
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ТУНЕЛЬНИМИ ПЕЧАМИ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

UDC (681.5:621.3.036):621.311-026.16(045)

*Khorolskyi V. P., Grand PhD of Engineering
Science, Professor*
Korenets Yu. M., Senior Lecturer
Trunov V. Yu., a graduate of a master's degree

Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua

AUTOMATION OF TUNNEL FURNACE CONTROL IN CONDITIONS OF POWER SYSTEM INSTABILITY

Мета. Метою роботи є розробка рішень для оптимізації теплових режимів тунельних печей в умовах обмежень постачання електрикою за допомогою мехатронних модулів живлення. Дана мета конкретизується у вирішенні завдань із забезпечення рівномірності температурного розподілу в пекарній камері, підвищенні загальної продуктивності печі та зменшенні загальних енерговитрат. Оптимізація теплових режимів тунельної печі також дозволить покращити якість продукції та збільшити ресурс обладнання, зменшивши при цьому експлуатаційні витрати.

Методи. Для реалізації мети, пов'язаної з оптимізацією теплових режимів тунельних печей за допомогою мехатронних модулів живлення, використано комплексний підхід із застосуванням сучасних методів дослідження: енергетичного аудиту поточного стану енергоспоживання печі з оцінкою витрат та потенціалу економії; розробки, оптимізації та впровадження алгоритмів для автоматичного регулювання теплових режимів на основі даних, отриманих з термодатчиків та оброблених за допомогою статистичних методів аналізу.

Результати. У статті висвітлюються перспективні результати, які можуть суттєво покращити технологічний процес виробництва борошняних виробів в конвексних печах тунельного типу. Одним із ключових досягнень є оптимізація теплових режимів тунельних печей за допомогою систем автоматизації, які базуються на алгоритмах нечіткої логіки (фаззі-логіки). Завдяки об'єктивному аналізу технологічного процесу в режимі реального часу ці системи забезпечують стабільне управління навіть в умовах нестабільного постачання електроенергії. Впровадження автоматизації дозволяє зменшити загальні енерговитрати за рахунок раціонального використання енергії, забезпечення рівномірного температурного розподілу в пекарній камері та зменшення теплових втрат. Це, у свою чергу, позитивно впливає на якість готової продукції, яка буде більш однорідною і відповідатиме високим стандартам якості. Крім того, покращення стабільності теплових режимів сприятиме збільшенню продуктивності тунельних печей, що є важливим для задоволення зростаючого попиту на хлібобулочні вироби. Важливо, що застосування мехатронних модулів

живлення не лише підвищує енергетичну ефективність, а й дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати. Завдяки оптимізації роботи обладнання збільшується його ресурс, що знижує витрати на обслуговування і ремонт. Також проведення енергетичного аудиту і використання сучасних статистичних методів для аналізу даних створює можливості для розробки адаптивних рішень, які враховують специфіку конкретного виробничого процесу. Отримані результати відкривають перспективи масштабування запропонованих рішень для інших типів теплового обладнання, що може бути корисним для харчової промисловості в цілому. Таким чином, автоматизація тунельних печей є важливим кроком до підвищення технологічної, економічної та екологічної ефективності виробництва, сприяючи сталому розвитку промисловості навіть в умовах енергетичної нестабільності.

Ключові слова: тунельна піч, енергоживлення, тепловий режим, математичне моделювання, оптимізація, мехатронний модуль, автоматизація.

Постановка проблеми. В умовах збройної агресії росії проти України особливого значення набула проблема забезпечення стабільної роботи промислового обладнання в умовах нестабільності енергосистеми. Постійні відключення електроенергії, коливання напруги та обмеження енергопостачання створюють критичні виклики для підприємств, що використовують енергоємне обладнання, зокрема тунельні печі, які широко застосовуються у харчовій промисловості.

Тунельні печі є важливими технологічними агрегатами, які забезпечують безперервність виробничих процесів і високу якість продукції. Однак їх функціонування залежить від стабільного постачання електроенергії для забезпечення рівномірного нагріву, роботи систем керування та вентиляції. В умовах енергетичної нестабільності ці процеси порушуються, що призводить до:

- нерівномірного розподілу температур у пекарній камері;
- зниження продуктивності обладнання;
- збільшення енерговитрат і зносу обладнання;
- втрат сировини та недотримання технологічних стандартів;
- погіршення якості продукції.

Актуальність проблеми посилюється необхідністю зниження експлуатаційних витрат та оптимізації енергоспоживання у відповідь на виклики енергетичної кризи.

Існуючі системи керування тунельними печами не адаптовані до роботи в умовах нестабільного енергопостачання, в них відсутні механізми компенсації коливань температури в режимі реального часу. Низький рівень автоматизації такого обладнання спричинює неефективне використання енергії. У періоди роботи на автономних джерелах енергії відбуваються перевитрати енергоресурсів.

Збої в енергопостачанні спричиняють порушення технологічних циклів та підвищують ризики втрати партії продукції або зниження рівня її якості.

Для забезпечення безперебійної роботи тунельних печей в умовах енергетичної нестабільності потрібні нові підходи до керування технологічними процесами та їх автоматизації, які включають:

- розробку адаптивних мехатронних модулів, здатних працювати на альтернативних джерелах живлення;
- інтеграцію систем прогнозування технологічного процесу та оптимізації енергоспоживання;
- застосування інтелектуальних систем моніторингу та регулювання температурного режиму в камері тунельної печі.

Вирішення цієї проблеми сприятиме підвищенню енергоефективності, зменшенню експлуатаційних витрат та покращенню стійкості виробничих процесів до зовнішніх викликів, що є критично важливим у сучасних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво хліба та хлібобулочних виробів страва складається з багатьох етапів, кожен з яких є важливим для отримання якісного продукту. Проте етап випікання є, безперечно, найважливішим, оскільки саме на цьому етапі тісто та інші інгредієнти перетворюється на готовий виріб. Під час випікання відбуваються основні фізико-хімічні процеси, які надають продукту його кінцеву форму, текстуру, смак та аромат.

Тунельні печі широко використовуються в харчовій промисловості для виробництва хлібобулочних виробів, де стабільність теплових режимів є ключовим чинником забезпечення якості продукції. Однак сучасні виклики, пов'язані зі зростаючою нестабільністю вітчизняної енергосистеми, вимагають нових підходів до автоматизації процесів керування печами для підвищення їхньої енергоефективності та продуктивності.

Більшість класичних систем автоматизації, розглянутих у дослідженнях вітчизняних вчених [1-3], базуються на застосуванні ПІД-регуляторів для управління температурою та її розподілом в робочому просторі. Хоча ці методи забезпечують базовий контроль, вони часто не враховують динамічних змін у процесі та мають обмежену адаптивність до нестабільного постачання енергії.

У сучасній літературі багато уваги приділено інтеграції нечіткої логіки (fuzzy logic) для регулювання теплових процесів [4-7]. Такі системи дозволяють аналізувати складні нелінійні процеси в реальному часі та приймати оптимальні рішення навіть за відсутності чітко визначених математичних моделей. Однак, проблема масштабованості таких систем і обчислювальних витрат залишається актуальною.

Інноваційним підходом є впровадження в технологічний процес мехатронних модулів, що забезпечують розподілене управління та покращують енергозбереження за рахунок локальної адаптації [8-10]. У літературі цей напрям розглядається як перспективний, однак дослідження здебільшого обмежуються лабораторними умовами, що ставить питання про ефективність таких модулів у промислових масштабах.

Роботи [11, 12] демонструють важливість енергетичного аудиту для ідентифікації вузьких місць у споживанні енергії тунельними печами. Такі дослідження сприяють розробці моделей оптимізації теплових режимів. Водночас, автори вказують на необхідність інтеграції цих моделей з автоматизованими системами для досягнення максимального ефекту.

Використання Інтернету речей (IoT) та цифрових двійників (digital twins) [6, 7, 13] виявляється ефективним для моніторингу та передбачення змін у процесах. Ці технології можуть забезпечити детальне моделювання тунельних печей, проте потребують значних інвестицій у інфраструктуру, що є бар'єром для малого та середнього бізнесу.

Незважаючи на значні досягнення, більшість існуючих досліджень зосереджуються на окремих аспектах автоматизації – від оптимізації теплових режимів до енергозбереження. Відсутній системний підхід, що інтегрує сучасні алгоритми (наприклад, нечітка логіка), мехатронні модулі живлення та IoT у єдину платформу. Також обмежена кількість досліджень враховує умови реальної нестабільності енергопостачання, що є критично важливим для промисловості.

Для вирішення виявлених проблем необхідно:

- розробити комплексні автоматизовані системи, що об'єднують методи нечіткої логіки, мехатроніку та IoT;
- здійснити масштабні дослідження в умовах реального виробництва для перевірки ефективності нових підходів;
- інтегрувати моделі машинного навчання для прогнозування змін у процесах та адаптації до нестабільності енергосистем;
- вивчити можливості зниження витрат на впровадження таких рішень, що сприятиме їх доступності для підприємств різного масштабу.

Автоматизація тунельних печей в умовах нестабільності енергосистем є складною, але важливою задачею для харчової промисловості. Попри значні досягнення у сфері оптимізації

та автоматизації, подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію передових технологій у цілісні системи, що забезпечать стабільність, ефективність і якість виробничих процесів.

Метою статті є розробка рішень для оптимізації теплових режимів тунельних печей в умовах обмежень постачання електрикою за допомогою мехатронних модулів живлення. Дана мета конкретизується у вирішенні завдань із забезпечення рівномірності температурного розподілу в пекарній камері, підвищенні загальної продуктивності печі та зменшенні загальних енерговитрат. Оптимізація теплових режимів тунельної печі також дозволить покращити якість продукції та збільшити ресурс обладнання, зменшивши при цьому експлуатаційні витрати.

Виклад основного матеріалу. Для таких технологічних процесів харчової промисловості, як випікання хліба, хлібобулочних виробів, піци, лаваша, печива, сушіння макаронних виробів тощо, властива проблема, пов'язана з неможливістю постійного контролю температурних параметрів в пекарній камері під час зміни програм випікання для різних видів продукції або під час переходу на альтернативні джерела живлення в умовах нестабільного енергопостачання. У цих випадках контроль здійснюється технологічним персоналом візуально або за допомогою мехатронних датчиків. При цьому точність автоматичного контролю температури вздовж конвеєра та теплових потоків в пекарній камері тунельної печі залежить від змін параметрів декількох факторів зовнішнього впливу, наприклад, від стабільності електрозабезпечення тунельної печі.

Необхідність забезпечення якості технологічного процесу та кінцевого продукту в умовах нестабільного режиму електропостачання тунельної печі вимагає розв'язання певних проєктних завдань, а саме:

- оцінки температурного поля та розподілу теплових потоків вздовж конвеєрної стрічки і поду камери;
- розробки алгоритму оптимального розподілу теплових потоків у робочій камері тунельної печі в період сталого електропостачання електрики;
- моделювання розподілу теплових потоків і температурного поля в двовірному просторі робочої камери;
- розробки алгоритму розрахунку температурного поля в продукті і на його поверхні;
- розробки мехатронних модулів для електропостачання тунельної печі в періоди аварійних та/або віялових відключень;
- розробки мехатронної системи ситуаційного керування процесом виробництва якісної продукції різного виду в умовах адаптивного інтелектуального керування роботою тунельної печі на основі мехатронних модулів живлення;
- розробки структурного алгоритму роботи інтелектуальної системи керування технологічним процесом (ІСКТП) з прогнозуючою моделлю параметрів теплових потоків Q_{Σ} , Q_K , Q_{Pr} ; температур поверхонь конвеєрної стрічки та виробів, T_{Π} і T_B відповідно; оцінкою коефіцієнтів складної теплопередачі тунельної печі α_{Σ} .

При складній тепловіддачі загальний тепловий потік Q_{Σ} об'єднує два види теплопередачі: конвекцію (Q_K) та випромінювання (Q_{Pr}). Конвекція відбувається через рух повітря або іншого газу біля поверхні тіла, якому передається тепло, а випромінювання – це енергія, яку тіло випромінює в навколишнє середовище. При розрахунках теплових процесів важливо враховувати обидва види теплопередачі, оскільки вони разом формують загальний ефект теплообміну. Це дозволяє отримати більш точні результати при проєктуванні і аналізі теплових систем:

$$Q_{\Sigma} = Q_K + Q_{Pr}, \quad (1)$$

де Q_K – тепловий потік конвекцією, що залежить від коефіцієнта тепловіддачі та температури поверхні й середовища;

Q_{Pr} – променевий тепловий потік, що утворюється за рахунок випромінювання енергії з поверхні нагрітого тіла.

На підставі інформації, отриманої в процесі аналізу експертних оцінок, тепловий баланс для перетину робочої камери тунельної печі можна описати рівнянням виду:

$$\int_L Q dl = 0 \quad (2)$$

При цьому інтеграл від функції теплових потоків $Q(l)$ беруть за прямокутною межею L розміщення виробів в робочій камері тунельної печі.

Рішення задачі оптимізації теплових потоків пов'яжемо із системою, що складається з двох параметрів:

- 1) x – координати за довжиною конвеєра тунельної печі;
- 2) $\Delta Q(x)$ – прирощення функції теплових потоків.

Межа утворення скоринки має нечіткий характер і контролюється мехатронним пристроєм – технічним зором – у візуальний спосіб. Ступінь нечіткості оцінки якості продукції характеризується ступенем нечіткості визначення межі готовності виробів і ступенем нечіткості візуалізації процесу. У відповідності з цим оцінка x_a , може бути формалізована нечіткою підмножиною x_a з функцією належності $\mu_{x_a}(x)$, дана функція може бути задана у вигляді дзвоноподібної кривої з максимумом в точці x_a .

Перейдемо до розгляду формалізації якісного опису функції $Q(x)$ теплових потоків, які поглинаються виробами в робочій камері тунельної печі.

Якісна інформація полягає в тому, що при зміні координати x_a від межі зони випікання у напрямку завантаження наступної партії виробів тепловий потік повинен зменшитись. При відключенні електрозабезпечення функція $Q(x)$ теж зміниться, тобто якщо прийняти $x = x_a$, тоді:

$$\mu_x(x) = \mu_{x_a} = \mu_{x_a}(x), \quad (3)$$

$$Q(x - \Delta x) = Q(x) + \Delta Q(x_a). \quad (4)$$

При цьому необхідно обчислити нечітке відношення, яке характеризує координату x , тобто $\mu_{x_{i+1}}(x) = \mu_{x_i}(x - \Delta x)$. Після цього необхідно обчислити оптимальний тепловий потік, необхідний для виробництва виробу з параметрами $r_n = l \times l$, тоді:

$$I = \int_L Q(L) dl. \quad (5)$$

Нехай виріб, який знаходиться на поверхні конвеєра з координатами $\{x, y\}$, перебуває в полі температур $T\{x, y\}$. Зв'язок між параметрами визначимо нечітким відношенням R . При нагріванні виробів температура в їх верхній частині буде вищою ніж у нижній, що визначає показниковий (експоненційний) характер зміни температури в глибину виробу і є важливим при формалізації зав'язків між $T\{x, y\}$ та $Q(L)$.

Звернемо увагу на координату $\{y\}$ – глибину потоку тепла, необхідного для виробництва виробу радіусом r_n . У цьому випадку приріст температури $\Delta T(y)$ функції $T(y)$ визначимо нечіткою множиною $\Delta T y$ у вигляді максимального добутку виду:

$$\Delta T_{y+\Delta y} = \bar{y} R, \quad (6)$$

де $\Delta T y$ – нечітка підмножина універсальної множини Y , яка характеризує координату y ; Δy – крок по координаті y .

За допомогою функцій ступеня належності вираз (6) напишемо у вигляді:

$$\mu \Delta \bar{T}_{y+\Delta y}(u) = \max \left\{ \min \left[\mu_y(y), \mu_R(y, u) \right] \right\}; u \in U; y \in Y, \quad (7)$$

де Y – універсальна множина координати y ;

U – універсальна множина приросту $\Delta T(x, y)$ функції $T(x, y)$.

Цю залежність одержано при фіксованій координаті x , а тому в подальшому координату x враховувати не будемо.

Виходячи із межових умов на поверхні конвеєрної стрічки (на відстані 50 мм від верхнього поду печі) величину приросту функції $T(y)$ при $y = 0$ можна прийняти у вигляді

однокрапкової множини $\Delta T_0 = 1/(K\Delta y)$. Нечітку множину R знайдено формалізацією запропонованого умовного рівняння.

Якщо значення $\bar{y}$ близьке до 0, тоді значення $\Delta T_{y+\Delta y}^{(1)}$ буде значно більшим за значення ΔT_0 .

З метою алгоритмізації розрахунку оптимальної температури випікання виробів у тунельній печі дійсні значення прискорення ΔT обчислимо за формулою:

$$\Delta T = au + b, \quad (8)$$

де a і b – коефіцієнти, які знаходять із умов:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \begin{cases} \varphi(x), \text{ коли } y = B \\ K, \text{ коли } y = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

яким відповідають наближені рівності $\Delta T_{\max}(x, B) \approx \varphi(x)\Delta y$; $\Delta T_{\min}(x, 0) \approx K\Delta y$.

Якщо визначити приращення $\Delta T(y)$ у виробі як функцію $T(y)$ по координаті y та у розподілі температур на поверхні стрічки конвеєра, який будемо контролювати мехатронним датчиком температури, можна знайти зміну температури виробу за координатою y відповідно до рівняння:

$$\Delta T(y + \Delta y) = T(y) + \Delta T(y). \quad (10)$$

При такій побудові автоматизованої системи керування технологічним процесом у тунельній печі необхідно також оцінити енергозатрати (E) на виробництво різних найменувань продукції та час випікання (G) виробів різного виду з відповідними характеристиками їх якості.

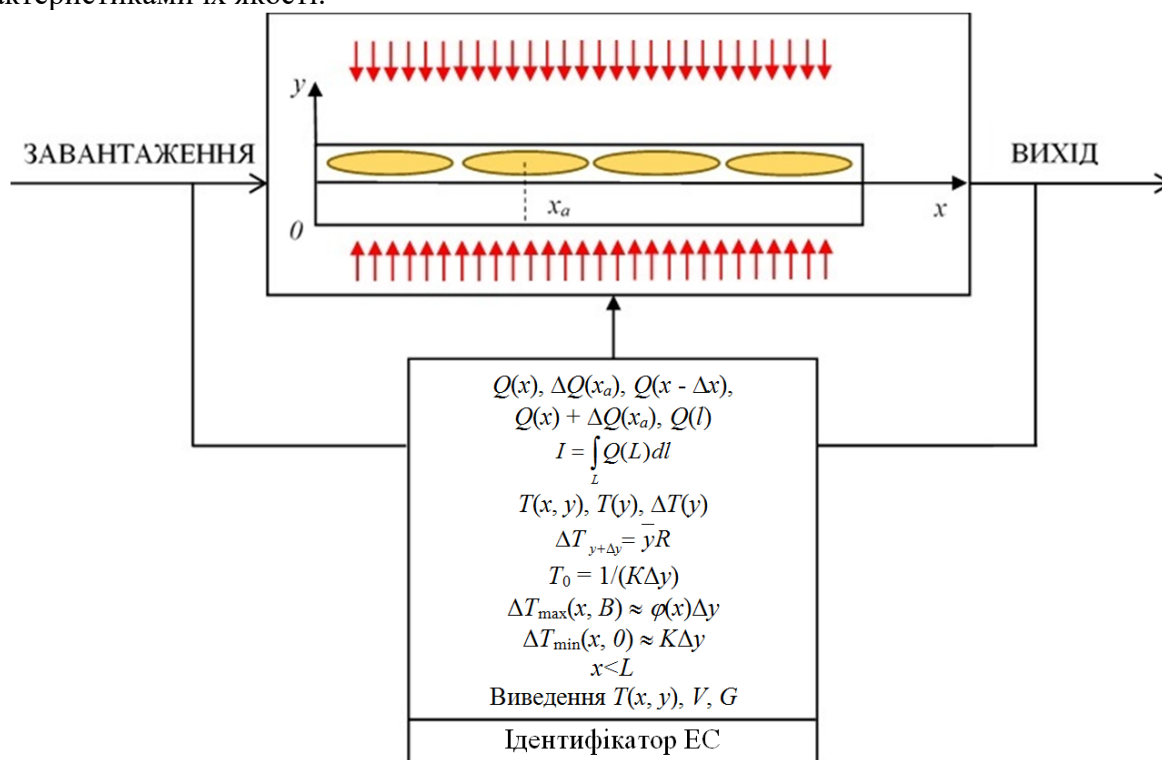


Рисунок 1 – Математична нечітка фаззі-модель тунельної печі

Важливим технологічним чинником в системі керування роботою тунельної печі є не тільки інтенсивність інфрачервоного випромінювання (I), але й швидкість руху конвеєра (V_k). Вибір оптимальної швидкості виконується за допомогою системи автоматичного керування САК асинхронного двигуна з тиристорним перетворювачем частоти ТПЧ (САК АД-ТПЧ) в межах 30-40% від номінальних значень.

В автоматизованій системі керування роботою тунельної печі головну роль відіграє АРМ оператора з бібліотекою програмних продуктів та алгоритмів керування експертною

системою (ЕС) нечіткого моделювання параметрів Q , T , E , G та багатоканального фаззі-регулювання за допомогою станції фірми «Siemens».

Приклад архітектури такої системи керування запропоновано на рис. 2. Система включає індикатори положення мехатронних датчиків, робочу станцію фірми «Siemens» з монітором (М), інформаційне табло (ІТ), блок мехатронної системи включення резервного блоку електрозабезпечення.

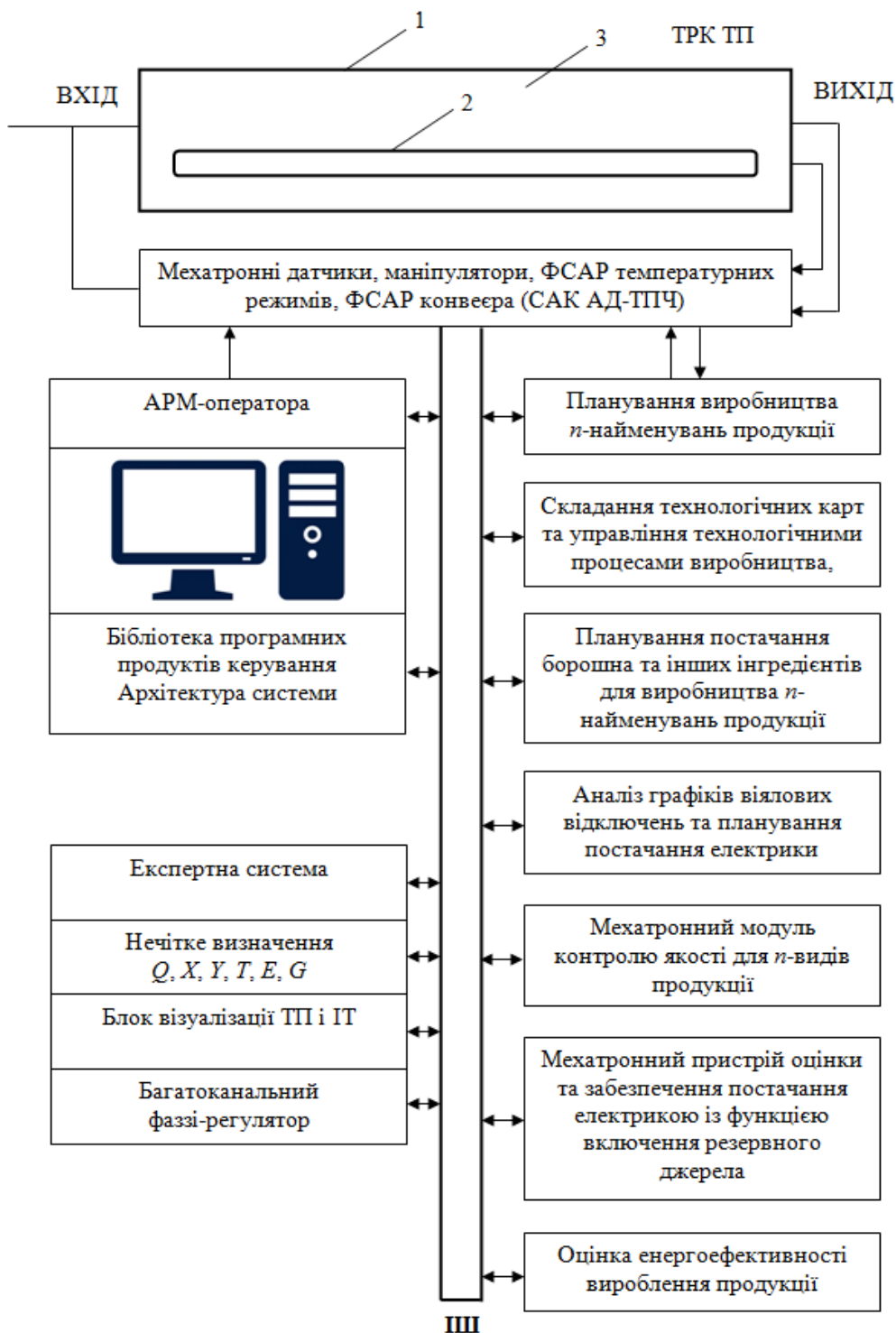


Рисунок 2 – Блок схема мехатронної системи автоматизованого контролю і керування виробництва продукції в камері тунельної печі: 1 – тунельна піч; 2 – стрічковий конвеєр, 3 – робоча теплова камера тунельної печі; ІІІ – інформаційна шина

Розроблені модулі теплових процесів і температурних режимів випікання виробів у тунельній печі дозволяють проєктантам правильно підібрати, розмістити та відкалібрувати:

- мехатронні датчики систем контролю температурного поля робочої зони випікання;
- датчики механічних маніпуляторів завантаження-розвантаження продукції;
- мехатронну систему контролю електропостачання тунельної печі.

Висновки. У запропонованій системі мехатронні датчики-маніпулятори фаззи-системи автоматичного регулювання (ФСАР) забезпечуватимуть оптимальні температурні режими і швидкість руху стрічкового конвеєра, режими роботи маніпуляторів завантаження-розвантаження продукції, контроль її якості та продуктивності тунельної печі. Головною метою впровадження подібної системи є забезпечення планових показників виробництва певного визначеного асортименту та його енергоефективності. Таким чином, розглянуто питання побудови ситуаційної системи керування випіканням в тунельній печі конвеєрного типу *n*-найменуваль продукції в умовах як сталого енергозабезпечення, так і під час позапланових або віялових відключень електрики з переходом на альтернативні джерела електрозабезпечення.

Завдяки впровадженню систем автоматичного регулювання теплових режимів, розроблених на основі методів нечіткої логіки (фаззи-логіки), можна зменшити витрати енергії та забезпечити її раціональне використання в умовах нестабільного енергопостачання.

Оптимізація роботи мехатронних модулів живлення та забезпечення рівномірності температурного розподілу дозволять збільшити загальну продуктивність виробництва без втрати якості продукції.

Забезпечення стабільності теплових режимів сприятиме досягненню високих стандартів у виробництві хлібобулочних виробів, лаваша, піци, сандвічів, лазаньї тощо.

Вдосконалення керування тепловими процесами та зменшення теплових втрат сприятимуть збільшенню ресурсу обладнання та зниженню витрат на його обслуговування.

Використання енергетичного аудиту, статистичних методів аналізу та сучасних алгоритмів обробки даних сприятиме гнучкості системи автоматизації та адаптації до умов конкретного виробництва.

Запропоновані алгоритми та модулі автоматизації можуть бути адаптовані для інших типів теплового обладнання, що відкриває можливості їх подальшого застосування в харчовій промисловості.

Таким чином, автоматизація керування тунельними печами дозволяє не лише підвищити стабільність і ефективність роботи в умовах нестабільного енергопостачання, але й сприяє сталому розвитку технологічного процесу.

Список літератури

1. Лорія М. Г., Поркуян О. В., Ананьєв М. В., Целіщев О. Б. Оптимальні налаштування регуляторів промислових систем управління технологічними об'єктами : монографія. Сєвєродонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. 192 с.
2. Шаруда С. С., Кишенько В. Д. Інтелектуальна система сценарного управління хлібопекарським виробництвом. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 5/3 (47). С. 66–70.
3. Шаруда С. С., Кишенько В. Д. Імітаційне дослідження системи управління технологічними процесами хлібозаводу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011, № 3. С. 14–16.
4. Швед С. М., Ельперін І. В. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 613(60). С. 44–46.
5. Ross, Timothy J. Fuzzy logic with engineering applications. England: John Wiley & Sons Ltd., 2004. 628 p
6. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів : монографія; за заг. ред. В. П. Хорольського. Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О. 2019. 203 с.

7. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Серебренников В. М. Автоматизовані системи керування виробництвом смарт-продуктів харчування : монографія. Кривий Ріг : Видавець Чернявський Д.О., 2021. 311 с.
8. Michael B. Histan, David G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. WCB/McGraw-Hill, 1999. 400 p.
9. Godfrey C. Onwubolu. Mechatronics: principles and applications. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 672 p.
10. Ладанюк А. П., Засць Н. А., Власенко Л. О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування) : монографія. Київ : Видавництво Ліра-К, 2016. 312 с.
11. Papasidero, Davide & Pierucci, Sauro & Manenti, Flavio. (2016). Energy optimization of bread baking process undergoing quality constraints. *Energy*. 116. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.046>.
12. Paton, Joe & Khatir, Zinedine & Thompson, Harvey & Kapur, Nikil & Toropov, Vassili. Thermal energy management in the bread baking industry using a system modelling approach. *Applied Thermal Engineering*. 2013. 53. PP. 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.036>.
13. Wilson, Patricia & Clark, Susan & Scott, Charles. Energy Efficiency Optimization In Mechanical Systems: Innovative Approaches In Industrial Applications. *International Journal of Industrial Innovation and Mechanical Engineering*. 2024. 1. PP. 28-32. <https://doi.org/10.61132/ijiime.v1i2.61>.

References

1. Loria, M. H., Porkuian, O. V., Ananiev, M. V., Tselishchev, O. B. (2019). *Optymalni nastroiuvannia rehuliatoriv promyslovykh system upravlinnia tekhnolohichnymy obiektamy* [Optimal tuning of controllers in industrial control systems for technological objects], Severodonetsk, Publishing House of the V. Dahl EUNU. 192 p.
2. Sharuda, S. S., Kyshenko, V. D. (2010). *Intelektualna systema stsenarnoho upravlinnia khlibopekarskym vyrobnytstvom* [Intelligent scenario management system for bakery production], *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], 5/3 (47), 66–70.
3. Sharuda, S. S., Kyshenko, V. D. (2011). *Imitatsiine doslidzhennia systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy khlibozavodu* [Simulation study of the technological process management system of a bread factory], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu* [Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute], 3, 14–16.
4. Shved, S. M., Elperin, I. V. (2012). *Systemnyi analiz tekhnolohichnoho protsesu vyrobnytstva khlibobulochnykh vyrobiv* [System analysis of the technological process of bakery production], *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 613(60), 44–46.
5. Ross, Timothy J. (2004). *Fuzzy logic with engineering applications*. England, John Wiley & Sons Ltd. 2004. 628 p.
6. Khorolskyi, V. P. and others. (2019). *Intelektualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv* [Intelligent management systems for the production of bakery products], Kryvyi Rih, Publisher of FO-P Chernyavskyi D.O. 203 p.
7. Khorolskyi, V. P., Korenets, Yu. M., Serebrennikov, V. M. (2021). *Avtomatyzovani systemy keruvannia vyrobnytstvom smart-produktiv kharchuvannia* [Automated control systems for the production of smart food products], Kryvyi Rih, Publisher Chernyavskyi D.O. 311 p.
8. Michael B. Histan, David G. Alciatore. (1999). Introduction to mechatronics and measurement systems. WCB/McGraw-Hill. 400 p.
9. Godfrey C. Onwubolu. (2005). Mechatronics: principles and applications. Elsevier Butterworth-Heinemann. 645 p.

10. Ladaniuk, A. P., Zaiets, N. A., Vlasenko, L. O. (2016). *Suchasni tekhnolohii konstruiuvannia system avtomatyzatsii skladnykh ob'ektiv (merezhevi struktury, adaptatsiia, diahnozyka ta prohnozuvannia)* [Modern technologies for designing automation systems of complex objects (network structures, adaptation, diagnostics, and forecasting)], Kyiv, Lira-K Publishing House. 312 p.
11. Papasidero, Davide & Pierucci, Sauro & Manenti, Flavio. (2016). Energy optimization of bread baking process undergoing quality constraints. *Energy*. 116. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.046>.
12. Paton, Joe & Khatir, Zinedine & Thompson, Harvey & Kapur, Nikil & Toropov, Vassili. (2013). Thermal energy management in the bread baking industry using a system modelling approach. *Applied Thermal Engineering*. 53. 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.036>.
13. Wilson, Patricia & Clark, Susan & Scott, Charles. (2024). Energy efficiency optimization in mechanical systems: innovative approaches in industrial applications. *International Journal of Industrial Innovation and Mechanical Engineering*. 1. 28–32. <https://doi.org/10.61132/ijiime.v1i2.61>.

Objective. The aim of this study is to develop solutions for optimizing the thermal regimes of tunnel ovens under electricity supply constraints using mechatronic power modules. This goal is specified through addressing the tasks of ensuring uniform temperature distribution in the baking chamber, increasing the overall productivity of the oven, and reducing total energy consumption. Optimizing the thermal regimes of tunnel ovens will also improve product quality, extend equipment lifespan, and reduce operational costs.

Methods. To achieve the goal of optimizing the thermal regimes of tunnel ovens with mechatronic power modules, a comprehensive approach was applied using modern research methods. These include conducting an energy audit of the current energy consumption state of the ovens with an assessment of costs and savings potential, developing, optimizing, and implementing algorithms for automatic thermal regime regulation based on data collected from thermal sensors and processed using statistical analysis methods.

Results. The article highlights promising results that can significantly improve the technological process of manufacturing bakery products in conveyor-type tunnel ovens. One of the key achievements is the optimization of thermal regimes through automation systems based on fuzzy logic algorithms. Thanks to the objective analysis of the technological process in real-time, these systems ensure stable operation even under unstable electricity supply conditions. The implementation of automation reduces overall energy consumption by rationalizing energy use, ensuring uniform temperature distribution in the baking chamber, and minimizing heat losses. In turn, this positively impacts the quality of the final product, which will be more uniform and meet high quality standards. Furthermore, improving the stability of thermal regimes will enhance the productivity of tunnel ovens, which is critical to meeting the growing demand for bakery products. Notably, the application of mechatronic power modules not only increases energy efficiency but also minimizes operational costs. Optimizing equipment operation extends its lifespan, thereby reducing maintenance and repair costs. Additionally, conducting energy audits and applying modern statistical methods for data analysis enable the development of adaptive solutions tailored to the specific needs of each production process. The results obtained open up opportunities for scaling the proposed solutions to other types of thermal equipment, which could be beneficial for the food industry as a whole. Thus, the automation of tunnel ovens represents a significant step toward enhancing the technological, economic, and environmental efficiency of production, contributing to the sustainable development of the industry even under energy instability.

Keywords: tunnel oven, power supply, thermal regime, mathematical modeling, optimization, mechatronic module, automation.