

ІНФОРМАТИВНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АТОМАТИЗАЦІЇ ОБСМАЖУВАННЯ КАВИ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У роботі обґрунтовано актуальність автоматизації термічних процесів у кавовій індустрії з акцентом на потреби малих та середніх підприємств. Проаналізовано динаміку світового та вітчизняного ринків кави, що підтверджує запит на прецизійне обладнання для локального обсмажування. Визначено основні технологічні параметри, такі як температура зерна, середовища та швидкість зміни температури, що потребують безперервного моніторингу та регулювання. Сформовано структуру інформаційних параметрів електромеханічної системи, що інтегрує сучасні сенсори та засоби мікропроцесорного керування. Результати дослідження спрямовані на підвищення енергоефективності та забезпечення високої якісної повторюваності профілів обсмажування шляхом мінімізації впливу людського фактора.

Ключові слова: автоматизація, ростер, електромеханічна система, профіль обсмажування, температура зерна, енергоефективність, мікропроцесорне керування.

Abstract

This paper substantiates the relevance of automating thermal processes in the coffee industry, with a focus on the needs of small and medium-sized enterprises. The dynamics of global and domestic coffee markets are analyzed, confirming the demand for precision equipment for local roasting. Key technological parameters such as bean temperature, environment temperature, and rate of rise, which require continuous monitoring and regulation, are identified. The structure of information parameters for the electromechanical system is established, integrating modern sensors and microprocessor control tools. The research results are aimed at increasing energy efficiency and ensuring high qualitative repeatability of roasting profiles by minimizing the human factor influence.

Keywords: automation, roaster, electromechanical system, roast profile, bean temperature, energy efficiency, microprocessor control.

Вступ

Сучасний стан світової кавової індустрії характеризується інтенсивною цифровізацією технологічних процесів, що зумовлено зростаючими вимогами до прецизійності обробки сировини, оскільки стабільність смако-ароматичного профілю продукту безпосередньо залежить від точності відтворення температурних кривих.

Український кавовий ринок, попри складні макроекономічні умови, зберігає високу динаміку розвитку та демонструє здатність до адаптації. Станом на 2025 рік обсяг споживання натуральної кави в Україні стабілізувався на рівні 58 тис. тонн, що свідчить про формування стійкої культури споживання. Характерною рисою вітчизняного ринку є вимушена локалізація виробничих потужностей та масовий перехід підприємств на власне обсмажування зерна. Специфіка малих та середніх підприємств, які працюють з унікальними мікро-лотами зерна, вимагає гнучких систем керування, здатних адаптуватися до варіативних фізико-хімічних властивостей сировини. Це спричинило високий попит на малогабаритне ростерне обладнання, яке потребує інтелектуальних систем автоматизації для забезпечення конкурентоспроможності продукції. Актуальність розробки вітчизняної електромеханічної системи автоматизації обсмажування обумовлена значною ціною закордонних аналогів та підвищення енергоефективності виробництва. Використання сучасних алгоритмів керування дозволяє мінімізувати питому частку браку, яка на напівавтоматичних лініях може сягати 5%, та оптимізувати енерговитрати на 15–20%. Таким чином, розробка системи, що забезпечує автоматичне регулювання швидкості росту температури, є критично важливим завданням для забезпечення високої повторюваності результатів та мінімізації впливу людського фактора на технологічний процес.

Метою даної роботи є визначення на основі аналізу технологічного процесу необхідного переліку інформативних параметрів електромеханічної системи автоматизації обсмажування кави.

Результати дослідження

Об'єктом автоматизації у досліджуваній електромеханічній системі є ростер барабанного типу [1], що являє собою складний теплотехнічний агрегат із перехресним теплообміном. Процес обсмажування кавових зерен характеризується високою динамічністю фізико-хімічних перетворень, зокрема реакцією Майяра та карамелізацією цукрів, що мають два основних етапи: ендотермічний (поглинання тепла відбувається до температури близько 175°) та екзотермічний (виділення тепла) [2]. Тому якісне виконання технологічного процесу потребує прецизійного керування термодинамічними параметрами середовища.

Основними виконавчими механізмом системи є:

- обертний барабан, оснащений внутрішніми лопатями для забезпечення гомогенізації завантаженої сировини та рівномірного розподілу теплової енергії;
- нагрівальний пристрій, який може бути виконаний у вигляді газової горілки або електричних тенів;
- витяжний вентилятор.

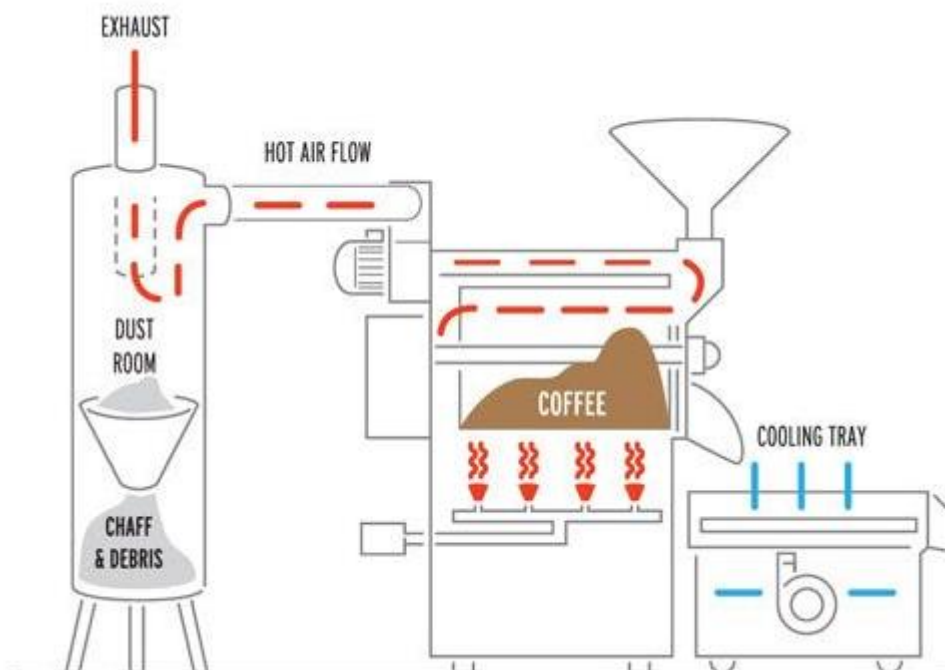


Рисунок 1 – Структурна схема технологічного процесу обсмажування кави

Для забезпечення високої якісної повторюваності технологічного циклу [1,3] критично важливим є безперервний моніторинг та регулювання ряду взаємопов'язаних параметрів. Першочерговим показником є температура зерна, робочий діапазон якої під час циклу зазвичай становить від 90°C (точка розвороту) до 210–225°C (фінальна стадія вивантаження). Не менш важливим є контроль температури теплоносія у робочій камері, яка у пікових значеннях може сягати 240–260°C, що дає змогу прогнозувати теплову інерцію системи та запобігати дефектам термічного оброблення.

Ефективність конвективних процесів безпосередньо залежить від швидкості повітряного потоку, де тиск у витяжній системі зазвичай варіюється в межах 50–150 Па залежно від фази обсмажування. Крім того, важливою складовою електромеханічного керування є швидкість обертання барабана, яка для ростерів малого завантаження становить 45–75 об/хв. Коректне налаштування цього параметра дозволяє оптимізувати час контакту зерен із розігрітою поверхнею, запобігаючи виникненню дефекту «scorch» (припалювання).

Особлива увага в системі автоматизації приділяється розрахунковому параметру швидкості зміни температури. На початковому етапі (сушіння) цей показник може становити 15–20°C/хв, тоді як на етапі карамелізації та «першого креку» він має плавно знижуватися до 4–7°C/хв. Стабілізація є ключовим фактором запобігання термічному шоку зерна та збереження ензимного складу кави. Таким чином, інтегрований контроль зазначених параметрів у межах єдиної електромеханічної системи дозволяє трансформувати дискретний процес обсмажування у керований цикл із похибкою відтворення температурного профілю не більше 0.5°C.

Таким чином аналіз технологічного процесу обсмажування кави дозволяє визначити інформативні параметри електромеханічної системи автоматизації, що подані у таблиці 1

Таблиця 1 - Інформативні параметри системи автоматизації обсмажування кави

№	Назва параметру	Діапазон зміни	Пристрій для контролю
1	Температура зерна	20 - 230 °C	Малоінерційна термopа (Тип К або J) з відкритим спeєм
2	Температура середовища	20 - 280 °C	Промислова термopа (Тип К) у захисній гільзі
3	Швидкість зміни температури	0 - 25 °C/хв	Програмний диференціатор (обчислювальний блок контролера)
4	Швидкість обертання барабана	30 - 90 об/хв	Енкодер на валу барабана
5	Тиск повітряного потоку	0 - 250 Па	Диференціальний датчик тиску (манометр цифровий)
6	Вологість вихідних газів	0 - 100 %	Високотемпературний ємнісний датчик вологості
7	Струм споживання привода	0 - 5 А	Зворотний зв'язок ПЧ
8	Потужність нагрівальних елементів	0 - 100 %	Модуль ШІМ-керування або твердотільне реле з ОС

Висновки

Проведений аналіз технологічного процесу обсмажування кавових зерен як об'єкта автоматизації дозволяє стверджувати, що стабільність якісних показників кінцевого продукту безпосередньо залежить від точності відтворення динамічних температурних профілів. Встановлено, що ключовим фактором успішної автоматизації є інтегрований контроль комплексу параметрів, серед яких пріоритетними є температура зерна, температура середовища та швидкість зміни температури. Запропонована структура інформаційних параметрів охоплює критичні вузли електромеханічної системи, що забезпечує необхідну глибину моніторингу та зворотного зв'язку для систем прецизійного керування.

Здійснений аналіз технологічного процесу та визначений перелік інформаційних параметрів дозволить розробити структурні схеми системи на базі сучасних мікропроцесорних засобів та частотно-регульованих приводів, що дасть змогу досягти високого ступеня повторюваності циклів обсмажування, що є критично важливим для малих та середніх підприємств кавової галузі. Це не лише знижує вплив суб'єктивного фактора оператора на технологічний процес, а й закладає фундамент для енергоєфективного виробництва за рахунок оптимізації роботи нагрівальних елементів та систем вентиляції.

Окремим завданням є розробка адаптивного алгоритму керування, який враховує високу інерційність теплових процесів), для мінімізації відхилень від цільового профілю, математичне моделювання енергоспоживання: проведення порівняльного аналізу витрат енергії при різних стратегіях керування потужністю нагрівального пристрою та швидкістю повітряного потоку, розробка інтерфейсу моніторингу для візуалізації процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. D. R. Heldman, D. B. Lund. Boca Raton *Handbook of Food Engineering*. 2nd ed.: CRC Press, 2006. – 1047 p.
2. Raemy A, Lambelet P. A calorimetric study of self-heating in coffee and chicory. *Int J Food Sci & Tech*, 1982;17(4):451–460.
3. Єремєєв І. С., Кисельов В. Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами : навч. посіб. — Київ : Центр учбової літератури, 2022. — 324 с.

4. Fabbri A., Cevoli C., Alessandrini L., Romani S. Numerical model of coffee roasting process. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 105, Issue 3. P. 396–404.

Коваль Андрій Миколайович — кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних електромеханічних систем та комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.

Шутий Денис Васильович — студент гр. ЕМСА-22, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Andrii M. Koval— Candidate of Technical Sciences, of the Department of Computer Electric Electric Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, E-mail: koval.a.m@vntu.edu.

Denis Shutyy – student EMSA-24, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa.