

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ,
О.К. КОПАЙГОРА, Д.П. ЗАКІНА, А.К. ЛИТВИНЕНКО

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА ТА ЗАМОРОЖУВАННЯ РЕМІСНИЧОГО ХЛІБА

Розроблено інтелектуальну систему керування виробництвом ремісничого хліба за стадіями охолодження, попереднього заморожування, подальшого заморожування до -20°C , в якій реалізовані MES-, ERP- та SCADA-системи. Вона вміщує такі програми керування дільницями: підготовки сировини, виробництва опари, тіста, випікання, охолодження ремісничого хліба та його попереднього заморожування, заключного оптимального заморожування в конвеєрному морозильному апараті (КМА). Верхній рівень інтелектуального керування включає системи планування ресурсів та логістики хліба, який за допомогою інформаційної шини Profibus DP, SCADA-систем, алгоритмів нечіткого керування з автоматичною модифікацією системи продукційних правил корегує планові показники енергозатрат з врахуванням якісних показників борошна, опари, тіста.

Ключові слова: ремісничий хліб, керування інтелектуальне, керування нечітке, фазифікація, дефазифікація, алгоритм керування заморожуванням, моделювання системи

V. P. KHOROLSKYI, YU. M. KORENETS, O. K. KOPAYHORA, D. P. ZAIKINA, A. K. LYTVYNENKO
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tuhun-Baranovskyi

AUTOMATED SYSTEM OF FUZZY CONTROL OF PRODUCTION PROCESSES AND FREEZING OF CRAFT BREAD

Abstract. An intelligent control system for the production of handicraft bread by stages of cooling, pre-freezing, subsequent freezing to -20°C has been developed, in which MES-, ERP- and SCADA-systems are implemented. It includes the following site management programs: preparation of raw materials, production of sourdough, dough, baking, cooling of artisanal bread and its pre-freezing, final optimal freezing in a conveyor freezer (KMA). The upper level of intelligent control includes resource planning systems and bread logistics, which with the help of Profibus DP information bus, SCADA-systems, fuzzy control algorithms with automatic modification of the system of production rules adjusts energy consumption targets taking into account the quality of flour and dough.

The principles of construction of the automated system of fuzzy control of optimization of energy of the refrigerant in the system of refrigeration of the conveyor freezer intended for freezing of artisanal bread and preservation of its quality at variation of parameters of raw materials based on data received in real time are offered. The novelty of the developed system of the automated process of freezing of artisanal bread is that it is built on the basis of a fuzzy regulator with linguistic feedback and automatic modification of the system of production rules. This system allows, compared to traditional PID-regulators, to reduce by 10-12% energy consumption for the production of 1 ton of bread by reducing the response time of the program to change energy consumption in production with specified performance and quality parameters, as well as freezing performance in the developed intellectual artisanal bread production management system.

Using a simulation model of bread freezing, it is proved that the automated system of artisanal bread production with fuzzy control and dynamic adjustment of the system of production rules allows to stabilize the set parameters of bread freezing with an error of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, and its speed reduces product freezing time by 15-16%, why provides a higher level of digital control quality.

Key words: craft bread, intelligent control, fuzzy control, fassification, defasification, freeze control algorithm, system modeling

Постановка задачі

У процесі забезпечення населення техногенних територій продуктами харчування високої якості виникає питання проектування виробничих процесів харчових продуктів на основі безлюдних технологій. Цю проблему потрібно вирішувати за рахунок впровадження автоматизованих виробництв з робототехнологічними комплексами, промислового Інтернету речей (ІоТ) та інформаційно-комунікаційних технологій, що забезпечують виробництво та розподіл безпечної продукції між споживачами в зонах високого забруднення навколишнього середовища [1].

Аналіз досліджень та публікацій

Автоматизоване виробництво високоякісної продукції харчування для регіонів з високим рівнем забруднення тісно пов'язане зі збільшенням виробництва охолоджених і заморожуваних напівфабрикатів та готових продуктів [2]. Ця тенденція сприяє розробці інформаційних систем керування нутрієнтною збалансованістю продуктів харчування, контролю параметрів їх якості в реальному масштабі часу та забезпеченню автоматизованого керування технологічними процесами виробництва продукції, заморожування напівфабрикатів та готової продукції. Питаннями автоматизованого виробництва хліба в Україні займаються вчені багатьох закладів вищої освіти, серед них Б. М. Гончарук, А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, І. В. Ельперін, Л. О. Злобін, С. М. Швед, Я. І. Проць та багато інших вчених і наукових колективів [3, 4].

В той же час питанню автоматизованого виробництва спеціальних сортів хліба, наприклад, ремісничого, на заквасці, в нашій країні не приділяється достатньої уваги, тоді як системи автоматизованого виробництва ремісничого хліба, розроблені на основі технологій Індустрії-4.0 вже працюють в країнах ЄС. Отже подібні технології представляють значний інтерес для харчової промисловості України та вимагають аналогічних розробок.

Формулювання цілей

Метою статті є розробка автоматизованих систем нечіткого керування процесами виробництва

ремісничого хліба та оптимізації енергоефективності процесів заморожування напівфабрикатів та готових виробів для тривалого зберігання.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасне виробництво заморожуваного ремісничого хліба для людей, що мешкають на територіях з техногенним тиском, представляє собою складне автоматизоване виробництво з високим рівнем невизначеності [1, 4, 5]. На рис. 1 наведено систему дворівневого інтелектуального керування виробництвом ремісничого хліба, в якій:

1, 2, 3, 4, 5 – відповідні виробничі дільниці з технологічним обладнанням;

6 – системи інформаційного забезпечення;

6а – системи програмного забезпечення;

7 – локальні системи автоматизованого нечіткого керування;

8, 9, 10 – системи автоматизованого керування верхнім рівнем виробничо-технологічного комплексу (ВТК) з MES- та ERP-системами та системами відображення корпоративної інформації за допомогою МКП.

Керування дільницями виконують оператори – технологи з автоматизованих робочих місць (АРМ) Оперативна інформація з виробничих дільниць 1, 2, 3, 4, 5 та лабораторії заводу 11 надходить в систему інформаційного забезпечення 6. Нижній рівень керування ВТК спроектовано на основі SCADA-систем.

В інтелектуальній системі спроектовано нечіткі або фаззи-системи автоматичного керування (САК). Вони можуть бути використані як САК стабілізації й оптимізації технологічних процесів підготовки сировини (1), виробництва опари-тіста (2), дільниці випікання (3), стадії охолодження (4) та дільниці заморожування (5). Доведемо, що фаззи-САК мають ряд важливих переваг щодо типових САК з ПІ та ПІД-регуляторами.

Якщо складні процеси виробництва хліба віднести до квазінелінійних, то при керуванні ними кращі результати одержують тоді, коли проєктанти САК використовують нечітку інформацію про параметри борошна та опари. Особливу увагу приділяють процесу приготування опари, який протікає 30-35 годин та є найбільш інформативним [1, 4].

На хлібозаводах такі технологічні процеси як підготовка борошна, виробництво опари-тіста, випікання, охолодження хліба до температури $+30...35^{\circ}\text{C}$ та початкове заморожування до температури -7°C , а потім заморожування до температури $-18...-20^{\circ}\text{C}$ уявляють собою складні квазінелінійні об'єкти керування.

Ідентифікація та алгоритмізація таких процесів – предмет сучасних наукових досліджень, що вимагає значних інвестицій щодо створення математичних моделей, їх дослідження, впровадження САК у виробництво в умовах невизначеності параметрів сировини, складних фізико-хімічних і біологічних процесів технології Rademaker [6].

Для хлібозаводів Придніпровського регіону у процесі технологічного переозброєння необхідно постійно проводити моніторинг екологічної складової, а саме якості води, борошна, інгредієнтів й постійного прогнозування впливу їх характеристик на вихідні показники продукції. Такі довготермінові збудження повинні бути враховані при проєктуванні фаззи-САК, які повинні адаптуватися за темпом з процесом надходження борошна на стадію виготовлення опари-хліба та процесом заморожування.

На рис. 2 наведено типову блок-схему адаптивної фаззи-системи стабілізації вихідних змінних. Принцип стабілізації густини опари з врахуванням сили борошна F_6 та її рН на виході з опарного відділення детально розглянуто в [1]. Адаптація виникає при тривалих і значних чинниках збурення характеристик сили борошна F_6 в порівнянні з їх стандартними значеннями, що важливо при проєктуванні САК процесів приготування тіста та випікання ремісничого хліба. Ці процеси також детально розглянуто в [1, 5], що дозволило авторам статті використати одержані базу прецедентів (БП) і бази знань (БЗ) при побудові фаззи-систем керування процесами охолодження й заморожування ремісничого хліба. Утім в типовій блок-схемі фаззи-керування, наведеній на рис. 2, основним виконавчим механізмом є регулюємиий вентиль (РВ) системи холодопостачання конвеєрного морозильного апарата – об'єкт керування (ОК).

Крім цього використано додатковий керований вплив – швидкість конвеєра морозильного апарата. З метою побудови інтелектуальної системи нечіткого керування енергоємним процесом заморожування ремісничого хліба за допомогою джерел [6, 7] проведемо дослідження робочих характеристик конвеєрного морозильного апарата, який наведено на рис. 3.

Конвеєрні морозильні апарати – це апарати циклічної або безперервної дії. Їх перевагами є високий ступінь роботизації завантажувально-розвантажувальних робіт та автоматизації процесу заморожування. Конвеєрний апарат складається з вантажного відсіку й відсіку повітроохолоджувачів. Його розташовують над вантажним відсіком або збоку від нього, так щоб забезпечити поперечний рух повітря стосовно напрямку руху конвеєра і продукту, що заморожується.

У вантажному відсіку цих апаратів продукт в формі заморожених блоків рухається за допомогою конвеєра у пульсуючому режимі або рівномірно. Довжину й швидкість руху конвеєра вантажного відсіку вибирають із умов досягнення продуктом необхідної за технологією кінцевої температури $T_k = -20^{\circ}\text{C}$ за час переміщення від ділянки завантаження до ділянки вивантаження ремісничого хліба з апарата. Ці апарати підрозділяють на апарати з ланцюговим (зигзагоподібним або спіралеподібним) і стрічковим конвеєром. Як електропривод використовують АД з тиристорним регулятором швидкості та нечітким регулятором.

Потужність АД 1,5 кВт, число обертів $n = 1500$ об/хв.

Для заморожування хліба будемо використовувати повітряний конвеєрний морозильний апарат, принципова схема якого представлена на рис. 3.

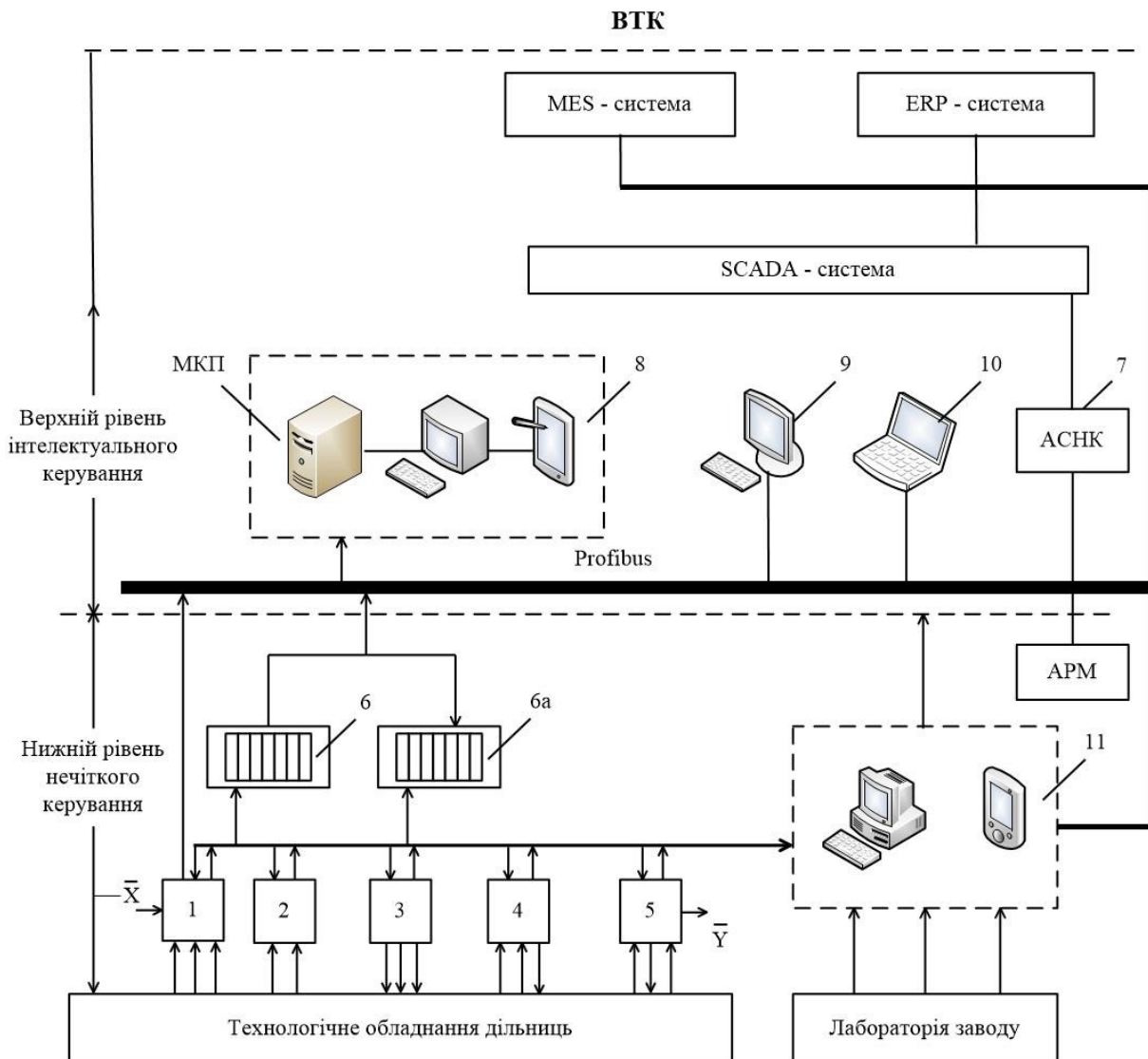


Рис. 1. Інтелектуальна система нечіткого керування виробництвом ремісничого хліба

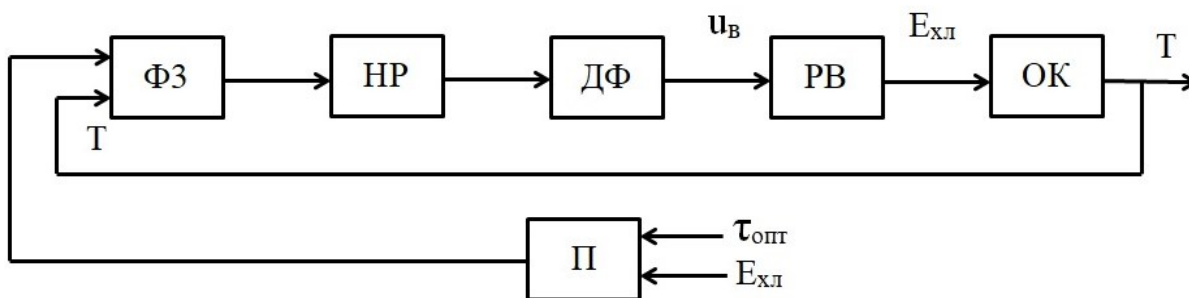


Рис. 2. Блок-схема фаззі-керування процесом заморожування ремісничого хліба: ФЗ – фаззифікатор, НР – нечіткий регулятор, ДФ – дефаззифікатор, РВ – регулюємий вентиль системи холодопостачання, ОК – об’єкт керування (конвеєрний холодильний апарат), П – система введення інформації

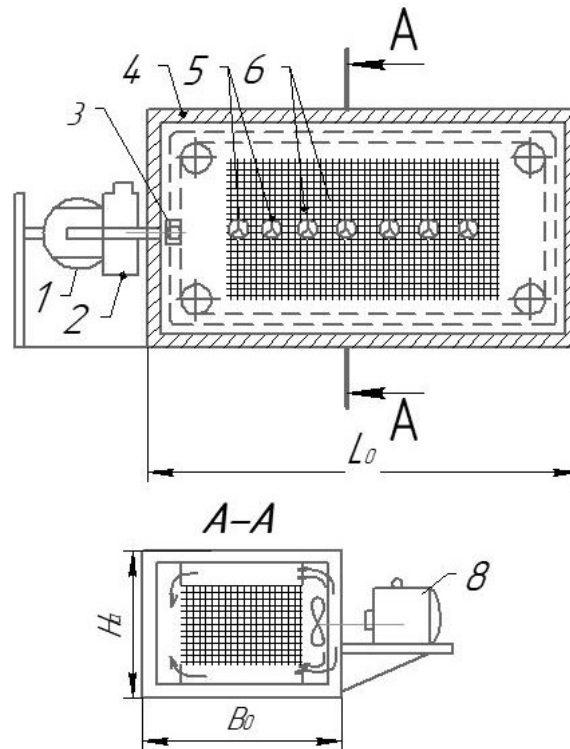


Рис. 3. Конвексний морозильний апарат:

- 1 – вузол завантаження й розвантажування; 2 – паровий ящик (скриня); 3 – блок-форма;
- 4 – ізований контур апарата; 5 – осеві вентилятори; 6 – оребрені секції повітроохолоджувача;
- 7 – вантажний конвекс; 8 – електродвигун

Об'єм хліба, що заморожується визначимо за формулою:

$$V = L * b * \delta, \text{ м}^3 \tag{1}$$

Тоді масу хліба, що заморожується, визначимо за формулою:

$$m = V * \rho, \text{ кг} \tag{2}$$

де ρ – щільність мороженого продукту.

Тривалість заморожування продукту τ будемо визначати за формулою Планка:

$$\tau = \frac{q_3 \rho}{t_{kp} - t_c} \delta \left[R \frac{\delta}{\lambda_x} + \rho \frac{1}{\alpha} \right] \tag{3}$$

де t_{kp} – криоскопічна температура, $^{\circ}\text{C}$;

t_c – температура тепловідводячого середовища $^{\circ}\text{C}$;

R і P – допоміжні коефіцієнти, що залежать від форми і співвідношення розмірів продукту, що заморожується;

λ_x – теплопровідність продукту, що заморожується, Вт/МК;

α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні блок форми до повітря, $\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2 \text{К}}$;

$q_x = i_1 - i_2$, де i_1, i_2 – ентальпія продукту, що заморожується при початковій і кінцевій температурі, Дж/кг.

Введемо поняття ефективних енергозатрат E_{xl} на заморожування ремісничого хлібу K_{en} :

$$K_{en} = \frac{E_{xl}}{(K_{як1} - K_{як2})}, \tag{4}$$

де $K_{як1}$ – якість ремісничого хліба після процесу заморожування з параметрами $\rho_{хлз}$;

$K_{як2}$ – якість тіста ρ_m .

$$K_{як} = \frac{\rho_m [1 + \beta_T (T_0 - T_3)] E_{міста}}{\rho_{хлз} [1 + \beta_{хл} (T_0 - T_3)] E_{хл}}, \tag{5}$$

де $\rho_m, \rho_{хлз}$ – густина тіста і заморожуваного хліба відповідно;

T_0, T_3 – початкова температура ремісничого хліба і заморожуваного відповідно;

$\beta_T, \beta_{xл}$ – коефіцієнти, що комплексно характеризують силу борошна F_6 , параметри запаху тіста, хліба та його рН.

Таким чином, $K_{як}$ залежить від параметрів борошна, опари та тіста, температурних режимів, часу заморожування, теплопровідності продукту і представляє собою кількість енергії, витраченої на заморожування ремісничого хліба за допомогою конвеєрного морозильного апарату (КМА). На рис. 4 наведена зона нечіткої залежності $E_{xл}$ від температури заморожування T_3 в камері КМА.

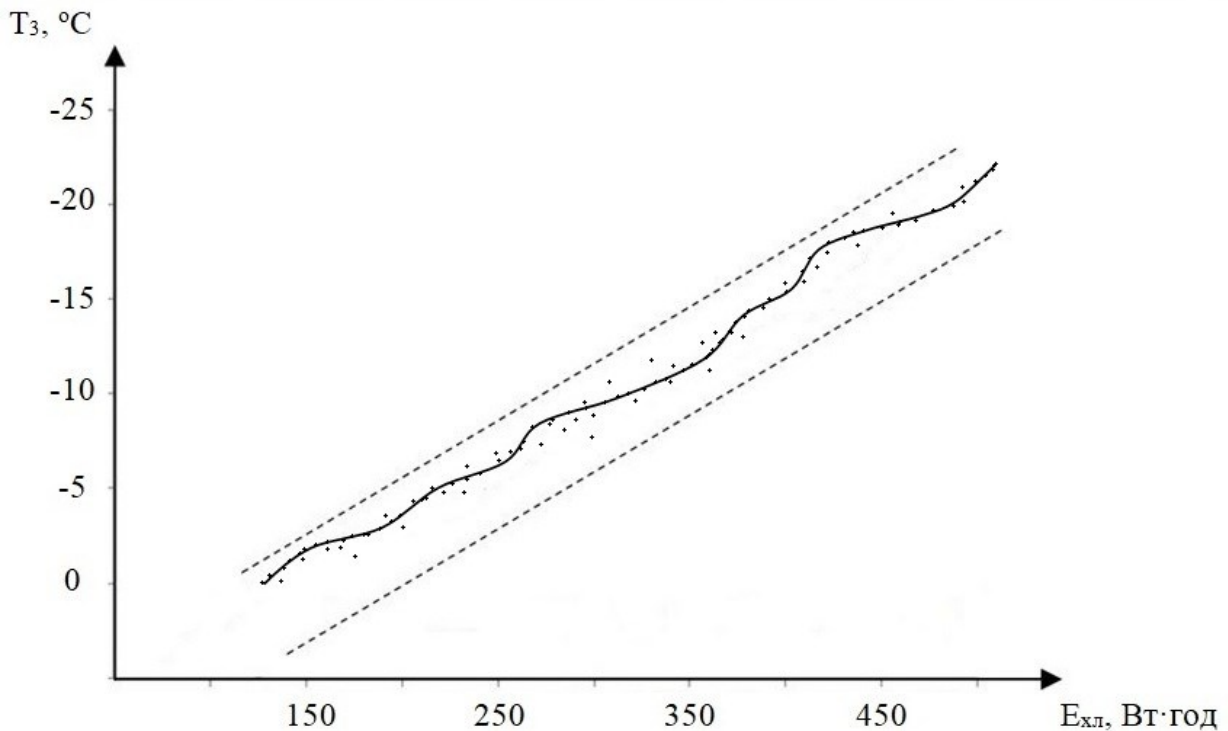


Рис. 4. Зона нечіткої залежності $E_{xл}$ від температури заморожування T_3

Так як залежність «температура-витрати електроенергії» мають нелінійний характер, то область кожної змінної розбивається на наступні нерівні інтервали $\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_3(t), \dots, \mu_n(t)$. При цьому регулюєма величина T за допомогою фазіфікатора (Φ_3) перетворюється в логістичну зміну «Температура» з термами $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_A, T_K$, яка подається на вхід нечіткого регулятора (НР).

Аналогічно, перетворенню зазнають параметри $K_{як1}$ та τ – тривалість замороження.

Керування КМА виконується наступною системою продукційних правил:

- 1) якщо T це T_1 і $K_{ЕН}$ – це $K_{вис.}$, то $E_{xл}$ – це $E_1 \in Q_{опт1}$;
- 2) якщо T це T_2 і $K_{ЕН}$ – це $K_{вис.}$, то $E_{xл}$ – це $E_2 \in Q_{опт2}$;
- 3) якщо T це T_3 і $K_{ЕН}$ – це $K_{вис.}$, то $E_{xл}$ – це $E_3 \in Q_3$;
- 4) якщо T це T_4 і $K_{ЕН}$ – це $K_{сер.}$, то $E_{xл}$ – це $E_4 \in Q_4$;
-
- 20) Якщо T це T_A і $K_{ЕН}$ – це $K_{низ.}$, то $E_{xл}$ – це $E_K \in Q_K$;
-
- 36) Якщо T це T_K і $K_{ЕН}$ – це $K_{д. низ.}$, то $E_{xл}$ – це $E_K \in Q_K$;

де $K_{вис.}$ – «високе» значення коефіцієнта $K_{як}$, $K_{сер.}$ – «середнє» значення коефіцієнта $K_{як}$, $K_{низ.}$ – «низьке» значення коефіцієнта $K_{як}$, $K_{д. низ.}$ – «дуже низьке» значення коефіцієнта $K_{як}$, $Q_{опт1}, Q_3, Q_4, \dots, Q_A, Q_K$ – холодопродуктивність КМА.

Значення температури одержано за механізмом нечіткого виводу Е. А. Мамдані [8].

Лінгвістична змінна «якість» $K_{як}$ виконується в другій системі продукційних правил:

1. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як1}$, то $E_{xл}$ – це E_1 , а τ – $\tau_{опт1}$.
2. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як2}$, то $E_{xл}$ – це E_2 , а τ – $\tau_{опт2}$.
3. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як3}$, то $E_{xл}$ – це E_3 , а τ – $\tau_{опт3}$.
4. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як4}$, то $E_{xл}$ – це E_4 , а τ – $\tau_{опт4}$.
5. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як5}$, то $E_{xл}$ – це E_5 , а τ – $\tau_{опт5}$.
6. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як6}$, то $E_{xл}$ – це E_6 , а τ – $\tau_{опт6}$.
7. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як7}$, то $E_{xл}$ – це E_7 , а τ – $\tau_{опт7}$.
8. Якщо $K_{як}$ – це $K_{як8}$, то $E_{xл}$ – це E_8 , а τ – $\tau_{опт8}$.

9. Якщо $K_{\text{як}} - \text{це } K_{\text{як}9}$, то $E_{\text{хл}} - \text{це } E_9$, а $\tau - \tau_{\text{опт}9}$.

Ці дві системи продукційних правил складені таким чином, що в кожний момент часу спрацює лише одне правило в кожній із систем.

Дослідження розробленої нечіткої моделі керування з метою визначення частоти спрацювання правил й коректності складання системи нечітких продукційних правил виконано на імітаційній моделі конвеєрного морозильного апарату. Під коректністю у нашому випадку будемо розуміти систему нечітких правил, в якій в будь-який момент часу лише одне правило має істинно умовну частину [8, 9].

За допомогою роботи імітаційної моделі в режимі реального часу визначався порядок розташування продукційних правил, який забезпечує найбільш швидку дію регуляторів нечіткого керування РВ і швидкістю конвеєра. Ці дані використовувались для реалізації системи нечіткого керування в пакеті програм SIMATIC Manager V 5.4. Пакет включає в себе декілька підпрограм для роботи із контролерами SCADA-системи фірми Siemens [10].

На рис. 5 наведено результати імітаційного моделювання, а саме криві перехідного процесу витрат Q : холодопродуктивності ($Q \in E_{\text{хл}}$) від тривалості заморожування τ у випадку ПД-регулятора 1 та нечіткого регулятора 2. Внаслідок значних коливань температури в КМА і якості ремісничого хліба і високих вимог до точності стабілізації температури заморожування ($T_3=20^\circ\text{C}\pm 0,05\%$) ремісничого хліба при використанні ПД-регуляторів ефективність заморожування технологічного процесу знижується, внаслідок чого збільшуються енерговитрати на 10-12% у порівнянні з енергозатратами (при підтримуванні $=20^\circ\text{C}$) в системі нечіткого керування процесом заморожування ремісничого хліба.

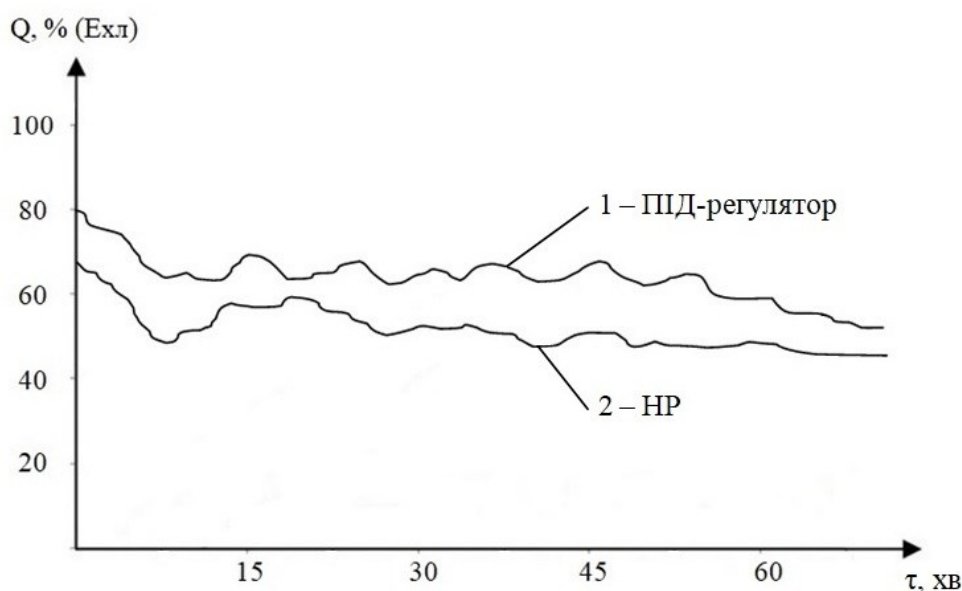


Рис. 5. Графіки залежності витрат холодопродуктивності Q ($E_{\text{хл}}$) від часу заморожування ремісничого хліба

Висновки

Запропоновано принципи побудови автоматизованої системи нечіткого керування оптимізацією енергії холодоносія в системі холодопостачання конвеєрного морозильного апарату, призначеного для заморожування ремісничого хліба та збереження його якості при варіації параметрів сировини, побудованих на даних, одержаних в режимі реального часу. Новизна розробленої системи автоматизованого процесу заморожування ремісничого хліба полягає в тому, що вона побудована на базі нечіткого регулятора з лінгвістичним зворотним зв'язком і автоматичною модифікацією системи продукційних правил. Така система дозволяє, у порівнянні з традиційними ПД-регуляторами, зменшити на 10-12% енергозатрати на виробництво 1 тони хліба шляхом зниження часу відгуку програми на зміну енерговитрат у виробництві продукції із заданими параметрами продуктивності та якості, а також робочих характеристик заморожування в розробленій інтелектуальній системі керування виробництвом ремісничого хліба,

За допомогою імітаційної моделі заморожування хліба доведено, що автоматизована система виробництва ремісничого хліба з нечітким керуванням і динамічним налагодженням системи продукційних правил дозволяє стабілізувати задані параметри заморожування хліба з похибкою $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а її швидкодія зменшує час заморожування продукту на 15-16 %, завдяки чому забезпечує більш високий рівень якості цифрового керування.

Література

1. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів : монографія / Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Возняк А. В. [та ін.] ; за редакцією В. П. Хорольського. – Кривий Ріг : видавець ФОП Чернявський Д. О., 2019. – 204 с. – ISBN 978-617-7784-12-7.

2. Хорольський Валентин Петрович. Цифрові системи інтелектуального управління підприємствами промислового комплексу регіону : монографія / В. П. Хорольський, О. В. Хорольська, І. П. Діянов ; за редакцією В. П. Хорольського та О. Б. Чернеги. – Кривий Ріг : видавець ФОП Чернявський Д. О., 2020. – 564 с. - ISBN 978-617-7784-30-1.
3. Гончаренко Б. М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій : Підручник / Б. М. Гончаренко, А. П. Ладанюк. – К. : НУХТ, 2014. – 530 с. – ISBN 978-966-612-163-2.
4. Швед С. М. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів / С. М. Швед, І. В. Ельперін // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 613(60) – С. 44-46.
5. Сильчук Т. А. Дослідження біотехнологічних властивостей тістових напівфабрикатів / Т. А. Сильчук, В. І. Дробот // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 210-215.
6. Якшаров Б. П. Справочник механика по холодильным установкам / Б. П. Якшаров, И. В. Смирнов. –Л. : Агропромиздат. – 1989. – 312 с. – ISBN 5-10-001468-7.
7. Большаков С. А. Холодильная техника и технология продуктов питания : Учебник / С. А. Большаков. – М. : Академия, 2003. – 304 с. – ISBN 5-7695-1229-6.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления : Учебник в 5-и тт. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 784 с. - ISBN: 5-7038-2193-2 (Т.5).
9. Штовба Сергей Дмитриевич. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с. – ISBN: 5-93517-359-x.
10. IEC 61131-7: 2000 Programmable Controllers – Part 7. Fuzzy control programming.

References

1. Intelektualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv : monohrafiia / Khorolskyi V. P., Korenets Yu. M., Vozniak A. V. [ta in.]; za redaktsiieiu V. P. Khorolskoho. – Kryvyi Rih : vydavets FOP Cherniavskiy D. O., 2019. – 204 s. – ISBN 978-617-7784-12-7.
2. Khorolskyi Valentyn Petrovych. Tsyfrovii systemy intelektualnoho upravlinnia pidpriemstvamy promyslovoho kompleksu rehionu : monohrafiia / V. P. Khorolskyi, O. V. Khorolska, I. P. Diianov ; za redaktsiieiu V. P. Khorolskoho ta O. B. Chernehy. – Kryvyi Rih : vydavets FOP Cherniavskiy D. O., 2020. – 564 s. - ISBN 978-617-7784-30-1.
3. Honcharenko B. M. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv kharchovykh tekhnolohii : Pidruchnyk / B. M. Honcharenko, A. P. Ladaniuk. – K. : NUKhT, 2014. – 530 s. – ISBN 978-966-612-163-2.
4. Shved S. M. Systemnyi analiz tekhnolohichnoho protsesu vyrobnytstva khlibobulochnykh vyrobiv / S. M. Shved, I. V. Elperin // Skhidno-yevropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2012. – № 613(60) – S. 44-46.
5. Sylchuk T. A. Doslidzhennia biotekhnolohichnykh vlastyvopei tistovykh napivfabrykativ / T. A. Sylchuk, V. I. Drobot // Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii. – 2017. – Т. 23, № 1. – S. 210-215.
6. Yaksharov B. P. Spravochnik mehanika po holodilnym ustanovkam / B. P. Yaksharov, I. V. Smirnov. –L. : Agropromizdat. – 1989. – 312 s. – ISBN 5-10-001468-7.
7. Bolshakov S. A. Holodilnaya tehnik i tehnologiya produktov pitaniya : Uchebnik / S. A. Bolshakov. – М. : Akademiya, 2003. – 304 s. – ISBN 5-7695-1229-6.
8. Metody klassicheskoi i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya : Uchebnik v 5-i tt. 2-e izd., pererab. i dop. T. 5. Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. K. A. Pupkova, N. D. Egupova. – М. : Izdatelstvo MG TU im. N. E. Baumana, 2004. – 784 s. - ISBN: 5-7038-2193-2 (Т.5).
9. Shtovba Sergej Dmitrievich. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB / C. D. Shtovba. – М.: Goryachaya liniya – Telekom, 2007. – 288 s. – ISBN: 5-93517-359-x.
10. IEC 61131-7: 2000 Programmable Controllers – Part 7. Fuzzy control programming.

Рецензія/Peer review : 23.01.2021 р.

Надрукована/Printed : 10.03.2021 р.