

ХОРОЛЬСЬКИЙ В. П.

<https://orcid.org/0000-0003-4040-3229>e-mail: [khoroLv@ukr.net](mailto:khoroLv@ukr.net)

КОРЕНЕЦЬ Ю. М.

<https://orcid.org/0000-0002-5873-7908>e-mail: [korenets@donnuet.edu.ua](mailto:korenets@donnuet.edu.ua)

ПЕТРУШИНА Ю. М.

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

e-mail: [petrushka.u1979@gmail.com](mailto:petrushka.u1979@gmail.com)

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН НА ОСНОВІ НЕЙРОНЕЧІТКОГО МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЇХ СТАНУ

З метою проектування сучасних смарт-підприємств типу промислових холодильників із забезпеченням високого рівня надійності їх роботи за умови збереження належної якості охолодження, заморожування та зберігання різних видів продукції, у статті виконано аналіз існуючого рівня безпеки та часу напрацювання до відмови обладнання холодильних машин для холодопостачання промислових холодильників та системний аналіз технічної системи обладнання холодильних машин з метою визначення вимог до системи оцінки рівня безпеки обладнання підприємств – промислових холодильників.

Розроблено методологію аналізу стану обладнання холодильних машин промислових холодильників як об'єкта несправностей.

Побудовано моделі можливих несправностей з виявленням взаємозв'язків між технологічними параметрами працездатності, надійності та аварійними ситуаціями.

Розроблено ситуаційну модель стану холодильної машини як джерела несправностей, що відрізняється можливістю виявлення взаємозв'язків між параметрами, подіями – причинами виникнення аварійних ситуацій та станом холодозабезпечення холодильних камер.

Структуровано знання про нечіткі ситуації та побудовано нечіткі моделі надійності, які характеризують стан обладнання.

Практична цінність дослідження полягає в розробленні методології оцінки надійності та довговічності обладнання холодильних машин на основі нейронечіткого методу ідентифікації, створення бази знань і системи керування процесом працездатності холодильних установок. Такий підхід дає змогу побудувати систему прогнозування та моніторингу аварійних ситуацій в системах оперативного контролю технологічних процесів заморожування продуктів харчування.

Ключові слова: холодозабезпечення, холодильні камери, надійність, нейронечітке моделювання, інтелектуальна технологія.

VALENTYN KHOROLSKY, YURI KORENETS, YULIYA PETRUSHYNA

Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky

## THEORETICAL FOUNDATIONS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF REFRIGERATION MACHINE EQUIPMENT ON THE BASIS OF THE NEURO-FUZZY METHOD FOR IDENTIFYING THEIR STATE

In order to design modern smart enterprises such as industrial refrigerators with a high level of reliability of their operation while maintaining the proper quality of cooling, freezing and storage of various types of products, the article analyzes the current level of safety and time to failure of equipment for refrigeration equipment for refrigeration of industrial refrigerators and system analysis of the technical system of equipment of refrigeration machines to determine the requirements for the system for assessing the level of safety of equipment of enterprises - industrial refrigerators.

A methodology has been developed for analyzing the state of the equipment of refrigeration machines of industrial refrigerators, as an object of malfunctions.

Models of possible malfunctions are constructed with the identification of relationships between technological parameters of operability, reliability and emergency situations.

A situational model of the state of the refrigeration machine as a source of malfunctions has been developed, which is distinguished by the ability to identify relationships between parameters, events - the causes of emergencies and the state of refrigeration supply of refrigeration chambers.

Knowledge about fuzzy situations is structured and fuzzy reliability models are constructed that characterize the state of the equipment.

The practical value of the study lies in the development of a methodology for assessing the reliability and durability of refrigeration equipment based on a neuron-fuzzy identification method, creating a knowledge base and a system for managing the refrigeration plant performance process. Thus, it is possible to manage systems for predicting and monitoring emergency situations in systems for operational monitoring of technological processes for freezing the results of eating.

Key words: refrigeration supply, refrigerating chambers, reliability, neuron-fuzzy modeling, intelligent system.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

З метою проектування сучасних смарт-підприємств – промислових холодильників (ПРХ) – із забезпеченням високого рівня надійності їх роботи за умови збереження належної якості охолодження, заморожування та зберігання м'ясної, рибної та плодоовочевої продукції, вважаємо за необхідне провести такі дослідження:

- виконати аналіз існуючого рівня безпеки та часу напрацювання до відмови обладнання ХМ – холодопостачання промислового холодильника, зробити системний аналіз технічної системи обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ та визначити вимоги до системи оцінки рівня безпеки обладнання ПРХ;
- побудувати системну модель оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ та розробити математичну модель оцінки стану обладнання ПРХ з урахуванням параметрів охолодження та заморожування продуктів харчування і статистичних даних про відмову вузлів ХМ, фенкойлів, філерів-випарників, систем контролю й регулювання параметрів холодоагенту, енергозабезпечення з використанням апарату теорії нечіткої логіки;
- розробити алгоритм ідентифікації нечіткої моделі оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ, алгоритм самоорганізації вхідних даних нечіткої моделі оцінки стану обладнання ПРХ, алгоритм оцінки стану обладнання ПРХ, алгоритм прийняття рішень щодо експлуатації обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ;
- розробити методи та алгоритми нейронечіткого керування ХМ – холодопостачання ПРХ, нечутливі до значної нестационарності протікання явищ холодообміну й процесів вимірювання параметрів охолодження, заморожування продуктів харчування та виконати проектні рішення щодо розробки інтелектуальної системи керування ХМ – холодопостачання промислового холодильника.

### Аналіз останніх джерел

Питання, пов'язані з системним аналізом складних технологічних процесів та розробкою систем їх ідентифікації з розпізнаванням аварійних ситуацій на баз комп'ютерних технологій типу технологій штучного інтелектуального керування розглядаються в наукових працях авторів М. З. Згуровського, О. А. Павлова, І. Б. Сіроджи, Ю. Г. Сухенка, О. А. Литвиненка, М. Г. Хмельнюка, О. С. Подмазка та інших представників вітчизняних наукових шкіл [1–5]. У той же час, ці системи розроблялись, в основному, для технологій машинобудування, хіміко-технологічних процесів та металургії. А, отже, не враховували особливостей технологічного процесу одержання штучного холоду, керування процесами заморожування продуктів харчування з різними режимами холодозабезпечення холодильних камер ПРХ.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення надійності складного процесу холодозабезпечення за рахунок моделювання надійності та довговічності стану обладнання холодильних машин на основі нейронечіткого методу ідентифікації їх стану.

### Виклад основного матеріалу

У процесі виконання проектних рішень щодо розробки смарт-підприємств ПРХ у відповідності до завдань програми «Індустрія 4.0 в Україні» необхідно спочатку розробити математичну модель стану обладнання ХМ. Вона повинна відрізнитись від існуючих особливою побудовою, що дозволить одержувати достовірні результати розрахунків критеріїв надійності системи за існуючих умов з урахуванням невизначеності вхідної інформації. Таку модель можна побудувати шляхом оброблення інформації про технологічний процес холодопостачання і статичних даних про відмови елементів холодильного обладнання з використанням апарату нечіткої логіки. Для цього потрібно визначити вимоги до математичного забезпечення системи оцінки стану обладнання ХМ підприємства-холодильника.

Якщо за критерій прийняти такий показник, як час безвідмовної роботи  $u_{пр}$  або час надійної експлуатації елементів обладнання ХМ, а засобами його досягнення – множину передумов відновлення ( $XE$ ), що включатиме час експлуатації, час відмови системи, кількість аварій та відмов, фізичні характеристики технічних пристроїв агрегатів КМ, ступень зношеності, корозії, тоді показник  $u_{пр}$  можна виразити через залежність виду:

$$u_{пр} = F(XE, A, \varepsilon), \quad (1)$$

де  $A$  – параметри технологічного процесу виробництва холоду: холодопродуктивність, температура, вологість, контроль за надійною роботою елементів ХМ, проведення вантажно-розвантажувальних робіт (ВРР) тощо;

$\varepsilon$  – відхилення, можливі збої, в тому числі за рахунок впливу людського фактору тощо.

Математичне забезпечення системи оцінки стану обладнання ХМ та показників його безпеки повинно бути побудовано з урахуванням перелічених вище особливостей функціонування.

Для розробки нечіткої моделі прогнозування рівня безпеки системи обладнання ХМ необхідно описати ситуацію пошуку несправностей, яка зв'язує множину передумов відновлення  $XE$  і множину появи відмов  $u_{пр}$ . Множину  $XE$  будемо визначати на основі оброблення інформації про параметри технологічного процесу і події в обладнанні ХМ та системі холодопостачання. Вхідну інформацію будемо отримувати від інформаційної системи АСУ-АСУТП підприємства-холодильника (верхній і середній рівень АСУТП – локальні системи керування ХМ) [6, 7] у вигляді станів обладнання («Компресор», «Конденсатор», «Випарник», «Камери-контейнери», «Холодопостачання», «Холодильне поле камер-контейнерів», «Витрати холодильного агента», «Витрати води, повітря, електрики»). Ці дані будуть надходити на сервер бази даних для опрацювання та подальшого збереження.

Математичне забезпечення повинно виконувати такі функції:

- імітаційне моделювання обладнання холодопостачання ХМ підприємства-холодильника;
- оптимізацію вхідних параметрів процесу холодопостачання камер-контейнерів, що містять у собі блок самоорганізації даних (FCM) і блок оптимізації нечіткої бази знань;
- нейрон-нечітке моделювання оцінки стану обладнання ХМ підприємства-холодильника, навчання і структурну ідентифікацію на основі оптимізованих даних, а також створення сховищ даних і баз даних статистики, бази даних контрольованих змінних.

На рис. 1 наведено системну модель оцінки обладнання ХМ – холодопостачання промислового холодильника.

На функціональній схемі представлено такі блоки:

- модуль розрахунку прогностичних показників на основі нейронечіткого моделювання НМ (ресурс роботи ХМ, зношення);
- блок 1 – оцінки стану обладнання ХМ, оптимізації значень контрольованих змінних;
- блок 2 – нечіткої оцінки показників стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ;
- блок 3 – ідентифікації параметрів та структури елементів ХМ;
- блок 4 – нечіткого логічного виводу;
- блок 5 – оптимізації ТП на основі нечіткої (FCM) кластеризації;
- блок 6 – формування та оптимізації нечіткої БД.

З точки зору побудови математичної моделі оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ і оцінки процесу виникнення відмов елементів технічної системи його обладнання, необхідно представити її вихідні змінні:  $y_k, y_{kn}$  – показники стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ, які визначають рівень надійності елементів:  $k$  – рівень технологічних об'єктів (підмоделі),  $n$  – рівень компресорних машин і механізмів (елементи підмоделей).

Статичну модель наведемо у вигляді залежності:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

де  $x_i$  – вхідні змінні (фактори), які суттєво впливають на стан обладнання,  $n$  – кількість факторів;

$y$  – показник стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ (критерій безвідмовності).

Оцінка стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ здійснюється шляхом оброблення інформації про вхідні параметри  $x_i$  ( $i$  – кількість змінних) за допомогою апарата нечіткої логіки (блоки 4, 5, 6). Інформація у вигляді лінгвістичних змінних щодо розробки нечіткої бази знань надана в таблиці 1. Побудова нечіткої моделі оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ для моделі (рис. 2) зведена до наступних етапів визначення структури, завдання нечітких множин, завдання функцій належності, вибору алгоритму розрахунку нечіткого введення.

Модель оцінки стану ХМ – холодопостачання ПРХ розділена на чотири підмоделі з критерієм:

$y$  – показника стану обладнання ХМ – холодопостачання камер – контейнерів промислового холодильника (критерій безвідмовності), %:

$y_1$  – модель холодильної машини ( $y_{11}$  – компресор;  $y_{12}$  – електродвигун – тиристорний перетворювач компресора;  $y_{13}$  – холодопродуктивність компресора;  $y_{14}$  – температура холодильного агента;  $y_{15}$  – тиск конденсації та температура охолодженого середовища;  $y_{16}$  – температура холодоносія на виході із випарника та температура кипіння);

$y_2$  – модель системи керування ХМ ( $y_{21}$  – положення системи «регулюючий клапан – температура – холодопродуктивність»;  $y_{22}$  – витрати холодильного агента).

$y_3$  – модель холодопостачання фенкойлів ( $y_{31}$  – продуктивність випарника чилера;  $y_{32}$  – продуктивність циркуляційного насосу);

$y_4$  – модель холодопостачання  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) камер-контейнерів ( $y_{41}$  – температура в камерах контейнеру;  $y_{42}$  – температура продукту,  $y_{43}$  – вологість в камерах контейнеру).

На рисунку 2 наведено структуру моделі оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ, а інформація у вигляді лінгвістичних змінних зведена до таблиці 1. Система відношень, яка відповідає структурі моделі оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ, має вигляд:

$$y = \prod y_k = y_1 \& y_2 \& y_3 \& y_4 \& \dots \& y_k = \prod y_{kn}, \quad (3)$$

де  $y_{kn} = f(x)$ , тому що алгебраїчний добуток ( $i$ ) зберігає безперервність нечіткої моделі відносно параметрів функцій приналежності.



Вхідні змінні, $x_i$ ( $i$ – кількість змінних)		Вихідні змінні – показник стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ, $y_{kn}$	
		$k$ – рівень технологічних об'єктів	$n$ – рівень машин і механізмів
		керування ХМ	холодопродуктивність
$x_{34}$	Холодопродуктивність		$y_{22}$ Витрати холодильного агенту, питомі витрати електрики
$x_{35}$	Тип холодильного агенту		$y_{23}$ Витрати води
$x_{36}$	Заміри температури ХМ у процесі холодопостачання	Блок 3 $y_3$ –	$y_{31}$ Продуктивність випарника – чилеру
$x_{37}$	Рівень мастила	холодопостачання фенкойлів	$y_{32}$ Продуктивність циркуляційного насосу
$x_{311}$	Час заморожування / тривалість охолодження	Блок 4 $y_4$ – холодопостачання камер ПРХ	$y_{41}$ Температура у камерах контейнеру
$x_{312}$	Щільність охолодженого продукту		$y_{42}$ Температура продукту, його геометрія
$x_{313}$	Теплопровідність замороженого продукту		$y_{43}$ Вологість
$x_{314}$	Продуктивність холодильної камери ПРХ	Блок 5 $y_5$ – види технічних пристроїв	$y_{51}$ Пристрої АСУ-АСУТП протиаварійного захисту
$x_{315}$	Дані про наявність дефектів у процесі охолодження / заморожування туші		$y_{52}$ Електрообладнання ХМ, АД-ТПЧ
$x_{316}$	Холодильне поле камери ПРХ		$y_{53}$ Динамічне обладнання автоматики контролю
$x_{317}$	Дані про геометрію ( $\Phi$ ) туші (напівтуші) ВРХ		$y_{54}$ Опорні системи (вузли, рами контейнерів)

Таблиця 2

## Лінгвістичні змінні та нечіткі множини для оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання ПРХ

Позначення змінної	Назва змінної	Універсальна множина	Терм-множина для оцінок
Для компресорів каскаду ХМ			
$T_{3M}$	Температура кипіння	-40 – -50 °С	Низька, середня, висока
$V_{x,a}$	Масові витрати холодильного агенту	кг/с	Низькі, середні, високі
$Q_{x,l,km}$	Холодопродуктивність КМ	кДж/кг	Низька, середня, висока
$Q_{x,l,v}$	Холодопродуктивність випарника (В)	кВт	Низька, середня, висока
$D$	Критерій накопичення пошкоджень	0 – 100%	Низький, середній, високий
$D_2$	Скорегований критерій накопичення пошкоджень	0 – 100%	Низький, середній, високий
$I$	Критерій довговічності	0 – 100%	Дуже низька, низька, середня, висока, дуже висока
Для конденсатора			
$Q_{т,кн}$	Теплопродуктивність конденсатора	кВт	Низька, середня, висока
$t_{кн1}, t_{кн2}$	Температура води на вході і виході конденсатора	°С	Норма, нижче норми, вище норми
$I_{тп}$	Інтенсивність теплопередачі	на 1°С	Низька, середня, висока
$D_{кн}$	Критерій накопичення пошкоджень	0 – 100%	Низький, середній, високий
$I_{кн}$	Критерій довговічності конденсатора	0 – 100%	Дуже низький, низький, середній, високий, дуже високий
Для морозильних камер заморожування			
$\tau_o, \tau_{кз}$	Тривалість охолодження, час заморожування	с	Висока, середня, низька
$\rho$	Густина охолодженого продукту	кг/м <sup>3</sup>	Висока, середня, низька
$\lambda$	Теплопровідність замороженого продукту	Вт(м*к)	Висока, середня, низька
$\Phi_{т,п}$	Форма туші, її геометрія	м <sup>2</sup>	Стандартна, близька до стандарту, нестандартна
$D_{кз}$	Критерій накопичення пошкоджень	0 – 100%	Низький, середній, високий
$I_{кз}$	Критерій довговічності камери заморожування	0 – 100%	Дуже низька, низька, середня, висока, дуже висока

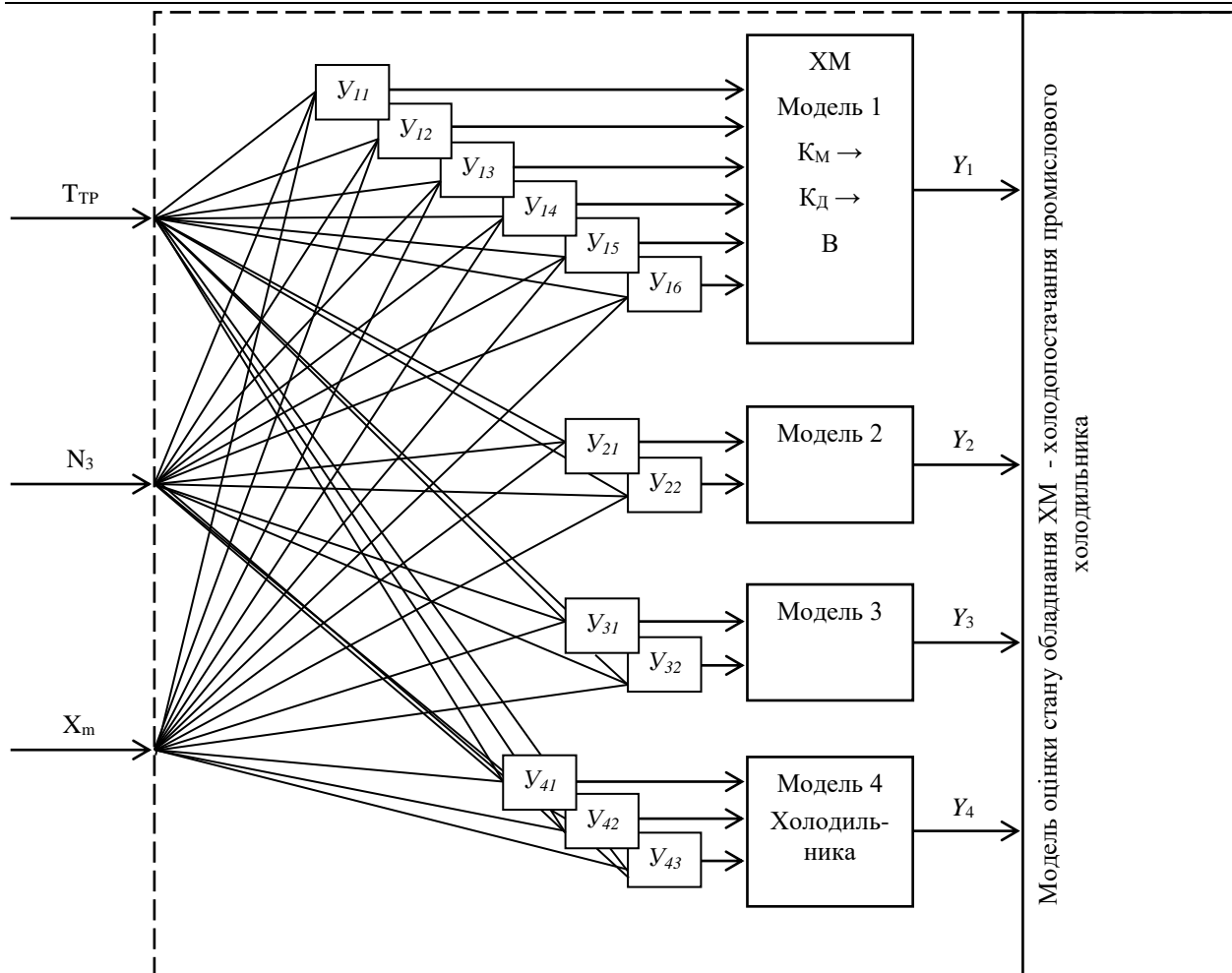


Рис. 2. Структура моделі оцінки стану обладнання ХМ – холодопостачання промислового холодильника:  $T_{тр}$  – термін експлуатації ХМ після останнього ремонту;  $N_з$  – кількість непланових зупинок компресорного обладнання;  $X_m$  – фактори впливу, які необхідні для розрахунку критерію довговічності ( $I_d$ , %)

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Таким чином, постійна оцінка надійності обладнання і керованих впливів на технологічні процеси заморожування (охолодження) збільшує працездатність системи в цілому і розширює довговічність окремих елементів і системи холодозабезпечення в цілому.

На основі розроблених нечітких баз знань оцінки стійкості обладнання ХМ – холодозабезпечення камер ПРХ необхідно надалі провести налагодження параметрів функцій належності вхідних змінних за допомогою структурної і параметричної ідентифікації та побудувати налагоджену нечітку модель оцінки стану обладнання ХМ – холодозабезпечення камер ПРХ.

### Література

1. Згуровский М. З., Павлов А. А. Труднорешаемые задачи комбинаторной оптимизации в планировании и принятии решений. Київ : Наук. думка, 2016. 716 с.
2. Сироджа И. Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта и принятия решений и управления. Київ : Наукова думка, 2002. 418 с.
3. Сухенко Ю. Г., Литвиненко О. А., Сухенко В. Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв : підручник. Київ : НУХТ, 2010. 547 с.
4. Хмельнюк М. Г., Яковлева О. Ю., Остапенко О. В. Энергетичний менеджмент і аудит. Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2017. 224 с.
5. Хмельнюк М. Г., Подмазко О. С., Подмазко І. О. Холодильні установки та сфери їх використання : Підручник. Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2014. 484 с.
6. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Серебренников В. М. Автоматизовані системи керування виробництвом смарт-продуктів харчування : монографія. Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2021. 312 с.
7. 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 Хмельницького національного університету*. 2021. № 6. С. 264–271.

**References**

1. Zgurovskij M. Z., Pavlov A. A. Trudnoreshaemye zadachi kombinatornoj optimizacii v planirovanii i prinyatii reshenij. Kyiv: Nauk. dumka, 2016. 716 s.
2. Sirodzha I. B. Kvantovye modeli i metody iskusstvennogo intellekta i prinyatiya reshenij i upravleniya. Kiev : Naukova dumka, 2002. 418 s.
3. Sukhenko Yu. H., Lytvynenko O. A., Sukhenko V. Yu. Nadiinist i dovhovichnist ustatkuvannia kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv: Pidruchnyk. Kyiv : NUKhT, 2010. 547 s.
4. Khmelniuk M. H., Yakovleva O. Yu., Ostapenko O. V. Enerhetychnyi menedzhment i audyt. Kherson : FOP Hrin D. S., 2017. 224 s.
5. Khmelniuk M. H., Podmazko O. S., Podmazko I. O. Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia : Pidruchnyk. Kherson : FOP Hrin D. S., 2014. 484 s.
6. Khorolskyi V. P., Korenets Yu. M., Serebrenykov V. M. Avtomatyzovani systemy keruvannia vyrobnytstvom smart-produktiv kharchuvannia : monohrafiia. Kryvyi Rih : Vydavets FO-P Cherniavskiy D. O., 2021. 312 s.
7. Khorolskyi V. P., Omelchenko O. V., Korenets Yu. M., Honcharenko V. A., Petrushyna Yu. M. Kholodozabezpechennia kholodylnykh kamer smart-promyslovykh kholodylnykh iz systemamy neuro-nechitkoho keruvannia protsesamy zamorozhuvannia produktiv kharchuvannia. Herald of Khmelnytskyi National University. 2021. № 6. S. 264–271.