

Розробка автоматизованої системи управління температурним режимом випікання хлібобулочних виробів із використанням нечіткого контролера

Олексій Разживін , Анастасія Люта ,
Олександр Сімкін , Артем Заліатов 

Purpose. The purpose of the work is to improve the main indicator of the economic efficiency of the production of bakery products - the saving of electricity for heating inside the baking chamber. **Design / Method / Approach.** Achieving the goal in the work is carried out by eliminating the possibility of supplying excess heat from heaters by modernizing the automated baking temperature control system. A mathematical model of the automated control system for the temperature mode of baking in a tunnel-type bakery oven was developed using the methods of designing intelligent control systems. The technological process is controlled using a fuzzy controller. **Findings.** Control of the parameters of the internal environment in the cameras was achieved by automated control of actuators. Conducting the technological process from start to finish without operator intervention provides the possibility of remote change of baking modes without stopping the process. Control algorithms for the technological process of baking bakery products have been developed, which exclude incorrect operations. **Theoretical Implications.** According to the results of theoretical research on the mathematical model of the fuzzy control system of the technological process of the production of bakery products, surfaces of the fuzzy control of the technological process of baking by capacity and humidity were obtained. **Practical Implications.** The proposed automated system for controlling the temperature mode of baking bakery products, the operation of the heater and humidifier is adjusted by a fuzzy controller. **Originality / Value.** The simulation results show that the use of fuzzy controllers in automatic control systems allows controlling temperature and humidity at the stages of bread baking. **Research Limitations / Future Research.** The fuzzy controller proposed in the article can control the power of the heater in three positions, the humidity level in three levels, and the baking stage in 3 stages. **Paper Type.** Practitioner Paper.

Keywords:

automated control system, baking temperature control, fuzzy controller

Contributor Details:

Oleksii Razzhivin, Cand.Sc., Assoc.Prof., Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC: Zaporizhzhia, UA, aleksey.razzhivin@mipolytech.edu

Anastasija Liuta, Cand.Sc., Assoc.Prof., Donbass State Engineering Academy: Kramatorsk, UA, asyalyutaya@gmail.com

Oleksandr Simkin, Cand.Sc., Prof., Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC: Zaporizhzhia, UA, a.i.simkin@mipolytech.edu

Artem Zaliatov, Ass.Sc., Donbass State Engineering Academy: Kramatorsk, UA, artem.zaliatov@gmail.com



Найскладнішою і відповідальною операцією приготування хліба є випічка. Випічка – це процес прогріву тістових заготовок, що приводить до їх перетворення зі стану тіста в стан хліба. Для випічки хліба і хлібних виробів зазвичай застосовуються печі, в яких тепло, що випікає з тіста хліб, передається термічним випромінюванням і конвекцією при температурі тепловіддаючих поверхонь 300–400 °С і середовища пекарної камери 200–250 °С. Найоптимальнішим варіантом автоматизації процесу випічки є автоматичне регулювання вологості в зоні парового зволоження печі, температур випікання. Однак створення такої системи регулювання є складним через недосконалість приладів вимірювання вологості і температури випікання.

Неточності підтримки температурного режиму та вологості всередині печі часто призводять до зниження якості виробів і до перевитрати електроенергії. Такі відхилення від параметрів технологічного процесу ведуть до підвищення собівартості готової хлібобулочної продукції, тому вирішення даного завдання є актуальною науково-технічною задачею.

В даному проекті спроектовано схему автоматичного регулювання тривалості випічки з корекцією за температурою в другій зоні пекарної камери, де відбувається випічка м'якушки. Застосування такої схеми автоматизації повинно привести до покращення якості продукції, що випікається, і зменшення браку.

Об'єктом дослідження є технологічний процес випічки хлібобулочних виробів в конвекційній печі з електричним підігрівом.

Предмет дослідження. Зниження енергоємності роботи хлібопекарної печі шляхом автоматизації процесу керування з використанням математичних методів, алгоритмів, інформаційного та програмного забезпечення.

Цілі та завдання

Ціллю дослідження є поліпшення основних показників економічної ефективності виробництва – економія електроенергії на підігрів всередині камери за рахунок виключення можливості підведення зайвої кількості тепла від ТЕНів шляхом модернізації автоматизованої системи управління температурним режимом випікання.

Для випікання хліба та хлібних виробів зазвичай застосовуються печі, в яких тепло тісту-хлібу передається термовипромінюванням та конвекцією при температурі тепловіддаючих поверхонь 300–400 °С та середовища пекарної камери 200–250 °С. Найоптимальнішим варіантом автоматизації процесу випічки є автоматичне регулювання вологості в зоні парозволоження печі, температур кірки та м'якушу продукції.

Основним завданням спроектованої автоматизованої системи управління тунельної хлібопекарської печі є:

- Регулювання температури у кожній камері випічки з використанням ТЕНів.
- Регулювання температури гарячого повітря, яка відбирається з печі шляхом зміни частоти обертання електродвигуна.

Дослідження системи керування процесом випікання хліба

Випікання борошняних виробів у печах є комплексним процесом значного ступеня складності. Для його вивчення доцільно розглядати випікання виробів у печі як сукупність кількох теплових процесів. Значний внесок у розвиток знань щодо процесів, що відбуваються в тісті-хлібі, зроблено вченими Прилепа Н. (Прилепа & Томаля, 2023), Волух М. Д. (Волух & Мешков, 2020). Серед праць у англomовному сегменті наукової літератури можна відзначити авторів Kambourova, V. (Zheleva & Kambourova, 2005), Mistry, H. (Mistry et al., 2006), Altamirano-Fortoul, R. (Altamirano-Fortoul, 2012).

Іншим процесом, який наразі також достатньо вивчений, є тепломасообмін між тістом-хлібом і середовищем пекарної камери печі. У ході численних досліджень був отриманий масив даних щодо впливу та оптимальних значень температури, вологості, відносної швидкості середовища пекарної камери та теплового потоку, що сприймається відкритою та контактною поверхнями виробів упродовж процесу випікання при різних режимах теплообміну (радіаційний, конвективний, мікрохвильовий та їх комбінації).

Автоматизоване регулювання режиму випікання хлібобулочних виробів у хлібопекарських печах будь-яких конструкцій здійснюється відповідною зміною температури та тривалості випікання. В даному випадку однією з основних обставин, що впливають на динаміку теплових процесів у печі, є розсіювання тепла зсередини печі назовні через її стіни. Використання точного математичного опису даного процесу з урахуванням диференціальних рівнянь теплопровідності є складним у реальних системах автоматичного управління температурою. Тому в роботі для «ідеального» випадку плоскої тришарової стіни запропоновано чисельну математичну модель динаміки зміни температури.

На першому етапі для створення і дослідження системи керування процесом випікання хлібу необхідно отримати лінійні математичні моделі процесу. Хлібопекарську піч представлено як багатопараметричний одноємнісний об'єкт, який характеризується рядом технологічних і теплотехнічних величин. Виділено дві ємності: перша – ємність топки, друга – ємність камери випікання печі. Проведено аналітичний розрахунок статичних і динамічних характеристик для ємності топки. В усталеному режимі робота топки описується наступним рівнянням теплового балансу:

$$Q_T - Q_C = 0, \quad (1)$$

де Q_T – потужність теплового потоку, що надходить до топки, кВт; Q_C – потужність теплового потоку, що виходить з топки, кВт.

В свою чергу:

$$Q_T = Q_x + Q_\phi + Q_n + Q_{\text{рец}}, \quad (2)$$

де Q_x – потужність теплового потоку, що надходить до топки за рахунок хімічної теплоти палива, кВт; Q_ϕ – потужність теплового потоку, що надходить

до топки за рахунок фізичної теплоти палива, кВт; $Q_{\text{п}}$ – потужність теплового потоку, що надходить до топки з повітрям, кВт; $Q_{\text{реци}}$ – потужність теплового потоку, що надходить до топки з рециркуляційними газами, кВт.

Вхідними величинами для рівняння топки є: витрата палива $G_{\text{т}}$, що подається до топки; витрата газів рециркуляції $G_{\text{реци}}$, що надходять до топки, і температура газів рециркуляції $\theta_{\text{реци}}$. Вихідною величиною, тобто регулюючим параметром даної ділянки, є температура димових газів $\theta_{\text{д}}$.

Рівняння динаміки для топки можна отримати, якщо прийняти до уваги, що зміна температури димових газів в ній за час dt дорівнює різниці між кількістю теплоти в одиницях часу, що підводиться, і кількістю теплоти в одиницях часу, що відводиться:

$$T_1 \frac{d(\Delta\theta_{\text{д}})}{dt} + \Delta\theta_{\text{д}} = K_{11}\Delta G_{\text{т}} - K_{12}\Delta G_{\text{реци}} + K_{13}\Delta\theta_{\text{реци}}, \quad (3)$$

де K_{11} , K_{12} , K_{13} – коефіцієнти передачі топки; T_1 – постійна часу топки.

Керуючою величиною прийнята $\theta_{\text{д}}$ – температура димових газів на виході з топки, $^{\circ}\text{C}$, а величинами збурень – витрата пари $G_{\text{п}}$, кг/год; ступінь сухості пари X_2 ; потужність печі $G_{\text{х}}$, кг/год; середня температура середовища пекарної камери $\theta_{\text{к}}$, $^{\circ}\text{C}$ та парціальний тиск пари в камері випікання $P_{\text{п}}$, кПа.

Спростуємо та приймаємо припущення: тепловідбір і тепловіддача металу конвеєру приблизно рівні та взаємно компенсуються; втрати тепла в оточуюче середовище незначні; температура центра тістових заготовок в межах камери випікання не змінюється, а розподіл температур від центра до поверхні буде лінійним. З урахуванням прийнятих позначень та припущень рівняння теплового балансу камери випікання печі в усталеному режимі має вигляд:

$$Q_{\text{п}} + Q_{\text{т}} - Q_{\text{с}} - Q_{\text{т}} = 0, \quad (4)$$

де $Q_{\text{п}}$ – притік тепла з насиченою парою; $Q_{\text{т}}$ – притік тепла від поверхонь, що гріють; $Q_{\text{с}}$ – тепло, що відноситься вентиляційною сумішшю в витяжний канал; $Q_{\text{т}}$ – тепло, що відноситься тістовими заготовками.

Підставляючи відомі залежності для складових рівняння теплового балансу, лінеаризуючи його та роблячи відповідні перетворення, отримуємо рівняння динаміки:

$$G_{xy} \frac{d\theta_c}{dt} = \sum Q_i, \quad (5)$$

де Q_i – доданки універсального рівняння балансу теплоти в статисти; $G_{xy} = V_{xy} \cdot \rho_c \cdot C_c$ – теплоємність об'єкта як сума теплоємності пароповітряного середовища і металу в межах камери випікання, кДж/К; $G_{\text{м}}$ – маса металу, що сприяє теплообміну, кг; ρ_c – густина середовища, кг/м³; C_c , $C_{\text{м}}$ – питома теплоємність відповідно середовища та металу, кДж/кг·К.

З урахуванням великої вологості пароповітряного середовища в камері випікання печі за умови розрахунку її теплоємності можна допустити, що густина середовища дорівнює густині пари, а питома теплоємність середовища – питомій теплоємності пари ($\rho_c = \rho_{\text{п}}$, $C_c = C_{\text{п}}$):

$$T_2 \frac{d(\Delta\theta_c)}{dt} + \Delta\theta_d = K_{21}\Delta G_n + K_{22}\Delta x_2 - K_{23}\Delta G_x + K_{24}\Delta\theta_d - K_{25}\Delta P_n, \quad (6)$$

де $K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}, K_{25}$ – коефіцієнти передачі камери випікання печі; T_2 – постійна часу камери випікання печі.

Параметрична схема камери випікання печі, як об'єкта регулювання температури $\theta_c, ^\circ\text{C}$, представлена на рисунку 1.

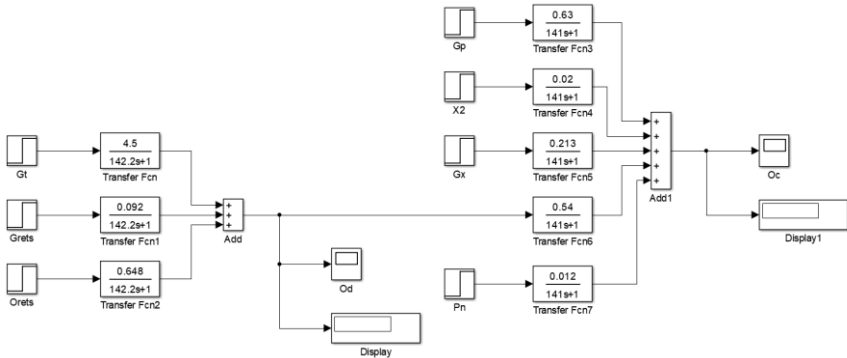


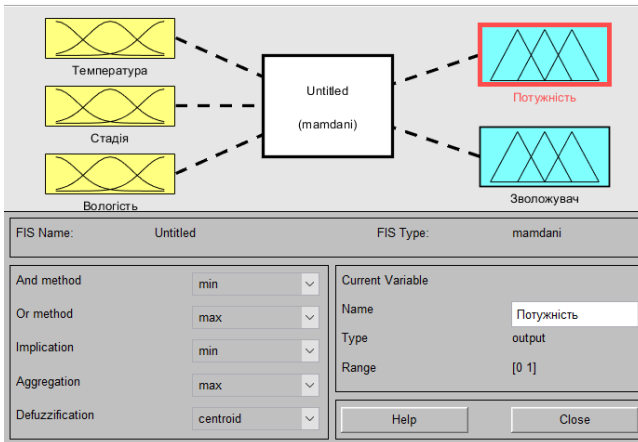
Рисунок 1 – Структурна схема моделі температурних режимів роботи хлібопекарської печі (Джерело: Створено авторами)

Створення нечіткого контролера для регулювання температурних режимів і вологоперенесення

Метою дослідження в експериментальній частині є створення нечіткого контролера для визначення часу випікання хліба з використанням вхідних та вихідних параметрів. Контролер забезпечить: вибір необхідного режиму, нагрівання камери до потрібної температури, оптимальну вологість, витрату води та електроенергії, відповідну стадію для випікання. Постійно контролюючи процес випічки, інтелектуальна система за потреби вчасно надає необхідні корективи. Аналізуючи дослідження вчених у науковому напрямку управління випічкою хліба, був обраний метод, заснований на нечіткій логіці.

Нечітке моделювання в середовищі MATLAB виконується за допомогою пакету розширення Fuzzy Logic Toolbox.

На основі проведеного аналізу застосовано алгоритм Мамдані як основний метод нечіткого висновку для побудови оптимальної моделі інтелектуального управління. Для створення нечіткої моделі Мамдані необхідно отримати результати з трьох вхідних даних та двох даних регулювання температури. Необхідно: задати параметри нечіткої моделі регулювання температури в камері; сформулювати основу правил; поставити та побудувати функцію приналежності; вивести рішення. Інтерфейс алгоритму показано на рисунку 2.



**Рисунок 2 – Інтерфейс алгоритму нечіткого управління
(Джерело: Створено авторами)**

Для управління випічкою в пічній камері було визначено 3 вхідні нечіткі змінні:

- Температура камери. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 0 до 260⁰C: T_1 – низька температура, T_2 – середня температура, T_3 – висока температура з описом гаусовськими функціями приналежності.

- Вологість камери. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 0 до 100%: V_1 – низька вологість, V_2 – середня вологість, V_3 – висока вологість з описом гаусовськими функціями приналежності.

- Стадії випікання хліба (зволоження, обсмажування, випікання). Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми: S_1 – 1 стадія; S_2 – 2 стадія; S_3 – 3 стадія з описом функцій приналежності типу синглітон.

Набір вихідних лінгвістичних змінних визначено двома елементами:

- Регулювання споживаної потужності нагрівального елемента пекарної печі. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 1,8 до 8 кВт: P_1 – низька потужність, P_2 – середня потужність, P_3 – висока потужність з описом трикутними функціями приналежності.

- Ввімкнення та вимикання парового зволожувача. Розбиття змінної здійснено на 3 лінгвістичні терми рівномірно в діапазоні від 24 до 28%: MV_1 – низька вологість, MV_2 – середня вологість,

На основі якісних характеристик встановлено базу правил, що описують роботу об'єкта управління (ОУ), «якщо..., тоді...»: передбачається використовувати інформацію про ОУ, його поточний стан за умови правила, із висновку виводиться керуючий сигнал, що приводить ОУ у бажаний стан.

Алгоритм функціонування нечіткого регулятора представлений у вигляді правил, на основі яких у програмному комплексі регулюється

технологічний параметр системи управління. Для коректного функціонування нечіткого регулятора, заснованого на даних умовах зміни температури та вологості в камері, було складено базу правил, на підставі яких регулюватиметься технологічний процес (див. рисунок 3).

1. If (Температура is T1) and (Стадія is S1) and (Вологість is V1) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV3) (1)
2. If (Температура is T2) and (Стадія is S2) and (Вологість is V2) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV1) (1)
3. If (Температура is T3) and (Стадія is S3) and (Вологість is V3) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV1) (1)
4. If (Температура is T1) and (Стадія is S1) and (Вологість is V2) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV3) (1)
5. If (Температура is T2) and (Стадія is S2) and (Вологість is V3) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV2) (1)
6. If (Температура is T3) and (Стадія is S3) and (Вологість is V1) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV3) (1)
7. If (Температура is T1) and (Стадія is S1) and (Вологість is V3) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV1) (1)
8. If (Температура is T2) and (Стадія is S2) and (Вологість is V1) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV3) (1)
9. If (Температура is T3) and (Стадія is S3) and (Вологість is V2) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV1) (1)
10. If (Температура is T1) and (Стадія is S2) and (Вологість is V1) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV1) (1)
11. If (Температура is T1) and (Стадія is S2) and (Вологість is V2) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV1) (1)
12. If (Температура is T1) and (Стадія is S2) and (Вологість is V3) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV2) (1)
13. If (Температура is T1) and (Стадія is S3) and (Вологість is V1) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV3) (1)
14. If (Температура is T1) and (Стадія is S3) and (Вологість is V2) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV2) (1)
15. If (Температура is T1) and (Стадія is S3) and (Вологість is V3) then (Потужність is P3)(Зволожувач is MV3) (1)
16. If (Температура is T2) and (Стадія is S1) and (Вологість is V1) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV1) (1)
17. If (Температура is T2) and (Стадія is S1) and (Вологість is V2) then (Потужність is P1)(Зволожувач is MV3) (1)
18. If (Температура is T2) and (Стадія is S1) and (Вологість is V3) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV1) (1)
19. If (Температура is T2) and (Стадія is S3) and (Вологість is V1) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV3) (1)
20. If (Температура is T2) and (Стадія is S3) and (Вологість is V2) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV2) (1)
21. If (Температура is T2) and (Стадія is S3) and (Вологість is V3) then (Потужність is P2)(Зволожувач is MV3) (1)

if	and	and	Then	and
Температура is	Стадія is	Вологість is	Потужність is	Зволожувач is

Рисунок 3 – Правила функціонування системи нечіткого висновку (Джерело: Створено авторами)

Результати

Поверхні керування технологічним процесом за потужністю та вологістю в камері печі наведено на рисунках 4 та 5.

Згідно з рисунками 4 та 5, аналіз показав, що отримана система управління здатна працювати цілком задовільно. Також, використовуючи пункт меню "Перегляд правил", можна перевірити адекватність згенерованої моделі.

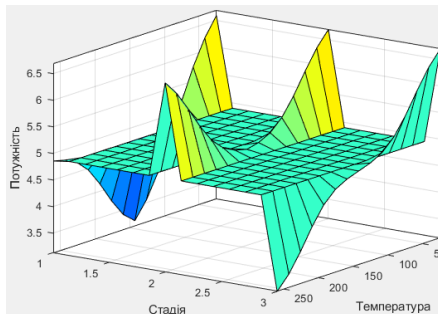


Рисунок 4 – Поверхня нечіткого керування технологічним процесом випікання за потужністю (Джерело: Створено авторами)

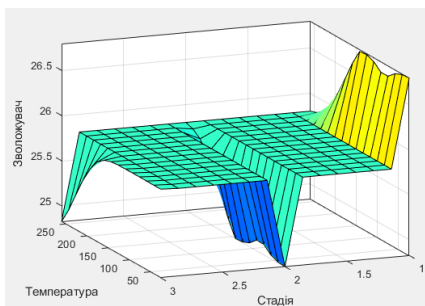


Рисунок 5 – Поверхня нечіткого керування технологічним процесом випікання за вологістю (Джерело: Створено авторами)

Висновки

При модернізації системи управління хлібопекарською піччю поставлені і вирішені наступні завдання: контроль параметрів внутрішнього середовища в камерах шляхом автоматизованого управління виконавчими механізмами; проведення технологічного процесу від початку до кінця без втручання оператора, при цьому забезпечується можливість дистанційної зміни режимів випічки без зупинки процесу; управління технологічним процесом печі для регулювання температурних режимів і вологоперенесення з використанням нечіткого регулятора; розробка алгоритму управління технологічним процесом випічки хлібобулочної продукції, які виключають некоректні операції. Впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом дозволяє підвищити ефективність процесу за рахунок скорочення етапу розігріву печі та якість готової хлібобулочної продукції шляхом точного дотримання технологічних параметрів.

Посилання

- Altamirano-Fortoul, R., Le-Bail, A., Chevallier, S., & Rosell, C. M. (2012). Effect of the amount of steam during baking on bread crust features and water diffusion. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.015>
- Zheleva, I., & Kambourova, V. (2005). Identification of heat and mass transfer processes in bread during baking. *Thermal Science*, 9(2), 73–86. <https://doi.org/10.2298/tsci0502073z>
- Mistry, H., Ganapathi-subbu, Dey, S., Bishnoi, P., & Castillo, J. L. (2006). Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens. *Applied Thermal Engineering*, 26(17–18), 2448–2456. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.007>
- Волюх, М. Д., & Мешков, Ю. В. (2020). Дослідження показників якості хлібобулочних виробів підвищеної харчової цінності. *Вісник Херсонського Національного Технічного Університету*, 3, 107–114. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.14>
- Прилепа, Н., & Томаля, Т. (2023). Критерії оцінювання якості хліба та хлібобулочних виробів в Україні. *Development Service Industry Management*, 4, 145–148. [https://doi.org/10.31891/dsim-2023-4\(24\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2023-4(24))