

DOI 10.31891/2307-5732-2023-329-6-344-353  
УДК 681.51:(664.6/.7:664.655.041)(045)

**ХОРОЛЬСЬКИЙ ВАЛЕНТИН**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
<https://orcid.org/0000-0003-4040-3229>  
e-mail: [khorolv@ukr.net](mailto:khorolv@ukr.net)

**КОРЕНЕЦЬ ЮРІЙ**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
<http://orcid.org/0000-0002-5873-7908>  
e-mail: [korenets@donnuet.edu.ua](mailto:korenets@donnuet.edu.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОТАЦІЙНИХ ПЕЧЕЙ ХЛІБОЗАВОДУ ТА РОЗРОБКА МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ЇХ ВІД АВАРІЙ

*У статті актуалізовано проблематику дослідження працездатності ротаційних печей в період обмеження постачання газу та електрики. Відпрацьовано алгоритм оцінки надійності ротаційних печей в періоди обмежень постачання газу за рахунок включення резервних джерел. Доведено, що якісні показники хлібопекарських виробів залежать від надійної роботи технологічного обладнання; рівня знань технологів-операторів; рівня інформаційного й алгоритмічного забезпечення; інтелектуально-інформаційної підтримки прийняття рішень особи, яка приймає оперативні рішення. Головну роль в цьому випадку буде відігравати рівень інтелектуалізації керування обладнанням в періоди обмежень постачання енергоносіїв та віялових відключень електрики, своєчасне розпізнавання аварійних ситуацій та аварій, виконання персоналом профілактичного обслуговування обладнання хлібопекарського виробництва. Завдання операторів та АСУТП в період експлуатації ротаційної печі полягає у створенні та підтримуванні нормативних значень температури випікання хліба в періоди обмеження постачання електрики і газу та у розпізнаванні аварійних ситуацій та аварій в темпі з процесом. У результаті розроблено та запропоновано АСУТП ротаційної печі з вбудованою мехатронною системою оцінки надійності обладнання й моніторингом стану енергетичних чинників, що спроектована з урахуванням місцевих умов і призначена для впровадження на хлібо заводах Придніпровського економічного регіону в умовах воєнного стану. Основними ознаками розробленої системи є використання положень надійності складних систем, алгоритмів та систем моніторингу з розпізнаванням аварій, що виникають у процесі експлуатації ротаційних печей. Головну увагу приділено розробці експертної системи контролю забезпечення ротаційних печей енергоносіями (газом, електрикою) та їх резервування.*

**Ключові слова:** ротаційна піч, температурне поле, модель, моніторинг ситуацій, система прийняття рішень, невизначеність.

KHOROLSKY VALENTYN

Donetsk National Economy and Trade and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky

KORENETS YURIY

Donetsk National Economy and Trade and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky

## RESEARCH OF THE RELIABILITY OF ROTARY OVENS OF A BAKERY FACTORY AND THE DEVELOPMENT OF MECHATRONIC SYSTEMS TO PROTECT THEM AGAINST ACCIDENTS

*The article updates the issues of research into the performance of rotary kilns during the period of gas and electricity supply restrictions. An algorithm for evaluating the reliability of rotary kilns during periods of gas supply restrictions due to the inclusion of backup sources has been developed. It has been proven that the quality indicators of bakery products depend on the reliable operation of technological equipment; level of knowledge of technologists-operators; the level of information and algorithmic support; intellectual and informational decision-making support of the person who makes operational decisions. The main role in this case will be played by the level of intellectualization of equipment management during periods of energy supply restrictions and fan power outages, timely recognition of emergency situations and accidents, and preventive maintenance of bakery production equipment by personnel. The task of operators and control systems during the operation of the rotary oven is to create and maintain normative values of the bread baking temperature during periods of electricity and gas supply restrictions and to recognize emergency situations and accidents in time with the process. As a result, an automated control system for a rotary kiln with a built-in mechatronic system for evaluating the reliability of equipment and monitoring the state of energy factors was developed and proposed, which was designed taking into account local conditions and intended for implementation at bread factories of the Dnieper economic region under martial law. The main features of the developed system are the use of reliability provisions of complex systems, algorithms and monitoring systems with the recognition of accidents that occur during the operation of rotary kilns. The main attention is paid to the development of an expert control system for supplying rotary kilns with energy carriers (gas, electricity) and their backup.*

**Keywords:** rotary kiln, temperature field, model, situation monitoring, decision-making system, uncertainty.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** За період повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України вітчизняна харчова промисловість стійко відреагувала на виклики та продовжила забезпечувати населення регіонів продуктами харчування високої якості. Це стало можливим за рахунок своєчасної модернізації хлібо заводів, молоко заводів, м'ясопереробних підприємств, холодильних підприємств, підприємств агропромислового комплексу та розробки алгоритмів роботи таких підприємств у період віялових відключень електрики та постачання газу. Іншим важливим чинником подолання проблем стало підвищення надійності технологічного обладнання за рахунок його оперативного обслуговування й

взаємовигідної співпраці зі споживачами продукції та постачальниками комплектуючих, електрики, газу і води.

Головним завданням хлібопекарної галузі Придніпровського економічного району в період воєнного стану в Україні є забезпечення населення високоякісними хлібобулочними виробами. Можливість забезпечення виконання цього завдання тісно пов'язана не лише з логістикою сировини і персоналу, але й зі стабільністю постачання підприємств інгредієнтами, водою, енергоносіями. Запорукою стабільності виробництва хлібопродуктів з високим рівнем якості є інтелектуалізація технологічних процесів з модернізацією енергетичного обладнання та підвищення стабільності його роботи в періоди обмежень постачання електрикою, водою та газом.

Дослідниками [1, 2, 3] доведено, що якісні показники хлібопекарських виробів залежать від:

- 1) надійної роботи технологічного обладнання;
- 2) рівня знань та практичного досвіду технологів-операторів;
- 3) рівня інформаційного й алгоритмічного забезпечення;
- 4) інтелектуально-інформаційної підтримки прийняття рішень особою, яка приймає оперативні рішення.

Таким чином, головну роль для реалізації вищезазначених умов може відігравати рівень інтелектуалізації керування обладнанням в періоди обмежень енергоносіїв та віялових відключень електрики; робота спеціального програмного забезпечення для своєчасного розпізнавання аварійних ситуацій та аварій; умови виконання персоналом профілактичного обслуговування обладнання хлібопекарського виробництва.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Учені із Національного університету харчових технологій (НУХТ), м. Київ, у своїх дослідженнях розглянули питання надійності обладнання харчових виробництв та розробили методи підвищення рівня його надійності [1, 2, 3]. При цьому їх роботи доводять, що з метою підвищення надійності обладнання, забезпечення його постачання енергоносіями, в умовах нечіткої оптимізації, необхідно проводити моніторинг значень як вхідних параметрів якості сировини, води; оперативних параметрів опари, тіста; робочих характеристик обладнання; показників якості кінцевого продукту, так і стану енергозабезпечення з елементами резервування та/або генерування електрики, газу, пошуку додаткових джерел електропостачання.

**Виділення невирішених частин.** Результати проведених досліджень та аналіз практичного досвіду виробників дали змогу виявити проблеми використання існуючих методів і методик прогнозу надійності роботи ротатійних хлібопекарських печей на предмет виникнення збурень (відмов), аварій в умовах нечіткої інформації про технологічний процес виробництва хліба.

**Метою статті** є дослідження питань підвищення працездатності технологічного обладнання для виробництва хлібобулочних виробів зі заданими характеристиками якості за рахунок їх захисту від аварій.

**Виклад основного матеріалу.** Експертна група проєктантів у складі співробітників ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського та представників місцевих виробників хлібобулочної продукції узяла за мету розробити методику експлуатації ротатійних хлібопекарських печей у періоди обмеженої потужності енергосистеми та нестабільного постачання газом і водою.

Попередні висновки експертів базувалися на наступному:

- 1) головним елементом технологічної схеми з виробництва хлібобулочних виробів є ротатійна піч з візками, від оптимальної роботи якої, її надійності та енергоефективності залежить якість продукції;
- 2) найціннішим інформаційним об'єктом ротатійної печі є температурне поле пекарної камери, потоки повітря у ній та режими роботи витяжного вентилятора;
- 3) газовий мультиблок з системами контролю тиску газу та його витрат – третій за рейтингом елемент, від надійної роботи якого залежить не лише режим роботи пекарної камери, а й продуктивність печі та якість продукції;
- 4) ротатійна піч визначена експертами як слабо структурований об'єкт керування, вихідні показники якого значною мірою залежать від досвіду операційного персоналу.

Отже, необхідно розробити моделі причинно-наслідкових зв'язків конструктивних особливостей ротатійних печей з робочими характеристиками керування роторними печами з метою удосконалення існуючих систем керування з урахуванням режимів роботи енергосистем та забезпечення хлібозаводу газом. Необхідно донавчити експертну систему, а саме, розробити програмне забезпечення, яке працюватиме в манері досвідченого оператора, розпізнаючи аварійні ситуації, аварії та інші збурення в системі енерго- та газозабезпечення.

Завдання операційного персоналу (ОПР) та АСУТП в період експлуатації ротатійної печі полягає:

- у створенні та підтримуванні нормативних температур в пекарських камерах для забезпечення процесу випікання хліба;
- в оптимізації температурних режимів пекарної камери і забезпеченні заданих параметрів мікроклімату в періоди обмеження електрики, газу, води;
- розпізнавання аварійних ситуацій та аварій в темпі з технологічним процесом виробництва хліба.

Ці складові позначимо у вигляді множин  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$ , кожна з яких характеризується вектором, наприклад,  $V_{11} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$  змінних тощо.

На рис.1-5 наведено моделі причинно-наслідкових зв'язків основних блоків ротаційної печі. До збурень нами віднесені:  $B_1$  – виялові відключення електрики та переведення обладнання на резервні джерела;  $B_2$  – відключення газу або зменшення тиску в мережі та переведення газового мультиблоку на альтернативні джерела.

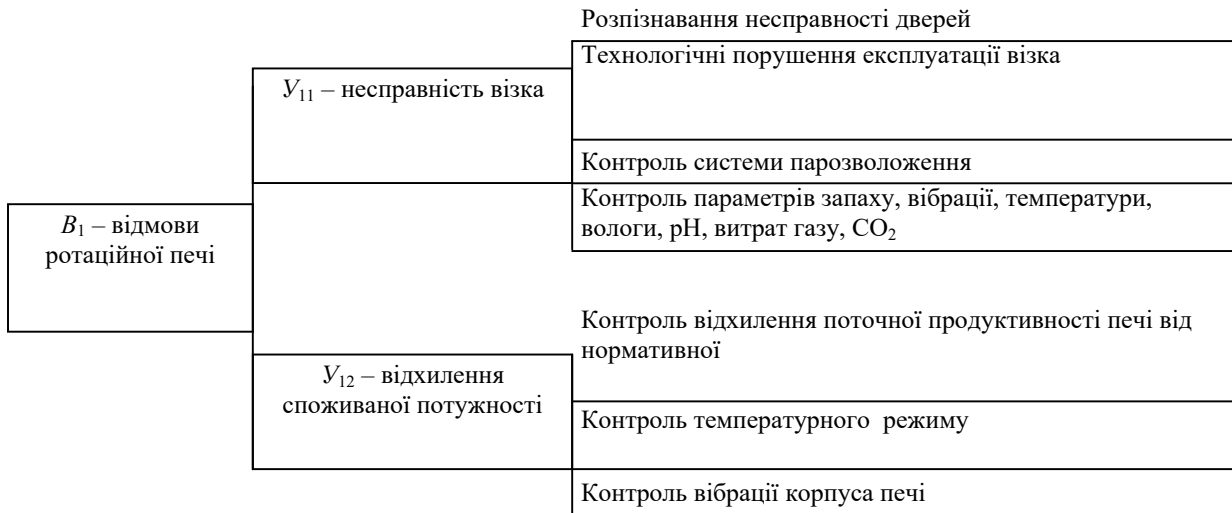


Рис.1. Модель відмов для множини  $B_1$

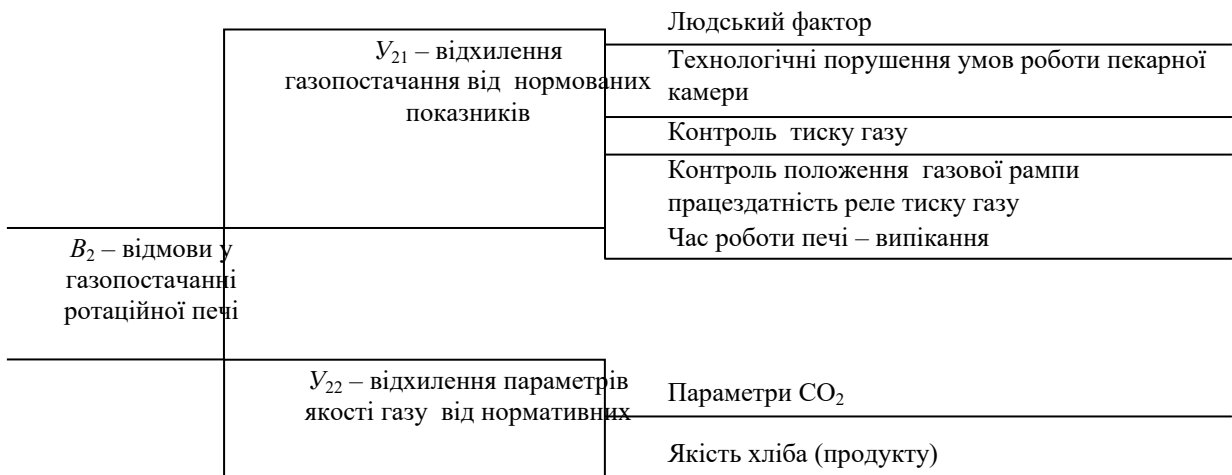


Рис. 2. Модель відмов для множини  $B_2$

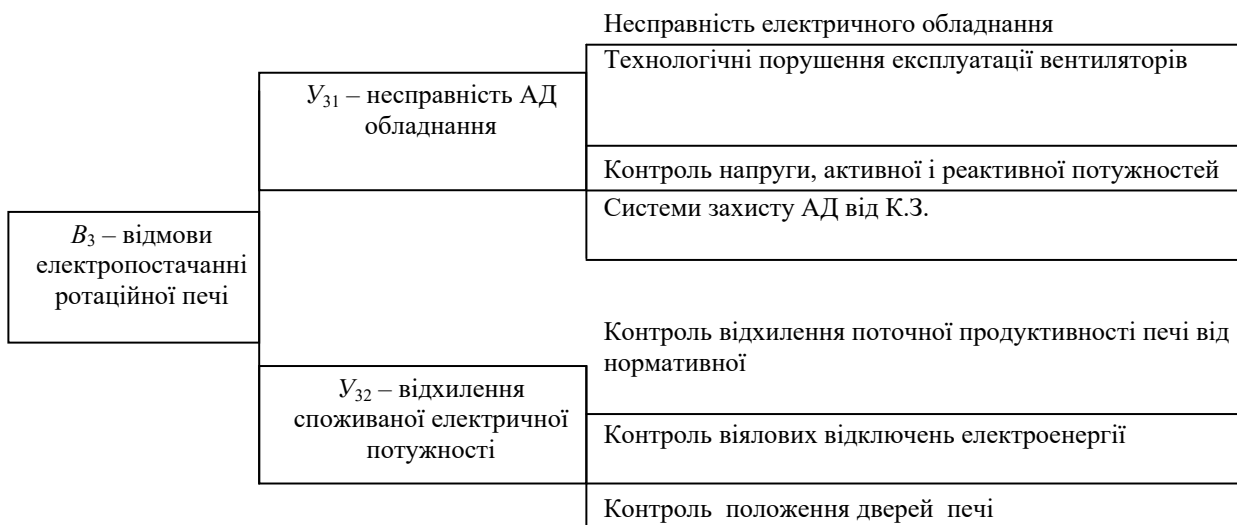
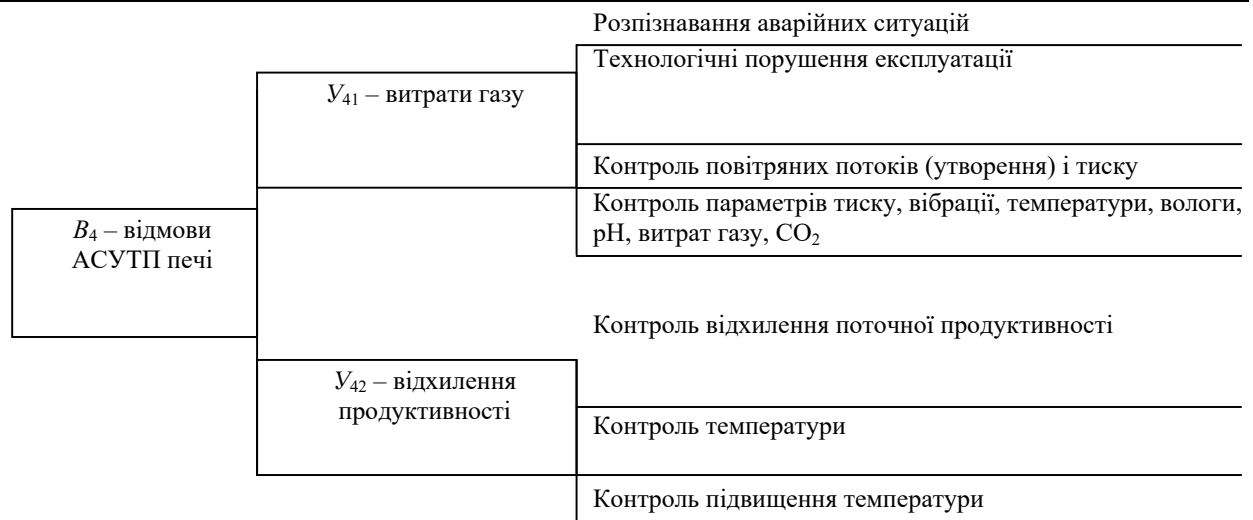
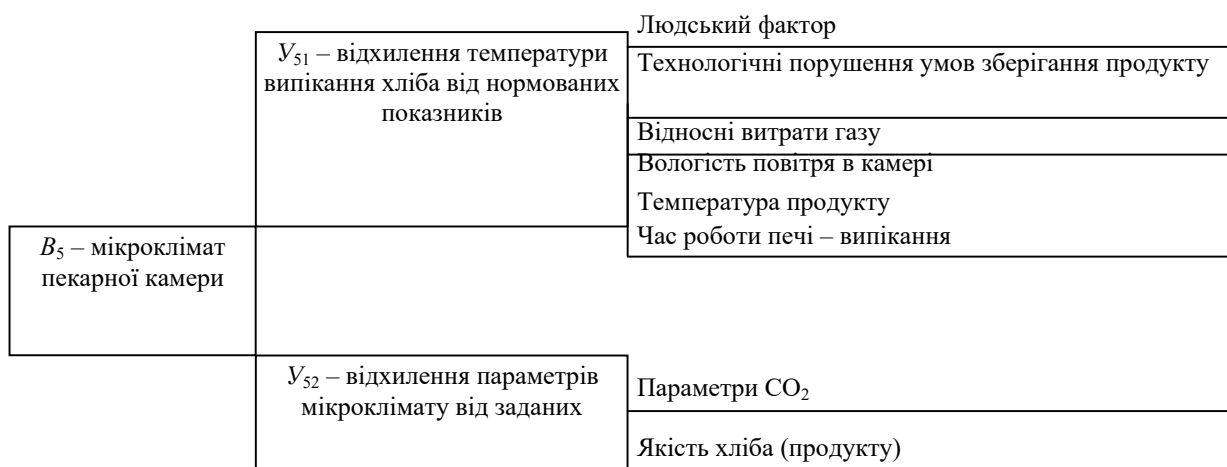


Рис. 3. Модель відмов для множини  $B_3$

Рис. 4. Модель відмов для множини B<sub>4</sub>Рис. 5. Модель відмов для множини B<sub>5</sub>

Важливим чинником B<sub>3</sub> збурень є температурне поле пекарної камери ротаційної печі. З метою підвищення надійності та працездатності ротаційної печі та своєчасного виконання бізнес-замовлень ОПР повинен оперативного контролювати час випікання хліба, його охолодження та логістику, а головне – контролювати якісні характеристики хліба.

Як відомо, параметри якості хліба чутливі до змінних збурень сировини та інгредієнтів, знань ОПР, експертних систем прогнозування надійності обладнання та захисту від аварій, вбудованих в АСУТП хлібозаводу. Тому інтелектуалізація процесів виробництва хліба вимагає від експертів нових атрибутів щодо вивчення впливу надійності на роботу ротаційних печей в умовах постійного моніторингу працездатності обладнання, стану енергетичного обладнання та обладнання газопостачання.

Серед цих атрибутів для умов системи виробництва хліба на хлібозаводах регіону до найбільш відповідальних елементів технічної системи обладнання ротаційної печі віднесемо пекарню камеру, мотор-редуктор, систему енергопостачання, парогенератор, газовий мультиблок, систему витяжної вентиляції, вихід яких із ладу приведе до втрати працездатності усєї системи виробництва хліба

У таблиці 1 наведено інформацію про причини виходу із ладу відповідних елементів обладнання ротаційної печі, яку було сформовано на основі експертних оцінок.

Таким чином, визначені найбільш відповідальні області значень (кластери) в складі даної технічної системи: ротаційна піч – температурне поле пекарної камери – теплогенератор – газовий мультиблок – система вентиляції – АСУТП з вбудованою інтелектуальною системою діагностики – системи газопостачання та електропостачання. Останні системи пі час воєнного стану в Україні працюють в умовах невизначеності щодо постачання газу та електрики.

З метою зменшення рівня невизначеності щодо надійності газопостачання необхідно звернутись до таблиці 1 та до моделей проблемних ситуацій (рис. 1-5) зі станом інформаційного забезпечення ОПР. При цьому лише ОПР буде приймати рішення про перехід системи виробництва хліба на нові джерела енергії.

На основі вищесказаного можна констатувати, що в сучасних системах АСУТП необхідно проектувати підсистеми автоматизованого контролю (ПАК) оцінки працездатності ротаційних печей хлібозаводу та мехатронні пристрої захисту обладнання від аварій. Вони дозволяють ОПР за допомогою спеціальних алгоритмів і інтелектуальних систем підтримки прийняття оперативних рішень (ІСППОР)

оперативно прогнозувати умови і час появи відмов та аварійних ситуацій. На основні аналізу параметрів термообробки у технологічному процесі виробництва хлібу і статичних даних про відмови вузлів обладнання ротаційної печі ПАК повинна прогнозувати для ОПР час виконання ремонтних робіт газо- і електропостачання. На рисунку 6 наведено розроблену авторами статті АСУТП ротаційної печі (РП).

Таблиця 1

**Інформація про параметри технологічного процесу випікання хліба**

Інформація надається постійно в процесі виробництва хлібопродуктів	Інформація надається на АРМ диспетчера-оператора один раз на годину
1. Продуктивність ротаційної печі. 2. Витрати газу, електрики та періоди обмежень, виялові відключення. Резервні джерела газопостачання та електропостачання. 3. Енергетичні характеристики та температурні режими вентиляторів і мультиблоку. 4. Стан системи контролю температурних режимів. 5. Стан системи теплообмінників і теплогенератора. 6. Дані показники температурних параметрів камер для випікання хліба, печива тощо. Інформація надається АРМ-оператор у вигляді строки бази даних із робочої станції оброблення даних РП хлібозаводу. 7. Параметри теплових камер-хлібозаводу. Дані про геометричні параметри та властивість продуктів харчування (робочі характеристики хліба).	1. Тип продукції. 2. Вимірювання температури в пекарній камері ротаційної печі. 3. Вимірювання якості продукції в процесі надходження тістової заготовки в камеру. 4. Оптимальні режими роботи системи випікання хліба. 5. Стійкість обладнання ротаційної печі до збурень 6. Дані про витрати електрики, газу, викиди CO <sub>2</sub> у навколишнє середовище тощо. 7. Дані про зупинку обладнання, параметри завантаження-розвантаження пекарної камери. 8. Дані про можливі дефекти обладнання і фактичну якість продукції. Планування значення технологічних параметрів розвантаження-охолодження хліба.

В архітектуру АСУТП з модулем розрахунку прогнозних показників надійності РП й підсистемою інформаційного забезпечення вбудовані блоки 1-6, які виконують: оцінку станів обладнання ротаційної печі; ідентифікацію параметрів та структури елементів РП; нечітке логічне виведення інформації, кластерізацію, формування нечіткої БД та самонавчання моделей.

В АСУТП нечіткі моделі (НМ) відіграють роль розпізнавання і прогнозування якості газу, контролю роботи мультиблоку, температури випікання хліба, відносної вологості пару у пекарній камері РП, концентрацію повітря витяжної вентиляції ротаційної печі, а саме вміст CO<sub>2</sub>. Інтелектуальна система з MES-системою оперативного керування температурним полем та з системою нейромережевого розпізнавання і класифікації ситуацій повинна забезпечувати адаптацію параметрів процесу випікання хліба в умовах врахування зміни зовнішніх умов: надходження борошна, відвантаження готових продуктів споживачу, постачання газу й електрики.

Розроблена архітектура АСУТП дозволяє ОПР своєчасно виявляти вплив поведінки того чи іншого параметру робочого процесу випікання хліба на зношення технічної системи ротаційної печі. Вона в темпі з процесом дозволяє розпізнавати відмови головних блоків ротаційної печі. Як показала практика експлуатації ротаційних печей на криворізьких хлібозаводах, ефективність їх роботи залежить від характеристики газу (роботи газового мультиблоку) та теплогенератора, що певною мірою відбивається на показниках надійності елементів і всієї системи в цілому [4].

Якщо в якості критерію прийняти показник  $Y_{np}$  – час надійної експлуатації елементів обладнання ротаційної печі, а засобами її досягнення  $X_e$  – час експлуатації, час відмови системи, кількість аварій та відмов, фізичні характеристики технічних блоків агрегатів РП, ступень зношеності, корозії, то тоді показник  $Y_{np}$  виразимо через залежність вигляду:

$$Y_{np} = F(X_e, A, \varepsilon), \quad (1)$$

де  $A$  – параметри технологічного процесу виробництва хліба, продуктивність, температура, вологість, контроль за надійною роботою елементів ротаційної печі, наявність ППР тощо,  $\varepsilon$  – відхилення, можливі збої, людський фактор тощо.

В умовах різних режимів роботи та експлуатації ротаційних печей розроблені моделі повинні мати здібність до навчання шляхом ідентифікації її параметрів і структурних елементів.

З метою розробки нечіткої моделі прогнозування рівня працездатності обладнання ротаційної печі необхідно розробити алгоритм пошуку несправностей, який зв'язує множину передумов відновлення  $X_e$  і множину появи відмов  $Y_{np}$ . Множину  $X_e$  будемо виявляти на основі оброблення інформації про параметри технологічного процесу і подіях на обладнанні ротаційної печі та системи газозабезпечення. Вхідна інформація надходить від інформаційної системи АСУ-АСУТП хлібозаводу – підприємства (верхній і середній рівень АСУТП – локальні системи керування роторними печами).

Інформація надходить у вигляді станів обладнання ротаційної печі: витрат газу, повітря, електрики, температури випікання, параметрів якості хліба. Ці дані надходять на сервер бази даних, де зберігаються.

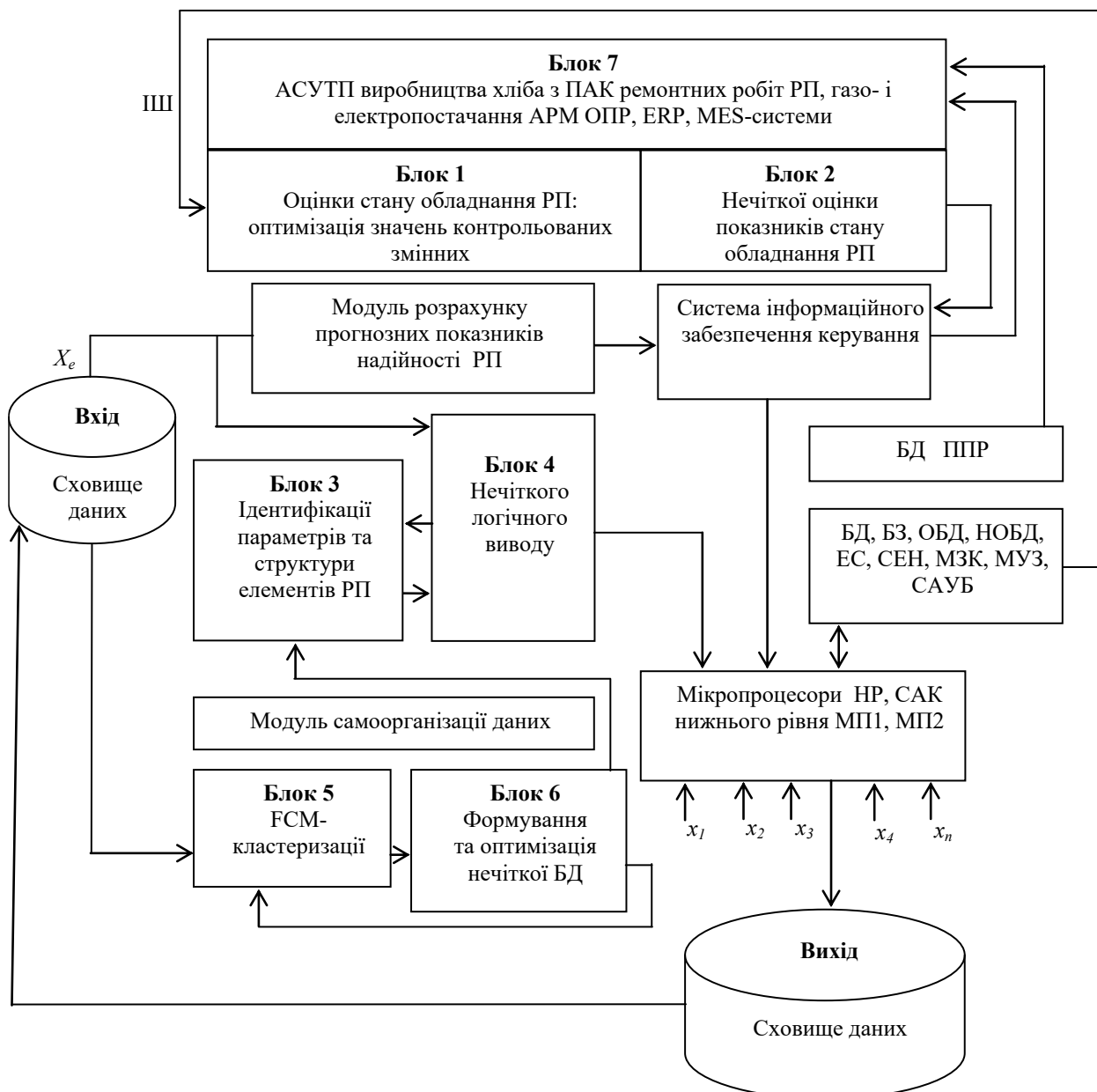


Рис. 6. Блок-схема АСУТП ротатійної печі

На першому кроці виконується визначення початкових умов для моделювання – попереднє оброблення інформації виробничих даних дільниці постачання тістових заготовок в пекарню камеру ротатійної печі – навчання нечіткої моделі. На цьому етапі за рахунок визначення найбільш значимих змінних і виділення областей впливу або інтервалів значень, які спричиняють той чи інший ефект, за допомогою процедури нечіткої кластеризації вдається підвищити ефективність навчання нечіткої моделі, знизити розмірність і витрати часу на її навчання. Після навчання нечітка модель підготовлена до керування процесом контролю обладнання ротатійної печі та її основних режимів роботи.

Розраховані на наступному етапі значення критеріїв надійності елементів і усієї системи обладнання ротатійної печі, її пекарної камери в реальному масштабі часу передаються і зберігаються в БД з метою використання як для налагодження моделі, так і для керування процесами випічки хліба, його охолодження, пакування та логістики. Останнім етапом буде слугувати процес виведення значень для ОПР і завершення роботи алгоритму.

З метою скорочення непланових ремонтних робіт і зупинок обладнання створено БД ППР, яка з ПАК виконує оптимізацію програми технічного обслуговування та ремонтів ротатійних печей. Система оцінює тривалість, затрати праці, вимоги щодо запасних частин і матеріалів відповідно до розробленої системи автоматизованого ППР. У процесі його виконання складаються відповідні даній процедурі документи в електронному вигляді: відомості, заяви, графіки, акти, звіти тощо.

На рис. 7 наведено алгоритм діагностики та керування процесом матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) ремонтів та обслуговування енергетичного обладнання ротатійної печі.

Особливу увагу щодо контролю надійної роботи ротатійної печі необхідно звернути на систему газопостачання та електропостачання. З цієї причини алгоритм діагностики та керування МТЗ ротатійної

печі розпочинає свою роботу з оцінки параметрів планування енергоносіїв – газу та електрики [5, 6]. Дані від ОПР надходять в АСУТП верхнього рівня управління ERP якого оцінює погодинну потребу енергоносіїв та потоки грошей від реалізації продукції. Середній рівень з MES-системами оперативного керування і програмним забезпеченням виконує планування продуктивності ротативних печей хлібозаводу, питомі витрати газу та електрики та його дільниць: підготовки борошна, виробництва опари та тіста. Середній рівень також визначає технологічні режими роботи пічної камери, її завантаження та оптимізує траєкторію виробництва  $n$  сортів хліба та відповідно оцінює питомі витрати енергоносіїв, води, повітря тощо. На третьому кроці алгоритм за допомогою методів нечіткого прогнозування оцінює залишковий ресурс енергетичних чинників та режимів роботи газового мультиблоку, частоту аварійного відключення газу, електрики, елементів резервування. Особа, яка приймає рішення (ОПР) на четвертому кроці алгоритму одержує необхідну інформацію для прийняття рішень щодо надійності роботи блоків ротативної печі та критично оцінює безпеку роботи обладнання (5 крок алгоритму). Якщо система оцінки безпеки роботи ротативної печі розпізнала дефект в системі газопостачання, то на шостому кроці алгоритм оцінює час безпечної роботи пекарної камери, щодо завершення процесу випікання (виробництва) хліба, якщо ні – оцінюється критичність ситуації, а, відповідно, відпрацювання команд «проведення профілактичного обслуговування» або «зупинка ротативної печі на ремонт». Верхній рівень АСУТП оцінює вартість ППО та ремонту, оптимізуючи операції технологічного обслуговування (ТО) та ремонту (Р) (крок 7). На восьмому кроці алгоритм з підсистемою ІСППРОР верхнього рівня АСУТП ротативної печі хлібозаводу виконує наступні операції:

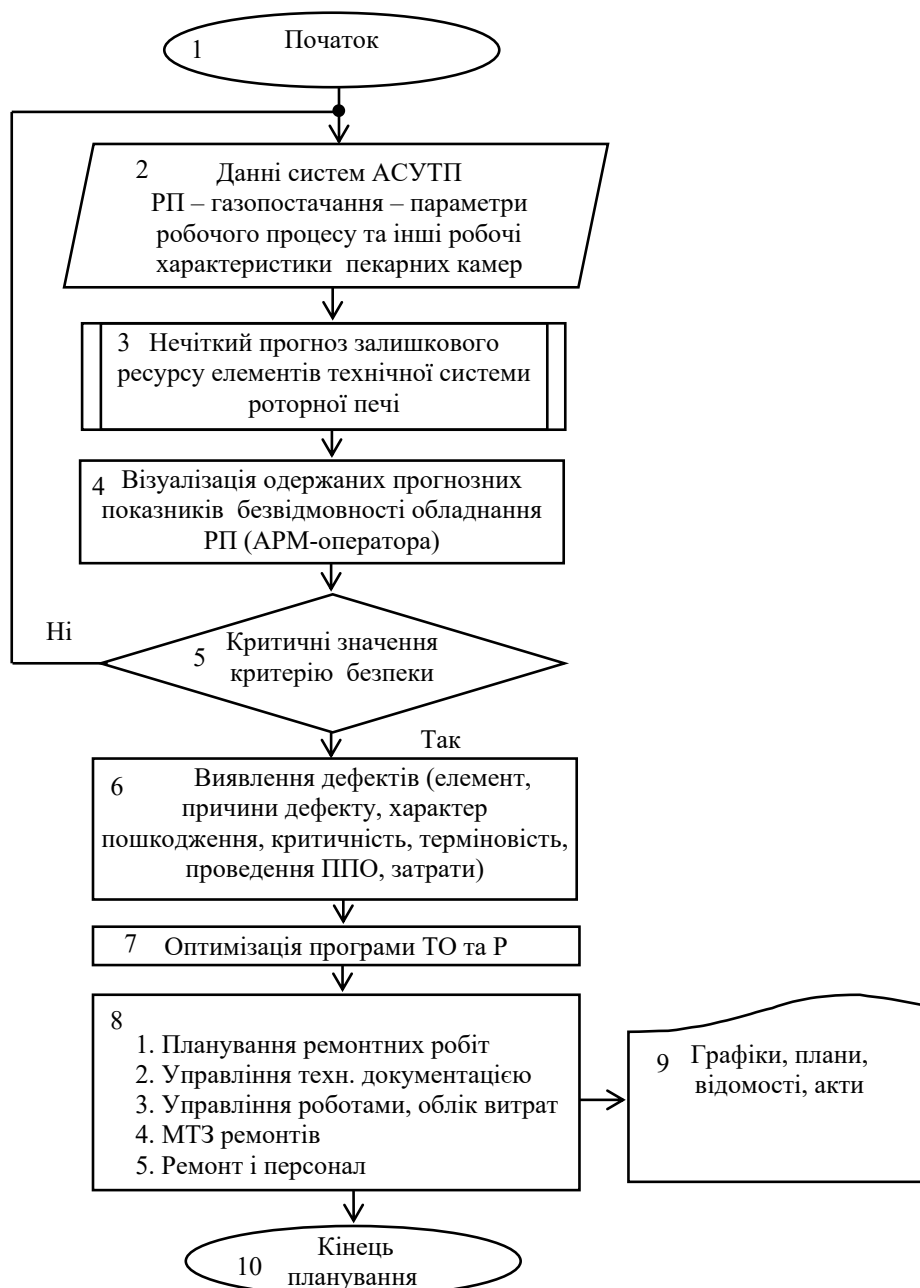


Рис. 7. Алгоритм діагностики та керування процесом матеріально-технічного забезпеченням (МТЗ) ремонтів та обслуговування енергетичного обладнання ротативної печі

- 1) планування ремонтних робіт;
- 2) управління технічною документацією;
- 3) управління виконанням ремонтних робіт і обліком витрат;
- 4) управління персоналом;
- 5) МТЗ ремонтів блоків.

Головне завдання системи керування виробництвом хліба – виконувати завдання споживачів продукції в умовах обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень електрики (найбільша невизначеність системи управління верхнього рівня) з метою постачання хлібобулочних виробів точно в термін у визначеній кількості. Інша умова відпрацювання оптимальної траєкторії виробництва хліба і графіка постачань в умовах дефіциту газу – переведення газопостачання ротаційної печі на альтернативні джерела.

В АСУТП, що керує на нижньому рівні технологічними процесами з локальними системами керування САК1, САК2, САК3 і вхідними змінними 1, 2, 3, ..., 7, 8, 9, ...,  $n$  сировинних і енергетичних ресурсів відокремлені такі підсистеми:

1. Підготовки сировини (приготування соляного розчину, цукрового розчину, дозування жирних продуктів, покращувачів та /або підсилювачів, диспергування додаткових інгредієнтів).

2. Підготовки опари.

3. Виробництва тіста.

4. Випікання в ротаційних печах.

5. Охолодження, пакування, логістики.

У кожній із зазначених підсистем впроваджено мехатронні пристрої МЗК, МУЗ, а саме: контроль параметрів очищеної води, борошна, газоутворюючої здатності борошна, густини рідких дріжджів, густини соляного та цукрового розчинів та інших рідких компонентів, вологості опари, густини опари, температури тіста, вологості тіста, кислотності опари, підйомної сили тістової заготовки, формоутворюючої здатності тістової заготовки, тривалості вистоювання тістових заготовок, пористості тістових заготовок, температури в шафі вистоювання, маси тістової заготовки. Контроль виконується за допомогою систем автоматизованого контролю САК1, САК2, САК3, СЕН, ЕС. Інформація до систем контролю надходить інформаційною шиною ІШ в АСУТП виробництва хліба та утворює підсистему оцінки якості хлібопродуктів типу «Система електронна НІС»(СЕН).

Запропоновано використати в системі моніторингу працездатності блоків ротаційної печі експертну систему (ЕС) та систему контролю енергопостачання газу і електрики з використанням інтерпретатора ПРОЛОГ [6, 7, 8]. Експертна система представляє собою машину логічного виведення інформації та складається з бази даних (БД) і бази правил (БП), в яких є опис алгоритмічного, функціонального і технологічного рівнів діагностики ротаційної печі. Для умов контролю постачання газу і електрики ЕС надає ОПР через дисплей АРМ наступну інформацію: потік газу – (має розрив) – сигнал датчика з реле мінімального тиску газу та стабілізатора тиску газу свідчить про відсутність цього параметру.

Цій аварійній події відповідає правило: «Якщо є розрив в трубопроводі постачання газу в газовий мультиблок, то є проблемна подія з виконанням виробничої програми випікання хліба». Надходить відповідна команда ЕС оператору ротаційної печі: «Перейти на резервне постачання газу». Експертна система на основі інтерпретатора ПРОЛОГ оцінює стан обладнання ротаційної печі та видає рекомендації щодо проведення планово-профілактичного ремонту.

Особлива увага ОПР привертається до роботи експертних систем моніторингу постачання газу й електрики за допомогою інтерпретатора, який працює на мові ПРОЛОГ. У нашому випадку моніторинг виконано в режимі реального часу (on-line) за допомогою Інтернет-речей (IoT). В основу розробленої моделі аналізу робочих характеристик ротаційної печі та енергетичного блоку (систем газопостачання та електропостачання) і технологічних процесів виробництва хліба, використана нейронна мережа прямого розповсюдження інформації. Вона складається із вхідного, вихідного і одного або декількох шарів нейронів [9, 10].

Вихід нейрона в шарі  $n + 1$  визначається відношенням:

$$y_j^{n+1} = f(S_j^{n+1}), \quad (2)$$

де  $n + 1$  – номер шару;

$j$  – індекс нейрона в шарі  $n + 1$ , ( $j = 1, N_{n+1}$ ),  $N_{n+1}$  – кількість нейронів в шарі  $n + 1$ ;

$f$  – активаційна функція шару  $n + 1$  (у нашому випадку будемо використовувати сигмоїдальну активаційну функцію  $f(x) = 1/(1 + e^{-ax})$ , а для вихідного шару – лінійна  $f(x) = ax$ ;

$y_j^{n+1}$  – вихід  $j$ -го нейрону шару  $n + 1$ ;

$S_j^{n+1}$  – постсинаптичний потенціал  $j$ -го нейрона шару, який обчислюється за формулою:

$$S_j^{n+1} = \sum_{k=1}^{N_n} W_{jk}^{n+1} y_k^n + b_j^{n+1}; S^{n+1} = W^{n+1} \tilde{y}^n, \quad (3)$$

де  $W_{jk}^{n+1}$  – вагові коефіцієнти зв'язку  $k$ -го нейрона шару  $n$  із  $j$ -м нейроном шару  $n + 1$ ;



$y_k^n$  – вихід  $k$ -го нейрона шару  $n$ ;

$\tilde{y}^n$  – розширений вектор з врахуванням порогу (*bias*-нейрону);

$b_j^{n+1}$  – *bias*-нейрон  $j$ -го нейрону шару  $n + 1$ .

Метою моніторингу в режимі реального часу є: оцінка стану обладнання і робочих характеристик борошна, інгредієнтів, процесу випікання й режимів роботи ротаційних печей.

У системі діагностики хлібопекарського обладнання хлібозаводу використано концепцію побудови засобів діагностичної підтримки людини-оператора та особи, що приймає рішення (ОПР). Це дозволяє будувати системи оперативної діагностики в складі діючих АСУТП підприємств харчової промисловості. Така технологія базується на поняттях загального поля даних і знань про об'єкт діагностування та інструментальних засобах і складається із:

1) неоперативного контуру з НБД, призначеного для вирішення задач, щодо створення верифікації баз даних, баз знань та операторського інтерфейсу;

2) оперативного контуру з ОБД, призначеного для вирішення задач інтелектуальної інформаційної підтримки людини-оператора в режимі реального часу.

Бази даних (БД) поділимо на оперативні (ОБД) та нормативні (НБД). Перші містять змінні, які характеризують поточний стан об'єктів діагностики. Другі включають нормативний опис стану технологічного обладнання хлібозаводів.

Бази знань (БЗ) реалізуються моделями семіотичного типу і розділяються на неоперативні й оперативні [9, 10]. Перші мають тестовий опис діагностичних моделей знань для кожного елементу обладнання, що піддається такій діагностиці. Інші мають бінарні діагностичні моделі знань для оперативної діагностики елементів газового мультиблоку обладнання ротаційної печі, витяжних вентиляторів, теплообмінника тощо.

Бази знань представляють собою ієрархію моделей знань, яка відповідає ієрархії обладнання ротаційної печі та забезпечення її газом і електрикою в періоди вیاєлових відключень енергопостачання для конкретного виробничого процесу хлібозаводу.

Перехід від БЗ інтерпретатора ЕС реалізується в неоперативному контурі транслятором текстових баз знань. Верифікація відтрансльованих моделей діагностики виконується в мікропроцесорі задач неоперативного контуру МП1. Оперативне оброблення діагностичних моделей виконано за допомогою мікропроцесора задач діагностики оперативного контуру МП2. Особливістю експертної системи діагностики хлібозаводу є оброблення даних систем вимірювання і оцінка сигналів з датчиків, наприклад контролю працездатності ротаційної печі та надання оператору рекомендацій щодо технологічного обслуговування енергетичного та газового обладнання, а також виконання планових ремонтів та ППР.

### Висновки

Розроблено систему оцінки надійності обладнання з моніторингом стану енергетичних чинників, що спроектована для умов хлібозаводів Придніпровського економічного регіону. Ознакою такої системи є основні положення надійності складних систем, алгоритми та системи моніторингу з розпізнаванням аварій, аварійних ситуацій, що виникають у процесі експлуатації ротаційних печей. Головну увагу в системі звернено на розробку експертної системи контролю забезпечення ротаційних печей енергоносіями (газом, електрикою) та їх резервування.

### Література

1. Швед С. М., Ельперін І. В. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2012. № 613(60). С. 44–46.
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. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів : монографія; за заг. ред. В. П. Хорольського. Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д.О. 2019. 203 с. ISBN 978-617-7784-12-7.
5. Ладанюк А. П., Заєць 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. ISBN 978-617-7320-34-9.
6. Гончаренко Б. М., Ладанюк А. П. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій. Київ : НУХТ, 2014. 530 с. ISBN 978-966-612-163-2.
7. Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів : підручник. Київ : Видавництво Ліра-К, 2015. 378 с.
8. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посіб. Київ : Вид-во «Ліра-К», 2015. 552 с. ISBN 978-966-2174-13-7.

9. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій : підручник. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2023. 557 с. ISBN 978-966-385-389-5.

10. 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. ISBN 978-617-8045-18-0.

#### References

1. Shved S. M., Elperin I. V. Systemnyi analiz tekhnolohichnoho protsesu vyrobnytstva khlibobulochnykh vyrobiv. Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2012. № 613(60). S. 44–46.

2. Sharuda S. S., Kyshenko V. D. Intelktualna systema stsenarnoho upravlinnia khlibopekarskym vyrobnytstvom. Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2010. № 5/3 (47). S. 66–70.

3. Sharuda S. S., Kyshenko V. D. Imitatsiine doslidzhennia systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy khlibozavodu. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2011, № 3. S. 14–16.

4. Intelktualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv : monohrafiia; za zah. red. V. P. Khorolskoho. Kryvyi Rih : Vydavets FO-P Cherniavskiy D.O. 2019. 203 s. ISBN 978-617-7784-12-7.

5. Ladaniuk A. P., Zaiets N. A., Vlasenko L. O. Suchasni tekhnolohii konstruiuvannia system avtomatyzatsii skladnykh ob'ektiv (merezhevi struktury, adaptatsiia, diahnozyka ta prohnozuvannia) : monohrafiia. Kyiv : Vydavnytstvo Lira-K, 2016. 312 s. ISBN 978-617-7320-34-9.

6. Honcharenko B. M., Ladaniuk A. P. Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv kharchovykh tekhnolohii. Kyiv : NUKhT, 2014. 530 s. ISBN 978-966-612-163-2.

7. Elperin I. V., Pupena O. M., Sidletskiy V. M., Shved S. M. Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv : pidruchnyk. Kyiv : Vydavnytstvo Lira-K, 2015. 378 s.

8. Pupena O. M., Elperin I. V., Lutska N. M., Ladaniuk A. P. Promyslovi mrezhi ta intehratsiini tekhnolohii v avtomatyzovanykh systemakh : navch. posib. Kyiv : Vyd-vo «Lira-K», 2015. 552 s. ISBN 978-966-2174-13-7.

9. Khorolskyi V. P., Korenets Yu. M. Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv kharchovykh tekhnolohii : pidruchnyk. Kryvyi Rih : DonNUET, 2023. 557 s. ISBN 978-966-385-389-5.

10. Khorolskyi V. P., Korenets Yu. M., Serebrennikov V. M. Avtomatyzovani systemy keruvannia vyrobnytstvom smart-produktiv kharchuvannia : monohrafiia. Kryvyi Rih : Vydavets Cherniavskiy D.O., 2021. 311 s. ISBN 978-617-8045-18-0.