

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРЕСИВНОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

DOI : 10.33274/2079-4827-2022-44-1-53-65

УДК 681.5:621.565

Хорольський В. П., д-р техн. наук, професор¹

Коренець Ю. М., старший викладач¹

Петрушина Ю. М., здобувач ОС магістр¹

¹ Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua.

ОЦІНКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН ПРОМИСЛОВИХ ХОЛОДИЛЬНИКІВ В ТЕМПІ З ПРОЦЕСОМ ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ

UDC 681.5:621.565

*Khorolskyi V. P., Grand PhD of Engineering Science,
Professor¹*

Korenets Yu. M., Senior Lecturer¹

Petrushyna Yu. M., a graduate of a master's degree¹

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua.

EVALUATION OF THE OPERABILITY OF REFRIGERATION MACHINES OF INDUSTRIAL REFRIGERATORS AT A PACE WITH THE REFRIGERATION PROCESS

Мета. Метою статті є підвищення ефективності експлуатації, технічного обслуговування та діагностики холодильного обладнання (холодильних машин) промислового холодильника за рахунок моніторингу його стану в реальному масштабі часу, враховуючи невизначеність інформації про холодопостачання холодильних камер за допомогою апарату нечіткої логіки.

Методи. У статті використано методи системного аналізу, алгоритмізації, математичного моделювання процесів виробництва штучного холоду, його постачання в холодильні камери промислових холодильників, теорії нечіткої логіки нейронних мереж, теорії надійності та експертних оцінок. Використовуючи основну сукупність теоретичних і практичних атрибутів (ознак), в статті розроблено метод оцінки стану обладнання за допомогою моделей причинно-наслідкових зв'язків холодопостачання холодильних камер промислового холодильника, який відрізняється від аналогів точністю прогнозування відмови його обладнання в процесі експлуатації. Метод полягає в параметричній ідентифікації нечіткої моделі за рахунок визначення змінних, які визначають залежність між параметрами процесу виробництва холоду і його холодопостачання в холодильні камери промислового холодильника й оцінює вплив дефектів, несправностей, аварій, аварійних ситуацій на якість замороженої продукції. Експериментальна частина роботи заснована на методах визначення комбінації відмов (ознак низької надійності) холодильного обладнання, помилок персоналу і техногенних впливів процесу виробництва холоду у вигляді дерева відмов для множин проявів несправностей, що дозволяє представити комп'ютерну модель системи обладнання промислового холодильника у вигляді послідовно з'єднаних елементів-блоків, коли відмова будь-якого елемента рівнозначна відмові системи в цілому, що дозволяє на основі обчислювального експерименту з використанням штучних нейронних мереж запропонувати алгоритми та систему діагностики холодозабезпечення холодильних камер промислових холодильників великої потужності для заморожування м'яса великої рогатої худоби.

Результати. Розроблена модель причинно-наслідкових зв'язків стану обладнання холодильних машин промислових холодильників, яка вирізняється тим, що заснована на сучасних

Надійшла до редакції 08.04.2022 р.

© В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець,
Ю. М. Петрушина, 2022

методах оброблення інформації про технологічний процес заморожування м'ясних продуктів і статистичних даних про відмови елементів холодильного обладнання і яка дозволяє підвищити в моделях достовірність розрахунків надійності роботи компресорних установок, конденсаторів і випарників при існуючих умовах їх експлуатації з врахуванням вхідної інформації про значення вхідних змінних за допомогою використання нечіткої логіки. Розроблено систему діагностики холодильного обладнання промислового холодильника з високим рівнем точності прогнозування відмов та забезпечення особи, що приймає рішення в реальному масштабі часу, інформацією про оперативні ситуації холодозабезпечення холодильних камер та спрогнозувати наслідки відмов. Практична цінність запропонованої системи діагностики холодильного обладнання полягає в підвищенні надійності, працездатності та ефективності холодозабезпечення холодильних камер за рахунок зниження кількості відмов (позапланових зупинок) до 25 % на рік.

Ключові слова: холодильні камери, холодозабезпечення, холодильні машини, система діагностики, моделювання, керування, технології штучного інтелекту.

Постановка проблеми. У сучасних умовах експлуатації складних технічних систем промислових холодильників необхідно звернути увагу не лише на оптимізацію енергоефективних режимів їх роботи і ресурсозбереження, але й на питання надійності, працездатності обладнання, ефективності його обслуговування і ремонтів, від якості виконання яких залежать витрати на підтримування технічних установок в працездатному стані, безпечному для технологічних процесів і персоналу.

Сучасне виробництво холоду в промислових холодильниках, які збереженням продуктів харчування тим самим забезпечують життєдіяльність населення та роботу переробних і харчових виробництв, одночасно є одним із джерел техногенної небезпеки. До числа причин виробничої аварійності холодильного обладнання промислових холодильників (ПРХ) відносяться: недопустиме зношення основних виробничих фондів, неефективні проєктні та технічні рішення, несвоєчасне виконання робіт щодо обслуговування і ремонту.

Тому до числа пріоритетних задач щодо підвищення рівня безвідмовності обладнання ПРХ відносяться удосконалення методів аналізу його надійності та раціональне використання результатів такого аналізу в системах керування діючим виробництвом холоду.

Відомі методи оцінки стану і надійності обладнання холодильників, що базуються на математичному апараті теорії надійності, теорії ймовірності, методах теорії стійкості, мають обмеження у використанні для комплексного дослідження стану обладнання ПРХ в умовах експлуатації [1]. це обумовлено тим, що холодильне обладнання ПРХ, як складна технічна система діагностики, функціонує безперервно в умовах нечіткого вимірювання значного числа параметрів, а, отже, в умовах невизначеності. Врахувати вплив того чи іншого вхідного параметру і визначити виникнення як раптових, так і спричинених зношенням холодильного обладнання відмов і дефектів елементів обладнання ПРХ в період тривалої його експлуатації існуючими методами неможливо.

Отже, пошук інноваційних методів діагностування несправностей обладнання в процесі заморожування продуктів харчування з метою запобігання простоїв виробництва, а також для оптимізації затрат на ремонтні роботи холодильного обладнання, є актуальним і своєчасним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання технології виробництва штучного холоду, математичного моделювання умов експлуатації холодильного обладнання ПРХ, розвитку методики його експлуатації, стану надійності, працездатності, рішення проблеми аналізу безпеки викидів CO₂, ризику виникнення аварій достатньо широко презентовані в спеціальній літературі [1, 2, 3]. Завдяки фундаментальним роботам, проведеним у два останні десятиліття, досягнуто значних успіхів у наведеній сфері досліджень. Серед них можна виокремити роботи українських вчених Ю. Г. Сухенка, В. Ю. Сухенка, М. Г. Хмельнюка, О. С. Подмазка, І. О. Подмазка, М. М. Муштрука, О. В. Остапенка, О. В. Зіміна [1, 2, 3], в яких детально розглянуті теоретичні питання довговічності, на-

дійності технічних об'єктів харчової промисловості. Серед сучасних наукових досліджень відзначимо наукові праці О. А. Онищенко, В. М. Букарос, А. Ю. Букарос, в яких розроблено системи діагностики та контролю технічного стану холодильних установок на основі відомих FDD (fault detection and diagnostics) методів діагностики складних технологічних систем штучного холоду [4, 5]. У той же час мінімізація втрати якості продукції заморожування продуктів харчування з різними характеристиками, які знаходяться в холодильних камерах промислових холодильників великої потужності, вимагає від науковців додаткових досліджень щодо впровадження інтелектуальних технологій процесів діагностування стану холодильних машин [6, 7]. Тому, на наш погляд, з метою підвищення ефективності експлуатації холодильного обладнання промислових холодильників, їх технічного обслуговування і ремонтів обладнання для заморожування продуктів харчування в холодильних камерах, необхідно для оцінки стану холодильного обладнання розробити методику представлення його у вигляді моделей причинно-наслідкових зв'язків складної технічної системи за допомогою апарату нечіткої логіки та розробити алгоритм прийняття рішень щодо оцінки стану обладнання промислового холодильника.

Метою статті є підвищення ефективності експлуатації, технічного обслуговування та діагностики холодильного обладнання (холодильних машин) промислового холодильника за рахунок оцінки його стану в реальному масштабі часу, враховуючи невизначеність інформації про холодопостачання холодильних камер за допомогою апарату нечіткої логіки.

Вклад основного матеріалу. З метою моделювання процесів виробництва холоду та впливу експлуатаційних відмов елементів холодильних машин на працездатність усієї технічної системи обладнання ПРХ використовуємо формалізовані методи виявлення причинно-наслідкових зв'язків між подіями (відмовами) та вихідними показниками процесу заморожування.

Дані методи є графічними і широко використовуються проєктантами для аналізу працездатності складного холодильного обладнання з системами автоматизованого керування [8].

Множину можливих відмов позначимо: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ — вихідні змінні. Для виявлення комбінації відмов (негараздів) обладнання, помилок персоналу та зовнішніх (техногенних, природних) впливів, які спонукають до виникнення аварійних ситуацій системи обладнання ХМ, побудуємо дерево відмов (ADO/FTA) [7]. При цьому будемо розглядати будь-які негаразди технологічного режиму холодопостачання, які спонукають до утворення перерв щодо нормальної роботи холодильного обладнання ПРХ.

На рис. 1–5 представлені моделі причинно-наслідкових зв'язків (дерево відмов) обладнання ПРХ. У процесі побудови дерева відмов для множини U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 необхідно звернути увагу на те, що технічна система холодильного обладнання ПРХ є системою з послідовним з'єднанням елементів-блоків. Як відомо, у подібній системі відмова будь-якого елемента призведе до відмови системи в цілому. У результаті цього структурну схему надійності системи обладнання ХМ ПРХ представимо у вигляді послідовних блоків 1, 2, ..., 5.

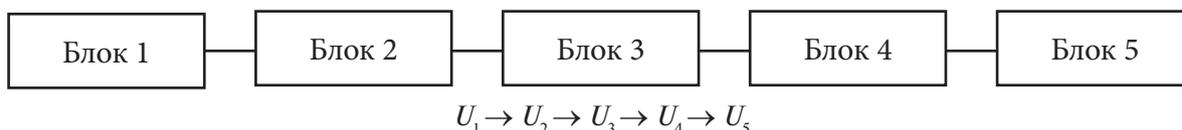


Рисунок 1 — Структурна схема надійності обладнання ХМ промислового холодильника

В умовах діючого виробництва штучного холоду на холодильних підприємствах до найбільш відповідальних елементів технічної системи обладнання ХМ ПРХ віднесемо: компресор, випарник, конденсатор, холодильний агент, охолоджуючі прилади. Завдання експлуатації холодильних машин полягає в підтримуванні нормативних температур для створення в холодильній камері ПРХ певних температурно-вологісних режимів і подальшому забезпеченні заданих параметрів мікроклімату. Ці складові позначимо у вигляді множин U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 .

U_1 несправність компресора (відмова)	V_{11} технічний стан компресора	Зношення в процесі експлуатації
		Інтенсивне спрацювання опорних підшипників
		Несправність механізмів кривошипно-шатунного вузла
		Підвищена вібрація поршневого компресора
	V_{12} порушення герметичності	Несправність поршневої і клапанної груп
		Неправильне центрування вала в корпусі
		Порушення в системі мастила
		Порушення технології експлуатації компресора
		Порушення температурних режимів
		Порушення притирання кілець тертя
	V_{13} втрата холодильного агента через сальники компресора	Зношення гумових кілець
		Втрата холодильного агента через сальники запірної арматури
		Втрати герметизуючих властивостей паронітових прокладок
		Відмови (поломка) пластин всмоктувальних клапанів
V_{14} втрата холодопродуктивності компресора	Потрапляння в компресор рідкої робочої сировини (або мастила) між поршнем і кришкою циліндру	
	Мала величина лінійного мертвого простору	

Рисунок 2 — Дерево відмов для множини простору U_1 (компресор)

Надійність такої системи q складається із незалежних, послідовно зв'язаних елементів і дорівнює добутку надійностей її елементів. Інтенсивність відмов λ нерезервованої системи дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів системи:

$$q = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i ; \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) , \quad (2)$$

де q — надійність системи; $\lambda(t)$ — інтенсивність відмов; i — кількість елементів системи (1, n).

Це свідчить про те, що при збільшенні числа елементів різко зменшується надійність усієї системи [1].

	Зношення АД в процесі експлуатації
	Людський фактор — помилки оперативного персоналу
V_{21} несправність електрообладнання АД-ТПЧ	Несправність системи включення-виключення ТПЧ
	Несправність системи контролю АСР АД-ТПУ
	Контроль параметрів потужності, питомих витрат
	Несправність апаратури захисту АД або СД
	Витрати електроенергії та витрати води
	Несправності датчиків контролю
	Несправності АРМ холодильщика
	Контроль виробничої ситуації
V_{22} несправності САК і АСУТП	Зниження холодопродуктивності ХМ
	Система контролю гідравлічного удару
U_2 відмова електрообладнання холодильної машини та АСУТП	Система несправності контролю холодопостачання, тиску, температури
	Несправності датчиків тиску, температури, вібрації в САК діагностиці
	Зниження витрат холодильного агенту
V_{23} втрата холодильного агента через сальники компресора	Контроль температури кипіння мановакуумметром
	Контроль холодопродуктивності системи холодопостачання
	Збої в системі АРМ, ПЗ, ІСППЕ
	Контроль температури заморожування продукту
	Збої в системі промислового Інтернету-речей
	Збої в системі MES, ERP-розподілу продукції
V_{24} втрата холодопродуктивності компресора	Несправність датчиків температури повітря
	Збої в системі оцінки якості процесів охолодження
	Збої в системі шокового заморожування
	Збої в системі багатоступеневого стиснення

Рисунок 3 — Дерево відмов для множини U_2

Людський фактор — помилки операторів ХМ		
V_{31} несправність обладнання багатоступеневого стиснення	Несправність компресорів: зменшення продуктивності	
	Несправність насосної групи: зниження тиску	
V_{32} несправність двохступеневої ХМ	Збої систем автоматизованого керування	
	Відсутність змащення робочих деталей ХМ	
	Несправність проміжної змієвикової посудини та повного проміжного охолодження	Відхилення тиску та температури від номінальних значень
		Відхилення від оптимального теплового режиму (зменшує холодопродуктивність ХМ)
		Несправність мастильного насосу ХМ
		Забруднення фільтрів, засмічення мастилопроводів, порушення герметичності мастильної системи, низький рівень мастила
Матеріальний баланс проміжної посудини відсутній		
V_{32} несправність двохступеневої ХМ	Наявність значних відхилень витрат холодильного агенту	
U_3 багатоступеневі компресорні ХМ в системі холодопостачання ПРХ	Технологічні перевантаження збільшення експлуатаційних витрат на одержання штучного холоду	
	Наявність значних відхилень витрат холодильного агенту	
	Несправність електродвигунів компресорів ХМ	Зміни режимів електрозабезпечення двигунів ХМ, ремонт виводів електродвигунів, ушкодження ізоляції вивідних кінців
		Неузгодженість систем керування швидкістю АД-ТПЧ холодильних машин: зниження ККД ХМ
	Відхилення параметрів холодозабезпечення, що знижує корисні властивості продукту та їх терміни придатності	
V_{33} несправність в системі холодопостачання ПРХ	Небажані надходження теплоти від продуктів і тари під час холодильного оброблення	
	Нераціональні параметри надходження теплоти від вентиляції, експлуатації камер	
	Порушення технологій зберігання продуктів харчування	

Рисунок 4 — Дерево відмов БСК ХМ в системі холодопостачання ПРХ(U_3)

U_4 Відмови холодильного апарату		Розпізнавання гідравлічного удару
		Технологічні порушення експлуатації аміачних холодильних машин: потрапляння рідкого аміаку в циліндри компресора
	V_{41} витрата холодильного агента	Контроль утворення парових пробок і тиску (50 кПа)
		Контроль параметрів рідкого аміаку перед насосом, охолоджуючого приладу, випарник-конденсатор
		Контроль відхилення поточної холодопродуктивності випарника і компресора від оптимальної
	V_{42} відхилення холодопродуктивності	Контроль температури кипіння в елементах холодильної машини
		Контроль підвищення температури конденсації

Рисунок 5 — Дерево відмов для множини U_4

U_5 Мікроклімат холодильної камери	V_{51} відхилення температури холодильної камери та заморожуваного продукту від нормованих показників	Людський фактор
		Технологічні порушення умов зберігання продукту
		Відносні параметри
		Вологість повітря в камері Температура заморожуваного продукту Час роботи холодильної камери
	V_{52} відхилення параметрів мікроклімату від заданих значень	Параметри CO_2
		Якість заморожуваного продукту

Рисунок 6 — Дерево відмов для множини U_5

При цьому в основу механізму розповсюдження збурень за структурою системи покладено думку, що імпульс впливу відмови елемента накопичується і зменшує як показники надійності окремих елементів системи обладнання ХМ промислових холодильників, так і показник надійності системи в цілому:

$$U = \sum f(V_i) = f(V_1) + f(V_2) + f(V_3) + f(V_4) + f(V_5). \quad (3)$$

На основі аналізу дерев відмов і виходячи з вищесказаного, найбільший внесок до сумарного ризику надходження несприятливих подій вносять елементи з множиною відмов U_1 і U_3 . Таким чином, компресор з трубопроводом і шатунами є ключовою частиною системи надійності обладнання ХМ, модернізація системи автоматичного контролю і керування якого може бути найбільш ефективною з точки зору безпеки, розробки конструктивно-технологічних та експлуатаційних заходів, спрямованих на зниження імовірності і наслідків можливих відмов для якості продуктів харчування. На рис. 7 наведено систему діагностики та керування холодильними машинами з метою підвищення їх працездатності та ефективності заморожування продуктів харчування без втрати їх якості [6, 7].

В автоматизованій системі діагностики запропоновано виокремити такі підсистеми:

- інформаційного забезпечення з нечіткими базами даних, базами знань, оперативними базами даних і знань відповідно (НБД, НБЗ, ОБД, ОБЗ);
- діагностики працездатності обладнання ХМ;
- захисту обладнання від аварійних ситуацій;

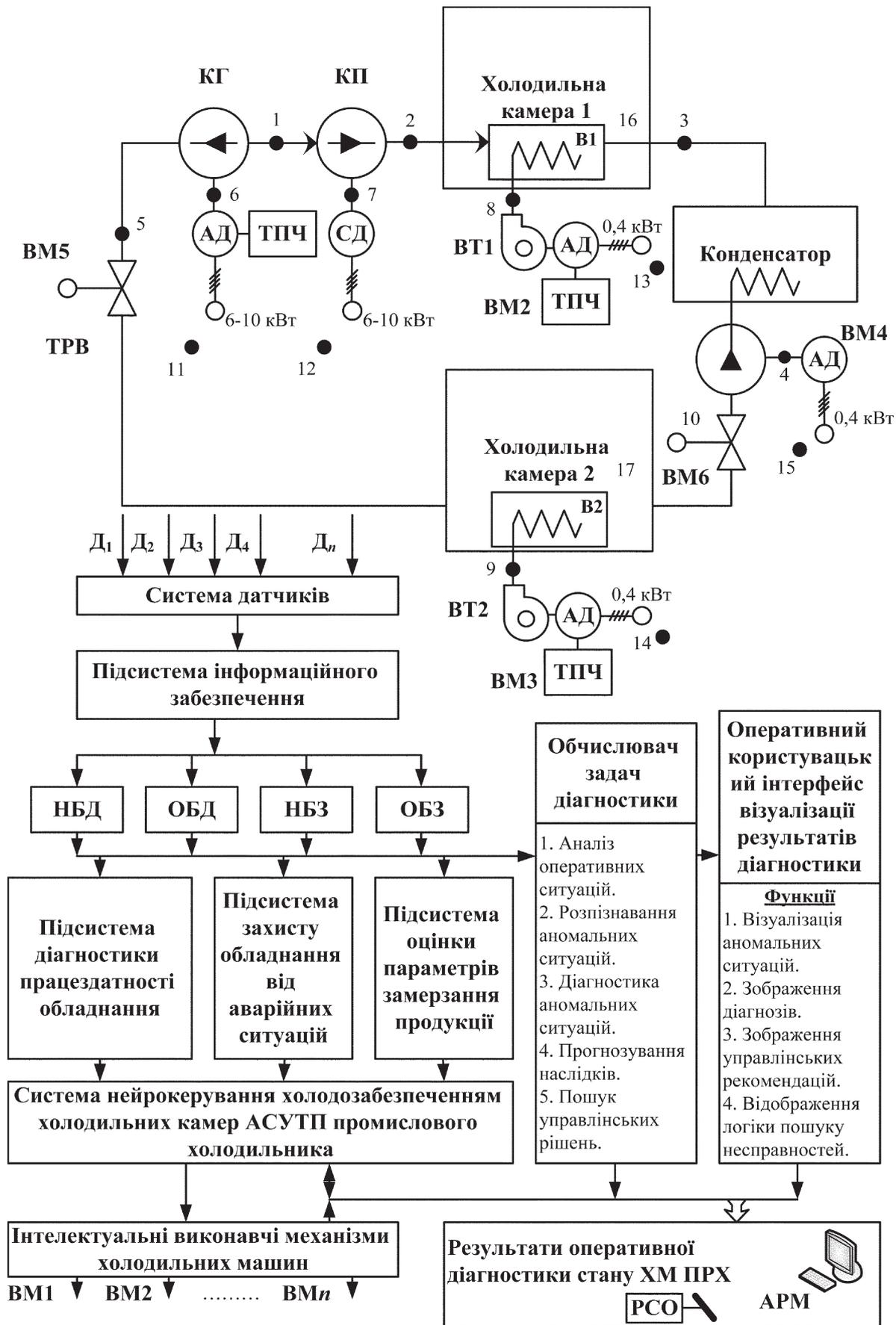


Рисунок 7 — Автоматизована система діагностики та керування холодильними машинами промислового холодильника (точки 1, 2, 3, 4, ..., 17 — контролю і діагностики обладнання холодильних машин промислового холодильника)

— оцінки параметрів заморожування продуктів, а саме τ_0 — тривалість заморожування, яку будемо оцінювати за формулою Планка [9] та контролювати параметри: R — визначальний розмір шматка продукту, його геометрію, м; ρ — густину охолодженого продукту, кг/м³; q — питому теплоту кристалізації води; ω — вологовміст продукту; t_k — криоскопічну температуру продукту, °С; $t_{o.c.}$ — температуру охолоджуваного середовища, °С; λ — теплопровідність заморожуваного продукту, Вт/(м·К); Q — кількість теплоти, відведеної від продукту під час заморожування, кДж; G — масу замороженого продукту, кг; H_n, H_k — питомі ентальпії продукту відповідно в початковому та кінцевому (замороженому) стані, кДж/кг; контроль параметрів вібрації компресора поршневого (КП), компресора гвинтового (КГ), конденсатора; стану випарника (кількості пари, що утворюється у випарнику (кг/с)); теплове навантаження, кВт; q_0 — питома масова холодопродуктивність 1 кг холодильного агента, кДж/кг; стан снігової шуби на поверхні випарника. Крім контролю цих важливих параметрів (з системою датчиків $D_1, D_2, D_3, \dots, D_{17}$) передбачено контроль параметрів потужності та струму синхронних двигунів (СД) компресорів поршневих, асинхронних двигунів та тиристорних перетворювачів частоти ТПЧ компресорів гвинтових, положення інтелектуальних виконавчих механізмів (ІВМ) $ВМ_1, ВМ_2$ і т.д.

АСУТП промислового холодильника включає: системи нейронечіткого керування холодозабезпеченням холодильних камер ($ХМ_1, ХМ_2, \dots$) та регулюванням продуктивності КП, КГ, конденсатора (виконавчі механізми $ВМ_1 — ВМ_6$), вентиляторів $ВТ_1, ВТ_2$ з електроприводом по схемі АДВ-ТПЧ (виконавчі механізми $ВМ_1, ВМ_2$). Узгоджене управління каскадом із двох ступенів компресорних машин КП — КГ — конденсатор — випарники $В_1, В_2$ дозволяє забезпечити високий рівень працездатності та холодопродуктивності, мінімізуючи час простою холодильних машин та надаючи оператору-технологу через робочу станцію оператора (РСО) на його АРМ інформацію у вигляді візуалізації результатів діагностики ХМ, аномальних і аварійних ситуацій, прогнозування наслідків, логіки пошуку несправностей тощо.

У системі нейронечіткого керування процесом заморожування (ХК1, ХК2) продуктів харчування використано нейромережевий регулятор (НМ-Р) з архітектурою входів $N(e_k, Y_k)$. Управлінські впливи на об'єкт (холодильну камеру) розраховуються у відповідності з рівнянням:

$$U_k = N^{FFC}(r_k) + N^{FBC}(r_k, Y_k, U_{k-1}). \quad (4)$$

де r_k — вставка; Y_k — вихід об'єкта, який можна спостерігати; U_{k-1} — управлінські впливи, які сформовані в попередній момент часу.

Такий підхід до побудови архітектури АСУТП з високим рівнем оперативної діагностики регуляторів холодопродуктивності (несправностей ТРВ, забруднення змійовиків випарника, зупинки насосів охолодженої води, положення запірних клапанів, несправностей компресорів), занесених в ОБД і ОБЗ та оцінка стану обмерзання випарників холодильних камер дозволяє оператору-технологу в реальному масштабі часу керувати інтелектуальним комплексом керування параметрами мікроклімату холодильної камери (ХК₁, ХК₂). Тому в архітектурі АСУТП холодозабезпечення ХК промислового холодильника нейромережі (НМ) будуть відігравати роль розпізнавання і прогнозування якості вхідної продукції, заморожуваної продукції в умовах контролю роботи випарника, температури заморожування продукту, відносної вологості повітря у ХК, концентрацію повітря в ХМ, а саме вміст CO_2 . Інтелектуальний комплекс керування мікрокліматом ХК з системою нейромережевого розпізнавання і класифікації повинен забезпечувати адаптацію параметрів процесу заморожування (охолодження) в умовах безперервно змінних зовнішніх умов: надходження нового продукту, відвантаження заморожуваних продуктів споживчу. На рис. 8 наведено приклад алгоритму керування процесом заморожування продукту харчування (наприклад, м'ясних туш великої рогатої худоби), з оцінкою параметрів холодозабезпечення холодильних камер, їх мікроклімату та обліку параметрів енергоспоживання.

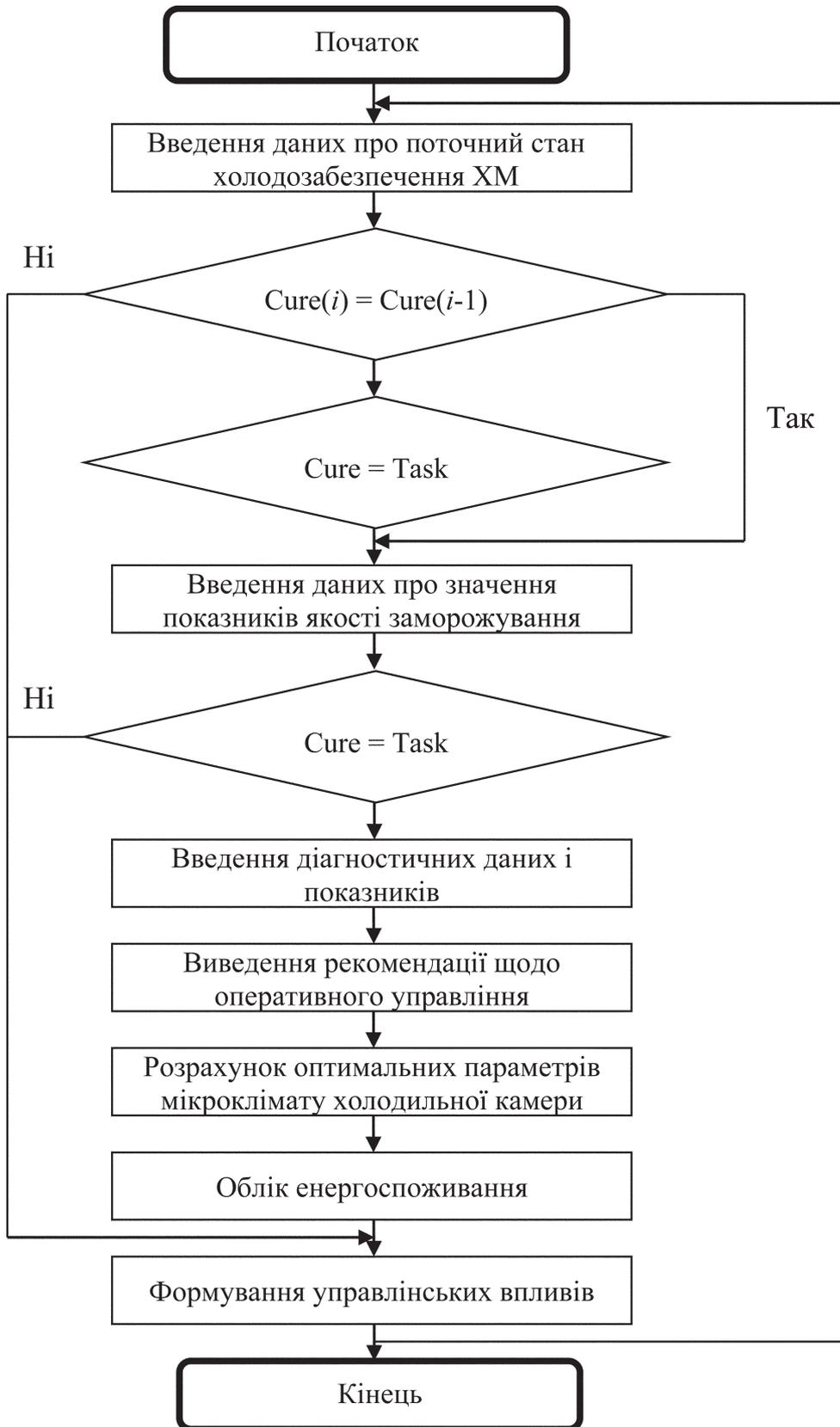


Рисунок 8 — Алгоритм керування процесом заморожування

Висновки. Отже, в процесі розробки методів оцінки працездатності холодильних машин авторами статті запропоновано:

1. Автоматизовану систему моніторингу обладнання і технологічного процесу заморожування (охолодження) продукції.

Така система повинна збирати на пульт АРМ-оператора інформацію про параметри ХМ, холодопостачання. Цей комплекс повинен виконувати наступні функції з використання інтелектуальних технологій з НМ:

- контроль необхідних параметрів і технологічного обладнання холодильних машин — холодопостачання ХК промислових холодильників;
- візуалізацію технологічного процесу з вказівкою контролюючих параметрів в режимі реального часу, аварійна сигналізація, представлення трендів основних технологічних змінних;
- діагностику обладнання ПРХ, надання ОПР інформації про несправність того чи іншого вузла/елемента ПРХ.

2. Методику розробки АРМ-діагностики обладнання ХМ промислових холодильників і реалізації інформаційної підтримки прийняття рішення щодо його сервісного обслуговування в режимі реального часу в процесі експлуатації.

На основі впровадження інтелектуальних технологій АРМ-діагностики буде досягнуто:

- підвищення ефективності роботи обладнання ПРХ за рахунок зниження кількості відмов до 25% за рік;
- виконання переходу від стратегії планового сервісного обслуговування до стратегії обслуговування обладнання ПРХ по фактичному технічному стану;
- забезпечення зниження витрат на ремонти і післяаварійне поновлення обладнання до 5%.

3. Моніторинг обладнання холодильних машин ПРХ і розробка АСУТП на базі нечіткого виведення інформації про стан обладнання ХМ-ПРХ дозволяє на базі нейрон-нечіткого керування комплексом одержати високопродуктивну автоматизовану оцінку працездатності обладнання промислових холодильників за критерієм мінімізації втрати якості замороженої продукції.

Список літератури

1. Сухенко В. Ю., Сухенко Ю. Г., Муштрук М. М. Показники надійності обладнання харчових виробництв. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2016. № 4. С. 12–16.
2. Остапенко О. В., Зімін О. В., Подмазко І. О., Хмельнюк М. Г. Шляхи підвищення енергоефективності холодильної установки підприємства харчової промисловості. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. № 52 (6). С. 4–10. doi: 10.15673/ret.v52i6.464.
3. Подмазко І. О. Підвищення ефективності роботи холодильного устаткування при термообробці харчових продуктів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.14 «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування» / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса : ОНАХТ, 2013. 20 с.
4. Bukaros A. Yu., Onyshchenko O. A., Montik P. N., Malyshev V. L., Bukaros V. N. Modernization of Luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2019. № 1. С. 230–237. doi: 10.15588/1607-3274-2019-1-21.
5. Букарос В. Н., Букарос А. Ю., Ромчук Н. О. Адаптивная система управления электроприводом компрессора. *Автоматизация технологических и бизнес-процесов*. 2014. № 6(4). С. 84–90. doi: 10.15673/2312-3125.
6. Хорольський В. П., Омельченко О. В., Коренець Ю. М., Гончаренко В. А., Петрушина Ю. М. Холодозабезпечення холодильних камер смарт-промислових холодильників із системами нейро-нечіткого керування процесами заморожування продуктів харчування. *Вісник ХНУ. Серія «Технічні науки»*. 2021. Вип. 6 (303). С. 264–271. doi: 10.31891/2307-5732-2021-303-6-264-271.
7. Цифрові системи інтелектуального управління підприємствами промислового комплексу регіону : монографія / за заг. ред. В. П. Хорольського, О. Б. Чернеги. Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д. О., 2020. 561 с.
8. Dorf, Richard C., Bishop, Robert H. *Modern Control Systems*. Pearson, 2016. 1032 p.

9. Грищенко В. О. Типові технологічні процеси і холодильне обладнання для зберігання рослинної продукції: моделювання, динамічні режими, керування : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 248 с. ISBN 978-966-929-762-4.

References

1. Sukhenko, V. Yu., Sukhenko, Yu. H., Mushtruk, M. M. (2016). *Pokaznyky nadiinosti obladnannia kharchovykh vyrobnystv* [Indicators of reliability of food production equipment], *Standartyzatsiia. Sertyfikatsiia. Yakist* [Standardization. Certification. Quality], no. 4, pp. 12–16.
2. Ostapenko, O. V., Zimin, O. V., Podmazko, I. O., Khmelniuk, M. G. (2016). *Shliakhy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti kholodylnoi ustanovky pidpriemstva kharchovoi promyslovosti* [Power efficiency opportunities for industrial refrigeration system of food processing enterprise]. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia* [Refrigeration Engineering and Technology], no. 52(6), pp. 4–10. doi: 10.15673/ret.v52i6.464.
3. Podmazko, I. O. *Pidvyshchennia efektyvnosti roboty kholodylnoho ustatkuvannia pry termoobrobtsi kharchovykh produktiv* [Increase of efficiency of work of refrigeration equipment during heat treatment of food products]. Odesa, ONAFT Publ., 2013, 20 p.
4. Bukaros, A. Y., Onyshchenko, O. A., Montik, P. N., Malyshev, V. L., Bukaros, V. N. (2019). Modernization of Luenberger observer for control system of hermetic compressor electric drive, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 1, pp. 230–237. doi: 10.15588/1607-3274-2019-1-21.
5. Bukaros, V. N., Bukaros, A. Yu., Romchuk, N. O. (2014). *Adaptivnaya sistema upravleniya elektroprivodom kompressora* [Adaptive compressor drive control system], *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv* [Automation of technological and business processes], 6(4), pp. 84–90. doi: 10.15673/2312-3125.
6. Khorolskyi, V. P., Omelchenko, O. V., Korenets, Yu. M., Honcharenko, V. A., Petrushyna, Yu. M. (2021). *Kholodozabezpechennia kholodylnykh kamer smart-promyslovykh kholodylnykiv iz systemamy neuro-nechitkoho keruvannia protsesamy zamorozhuvannia produktiv kharchuvannia* [Cold safety of refrigerating chambers of smart industrial refrigerators from unexpected neuro-fuzzy curing by the processes of freezing foodstuffs]. *Visnyk KhNU. Seriia "Tekhnichni nauky"* [Bulletin of KhNU. Series "Technical Sciences"], no. 6(303), pp. 264–271. doi: 10.31891/2307-5732-2021-303-6-264-271.
7. Horolskiy, V. P. et al. (2020). *Tsifrovi systemy intelektualnogo upravlinnya pidpriemstvami promyslovogo kompleksu regionu* [Digital systems of intellectual management of enterprises of the industrial complex of the region], Kryvyi Rih, Chernyavskiy D. O., 561 p.
8. Dorf, Richard C., Bishop, Robert H. *Modern Control Systems*. Pearson, 2016, 1032 p.
9. Hryshchenko, V. O. *Typovi tekhnolohichni protsesy i kholodylne obladnannia dlia zberihannia roslynnoi produktsii: modeliuvannia, dynamichni rezhymy, keruvannia* [Typical technological processes and refrigeration equipment for storage of plant products: modeling, dynamic modes, control], Kyiv, Komprynt Publ., 248 p. ISBN 978-966-929-762-4.

Objective. *The purpose of the article is to increase the efficiency of operation, maintenance and diagnostics of refrigeration equipment (refrigerators) of an industrial refrigerator by monitoring its condition in real time, taking into account the uncertainty of information about the refrigeration supply of refrigeration chambers using a fuzzy logic apparatus.*

Methods. *The article uses the methods of system analysis, algorithmization, mathematical modeling of artificial cold production processes, its supply to industrial refrigerators, fuzzy logic theory of neural networks, reliability theory and expert assessments. Using the main set of theoretical and practical attributes (features), the article developed a method for assessing the state of equipment using models of cause-and-effect relationships for the refrigeration supply of industrial refrigerators, which differs from analogues in the accuracy of predicting equipment failure during operation. The method consists in the parametric identification of a fuzzy model by determining variables that determine the relationship between the parameters of the cold production process and its cold supply to the refrigerat-*

ing chambers of an industrial refrigerator and evaluate the impact of defects, malfunctions, accidents, emergencies on the quality of frozen products. The experimental part of the work is based on methods for determining the combination of failures (signs of low reliability) of refrigeration equipment, personnel errors and man-made impacts of the cold production process in the form of a fault tree for a variety of manifestations of faults, which makes it possible to represent a computer model of an industrial refrigerator equipment system in the form of sequential cooling of connected block elements, when the failure of any element is equivalent to the failure of the system as a whole, which allows, on the basis of a computational experiment using artificial neural networks, to propose algorithms and a system for diagnosing the refrigeration supply of refrigerating chambers of high-capacity industrial refrigerators for freezing cattle meat.

Results. A model of causal relationships between the equipment of refrigeration machines of industrial refrigerators has been developed, characterized by the fact that it is based on modern methods of processing information about the technological process of freezing meat products and statistics on failures of refrigeration equipment. This model allows to increase the reliability of calculations of the reliability of compressor units, condensers and evaporators under the existing conditions of their operation, taking into account the input information about the value of input variables by using fuzzy logic. Developed a system for diagnosing refrigeration equipment of industrial refrigerators with a high level of accuracy in predicting failures and providing the real-time decision-maker with information on operational situations of refrigeration of refrigeration chambers to predict the consequences of failures. The practical value of the proposed system of diagnostics of refrigeration equipment is to increase the reliability, performance and efficiency of refrigeration of refrigeration chambers by reducing the number of failures (unscheduled stops) to 25% per year.

Keywords: refrigerating chambers, refrigeration supply, refrigerating machines, diagnostic system, modeling, control, artificial intelligence technologies.