

*Хорольський В. П., д-р техн. наук,
професор
Коренець Ю. М., старший викладач
Перекрест В. В., асистент
Нікітін Д. О., здобувач ВО ступеня
магістра*

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

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ РОТОРНИХ ПЕЧЕЙ ХЛІБОЗАВОДІВ

UDC 681.51:(664.6/.7:664.655.041)(045)

*Khorolskyi V. P., Grand PhD of
Engineering Science, Professor
Korenets Yu. M., Senior Lecturer
Perekrest V. V., Assistant Professor
Nikitin D. O., 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

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT RELIABILITY ASSESSMENT SYSTEMS ROTOR OVENS OF BAKERY FACTORIES

Мета. Метою статті є дослідження питань підвищення працездатності технологічного обладнання для виробництва хлібобулочних виробів із заданими характеристиками якості за рахунок його захисту від аварій.

Методи. З метою моделювання процесів випічки хліба та впливу експлуатаційних відмов елементів роторної печі на працездатність усієї технічної системи виробництва хліба запропоновано використати формалізовані методи побудови та аналізу причинно-наслідкових зв'язків між подіями (відмовами) та вихідними показниками якості системи. Використані методи є графічними і дозволяють моделювати можливі події, несправності, а також дослідити ймовірність виникнення аварій, які з'являються в роторних печах. Після цього виконується нечітке моделювання стану надійності роторних печей (розробляється нечітка база знань, лінгвістичні змінні, які задані на універсальних множинах, їх термів множини, функції належності, правила в нечіткій базі) та проектується інтелектуальні системи керування захисту роторних печей від аварій.

Результати. Розроблена система оцінки надійності обладнання з моніторингом стану енергетичних чинників спроектована з урахуванням умов місцевих хлібо заводів. Основною ознакою такої системи є алгоритми та системи моніторингу, розроблені відповідно до положення надійності складних систем, які включають функції розпізнавання аварій, аварійних ситуацій, що виникають у процесі експлуатації роторних печей. Головну увагу в системі спрямовано на розробку алгоритмів контролю забезпечення роторних печей енергоносіями (газом, електроенергією) та їх резервування. У статті обґрунтовано теоретичні основи оцінки рівня надійності обладнання роторних печей, газопостачання пекарних камер

© Хорольський В. П., Коренець Ю. М.,
Перекрест В. В., Нікітін Д. О.

та заходи з оптимізації їх роботи. Розроблено методи і алгоритми оцінки працездатності роторних печей та їх робочих блоків.

Моделювання процесів виробництва хліба та вплив експлуатаційних відмов елементів роторних печей на працездатність усієї технічної системи обладнання хлібозаводу виконано з використанням формалізованих методів виявлення причинно-наслідкових зв'язків між подіями (відмовами) та вихідними показниками технологічного обладнання.

Моніторинг стану обладнання роторних печей і розробка автоматизованої системи управління технологічними процесами на базі нечіткого виведення інформації про працездатність основних блоків роторних печей дозволяє операторам на базі нейронечіткого керування комплексом одержувати швидкодіючу оцінку працездатності обладнання хлібозаводів за критерієм втрати якості хлібопродуктів.

На основі впровадження інтелектуальних підсистем діагностики буде досягнуто: підвищення ефективності роботи обладнання роторних печей за рахунок оптимізації параметрів газопостачання та за рахунок зниження кількості відмов до 25% за рік; виконання переходу від стратегії планового сервісного обслуговування до стратегії обслуговування обладнання хлібозаводів за фактичним технічним станом; забезпечення зниження витрат на ремонт і післяаварійне обслуговування роторних печей хлібозаводів.

Ключові слова: роторна піч, моделі, причинно-наслідкові зв'язки, діагностика, система керування.

Постановка проблеми. Головне завдання хлібопекарної промисловості Придніпровського регіону в умовах впровадження воєнного стану в Україні – стабільне забезпечення населення високоякісними хлібобулочними виробами. Це завдання тісно пов'язане не лише з логістикою сировини і персоналу, але, й із постачанням електрики, газу, води. Важливим постає також й екологічний аспект організації такого виробництва, як-то забезпечення мінімізації викидів CO₂ у довкілля.

Актуальним завданням сьогодення також є постачання місцевого населення хлібобулочними виробами лікувально-профілактичного та/або дієтичного призначення для підтримки здоров'я людей у складних умовах життя, роботи, військової служби.

З цією метою криворізькі підприємства ПРАТ «КРИВОРІЖХЛІБ», ТОВ «КРИВОРІЗЬКИЙ ХЛІБОЗАВОД №1», ПАТ «ХЛІБ», ПРАТ «УКРАЇНСЬКІ ХЛІБНІ ТРАДИЦІЇ» та інші заводи регіону за останні місяці накопичили значний досвід з модернізації обладнання та забезпечення його надійної роботи в періоди обмежень постачання енергоресурсів.

Для світової практики виробництва хліба в останнє десятиріччя характерним є використання сучасного технологічного обладнання відомих фірм GOSTOL (Словенія), FRITSCH, DIOSNA, HARTMAN (ФРН), GLIMEK (Швеція), KONIG (Австрія), яке на сьогодні має високий рівень автоматизації, побудованої на базі SCADA-систем. Таке обладнання розраховане на однорідну за якісними показниками сировину та використання поліпшувачів і підсилювачів тіста.

У свою чергу, значення якісних показників хлібобулочних виробів залежить:

- 1) від стабільної і надійної роботи технологічного обладнання;
- 2) від рівня знань технологів-операторів виробничих процесів;
- 3) від рівня інформаційного та алгоритмічного забезпечення, інтелектуально-інформаційної підтримки прийняття рішень особи, яка приймає оперативні рішення.

Забезпечити вищенаведені умови можливо за рахунок підвищення рівня інтелектуалізації керування обладнанням в періоди обмежень постачання енергоносіями та віялових відключень електрики, використання спеціального програмного забезпечення, своєчасного розпізнавання аварійних ситуацій та аварій, регулярного виконання персоналом технологічного обслуговування обладнання хлібопекарського виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями автоматизації процесу виробництва хліба в Україні традиційно займається багато вчених і наукових колективів із

різних закладів вищої освіти. На розвиток цього напрямку наукових досліджень значною мірою вплинули роботи вітчизняних вчених А. П. Ладанюка, І. В. Ельперіна, Б. М. Гончаренка, В. Г. Трегуба, С. М. Шведа, С. С. Шаруди, В. Д. Кишенька [1-5] та багатьох інших.

Вивчені джерела, пов'язані із обраним напрямом досліджень, дали змогу виявити проблему використання існуючих методів і методик прогнозування показників мікроклімату пекарних камер для випікання різних сортів хліба, прогнозування надійності роботи роторних печей у темпі з процесом, вибір оптимальної системи завантаження тістових заготовок в пекарню камеру з визначенням і врахуванням моментів виникнення відмов (збурень).

Поряд із цим визначено, що дослідження несправностей блоків роторної печі може проводитись експертами за умов нечіткої інформації про технологічний процес виробництва хліба. Це важливе питання будемо розглядати на основі системного підходу, оскільки роторна піч віднесена авторами згаданих праць до складних, нелінійних динамічних систем із слабо структурованими чинниками керування.

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

Виклад основного матеріалу. У процесі аналітичного аналізу технологічного процесу випікання хлібопродуктів у роторних печах нами визначено, що роторна піч працює в режимах постійних збурень, завад, у тому числі і за рахунок помилок персоналу, неточностей вимірювання технологічних параметрів. Із-за цього різко зменшується можливість використання детермінованих і статичних моделей.

У таких умовах високу ефективність показали нечіткі моделі [6, 7], які мають низьку чутливість до завад і погрішностей вимірів якісних параметрів. Також вони характеризуються можливістю швидко налаштовуватись під конкретні умови технологічного процесу, як-то надходження нової партії борошна або інших інгредієнтів, зміна якості газу, віялові відключення електрики тощо.

На основі вищесказаного можна констатувати, що розробка методу оцінки працездатності роторних печей хлібозаводу, який дозволив би оператору за допомогою інтелектуальних систем підтримки прийняття оперативних рішень (ІСППОР) оперативно прогнозувати умови і час появи відмов, визначати їх вплив на основні сукупності параметрів термообробки у процесі виробництва хліба, отримувати статистичні дані про відмови вузлів обладнання роторних печей (РП), можлива за рахунок розробки інтелектуальної системи розпізнавання аварій та аварійних ситуацій.

Вирішення поставленої проблеми можливе за рахунок використання сукупності таких способів оброблення нечіткої інформації, як теорія нечіткої логіки, експертних систем, нейронних мереж та інтелектуальних технологій [8].

Для умов системи виробництва хліба на хлібозаводах регіону до найбільш відповідальних елементів технічної системи обладнання роторної печі експертна група проекту віднесла пекарню камеру, мотор-редуктор, систему енергопостачання, парогенератор, газовий мультиблок, систему витяжної вентиляції.

Завдання персоналу в період експлуатації роторної печі полягає в створенні та підтримуванні нормативних температур щодо процесу випікання хліба, температурних режимів і забезпечення заданих параметрів мікроклімату пекарної камери. Ці складові позначимо у вигляді множин U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 .

Спочатку розробимо моделі причинно-наслідкових зв'язків (дерево відмов) обладнання роторної печі. Ці моделі наведені на рисунках 1-5.

При цьому в основі механізму розповсюдження збурень по структурі системи розповсюджена думка експертів команди проекту, що імпульс впливу відмови елементу накопичується і зменшується як показники надійності окремих елементів системи обладнання роторної печі хлібозаводу, так і системи в цілому [4, 8].

$$U = \sum f(V_{ij}) = f(V_{1j}) + f(V_{2j}) + f(V_{3j}) + f(V_{4j}) + f(V_{51j}). \quad (1)$$

U_1 – несправність (відмова) електродвигуна	V_{11} – технічний стан вентилятора	<u>Зношення в процесі експлуатації</u> <u>Інтенсивне спрацювання опорних підшипників ротора</u>
		<u>Несправність механізмів вентилятора</u> <u>Підвищена вібрація корпусу печі</u>
	V_{12} – порушення герметичності	<u>Несправність парогенератора</u> <u>Неправильне центрування вала в корпусі</u> <u>Порушення в системі витяжної вентиляції</u>
		<u>Порушення технології експлуатації роторної печі</u> <u>Порушення температурних режимів</u>
		<u>Порушення притирання кілець тертя</u>
	V_{13} – втрата температури через корпус	<u>Зношення гумових кілець</u> <u>Втрата повітря через сальники запірної арматури</u> <u>Втрати герметизуючих властивостей паронітових прокладок</u>
		<u>Відмови (поломка) електроприводу поворотного столу</u>
	V_{14} – втрата працездатності поворотного столу	<u>Несправності мотор-редуктора вентилятора охолодження</u> <u>Мала величина заслінок дверей</u>

Рисунок 1 – Дерево відмов для множини U_1 – причин несправностей (відмов) електродвигуна роторної печі

Втім найбільший вклад у сумарний ризик надходження несприятливих подій вносять елементи з множиною відмов U_1 і U_3 .

Отже, газовий мультиблок зі стабілізатором тиску газу та реле мінімального тиску газу є ключовою частиною системи надійності обладнання роторної печі. А найбільш ефективною для забезпечення безпеки є розробка технологічної карти режимів роботи печі, технологічних експлуатаційних заходів, спрямованих на зниження ймовірності і наслідків можливих відмов, пов'язаних з постачанням газу, на якість хліба.

Для прогнозування відмов теплового і газового обладнання роторної печі відзначимо особливості, які дозволяють віднести роторну піч до складних систем керування та діагностики.

Для прогнозування відмов приймаємо до уваги факт, що системи керування роторними печами, які вивчаються, є унікальними, інколи виготовлені зі специфікою виробництва хлібопродуктів із різного борошна та можуть працювати в широкому діапазоні температурного поля камери і зміни параметрів газу, з різною корозійною активністю тіста, відрізняються історією експлуатації (термін служби роторних печей, історія поточних і капітальних ремонтів), конструктивним виконанням.

Наявність планово-профілактичних ремонтів (ППР) призводить до того, що в роботі роторних печей одночасно можуть знаходитись елементи, які жодного разу не відмовляли (хоч найбільш відповідальні елементи замінювалися, незважаючи на те, що вони ще працездатні), та такі, що піддавалися відновленню після відмови за допомогою ремонту без заміни. Тому необхідно виокремити в досліджуваній системі такі компоненти роторної печі, вихід із ладу яких призведе до втрати працездатності усієї системи виробництва хліба.

У таблиці 1 наведена інформація про причини виходу із ладу відповідних елементів обладнання роторної печі, визначена на основі експертних оцінок.

U_2 – відмови газового і електричного обладнання роторної печі		Зношення АД в процесі експлуатації редуктора
		Людський фактор – помилки оперативного персоналу
	V₂₁ – несправність електрообладнання АД-ТПЧ	Несправність системи включення-виключення ТПЧ
		Несправність системи контролю АСК АД-ТПЧ
		Контроль параметрів потужності, питомих витрат
		Несправність апаратури захисту АД або ТПЧ
		Витрати електроенергії та витрати газу
		Несправності датчиків контролю
		Несправності АРМ-оператора
	V₂₂ – несправності АСК газопостачання	Контроль виробничої ситуації
		Зниження продуктивності пекарної камери роторної печі
		Система контролю витрат газу
		Система несправності контролю постачання: газу, тиску, температури
		Несправності датчиків тиску, температури, вібрації в САК діагностиці
	V₂₃ – несправність систем автоматичного контролю температурних режимів камери роторної печі	Зниження витрат пари для зволоження заготовок тіста
		Контроль температурного поля камери та поверхні хліба
		Контроль тиску газу системи газопостачання
		Збої в системі АРМ, ПЗ, ІСПІЕ
		Контроль температури готового продукту
		Збої в системі промислового Інтернету-речей
	V₂₄ – контроль якості готової продукції	Збої в системі MES, ERP-розподілу продукції
		Збої в системі оцінки якості процесів упакування
		Несправність датчиків температури повітря
		Збої в системі шокowego заморожування
		Збої в системі логістики

Рисунок 2 – Дерево відмов для множини U_2 – причин відмов газового і електричного обладнання роторної печі

Таким чином, визначені найбільш відповідальні елементи в складі технічної системи: роторна піч – температурне поле пекарної камери – теплогенератор – газовий мультиблок – система вентиляції – АСУТП з інтелектуальною системою діагностики – системи газопостачання та електропостачання. У нашому випадку з метою побудови математичних моделей і алгоритмів керування процесом виробництва хліба необхідно покладатися на рекомендації експертів. Після чого, з урахуванням знань спеціалістів про ступень якості

процесу виробництва продукції та наслідків відмов обладнання роторної печі, необхідно параметрично оцінити втрати прибутку.

Людський фактор – помилки операторів роторних печей					
	V ₃₁ – несправність обладнання парогенератора	Несправність парогенератора: зменшення продуктивності			
		Несправність вентиляторної групи: зниження тиску			
		Збої систем автоматизованого керування			
			Відсутність змащення робочих деталей редуктора		
			Відхилення тиску та температури від номінальних значень		
			Відхилення від оптимального теплового режиму зменшує продуктивність роторної печі		
		Несправність системи відключення газу	Несправність реле мінімального тиску газу роторної печі		
			Забруднення штуцерів запобіжного клапану та датчика тиску газу		
			Температурно-повітряний баланс витрат газу не відповідає нормі		
		U ₃ – пекарна камера роторної печі	V ₃₂ – несправність газового мультиблоку	Наявність значних відхилень витрат електрики	
				Технологічні перевантаження → збільшення експлуатаційних витрат на одержання тонни хліба	
				Наявність значних відхилень витрат газу	
	Несправність електродвигунів вентиляторів	Зміни режимів електрозабезпечення двигунів РП, ремонт виводів електродвигунів, ушкодження ізоляції вивідних кінців			
		Неузгодженість систем керування швидкістю АД-ТПЧ витяжних вентиляторів роторної печі			
	V ₃₃ – несправність в системі витяжної вентиляції	Відхилення параметрів газового мультиблоку, що знижує корисні властивості продукту та їх термін придатності			
		Небажані надходження повітря від запобіжних клапанів			
		Нераціональні параметри надходження теплоти від вентиляції, пекарної камери			
		Порушення технологій зберігання продуктів харчування			

Рисунок 3 – Дерево відмов для множини U_3 – відхилень параметрів пекарної камери роторної печі

Таким чином, якість хліба і надійність обладнання роторної печі за визначенням експертів мають високі кореляційні зв'язки. Отже необхідно розробити алгоритм керування й

систему контролю та розпізнавання аварійних ситуацій та систему автоматизованого захисту від аварій.

		Розпізнавання аварійних ситуацій
	V ₄₁ – витрати газу	Технологічні порушення експлуатації
		Контроль парових пробок (утворення) і тиску
		Контроль параметрів тиску, вібрації, температури, вологи, рН, витрат газу, CO ₂
U ₄ – відмови постачання газу		
	V ₄₂ – відхилення продуктивності	Контроль відхилення поточної продуктивності
		Контроль температури
		Контроль підвищення температури

Рисунок 4 – Дерево відмов для множини U₄ – відмов у постачанні газу

	V ₅₁ – відхилення температури випікання хліба від нормованих показників	Людський фактор
		Технологічні порушення умов зберігання продукту
		Відносні затрати газу
U ₅ – мікроклімат пекарної камери	V ₅₂ – відхилення параметрів мікроклімату від заданих	Вологість повітря в камері
		Температура продукту
		Час роботи печі - випікання
	V ₅₂ – відхилення параметрів мікроклімату від заданих	Параметри CO ₂
		Якість хліба (продукту)

Рисунок 5 – Дерево відмов для множини U₄ – відмов у постачанні газу

Таблиця 1 – Інформація про параметри технологічного процесу випікання хліба

Інформація надається постійно в процесі виробництва хлібопродуктів	Інформація надається на АРМ диспетчера-оператора один раз за зміну
1. Продуктивність роторної печі. 2. Витрати газу, електрики. 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. 7. Інформація надається на АРМ оператора у вигляді строки бази даних із робочої станції оброблення даних РП хлібозаводу.	1. Тип продукції. 2. Вимірювання температури в пекарній камері роторної печі. 3. Вимірювання якості продукції в процесі надходження тістової заготовки в камеру. 4. Оптимальні режими роботи системи випікання хліба. 5. Стійкість обладнання роторної печі до збурень. 6. Дані про витрати електрики, газу, повітря тощо. 7. Дані про зупинку обладнання, параметри завантаження-розвантаження пекарної камери.

8. Параметри теплових камер-хлібозаводу. Дані про геометричні параметри та властивість продуктів харчування (робочі характеристики хліба).	8. Дані про можливі дефекти обладнання і фактичну якість продукції. Планування значення технологічних параметрів розвантаження-охолодження хліба.
--	---

Алгоритм і система розпізнавання аварійних ситуацій побудовані на основі математичної теорії нечітких множин (нечіткої логіки), коли в системі керування процесом випікання хліба в пекарній камері застосовано нейромережевий регулятор (НМ-Р) з архітектурою входів $N(e_k, Y_k)$ [8-10].

Управлінські впливи на об'єкт – роторну піч – розраховуються у відповідності з рівнянням:

$$U_k = N^{FFC}(r_k) + N^{FBC}(r_k, Y_k, U_{k-1}), \quad (2)$$

де r_k – вставка;

Y_k – вихід об'єкта, який можливо спостерігати;

U_{k-1} – управлінські впливи, які сформовані в попередній момент часу.

З метою надання динамічних властивостей НМ-Р використовуються різні кількісні параметри на вході, подання на вхідний шар нейронної мережі вставки та дискретні похідні першого і другого порядку. Також в якості входів можливо використати похідні сигнали помилки:

$$N(e_k, e'_k), N(e_k, e'_k, e''_k, \dots, e^n_k). \quad (3)$$

У цій системі НМ будуть відігравати роль розпізнавання і прогнозування якості вхідної сировини готової продукції в умовах контролю роботи мультиблоку, температури випікання хліба, відносної вологості пару у камері РП, концентрації повітря витяжної вентиляції роторної печі, а саме вмісту CO_2 . Інтелектуальна система керування температурним полем з системою нейромережевого розпізнавання і класифікації повинна забезпечувати адаптацію параметрів процесу випікання хліба в умовах врахування зміни зовнішніх умов: надходження борошна та відвантаження готової продукції.

На рис. 7 наведено приклад алгоритму керування процесом виробництва подових сортів хліба та режимів роботи роторної печі, чинниками витрат газу та електрики.

На базі розробленого алгоритму запропонуємо інтелектуальну систему керування роторною піччю, яка наведена на рис. 8.

Розроблена модель дозволяє ОПР своєчасно виявляти вплив поведінки того чи іншого параметру робочого процесу випікання хліба на зношення технічної системи роторної печі. Вона в темпі з процесом дозволяє розпізнавати відмови головних блоків роторної печі. Як показала практика експлуатації роторних печей на криворізьких хлібозаводах, на їх працездатність впливають характеристики газу (робота газового мультиблоку) та теплогенератора, що впливає певною мірою на показники надійності елементів і всієї системи в цілому [8].

Якщо в якості критерію прийняти показник Y_{np} – час надійної експлуатації елементів обладнання роторної 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. Тоді показник Y_{np} виразимо через залежність виду:

$$Y_{np} = F(X_E, A, \varepsilon), \quad (4)$$

де A – параметри технологічного процесу виробництва хліба: продуктивність, температура, вологість, контроль за надійною роботою елементів роторної печі, наявність ППР тощо;

ε – відхилення, можливі збої, людський фактор тощо.

В умовах різних режимів роботи та експлуатації роторних печей розроблена модель повинна мати здібність до навчання шляхом ідентифікації її параметрів і структурних елементів.

З метою розробки нечіткої моделі прогнозування рівня працездатності обладнання роторної 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 подій в обладнанні роторної печі та системи газозабезпечення.

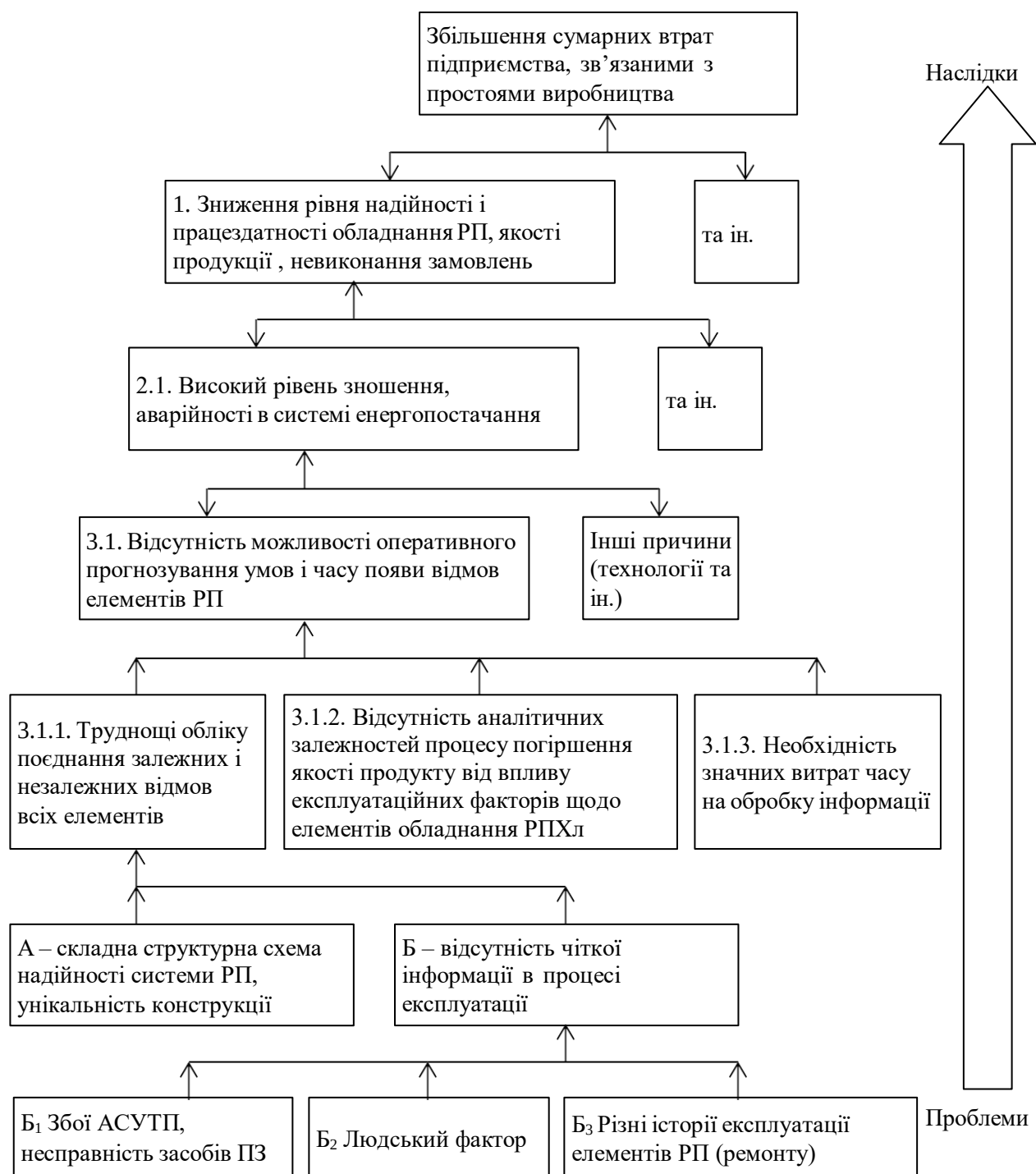


Рисунок 6 – Дерево проблемних ситуацій щодо прийняття рішення про оцінку працездатності обладнання роторної печі хлібозаводу

Джерелом вхідної інформації є АСУ-АСУТП підприємства – хлібозаводу (верхній і середній рівень АСУТП – локальні системи керування роторними печами).

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

На першому кроці виконується визначення початкових умов для моделювання – попереднє оброблення інформації виробничих даних ділянки постачання тістових заготовок в пекарню камеру роторної 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 затрати часу на її навчання алгоритмам ідентифікації.

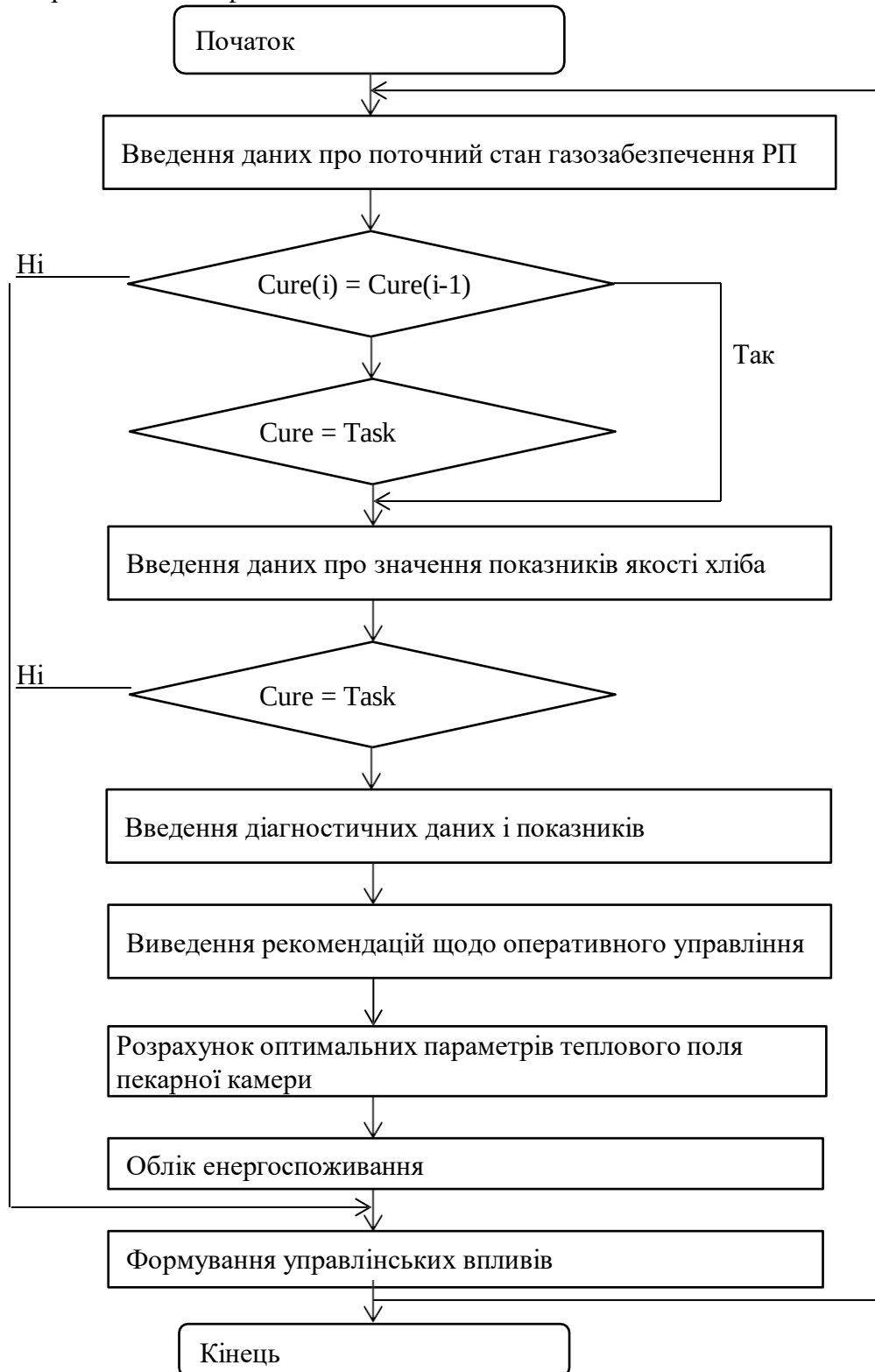


Рисунок 7 – Алгоритм керування процесом випікання хліба

Опишемо також узагальнений алгоритм прийняття рішень з точки зору надійної експлуатації обладнання роторної печі та газозабезпечення пекарних камер хлібозаводу (планування ремонтних робіт щодо технічного стану обладнання РП) в режимі реального часу, інтегрованими з АСУТП хлібозаводів. Блок-схема алгоритмів наведена на рис. 8–9.

Зібрані дані обробляються в сервері додатків, де виконується нечіткій розрахунок прогнозу і запис його в базу даних. Із сервера бази даних значення контрольованих параметрів і прогноз кількості відмовлень конкретних технічних пристроїв РП надходять на термінали робочих станцій операторів роторних печей (АРМ – оператора).

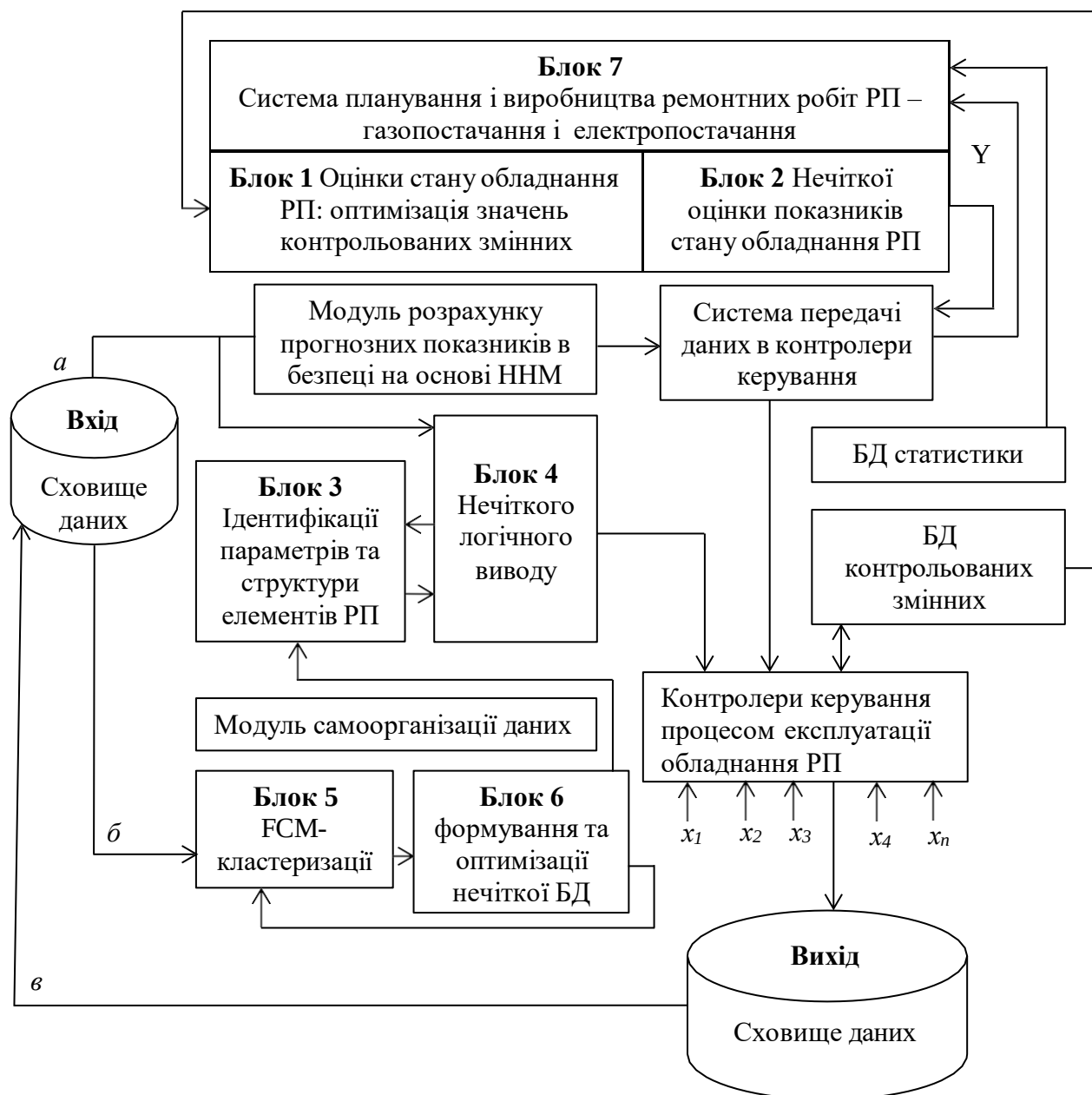


Рисунок 8 – Системна модель оцінки працездатності обладнання роторної печі

У подальшому відбувається формування нейронечіткого виведення:

1. Нечітке моделювання (нечітка база знань, лінгвістичні змінні, які задані на універсальних множинах, їх термів множини, функції належності, правила в нечіткій базі).

2. Ідентифікація нечіткої моделі (коефіцієнтів лінійних рівнянь – c , параметрів функцій належності – d , кількість правил – n) розробленими алгоритмами. Після навчання нечітка

модель підготовлена до керування процесом контролю обладнання роторної печі та її основних режимів роботи.

3. Розраховані на наступному етапі значення критеріїв надійності елементів і усієї системи обладнання роторної печі її пекарної камери в реальному масштабі часу передаються і зберігаються в БД для використання як для налагодження моделі, так і для керування процесами випічки хліба, його охолодження, пакування та логістики.

Останнім етапом буде слугувати процес виведення значення ОПР і завершення роботи алгоритму.

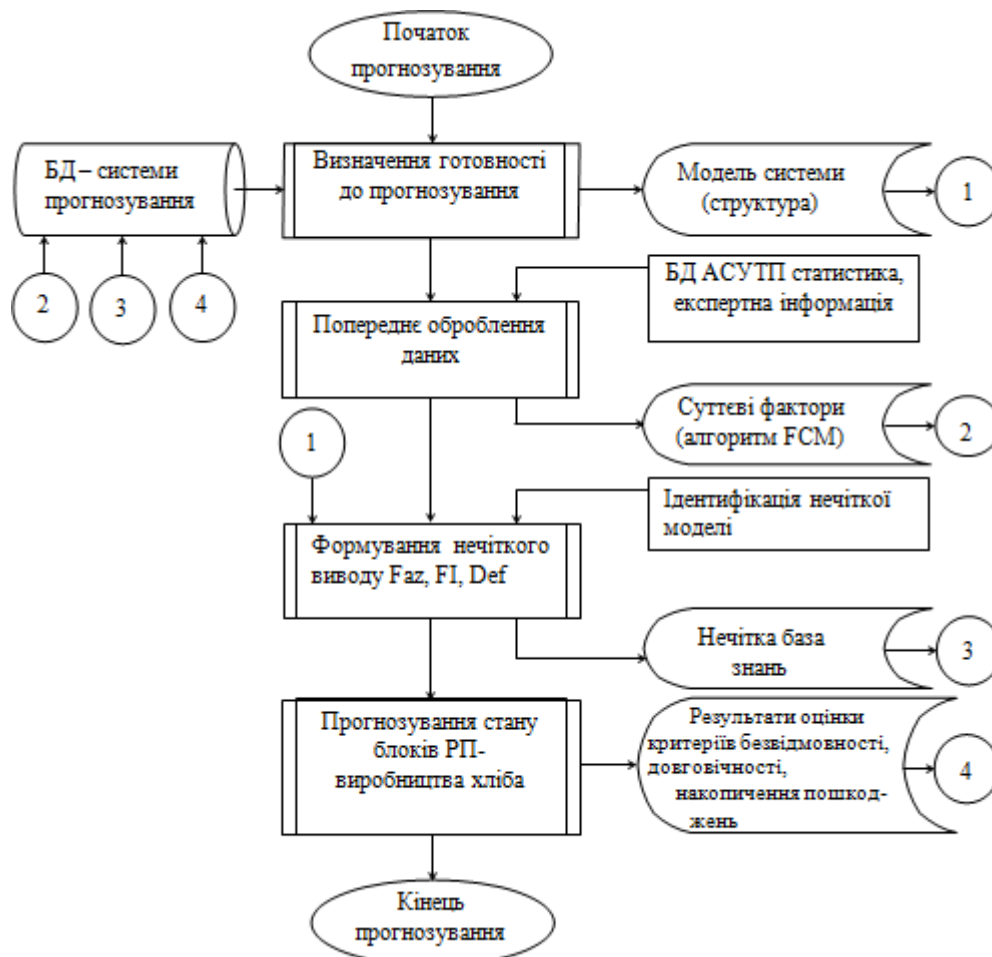


Рисунок 9 - Блок-схема алгоритму функціонування системи оцінки стану обладнання роторної печі системи газозабезпечення пекарної камери

У подальшому, з метою скорочення непланових ремонтних робіт і зупинок обладнання, виконується оптимізація програми технічного обслуговування та ремонтів, його тривалості, витрат праці, вимог щодо запасних частин і матеріалів відповідно до розробленої системи автоматизованого ППР. У процесі її виконання складаються відповідні документи в електронному вигляді: відомості, заяви, графіки, акти, звіти тощо.

На рис. 10 наведено алгоритм діагностики та керування процесом матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) ремонтів та обслуговування енергетичного обладнання роторної печі. Особливу увагу щодо контролю надійності роботи роторної печі необхідно звернути на систему газопостачання та електропостачання. Тому алгоритм діагностики та керування МТЗ роторної печі розпочинає свою роботу з оцінки параметрів планування енергоносіїв – газу й електрики. Дані від ОПР надходять в АСУТП верхнього рівня

управління, ERP якого оцінює погодинну потребу енергоносіїв та потоки грошей від реалізації продукції.

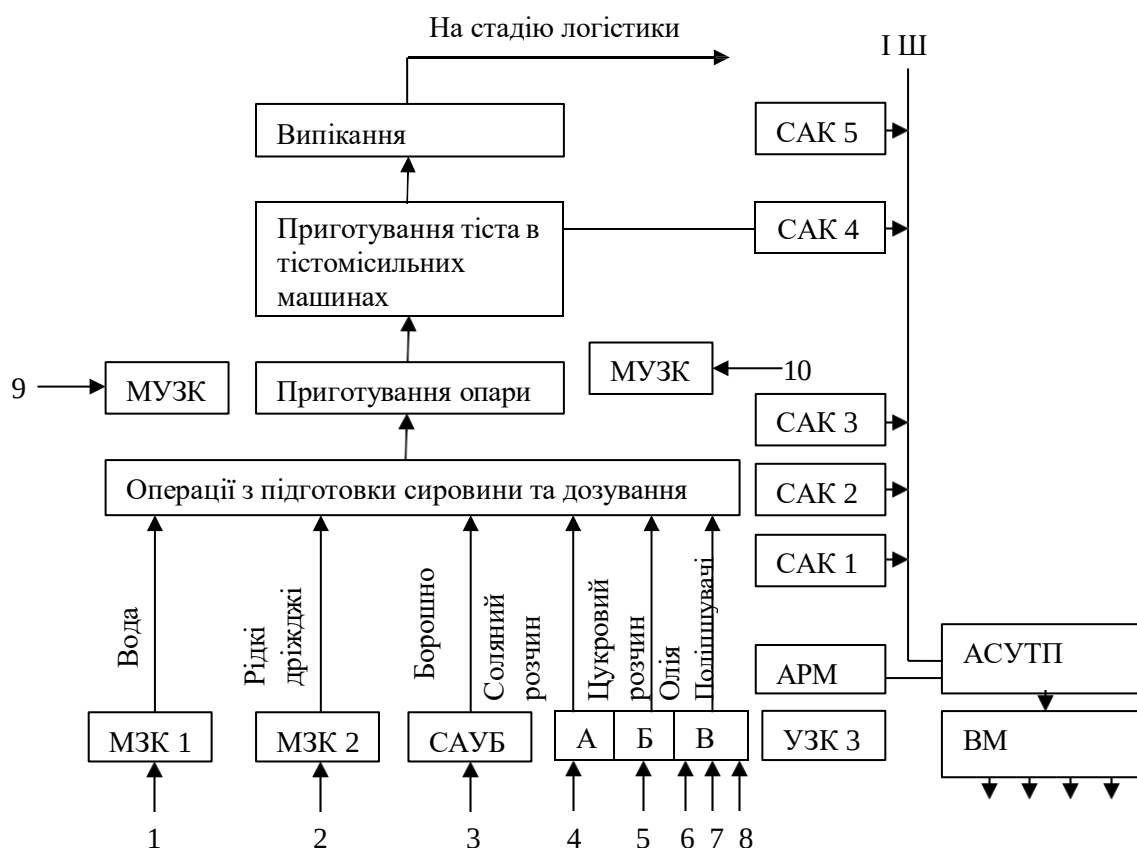


Рисунок 10 – Блок-схема автоматизованого комплексу виробництва хліба в роторних печах

Середній рівень з MES-системами оперативного керування і програмним забезпеченням виконує планування продуктивності роторних печей хлібозаводу, питомі витрати газу та електрики та його ділянок: підготовки борошна, виробництва опари та тіста. Середній рівень також визначає технологічні режими роботи випічної камери її завантаження, оптимізує траєкторію виробництва n сортів хліба та відповідно оцінює питомі витрати енергоносіїв, газу й електрики, а також повітря, води 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 роторної печі та критично оцінює безпечність роботи обладнання (5-й крок алгоритму). Якщо система оцінки безпечності роботи роторної 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, то оцінюється критичність ситуації, а, відповідно, відпрацювання команд «проведення профілактичного обслуговування» або «зупинка роторної 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 хлібозаводу виконує наступні операції: 1) планування ремонтних робіт; 2) управління технічною документацією; 3) управління виконанням ремонтних робіт і обліком витрат; 4) управління персоналом; 5) МТЗ ремонтів блоків печі.

Практика підвищення працездатності обладнання, яке визначає життєдіяльність населення регіону з техногенними територіями в період воєнного стану, вимагає від

проектантів мінімізувати втрати якості продукції харчування та оптимізувати витрати енергоносіїв за рахунок альтернативних джерел, розробити більш надійні системи керування технологічним обладнанням хлібозаводів. Система із вбудованими в технологічну лінію мехатронними пристроями – апаратами очищення води, дезінтеграції, змішування, – підсилює мікробіологічні, біохімічні, колоїдні, хімічні, гідродинамічні процеси випікання хліба.

У цій автоматизованій системі АСУТП, що керує на нижньому рівні технологічними процесами з локальними системами керування САК1, САК2, САК3 і вхідними блоками 1, 2, 3, 7 сировинних і енергетичних ресурсів виділені такі підсистеми:

1. Підготовки сировини, тобто диспергування для приготування соляного розчину, цукрового розчину та дозування жирних продуктів разом з підсилюючими речовинами.

2. Підготовки опари.

3. Виробництва тіста.

4. Випікання в роторних печах.

5. Охолодження, пакування та логістики.

У кожній із означених підсистем впроваджено мехатронні пристрої МУЗК, а саме: контроль параметрів очищеної води, борошна, газоутворюючої здатності борошна, густини рідких дріжджів, густини соляного та цукрового розчинів та інших 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 виконано за допомогою систем автоматизованого контролю САК1, САК2, САК3, САК4, САК5. Інформація до систем контролю надходить по інформаційній шині ІШ в АСУТП виробництва хліба

В АСУТП виробництва хліба використано нейронечіткі алгоритми інтелектуального керування процесами підготовки борошна, приготування опари, тіста, вистоювання та випікання хліба в роторній печі. Мехатронні пристрої з ЕС в темпі з процесом оцінюють якість сировини, напівфабрикатів і готової продукції. ІСППОР виконують рекомендації верхнього рівня керування АСУТП щодо продуктивності роторних печей, забезпечення газопостачанням, сировиною, інгредієнтами, електрикою та оцінюють вихідні показники якості та собівартості хліба. Головне завдання підсистеми підтримки прийняття рішень на основі інформації датчиків витрат гасу та електрики – забезпечити технологічну операцію випікання надійним енергозабезпеченням процесу випікання. Параметри борошна оцінює експертна система управління якістю, рекомендації якої через порт 3 надходять до системи автоматизованого управління борошном (САУБ) щодо вибору способу його поліпшення.

У монографії [11] авторами доведено, що в умовах нечіткої оптимізації з метою підвищення надійності обладнання та газопостачання і електрики, необхідно проводити моніторинг як робочих характеристик обладнання (якості сировини, води, опари, тіста, компонентів та хліба), так і енергозабезпечення з елементами резервування постачання газу та додаткових джерел електропостачання. Пропонуємо використати в системі моніторингу працездатності блоків роторної печі експертну систему (ЕС) та контроль енергопостачання газу і електрики з використанням інтерпретатора ПРОЛОГ [8, 11-13]. 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 роторної печі. Для умов контролю постачання газу електрики ЕС надає оператору 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». Команда ЕС віддає команду оператору роторної печі: «перейти на резервне постачання газу». Експертна система на основі інтерпретатора ПРОЛОГ оцінює стан обладнання роторної печі та видає рекомендації щодо проведення планово-профілактичного ремонту.

У системі діагностики роторних печей хлібозаводу використано концепцію побудови засобів діагностичної підтримки оператора, який оцінює оперативну обстановку та приймає рішення. 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, призначеного для вирішення задач, щодо створення і верифікації баз даних, баз знань та операторського інтерфейсу;
- 2) оперативного контуру, призначеного для рішення задач інтелектуальної інформаційної підтримки людини-оператора в реальному часі.

Бази даних (БД) поділимо на оперативні та нормативні. Перші містять змінні, які характеризують поточний стан об'єктів діагностики. Інші включають нормативний опис стану технологічного обладнання хлібозаводів. Бази знань (БЗ) реалізуються моделями семіотичного типу і розділяються на неоперативні та оперативні [8, 11-15]. Перші мають тестовий опис діагностичних моделей знань для кожного елементу обладнання, що піддається діагностиці. Другі мають бінарні діагностичні моделі знань для оперативної діагностики елементів газового мультиблоку обладнання роторної печі, витяжних вентиляторів, теплообмінника тощо.

Бази знань представляють собою ієрархію моделей знань, яка відповідає ієрархії обладнання роторної печі та забезпечення її газом і електрикою в періоди віялових 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 МП1 задач неоперативного контуру. Оперативне оброблення діагностичних моделей виконано за допомогою мікропроцесора МП2 задач діагностики оперативного контуру. Особливістю експертної системи діагностики хлібозаводу є оброблення даних систем вимірювання і оцінки сигналів з датчиків, наприклад, контролю працездатності роторної печі, та надання оператору рекомендацій щодо технологічного обслуговування енергетичного та газового обладнання, виконання планових ремонтів та ППР.

Висновки. Розроблена система оцінки надійності обладнання з моніторингом стану енергетичних чинників спроектована з урахуванням умов місцевих хлібозаводів. Основною ознакою такої системи є алгоритми та системи моніторингу, розроблені відповідно до положення надійності складних систем, які включають функції розпізнавання аварій, аварійних ситуацій, що виникають у процесі експлуатації роторних печей.

Головну увагу в системі спрямовано на розробку алгоритмів контролю забезпечення роторних печей енергоносіями (газом, електрикою) та їх резервування. У статті обґрунтовано теоретичні основи оцінки рівня надійності обладнання роторних печей, газопостачання пекарних камер та заходи з оптимізації їх роботи. Розроблено методи і алгоритми оцінки працездатності роторних печей та їх робочих блоків.

Моделювання процесів виробництва хліба та вплив експлуатаційних відмов елементів роторних печей на працездатність усієї технічної системи обладнання хлібозаводу виконано з використанням формалізованих методів виявлення причинно-наслідкових зв'язків між подіями (відмовами) та вихідними показниками технологічного обладнання.

Моніторинг стану обладнання роторних печей і розробка АСУТП на базі нечіткого виведення інформації про працездатність основних блоків роторних печей дозволяє ОПР на базі нейронечіткого керування комплексом одержати швидкодіючу оцінку працездатності обладнання хлібозаводів за критерієм втрати якості хлібопродуктів.

На основі впровадження інтелектуальних підсистем діагностики буде досягнуто:

- підвищення ефективності роботи обладнання роторних печей за рахунок оптимізації параметрів газопостачання та за рахунок зниження кількості відмов до 25% за рік;
- виконання переходу від стратегії планового сервісного обслуговування до стратегії обслуговування обладнання хлібозаводів за фактичним технічним станом;

– забезпечення зниження витрат на ремонт і післяаварійне обслуговування роторних печей хлібозаводів.

Список літератури

1. 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.
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. Гончаренко Б. М., Ладанюк А. П. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій. Київ : НУХТ, 2014. 530 с.
5. Швед С. М., Ельперін І. В. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 613(60). С. 44-46.
6. Яглінський В. П., Іоргачов Д. В. Моделювання динамічних процесів роботизованого виробництва: монографія. Одеса: Астропринт, 2004. 231 с.
7. Ямпольський Л. С. Нейротехнології та нейросистеми: монографія. Київ: Дорадо-Друк, 2015. 506 с.
8. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Серебренников В. М. Автоматизовані системи керування виробництвом смарт-продуктів харчування: монографія. Кривий Ріг: Чернявський Д.О., 2021. 311 с.
9. Ладанюк А. П. та ін. Системний аналіз складних систем управління. Київ : НУХТ, 2013. 274 с.
10. Зайченко Ю. П. Основи проєктування інтелектуальних систем. Київ: Видавничий дім «Слово», 2004. 352 с.
11. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів: монографія; за заг. ред. В. П. Хорольського. Кривий Ріг: Чернявський Д.О., 2019. 203 с.
12. Руденко О. Г., Бородянський Є. В. Штучні нейронні мережі. Харків: Компанія СМІТ, 2006. 404 с..
13. Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 220 с.
14. Трегуб В. Г. Основи комп'ютерно-інтегрованого керування (інтегровані автоматизовані системи керування). Київ: НУХТ, 2005. 192 с.
15. Ладанюк А. П., Трегуб В. Г. Комп'ютерно-інтегровані системи управління в харчовій промисловості. *Наукові праці УДУХТ*. 2000, № 8. С. 59-61.

References

1. Ladaniuk, A. P., Zaiets, N. A., Vlasenko, L. O. (2016). *Suchasni tekhnolohii konstruiuvannia system avtomatyzatsii skladnykh obiektiv (merezhevi struktury, adaptatsiia, diahnostyka ta prohnozuvannia)* [Modern technologies for designing automation systems of complex objects (network structures, adaptation, diagnostics and forecasting)], Kyiv, Lira-K Publishing House, 312 p.
2. Sharuda, S. S., Kyshenko, V. D. (2010). *Intelektualna systema stsenarnoho upravlinnia khlibopekarskym vyrobnytstvom* [Intelligent scenario management system for bakery production], *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], No. 5/3 (47). P. 66–70.

3. Sharuda, S. S., Kyshenko, V. D. (2011). *Imitatsiine doslidzhennia systemy upravlinnia tekhnologichnymy 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, pp. 14–16.
4. Honcharenko, B. M., Ladaniuk, A. P. (2014). *Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv kharchovykh tekhnolohii* [Automation of production processes of food technologies], Kyiv, NUHT, 530 p.
5. Shved, S. M., Elperin, I. V. (2012). *Systemnyi analiz tekhnologichnoho protsesu vyrobnytstva khlibobulochnykh vyrobiv* [System analysis of the technological process of production of bakery products], *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], 613(60), pp. 44–46.
6. Yahlinskyi, V. P., Iorhachov, D. V. (2004). *Modeliuvannia dynamichnykh protsesiv robotyzovanoho vyrobnytstva* [Modeling of dynamic processes of robotic production], Odesa, Astroprint, 231 p.
7. Yampolskyi, L. S. (2015). *Neirotekhnolohii ta neirosystemy* [Neurotechnologies and neurosystems], Kyiv, Dorado-Druk, 506 p.
8. Khorolskyi, V. P., Korenets, Yu. M., Serebrenykov, V. M. (2021). *Avtomatyzovani systemy keruvannia vyrobnytstvom smart-produktiv kharchuvannia* [Automated control systems for the production of smart food products], *Kryvyi Rih, Chernyavskiy D. O.*, 311 p.
9. Ladaniuk, A. P. and others. (2013). *Systemnyi analiz skladnykh system upravlinnia* [System analysis of complex management systems], Kyiv, NUHT, 274 p.
10. Zaichenko, Yu. P. (2004). *Osnovy proiektuvannia intelektualnykh system* [Basics of designing intellectual systems], Kyiv, Slovo Publishing House, 352 p.
11. Khorolskyi, V. P. and others. (2019). *Intelektualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv* [Intelligent management systems for the production of bakery products], *Kryvyi Rih, Chernyavskiy D. O.*, 203 p.
12. Rudenko, O. H., Borodianskyi, Ye. V. (2006). *Shtuchni neironni merezhi* [Artificial neural networks], Kharkiv, SMIT Company, 404 p.
13. Vasylykivskyi, I. S., Fedynets, V. O., Yusyk, Ya. P. (2020). *Vykonavchi prystroi system avtomatyzatsii* [Executive devices of automation systems], Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 220 p.
14. Trehub, V. H. (2005). *Osnovy kompiuterno-intehrovanoho keruvannia (intehrovani avtomatyzovani systemy keruvannia)* [Fundamentals of computer-integrated control (integrated automated control systems)], Kyiv, NUHT, 192 p.
15. Ladaniuk, A. P., Trehub, V. H. (2000). *Kompiuterno-intehrovani systemy upravlinnia v kharchovii promyslovosti* [Computer-integrated management systems in the food industry], *Naukovi pratsi UDUKht* [Scientific works of UDUHT], 8, pp. 59-61.

Objective. The purpose of the article is to study issues of improving the efficiency of technological equipment for the production of bakery products with given quality characteristics due to its protection against accidents.

Methods. For the purpose of modeling bread baking processes and the influence of operational failures of rotary oven elements on the performance of the entire technical system of bread production, it is proposed to use formalized methods of building and analyzing cause-and-effect relationships between events (failures) and initial system quality indicators. The methods used are graphical and allow simulating possible events, malfunctions, as well as investigating the probability of accidents occurring in rotary kilns. After that, fuzzy modeling of the state of reliability of rotary kilns is performed (a fuzzy knowledge base is developed, linguistic variables defined on universal sets, their set terms, membership functions, rules in a fuzzy base) and intelligent control systems for protecting rotary kilns from accidents are designed.

Results. *The developed system for evaluating the reliability of equipment with monitoring the state of energy factors is designed taking into account the conditions of local bread factories. The main feature of such a system is the algorithms and monitoring systems developed in accordance with the reliability of complex systems, which include the functions of recognizing accidents and emergency situations that arise during the operation of rotary kilns. The main attention in the system is directed to the development of control algorithms for supplying rotary kilns with energy carriers (gas, electricity) and their backup. The article substantiates the theoretical basis for assessing the level of reliability of equipment of rotary kilns, gas supply of baking chambers and measures to optimize their operation. Methods and algorithms for evaluating the performance of rotary kilns and their working units have been developed.*

Modeling of bread production processes and the impact of operational failures of rotary kiln elements on the performance of the entire technical system of bakery equipment was performed using formalized methods of identifying cause-and-effect relationships between events (failures) and output indicators of technological equipment.

Monitoring the condition of the equipment of rotary kilns and developing an automated system for managing technological processes based on the fuzzy output of information about the performance of the main blocks of rotary kilns allows operators based on neurofuzzy control of the complex to obtain a quick assessment of the performance of bakery equipment based on the criterion of loss of quality of bread products.

Based on the introduction of intelligent diagnostic subsystems, the following will be achieved: increase the efficiency of rotary kiln equipment due to optimization of gas supply parameters and by reducing the number of failures by up to 25% per year; implementation of the transition from the strategy of planned service maintenance to the strategy of maintenance of equipment of bread factories according to the actual technical condition; ensuring the reduction of costs for repair and post-emergency maintenance of rotary ovens of bakeries.

Keywords: *rotary kiln, models, causal relationships, diagnostics, control system.*