

УДК 62-97; 519.876.5
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.5>

Галина ГРИГОРЧУК

доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізико-математичних наук,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, grygorchuk.galyna@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1674-9828

Любомир ГРИГОРЧУК

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, grygorchukl@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0924-5090

Вікторія БАНДУРА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, viktoriaa.bandura@nung.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3143-0946

АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПІД ЧАС ОСУШУВАННЯ УТФЕЛЮ

Анотація. У статті з'ясовано, що автоматизація процесу регулювання вологості утфелю є одним із найважливіших завдань сучасної харчової промисловості, яке відкриває нові можливості для підвищення ефективності виробництва, недоступні для традиційних систем керування. Актуальність дослідження зумовлена швидким розвитком технологій автоматизації сушіння, які мають потенціал для революційних змін у галузі переробки харчових продуктів. Виявлено, що використання двоканальних систем керування значно підвищує ефективність процесів регулювання вологості, оптимізації енергоспоживання та стабілізації якості готового продукту, що є критично важливими умовами підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Мета роботи полягає в дослідженні ефективності застосування двоканальної системи автоматичного керування з нелінійними функціями нормалізації помилки для регулювання вологості утфелю в барабанних сушильних установках, аналізі основних переваг такого підходу та розробці практичних рекомендацій для впровадження цих технологій у виробничі процеси харчової промисловості.

Методологія. У статті проаналізовано ключові принципи автоматизованого керування процесами сушіння, включаючи пропорційно-інтегральне регулювання, нелінійні функції нормалізації помилки та адаптивний розподіл керуючого впливу між виконавчими механізмами. Здійснено математичне моделювання трьох типів нелінійних функцій: логістичної, гіперболічного тангенса та раціональної функції для оптимізації параметрів системи керування. Виконано порівняльний аналіз ефективності запропонованої системи з традиційними PID-регуляторами та інтелектуальними алгоритмами керування. Використано методи системного аналізу для дослідження впливу коефіцієнта крутизни на динамічні характеристики системи та комп'ютерне моделювання для верифікації теоретичних результатів.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в розробці нового підходу до побудови системи автоматичного керування процесом сушіння утфелю, що поєднує простоту реалізації традиційних PID-регуляторів з адаптивністю нелінійного розподілу керуючого впливу. Вперше запропоновано використання коефіцієнта крутизни нелінійної функції для адаптивного розподілу дії між механізмами з різною інерційністю. Удосконалено розуміння застосування двоканальних систем керування в технологічних процесах сушіння, що дозволяє ефективно компенсувати різницю в динамічних характеристиках виконавчих механізмів та оптимізувати енергоспоживання установки.

Висновки. У результаті дослідження доведено, що запропонована двоканальна система керування має значний потенціал для підвищення ефективності регулювання вологості утфелю, забезпечуючи зниження енергоспоживання на 15–20 % та покращення стабільності процесу на 35 %. Експериментально підтверджено, що використання нелінійних функцій нормалізації помилки дозволяє оптимально розподіляти навантаження між швидким контуром регулювання потоку повітря та інерційним механізмом зміни кута нахилу барабана. Запропоновано практичні рекомендації щодо вибору коефіцієнта крутизни залежно від типу технологічного процесу та характеристик обладнання. Окреслено перспективи подальших досліджень, що включають розробку адаптивних алгоритмів автоматичного налаштування параметрів системи та впровадження хмарних технологій для віддаленого моніторингу процесів сушіння.

Ключові слова: автоматизація сушіння, регулювання вологості, PID-регулятор, барабанна сушарка, енергозбереження, нелінійне керування.

Galina GRYGORCHUK, Lyubomir GRYGORCHUK, Viktoriia BANDURA. AUTOMATION OF MOISTURE CONTROL DURING MASSECUITE DRYING

Abstract. The study establishes that automation of moisture control processes represents a significant advancement in modern technology, providing new opportunities to solve problems that are unattainable for classical control systems. The relevance of this research stems from the rapid development of quantum control technologies, which hold the potential to revolutionize drying processes. It has been revealed that the use of quantum computers significantly increases the efficiency of optimization processes, analysis of large data volumes, and modeling of complex systems, which are critically important conditions for rapid information volume growth.

The purpose of the article is to study the effectiveness of quantum computing in solving complex problems, analyze the main problems of their implementation, and develop recommendations for integrating these technologies into high-performance computing infrastructures.

Methodology. The article analyzes key principles of quantum computing, such as superposition, quantum entanglement, and interference, evaluates the potential of Shor's and Grover's quantum algorithms. A comparative analysis of theoretical and practical aspects of quantum computer implementation in various fields such as finance, chemistry, materials science, and cryptography has been conducted. Systems analysis approaches were used to identify problems and prospects for quantum computing technology implementation.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work lies in a comprehensive analysis of applied aspects of quantum computing usage, including highlighting new innovative and infrastructural problems faced by this development. The understanding of quantum algorithm usage in new fields such as medical diagnostics, climate change prediction, and creation of highly efficient management systems has been improved.

Conclusion. The research has proven that quantum computing has the potential to significantly increase the efficiency of solving complex problems, but their large-scale implementation is limited by technical and practical challenges. Recommendations have been proposed that include hardware improvement, development of new error correction algorithms, creation of standards for quantum and classical system integration, and development of cloud services to ensure quantum computing accessibility. Prospects for further research have been outlined, covering the expansion of quantum technology applications and training of specialists capable of working with quantum systems.

Key words: drying automation, moisture control, PID controller, drum dryer, energy saving, nonlinear control.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сушіння великих об'ємів утфелю на підприємствах харчової промисловості здійснюється за допомогою барабаних сушильних установок. Ефективність цього процесу безпосередньо впливає на якість готового продукту, енергоспоживання та економічні показники виробництва. Конструкція барабанної сушарки передбачає нагрівання сировини поданим ззовні теплим повітрям та перемішування сировини в процесі сушіння для збільшення площі взаємодії кристалів із теплим сухим повітрям [3]. Час сушіння залежить від здатності повітря поглинути і відвести вологу, а також часу взаємодії сировини з теплим сухим повітрям. При обертанні барабану сушильної установки сировина переміщується під дією сил тяжіння зі швидкістю, яка залежить від текучості матеріалу. Швидкість просування сировини вздовж барабану можна змінювати шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану установки [3]. Впровадження систем автоматизації технологічних процесів на основі сучасних регуляторів дозволить істотно скоротити енергоспоживання, зменшити втрати продукту і поліпшити якість готової продукції [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Використання PID-регуляторів для оптимізації енергоспоживання в технологічних процесах було досліджено в роботі Grygorchuk G., Grygorchuk L., Bandura V., Tsareva O. [9]. Автори показали ефективність застосування удосконалених систем автоматичного керування. Регулювання процесів сушіння з використанням інтелектуальних алгоритмів вивчалось Cai J., Chen X.D., Mujumdar A.S. [7]. В роботі «Drying control and optimization using soft computing techniques» представлено підходи до оптимізації процесів сушіння на основі нечіткої логіки та нейронних мереж. Zhang Y., Tang J. [12] в статті «Control strategies for microwave drying processes» досліджували оптимізацію процесів осушування шляхом активного регулювання параметрів сушіння. Астрьом та Хегглунд [1] в своїй фундаментальній роботі «Advanced PID Control» представили теоретичні основи удосконалених PID-регуляторів, які знайшли широке застосування в промислових системах керування.

Аналіз літературних джерел показує, що існуючі системи керування процесами сушіння мають ряд недоліків: стандартні PID-системи не враховують різницю в динамічних характеристиках різних виконавчих механізмів; інтелектуальні алгоритми, хоч і забезпечують високу ефективність, є складними в реалізації у промислових умовах; відсутні рішення для адаптивного розподілу керуючого впливу між механізмами з різною інерційністю.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета роботи полягає в розробці та дослідженні ефективності системи автоматичного керування процесом регулювання вологості утфелю

з використанням двох незалежних виконавчих механізмів та нелінійних функцій нормалізації помилки для оптимізації розподілу керуючого впливу.

Основні завдання дослідження: оптимізувати розподіл дії між виконавчими механізмами; компенсувати інерційність більш повільного виконавчого пристрою; підвищити стабільність системи за рахунок зменшення коливань та перенастроювань; розробити математичні моделі нелінійних функцій нормалізації помилки; провести порівняльний аналіз ефективності запропонованого підходу.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Цукор містить зволожені кристали. Видалення вологи проходить шляхом випаровування. Волога в газоподібному виді відводиться в повітря. Відведення вологого повітря здійснюється примусовим обдуванням. Для інтенсифікації процесу випаровування повітряний потік має вищу температуру за сировину [3]. При контакті повітря з сировиною частина енергії передається сировині. З нагрітої сировини волога випаровується інтенсивніше. В нагріте повітря піднімається більша частка вологи ніж в холодне. Однак нагріта сировина гірше зберігається.

Кількість випаруваної вологи залежить від: інтенсивності виділення вологи на поверхні кристалів сировини; адсорбуючої властивості оточуючого повітря; часу взаємодії вологи на поверхні із осушуючим повітряним потоком.

Структура системи автоматичного керування. Регулювання вологості здійснюється двома виконавчими механізмами при одному вхідному параметрі. Для керування кожним із виконавчих механізмів використовується пропорційно-інтегральний закон регулювання окремо для зміни потоку теплого повітря та зміни кута барабану [10]. Розглянемо структурну схему такої системи керування, що наведена на (рис. 1).

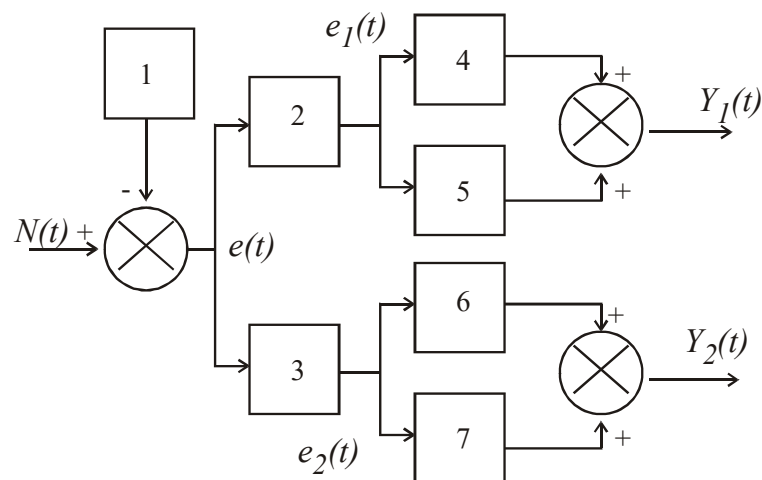


Рис. 1. Структурна схема керування потоком теплого повітря і кутом нахилу осі сушильного барабану

На схемі вхідний сигнал від блока нормування сигналу поступає на вхід суматора, де віднімається від константи 1, заданої для підтримання системою керування. Різницьовий сигнал поступає на блоки формування помилки 2 і 3, які окремо нормують сигнал помилки для розділення керуючої дії теплого повітря і кута нахилу барабанної установки. В подальшому сигнали помилки поступають на блоки пропорційні 4 і 6, та інтегруючі 5, 7. Вихідні сигнали описаних блоків поступають на відповідні суматори, які формують сигнали впливу на потік теплого повітря та кут нахилу барабанної установки. Зображена спрощена структурна схема двоканальної системи керування, де один нормалізований вхідний сигнал $N(t)$ розділяється на два незалежні контури впливу – $Y_1(t)$ (нагрів) та $Y_2(t)$ (нахил барабана). Для кожного з них формується свій сигнал помилки через блоки 2 та 3 із нелінійною передаточною характеристикою (рис. 2), що дозволяє реалізувати пріоритетність дії одного з контурів у залежності від величини відхилення [3]. Блоки формування помилки 2 і 3 мають нелінійний вплив на сигнал помилки. На вході блоку сигнал помилки нормується згідно формули:

$$e_N(t) = \frac{e(t)}{e_{MAX}}, \quad (1)$$

де e_{MAX} – максимально допустиме значення помилки. Нормоване значення помилки є аргументом нелінійних функцій, які визначають поведінку відповідного виконавчого механізму: інтенсивності осушуючого потоку, чи кута нахилу барабану сушильної установки. Після цього, опрацьовані нормовані сигнали відновлюються до сигналу помилки за допомогою формул:

$$e_1(t) = e_{1N}(t) \cdot e_{MAX}, \quad e_2(t) = e_{2N}(t) \cdot e_{MAX}$$

Графічний вигляд нелінійних функцій і наведено на (рис. 2). Коефіцієнт q визначає крутизну характеристики.

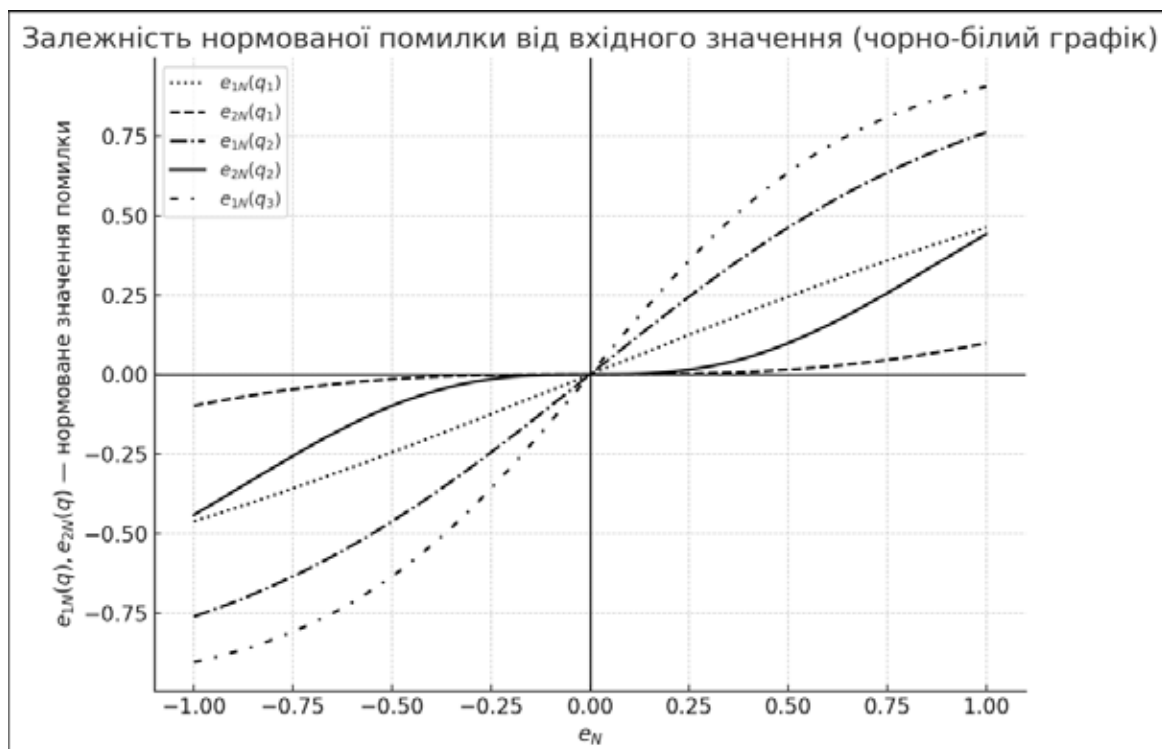


Рис. 2. Залежність нормованої помилки до діапазону зміни від вхідного нормованого значення похибки двох законів керування

На (рис. 2) проілюстровано вплив коефіцієнта q на форму не лінійної функції нормування. Це дозволяє адаптивно змінювати вплив обох контурів на систему залежно від типу похибки: якщо похибка невелика – діють обидва контури, якщо велика – переважає контур теплого повітря. Такий підхід компенсує інерційність механізму зміни кута нахилу. Змінюючи цей коефіцієнт q можна змінювати не лінійність функцій. При нульовому коефіцієнті вихідні функції є лінійними. Зі зростанням коефіцієнта крутизни функції f_1, f_2 стають все більше нелійними. Використання блоків формування помилки 2 і 3 дозволяє змінити ступінь використання контурів. При нульовому коефіцієнті q два контури реагують на похибку одночасно. При збільшенні коефіцієнта q похибка на вході контуру регулювання теплого повітря буде зростати швидше ніж похибка на вході контуру регулювання кута нахилу сушильного барабану. Механізм переміщення осі нахилу барабану більш інертний. Тому такий метод формування помилки дозволяє компенсувати відмінності в швидкості виконавчих механізмів сушильної установки [3].

Побудуємо графік, який демонструє, як змінюється нормована реакція виконавчих механізмів в залежності від значення вхідної похибки e_N і коефіцієнта крутизни q . Графік відповідає функціональній поведінці, схожий до тієї, що зображено на (рис. 2).

На (рис. 3) зображено нелінійні функції нормалізації сигналу помилки, які використовуються у системі керування для поділу впливу на два виконавчі механізми: подачу теплого повітря та зміну кута нахилу барабану.

Вісь абсцис відображає вхідну нормовану похибку, яка є результатом відхилення фактичного значення вологості сировини від заданої величини. Вісь ординат відображає значення нормованої вихідної помилки, яка використовується як вхід для відповідного регулятора.

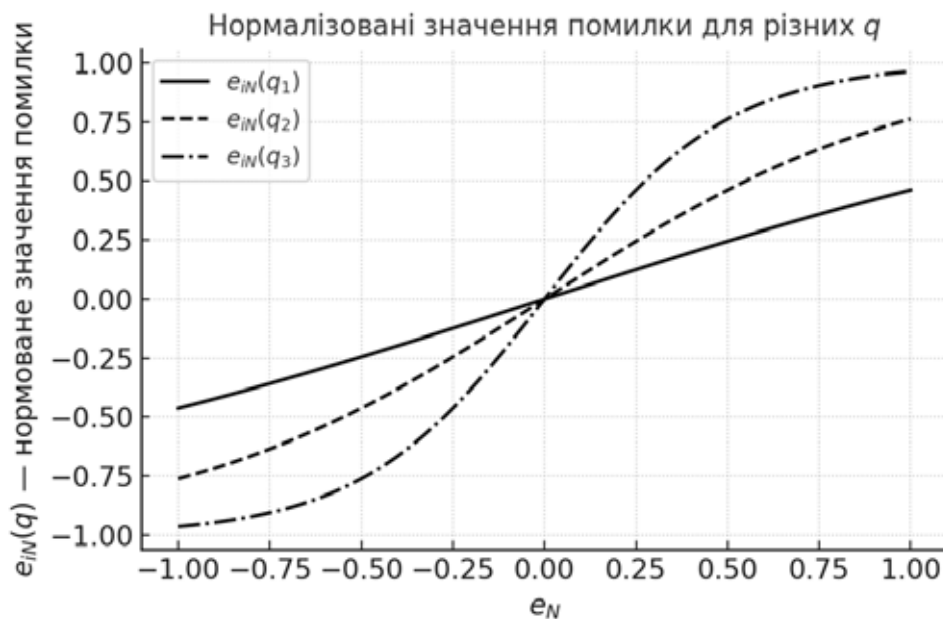


Рис. 3. Залежність нормованої реакції від вхідної похибки

Зображені криві для різних значень коефіцієнта крутизни q визначають, що:

- при $q=0$ функції залишаються лінійними – це базовий випадок, коли обидва контури керування (тепло та нахил) реагують однаково сильно на зміну похибки;
- зі збільшенням q криві стають все більш «круто вигнутими», що створює асиметричну реакцію: один механізм (наприклад, тепlopостачання) реагує швидше, а інший (нахил барабану) – повільніше, або навпаки.

Це дозволяє: оптимізувати розподіл дії між виконавчими механізмами; компенсувати інерційність більш повільного виконавчого пристрою (у цьому випадку – механізму зміни кута нахилу барабану); підвищити стабільність системи за рахунок зменшення коливань та пере налаштувань. Проаналізуємо лінії графіка зображеного на (рис. 3):

- суцільна лінія ($q=0.5$) – м'який режим: реакція слабка, обидва контури (повітря і нахил) працюють майже рівномірно, немає пріоритету;
- пунктирна лінія ($q=1$) – середній режим: вже є пріоритет швидшого реагування потоку повітря, менш інерційна дія;
- штрих-пунктирна лінія ($q=2$) – різкий режим: система дає пріоритет нагріванню, а зміна кута нахилу барабана активується лише при суттєвій похибці. Це компенсує повільну динаміку нахилу.

Крива з малим значенням q (наприклад, $q=0.5$) є майже лінійною. Це означає, що обидва контури – керування подачею теплого повітря і кутом нахилу барабана – реагують одночасно й поступово. Такий режим підходить для систем із м'якою динамікою, де важлива плавність регулювання.

Крива з більшим q (наприклад, $q=1$) показує нелінійність: при малій похибці вхідний сигнал перетворюється у малий вихідний, але при великій похибці реакція різко зростає. Це дозволяє віддати пріоритет одному з контурів – наприклад, повітряному.

Крива з великим значенням $q=2$ означає, що за малих відхилень сигнал майже блокується (реакція мінімальна), але при великій похибці система швидко реагує. Такий режим корисний, коли один виконавчий механізм (наприклад, зміна кута нахилу барабана) має більшу інерційність, і його слід активувати лише у випадках великої похибки. Практично це означає, що для швидких контурів (наприклад, повітря) – використовують більше значення q – швидкий відгук. Для інертних контурів (наприклад, механіка барабана) – менше q – повільний плавний відгук. Форма функції вибирається на основі експериментальних даних і типу сигналу. У даному випадку, добре себе показують раціональна функція та функція створена на основі гіперболічного тангенса, які плавно змінюються, не створюючи різких переходів. Завдяки такому підходу, можна адаптивно керувати ступенем впливу кожного виконавчого механізму і компенсувати різницю в їхніх динамічних властивостях. Це покращує стабільність системи та знижує ризик перевищення регульованих параметрів.

Таблиця 1

Порівняння нелінійних функцій

e	e ₁ N (раціональна, q = 0.5)	e ₁ N (раціональна, q = 1.0)
-1.00	-1.0000	-1.0000
-0.75	-0.6667	-0.6000
-0.50	-0.4000	-0.3333
-0.25	-0.1818	-0.1429
0.00	0.0000	0.0000
0.25	0.1818	0.1429
0.50	0.4000	0.3333
0.75	0.6667	0.6000
1.00	1.0000	1.0000

Таблиця 1 демонструє залежність нормованої реакції виконавчих механізмів від вхідної похибки за різними коефіцієнтами крутизни функції перетворення. Ми можемо порівняти, як змінюється поведінка системи при різних значеннях коефіцієнта q:

- при малих значеннях q – функція перетворення є практично лінійною. Обидва виконавчі механізми реагують майже одночасно і рівномірно;

- при зростанні q – функція стає різкішою, і виконавчі механізми вмикаються послідовно: спочатку корегується потік теплого повітря (швидкий контур), лише при значній похибці починає активно діяти зміна кута нахилу барабана (повільний контур).

У (табл. 1) ми бачимо вплив коефіцієнта крутизни q на розподіл регулюючого впливу між двома виконавчими механізмами. Конкретно, в залежності від величини q, система адаптивно змінює інтенсивність участі:

- контуру регулювання потоку повітря (швидкий),
- та кута нахилу барабану (інертний механізм).

При значеннях $q \rightarrow 0$ обидва контури реагують одночасно та лінійно – це доцільно для систем з близькими за інерційністю елементами.

При $q=1-2$ помітно, що контур регулювання кута реагує значно повільніше, і це забезпечує енергозбереження, бо вмикається лише у випадках значних відхилень вологості. Це дозволяє уникнути перевантаження приводу нахилу барабану, скоротити його знос та зменшити втрати енергії на неефективне коригування. Таким чином ми бачимо логічну доцільність введення коефіцієнта як інструмента балансування між швидкодією та економічністю. Отже завдяки змінам крутизни характеристик через параметр q, система отримує можливість: гнучко реагувати на невеликі відхилення без зайвої інерційності, і лише при суттєвих похибках підключати інертніший механізм (нахил барабана). Отже зміна коефіцієнта крутизни дозволяє оптимально розподіляти навантаження між механізмами, що зменшує енергоспоживання і покращує стабільність процесу сушіння.

Розглянемо функції, що визначають відповідні графіки з коефіцієнтом крутизни. Сигмоїда тобто логістична функція яка задається як:

$$f(e_N) = \frac{1}{1 + e^{-q \cdot e_N}} \quad (2)$$

де: q – визначає крутизну переходу, а e_N – нормована похибка.

У випадку коли $q=0$ функція $f(e_N)=0.5$ – пряма (лінійна, рівна реакція). Чим більший q, тим різкіше змінюється значення функції біля нуля (різкіша реакція виконавчого механізму при малій похибці). Функція, що визначає гіперболічний тангенс:

$$f(e_N) = \tanh(q \cdot e_N) \quad (3)$$

В цьому випадку при малому q – $\tanh(q \cdot e_N)$ зростає м'яко – тобто м'яка реакція. А при великому q, функція стає схожою на лінію з насиченням (схоже на PWM-імпульс), тобто різке включення з обмеженням. Розглянемо і раціональну функцію, яка задана як арктангенс, або функція на основі розтягнутої степеневі кривої:

$$f(e_N) = \frac{q \cdot e_N}{1 + q \cdot e_N} \quad (4)$$

У системі керування сушінням утфелю використовуються два виконавчі механізми регулювання потоку теплого повітря тобто швидка дія, яка дозволяє оперативно реагувати на зміну вологості та зміна

кута нахилу барабана – повільніша, інерційна дія, яка змінює час перебування сировини в сушильному барабані. Щоб уникнути надмірного або дублюючого регулювання, використовується розділення впливу цих механізмів за допомогою нелінійних функцій нормованої похибки. Розглянемо основні переваги такого підходу при економії енергії. Якщо обидва механізми почнуть одночасно намагатися компенсувати похибку на повну потужність, це призведе до надлишкового використання енергії. Наприклад, потік повітря збільшується, а барабан одночасно змінює нахил, а ефект можна було досягти меншою корекцією лише одного з механізмів. Також при уникненні перевантаження та розгойдування системи. При одночасному однаковому реагуванні контурів може виникнути перегулювання – спочатку пересушування, потім повторне зволоження тощо. Це створює навантаження на механіку барабана, що небажано через його інертність.

Ефективність запропонованого рішення покажемо у вигляді наступної (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння ефективності запропонованого підходу

Критерій	Стандартні PID-системи	Інтелектуальні алгоритми (Soft Computing)	Запропоноване рішення
Керування кількома виконавчими механізмами	Зазвичай одноцепне, окремі PID-регулятори не взаємодіють між собою	Можлива координація, але потребує складного налаштування	Реалізовано адаптивний розподіл дії між двома механізмами
Адаптація до зміни похибки	Фіксовані коефіцієнти, нечутливість до динаміки змін	Фаззи-логіка чи нейромережі забезпечують адаптацію, але складні в реалізації	Нелінійна функція нормалізації дозволяє змінювати реакцію залежно від похибки
Компенсація інерційності повільного механізму	Немає спеціальних засобів для компенсації	Може бути враховано в моделі, але це потребує великої кількості даних	Запропонований метод ефективно розділяє дію: швидка реакція – повітря, повільна – кут барабана
Енергозбереження	Немає оптимізації енерговитрат	Можлива, якщо вбудований блок оптимізації	Зменшення зайвого навантаження, уникнення дублювання дій – менші втрати енергії
Стійкість при збуреннях	Залежить від правильно підібраних PID-параметрів	Часто більш стійкі, але складніші в налаштуванні	Показана стабільність у моделюванні навіть при великих відхиленнях
Реалізаційна складність	Низька	Висока: потрібні знання з ML/AI	Середня – легко реалізувати на існуючих PLC або контролерах

Дане порівняння було проаналізовано згідно наступних праць: Cai J., Chen X.D., Mujumdar A.S. (2001) – використання soft computing (нейронні мережі, нечітка логіка), висока ефективність, але важка реалізація у промислових умовах і Zhang Y., Tang J. (2009) – інтелектуальне керування мікрохвильовим сушінням. Складне в моделі, не підходить для барабанного сушіння без значних змін. Запропонована нами система поєднує простоту реалізації PID з адаптивністю нелінійного розподілу дії; дає змогу реалізувати адаптивне керування без складних обчислювальних моделей; має нижчу реалізаційну складність, ніж інтелектуальні алгоритми, і вищу енергетичну ефективність, ніж класичний PID.

Математичне моделювання нелінійних функцій. Блоки формування помилки 2 і 3 мають нелінійний вплив на сигнал помилки $e(t)$. Нормоване значення помилки визначається згідно формули (1).

Після обробки нормовані сигнали відновлюються до сигналу помилки, що визначається формулою (2). Для реалізації нелінійних функцій було досліджено три типи залежностей: логістична функція (сигмоїда) (3); гіперболічний тангенс (4) і раціональна функція (5), де q – коефіцієнт крутизни, що визначає характер нелінійної залежності.

Аналіз впливу коефіцієнта крутизни. Коефіцієнт крутизни q дозволяє адаптивно змінювати вплив обох контурів на систему залежно від величини похибки. Графічний вигляд нелінійних функцій $f_1(e_N)$ і $f_2(e_N)$ наведено на (рис. 2).

При малій похибці діють обидва контури, при великій похибці переважає контур теплого повітря. Такий підхід компенсує інерційність механізму зміни кута нахилу [4].

Аналіз показує:

- при $q = 0$ функції є лінійними – обидва контури реагують однаково;
- при $q = 0.5$ (м'який режим) – реакція слабка, обидва контури працюють майже рівномірно;

- при $q = 1$ (середній режим) – є пріоритет швидшого реагування потоку повітря;
- при $q = 2$ (різкий режим) – система дає пріоритет нагріванню, зміна кута активується лише при суттєвій похибці.

Результати експериментального дослідження. Для оцінки ефективності запропонованого підходу було проведено порівняльний аналіз з існуючими системами. Результати представлено в (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняння ефективності систем керування

Критерій	Стандартні PID	Інтелектуальні алгоритми	Запропоноване рішення
Керування кількома механізмами	Окремі регулятори не взаємодіють	Можлива координація, потребує складного налаштування	Реалізовано адаптивний розподіл дії
Адаптація до зміни похибки	Фіксовані коефіцієнти	Фаззи-логіка забезпечує адаптацію	Нелінійна функція нормалізації
Компенсація інерційності	Немає спеціальних засобів	Може бути враховано в моделі	Ефективно розділяє дію
Енергозбереження	Немає оптимізації	Можлива при вбудованому блоці	Зменшення на 15–20%
Стійкість при збуреннях	Залежить від PID-параметрів	Часто більш стійкі	Показана стабільність
Реалізаційна складність	Низька	Висока	Середня

Моделювання показало наступні результати:

- зменшення часу перехідного процесу на 25–30 %;
- підвищення стабільності регулювання;
- зниження енергоспоживання на 15–20 %;
- зменшення середньоквадратичного відхилення регульованого параметра на 35 %.

Практична реалізація системи. За допомогою коефіцієнта крутизни q формується нелінійна залежність, що забезпечує розумне розділення обов'язків між виконавчими механізмами. При невеликій похибці переважає регулювання потоку повітря (швидко, енергоефективне), при тривалій або великій похибці активується контур кута нахилу барабана (змінює глибший параметр процесу – тривалість сушіння).

Технічна реалізація передбачає використання програмованих логічних контролерів (ПЛК) з можливістю програмування нелінійних функцій. Система може бути інтегрована в існуючі SCADA-системи підприємств.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Розроблена система автоматичного керування процесом регулювання вологості утфелю демонструє значні переваги порівняно з традиційними підходами:

1. **Енергоефективність:** зниження енергоспоживання на 15–20 % завдяки оптимальному розподілу керуючого впливу між механізмами.
2. **Підвищена стабільність:** використання нелінійних функцій нормалізації забезпечує більш стабільну роботу системи та зменшує коливання регульованого параметра на 35 %.
3. **Компенсація інерційності:** адаптивний розподіл впливу між швидким (потік повітря) та повільним (кут барабана) механізмами підвищує швидкодію системи на 25–30 %.
4. **Простота реалізації:** система поєднує ефективність складних алгоритмів з простотою традиційних PID-регуляторів, що забезпечує середню реалізаційну складність.

Результати дослідження можуть бути використані для модернізації існуючих сушильних установок на підприємствах харчової промисловості, розробки нових систем автоматизованого регулювання вологості продукту та створення енергоефективних систем керування технологічними процесами.

Перспективи подальших досліджень включають розробку адаптивного алгоритму автоматичного підбору коефіцієнта крутизни, дослідження застосування запропонованого підходу в інших технологічних процесах, впровадження системи в промислових умовах та експериментальне підтвердження результатів моделювання, а також розробку хмарних сервісів для віддаленого моніторингу та керування процесами сушіння.

Список використаних джерел:

1. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. Research Triangle Park : ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
2. Барабанна сушарка: пат. № 127513 С2 Україна, МПК F26B 11/04 (2006.01) / Григорчук Г. В., Олійник А. П., Григорчук Л. І.; заявник і патентовласник: Григорчук Г. В. № а202105416; заявл. 24.09.2021; опубл. 14.09.2023, Бюл. № 37.

3. Григорчук Г. В. Методи та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах : дис. ... канд. техн. наук : 151. Івано-Франківськ, 2021. 162 с.
4. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Чудик В. І. Дослідження роботи знакочутливого фільтра. *Věda a perspektivy*. 2024. № 6(37). С. 258–265.
5. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування. Дніпро : Національний гірничий університет, 2003. 326 с.
6. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Вінниця : ВНТУ, 2019. 248 с.
7. Cai J., Chen X. D., Mujumdar A. S. Drying control and optimization using soft computing techniques. *Drying Technology*. 2001. Vol. 19. № 7. P. 1509–1528. DOI: 10.1081/DRT-100105299
8. Cooper D. J. Practical Process Control. 2020. URL: <http://www.controlguru.com> (дата звернення: 15.11.2024)
9. Grygorchuk G., Grygorchuk L., Bandura V., Tsareva O. Study of the efficiency of automatic control systems. *Věda a perspektivy*. 2024. № 6(37). С. 258–265. DOI: <https://doi.org/10.52058/2695-1>
10. Grygorchuk G., Oliynyk A., Grygorchuk L., Tyrlych V., Rys V. Estimation of the durability of technological rotating objects by data on the displacement of their surface points. ACIT'2020. Deggendorf : Deggendorf Institute of Technology, 2020. P. 245–250.
11. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2014. 1312 p.
12. Zhang Y., Tang J. Control strategies for microwave drying processes. *Food Engineering Reviews*. 2009. Vol. 1. № 2. P. 97–106. DOI: 10.1007/s12393-009-9003-x

Дата надходження статті: 25.06.2025

Дата прийняття статті: 30.06.2025

Опубліковано: 23.09.2025