

**ХОРОЛЬСЬКИЙ В. П.**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
ORCID ID: 0000-0003-4040-3229  
e-mail: khorolv@ukr.net

**ОМЕЛЬЧЕНКО О. В.**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
ORCID ID: 0000-0003-0704-5909  
e-mail: omelchenko@donnuet.edu.ua

**КОРЕНЕЦЬ Ю. М.**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
ORCID ID: 0000-0002-5873-7908  
e-mail: korenets@donnuet.edu.ua

**ГОНЧАРЕНКО В. А.**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
e-mail: Vladimir.Goncharenko94@gmail.com

**ПЕТРУШИНА Ю. М.**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського  
e-mail: petrushka.u1979@gmail.com

## **ХОЛОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ХОЛОДИЛЬНИХ КАМЕР СМАРТ-ПРОМИСЛОВИХ ХОЛОДИЛЬНИКІВ ІЗ СИСТЕМАМИ НЕЙРО-НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ЗАМОРОЖУВАННЯ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ**

*Досліджена сукупність теоретичних, методологічних і практичних задач, зв'язаних зі створенням інтелектуального комплексу для адаптивного керування параметрами мікроклімату процесів заморожування продуктів харчування в холодильних камерах промислового холодильника. Відповідно для цієї задачі розроблено структуру нейромережевого регулятора холодопродуктивності холодильних машин АСУТП промислового холодильника, в якому інформація надходить в базу даних, нейромережу з модулем навчання та перетворюється в модулі формування рішень в управлінські впливи на виконавчі інтелектуальні механізми компресорів, конденсаторів, випарників, мінімізуючи викиди CO<sub>2</sub>. Розроблено модель холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника, в якій параметри геометрії завантаження та швидкості заморожування, тиску холодоагенту у випарнику в реальному масштабі часу визначають параметри холодозабезпечення холодильних камер. Мікроклімат холодильної камери оцінюють за допомогою багатопараметричної моделі нейрон-нечіткого дерева рішень з двома інтегрованими вихідними вузлами класифікації стану холодозабезпечення холодильних камер. Для особи, що приймає рішення розроблено інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень головного блоку верхнього рівня АСУТП промислового холодильника, яка відрізняється від аналогів точністю прогнозування якості заморожуваного продукту за рахунок навчання нейромережі методом зворотного розповсюдження.*

*Імітаційні дослідження системи нейромережевого керування холодозабезпеченням холодильних камер і процесу заморожування продуктів зі змінними структурами довело, що система забезпечує задані параметри якості управління, мінімізацію викидів CO<sub>2</sub> і запобігає втрату смакових властивостей заморожуваного продукту.*

*Ключові слова: холодозабезпечення, камери, керування, нечітке дерево рішень, інтелектуальна система, прийняття рішень.*

VALENTYN KHOROLSKY, OLEKSANDR OMELCHENKO,  
YURI KORENETS, VOLODYMYR HONCHARENKO, YULIYA PETRUSHYNA  
Donetsk National Economy and Trade and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky

## **REFRIGERATION SUPPLY OF REFRIGERATION CHAMBERS OF SMART INDUSTRIAL REFRIGERATORS WITH NEURON-FUZZY CONTROL SYSTEMS OF FOOD FREEZING PROCESSES**

*A set of theoretical, methodological and practical problems associated with the creation of an intelligent complex for adaptive control of microclimate parameters, the processes of freezing food products in the refrigerating chambers of an industrial refrigerator has been studied. Accordingly, for this task, the structure of the neural network controller of the refrigeration capacity of refrigeration machines of the process control system of an industrial refrigerator was developed, in which information enters the database, a neural network with a learning module and turns into decision-making modules into management actions on the executive intelligent mechanisms of compressors, condensers, evaporators, minimizing CO<sub>2</sub> emissions. A model of refrigeration supply for refrigerating chambers of an industrial refrigerator has been developed, in which the parameters of loading geometry and freezing speed, refrigerant pressure in the evaporator in real time determine the parameters of refrigeration supply for refrigerating chambers. The microclimate of the refrigerating chamber is estimated using a multi-parameter model of a neuron-odd decision tree with two integrated output nodes for classifying the state of refrigeration supply of refrigerating chambers. For the decision maker, an intelligent decision support system has been developed for the main block of the upper level of the process control system for an industrial refrigerator, which differs from analogues in the accuracy of predicting the quality of the frozen product by training the neural network using the backpropagation method.*

*Simulation studies of the neural network control system for the refrigeration supply of refrigerating chambers and the process of freezing products with interchangeable structures proved that the system provides the specified control quality parameters, minimizes CO<sub>2</sub> emissions and prevents the loss of taste properties of the frozen product.*

*Key words: refrigeration, cameras, control, fuzzy decision tree, intelligent system, decision making.*

### Постановка проблеми

Розробка технологічного обладнання виробництва смарт-продуктів харчування для населення, яке мешкає на територіях з техногенним тиском, пов'язана зі створенням і використанням холодильних машин, технологій холодозабезпечення холодильних камер промислових холодильників. Відомо широке використання штучного холоду в системах збереження харчової продукції (м'яса, риби, птиці тощо), яку заморожують, доморожують, розморожують на різних стадіях виробництва, транспортування і зберігання [1]. Холод використовують у технологіях виготовлення, охолодження і збереження ковбас, консервів, кондитерських виробів. Заморожують також фрукти, овочі, ягоди в спеціальних холодильних камерах промислових холодильників (ПРХ). Найбільше розповсюдження в процесах виробництва холоду одержали компресорні парові холодильні установки, в основі принципу дії яких лежить теоретичний цикл Карно [2]. Технологічні процеси виробництва холоду за допомогою холодильних машин характеризуються значною енергоемністю, потенційно небезпечні, на їх роботу впливають збурення, які можна віднести до квазінелінійних технологічних процесів (з енергетичними втратами в магістралях і в обладнанні установок, змінним складом і властивостями холодильних агентів, забрудненням і корозією теплопередавальних поверхонь) [3]. Складність технологічних процесів заморожування (охолодження) продуктів харчування за критерієм збереження їх якості і основного технологічного обладнання (холодильних установок, конденсаторів, випарників) промислових холодильників, чисельність і взаємозв'язок параметрів, необхідних для оперативного контролю і управління технологічними процесами холодозабезпечення в темі з процесом, вимагають від науковців розробки автоматизованих систем керування з високим рівнем інформаційного забезпечення оперативного персоналу інформацією про стан заморожуваного (охолоджуваного) продукту та стан обладнання холодильних машин. Тому розробка теоретичних основ оцінки керування холодопродуктивністю холодильного обладнання та розробка систем контролю параметрів холодильних камер з мінімізацією втрат якості продукції за рахунок помилок оперативного персоналу є важливим і актуальним завданням в плані впровадження цифрових систем керування складними процесами виробництва холоду.

### Аналіз останніх джерел

До сучасного періоду проблемами теорії холоду, оптимізації холодильних машин, процесів холодопостачання, їх автоматизованого керування в харчовій промисловості в науковому плані займалися та займаються вчені: М.Г. Хмельнюк, В.М. Василенко, С.Ф. Горикін, О.С. Подмазко, Н.В. Іващенко, М.М. Масліков, В.М. Владіміров, С.Ю. Лар'яновський, О.С. Тітлов, І.Г. Чумак, П. І. Дячек, В.С. Каліонов, Ю.Д. Румянцев, В.В. Покотілов, В. Маак, Г. -Ю. Еккерт, Жан Луї Кошпен та ін. [1–11].

Активні дослідження ведуться у сфері інтелектуального цифрового керування холодильними компресорними машинами відносно розробки й удосконалення принципово нових рішень автоматизованих систем управління промисловими холодильниками [4, 5, 10].

У більшості наукових праць [5, 6] автори підкреслюють складність поставлених задач і недостатність даних щодо автоматизованого керування технологічними процесами заморожування продуктів у холодильних камерах великої продуктивності (більше 1,5...2 т) з різними температурами заморожування і зберігання.

У наукових працях [7, 8] доведено, що об'єкти холодозабезпечення віднесені авторами до багато параметричних, з достатньою великою кількістю лінійних зв'язків, а тому оптимізація якості зберігання продуктів харчування, тобто стабілізація температурних режимів і мікроклімату в холодильних камерах, вимагає використання спеціальних і достатньою складних алгоритмів керування. Класичні системи регулювання в даній задачі керування технологічними процесами заморожування (охолодження) продуктів харчування без втрати їх якості в умовах, наприклад, ситуації з обмеженням потужності енергосистеми, не враховують багатозв'язаність параметрів і нелінійність цих зв'язків. У той же час підтримання параметрів холодозабезпечення в  $N$  холодильних камерах у заданих межах також в повній мірі не вирішує задачу керування, оскільки найбільш важливим є підтримання оптимальних процесів теплообміну між повітрям і продуктом, що призводить до уповільнення охолодження і заморожування, в зв'язку з чим відзначаються великі втрати маси продукту, а, отже, потрібна велика виробнича площа для камер холодної обробки [7–10].

У зв'язку з цим представляється перспективним використання інтелектуальних технологій керування процесами заморожування (охолодження) в харчовій промисловості з максимальним врахуванням рекомендацій виробничого персоналу і результатів досліджень різних процесів заморожування в умовах багаторівневого управління промисловим холодильником.

**Метою роботи** є підвищення якості керування технологічним процесом холодозабезпечення холодильних камер за рахунок розробки нейромережових регуляторів, інтелектуальних систем підтримки прийняття оперативних рішень та АСУТП промислових холодильників.

### Виклад основного матеріалу

Технологічні процеси виробництва холоду за допомогою компресорних холодильних машин характеризуються великою кількістю циклічних, розділених і з'єднаних технологічних потоків, множиною регулюємих і контролюємих параметрів. Вони залежать від:

- некерованих стрибкоподібних змін навантаження,
- енергетичних втрат в магістралях холодопостачання і в обладнанні холодильних установок;
- зміни властивостей і складу холодильного агента і теплопередаючих поверхонь.

Крім цього, технологічні процеси виробництва холоду є енергоємними в силу фізичних закономірностей виробництва холоду і відносяться до числа потенційно небезпечних, що обумовлено агресивними, ядовитими, вибухонебезпечними властивостями холодоагентів [5, 10].

Загальна задача стратегічного оперативного управління промисловими холодильниками з сучасними компресорними холодильними машинами полягає в регулюванні холодопродуктивності ХМ при зміні теплового навантаження на об'єкт охолодження і стабілізації режимів роботи обладнання (компресора, конденсатора, випарника) за допомогою регуляторів, датчиків температури, вологі, тиску, мікропроцесорів та АСУТП [4, 5, 10, 11] холодозабезпечення мікроклімату холодильних камер. На рис. 1 наведено загальну структуру взаємозв'язків, оцінених експертним шляхом, параметрів холодильної машини, холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника.

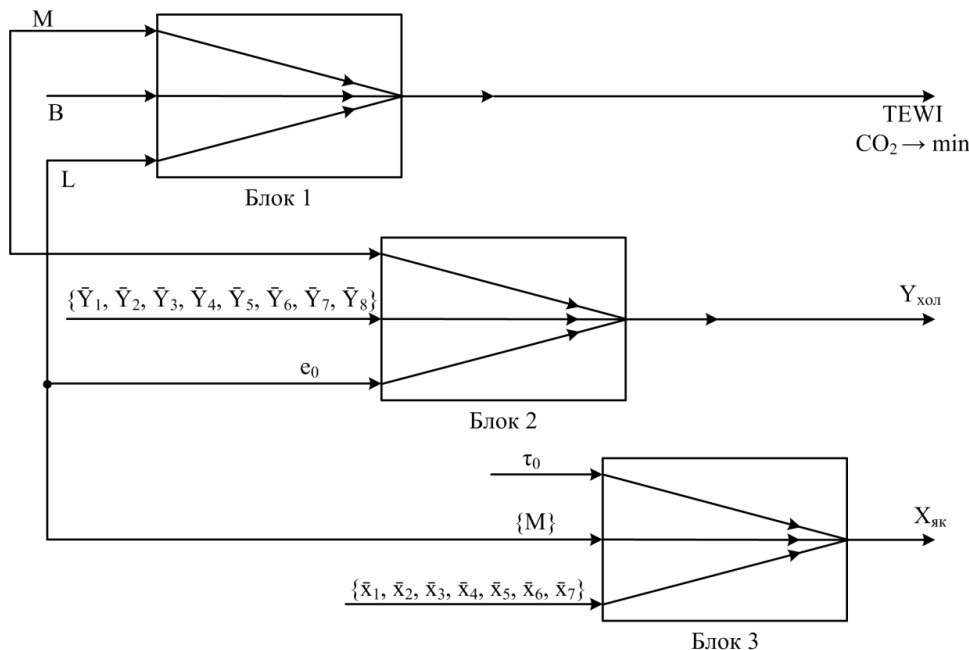


Рис. 1. Загальна структура взаємозв'язків вхідних і вихідних параметрів холодильної машини (ХМ) холодозабезпечення холодильної камери (ХК) промислового холодильника

Забезпечення номінальних параметрів мікроклімату холодильної камери призведе, в свою чергу, до збереження корисних властивостей продукту заморожування (охолодження) і збільшить термін його придатності. У той же час, проєктанти повинні забезпечити оптимізацію витрат електроенергії (в період підтримування ефективної роботи холодильних машин), а за рахунок використання сучасних систем контролю викидів в атмосферу двоокису вуглецю забезпечити не лише мінімізацію викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу, а, головне, вибрати найбільш небезпечні холодоагенти [1, 2]. У світовій практиці для аналізу впливу холодильних агентів на зовнішнє середовище використовують параметр TEWI (Total Equivalent Warning Impact). Він носить назву сумарної еквівалентної теплової дії [7].

$$TEWI = GWP \cdot M + aBL \tag{1}$$

- де  $GWP$  – потенціал глобального потепління;  
 $M$  – маса емісії холодоагенту в атмосферу;  
 $a$  – коефіцієнт, що характеризує емісію двоокису вуглецю в атмосферу під час вироблення 1кг CO<sub>2</sub>/1кВт·год електроенергії;  
 $B$  – кількість електроенергії, спожитої за період роботи холодильної установки, кВт·год;  
 $L$  – час роботи холодильної установки, год.

Звернемося до рис. 1, на якому наведено загальну структуру взаємозв'язків вхідних і вихідних параметрів:

- зовнішнього середовища (блок 1) з мінімізацією викидів CO<sub>2</sub> → min в атмосферу;
- холодильної машини з мінімізацією питомих витрат енергії  $e_0$  і чинників  $\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \bar{Y}_4, \bar{Y}_5, \bar{Y}_6, \bar{Y}_7, \bar{Y}_8, \bar{Y}_9\}$ , які характеризують холодозабезпечення  $\bar{Y}_{хол}$  та, відповідно, холодопродуктивність холодильних компресорних машин (блок 2);
- залежність втрат якості продукту заморожування  $X_{як}$ , тривалості заморожування  $\tau_0$  продукту і чинників  $\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6, \bar{x}_7\}$ , які визначають параметри якості заморожування продуктів та параметри мікроклімату  $\{M_{х.к.}\}$  холодильної камери (блок 3) промислового холодильника.

Параметри мікроклімату  $\{M_{х.к.}\}$  холодильної камери тісно пов'язані з параметрами  $X_{як}$ ,  $\bar{Y}_{хол}$ , TEWI,  $\tau_0$ ,  $e_0$  і на них впливають різні управлінські та збурюючі фактори [5, 7]. Отже, холодильна камера промислового

холодильника, як об'єкт керування є багатопараметричною системою з великою кількістю нечітких нелінійних зв'язків. Для покращення якості керування складним технологічним процесом заморожування харчових продуктів необхідно розробити інтелектуальну систему керування процесом холодозабезпечення із заданими параметрами мікроклімату  $\{M_{x,k}\}$ , в основі якої буде покладено технології нечіткого оцінювання параметрів  $\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \dots, \bar{Y}_9\}$  і  $\{\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_7\}$  та технологій прийняття оптимальних рішень [12]. Суттєвою перевагою такого підходу з використанням інтелектуальних технологій є:

- відмова від високоточних систем контролю параметрів мікроклімату  $\{M_{x,k}\}$ ;
- скорочення часу (зменшення часу) вимірювання параметрів їх реєстрації та обробки;
- підвищення об'єктивності досліджень;
- можливість прогнозування параметрів TEWI,  $X_{як}$ ,  $\bar{Y}_{хол}$  в режимі реального часу.
- Для побудови АСУТП холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника

необхідно:

- визначити параметри, що їх необхідно контролювати, та управлінські впливи на регульовані параметри холодопродуктивності ХМ;
- розробити інтелектуальну систему підтримки прийняття операційних рішень (ІСППОР).

Для цього необхідно розробити критерії холодозабезпечення та якості заморожуваного продукту харчування.

У процесі визначення експертних знань [12] та побудови бази даних і бази знань із джерел [1–11] використано ряд змінних, які визначають параметри холодозабезпечення, мікроклімат холодильних камер та параметри  $CO_2$ .

Експертним шляхом доведено, що критерій холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника  $Y_{хол}$  залежить від наступних чинників:

- $Y_1$  – холодопродуктивності холодильних машин;
- $Y_2$  – витрати холодильного агента (кг/с) через компресор;
- $Y_3$  – температури кипіння холодоагенту;
- $Y_4$  – потужності, що споживається електродвигуном компресора холодильної машини;
- $Y_5$  – параметра TEWI (сумарної еквівалентної теплової дії) з мінімізацією емісії двоокису вуглецю;
- $Y_6$  – теплового балансу холодильної камери (приміщення охолодження);
- $Y_7$  – тиску холодоагенту у випарнику;
- $Y_8$  – швидкості заморожування продукту харчування;
- $Y_9$  – геометрії заповнення холодильної камери продуктом заморожування.

За експертними даними побудовано модель виду:

$$Y_{хол} = b_1Y_1 + b_2Y_2 + b_3Y_3 + b_4Y_4 + b_5Y_5 + b_6Y_6 + b_7Y_7 + b_8Y_8 + b_9Y_9. \quad (2)$$

З коефіцієнтом множинної кореляції  $R_M = 0,989$  модель можна використати в АСУТП для прогнозування параметрів  $Y_{хол}$  та спроектувати нейромережевий регулятор для керування холодопродуктивністю холодильних машин промислового холодильника. На рис. 2 наведено структуру трьох-каналного нейромережевого регулятора керування: 1 – холодопродуктивністю двохступеневої компресорної машини; 2 – холодопродуктивністю конденсаторів; 3 – продуктивністю випарників.

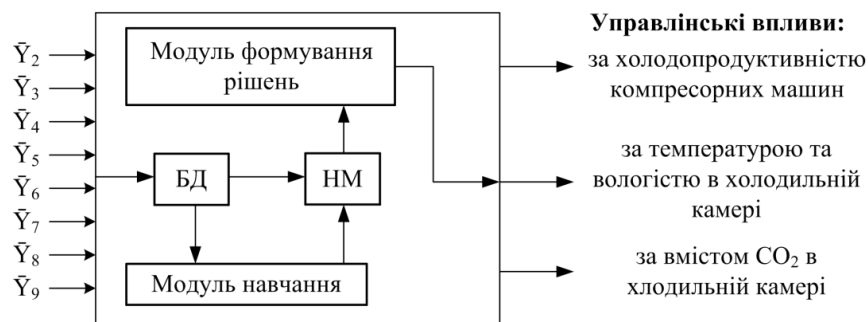


Рис. 2. Структура нейромережевого регулятора холодильної машини

Нейромережевий регулятор складається із чотирьох блоків. Від підсистеми збору даних SCADA-системи інформація про параметри  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_9$  надходить до бази даних, яка передає параметри в модуль навчання, у якому нейромережа навчається. Разом із вхідними параметрами  $\{\bar{Y}\}$  база даних передає в нейромережу також попередні дані про параметри  $\{\bar{X}\}$  мікроклімату в холодильній камері, значення управлінських впливів та інформацію про вхідні параметри якості заморожуваного продукту.

Після цього навчена нейромережа за допомогою модуля формування рішень видає інформацію: 1 – на АРМ особи, яка приймає рішення; 2 – на виконавчі інтелектуальні механізми компресорів, конденсаторів-випарників, забезпечуючи холодопостачання холодильних камер для заморожування м'ясних продуктів промислового холодильника [4].

Відповідно, на виході нейромережевого регулятора на дисплей АРМ диспетчера подаються рекомендації щодо підтримування значень фізичних величин – управлінських впливів щодо температурних режимів, вологи та мікроклімату в холодильній камері.

У процесі вивчення оптимальних параметрів мікроклімату холодильних камер промислового холодильника експертним шляхом оцінюються такі нечіткі параметри:

$x_1$  – відносна вологість повітря в камері;

$x_2$  – температура в камері  $t_{х.к.}$ ;

$x_3$  – температура замороженого продукту;

$x_4$  – витрати електроенергії поршневими компресорами, конденсаторами для досягнення заданих параметрів мікроклімату холодильних камер;

$x_5$  – час роботи холодильної камери (годин) з номінальними параметрами заморожування продукту;

$x_6$  – витрати холодоагенту;

$x_7$  – параметри  $CO_2$  в атмосфері.

На підставі цього одержимо такий критерій якості:

$$X_{як} = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7. \quad (3)$$

де  $X_{як}$  – параметр, що характеризує якість заморожуваного (охолодженого) продукту.

Ми уже відзначали, що параметри  $X_{як}$  продукту залежать від багатьох зовнішніх факторів і від параметрів мікроклімату всередині холодильної камери, для яких можливо побудувати нечітке дерево рішень за методикою [12]. Адаптивне дерево рішень для  $X_{як}$  (якості заморожування продукту харчування) наведено на рис. 3.

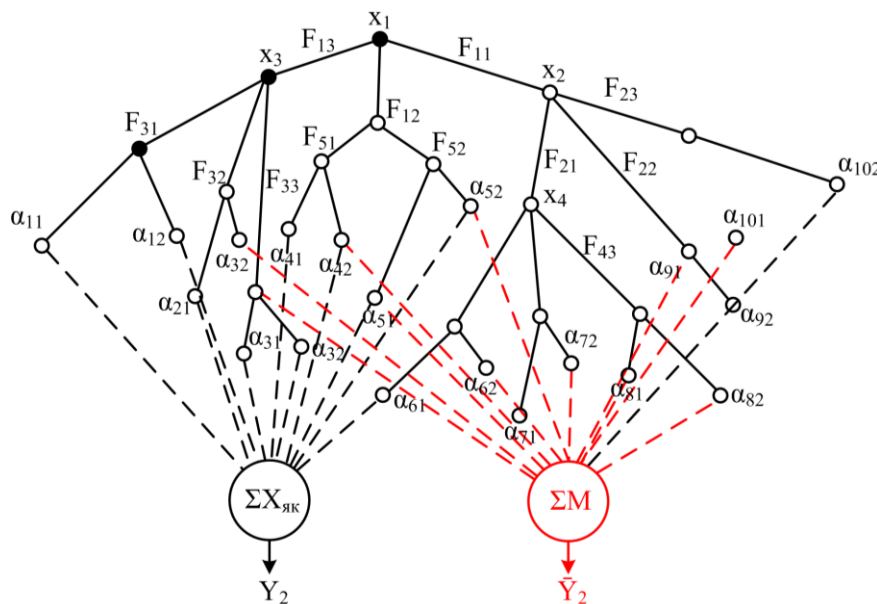


Рис. 3. Дерево нечітких рішень

Дерево прийняття рішень – це дерево, в листі якого побудовані значення цільової функції, а в інших вузлах – умови переходу (наприклад, «Холод» ∈ «Процес заморожування»), які визначають, за яким із ребер необхідно пройти. Якщо для даного спостереження умова «дійсна», то має місце перехід по лівому ребру, якщо умова є «неправдою» – перехід здійснюється правим ребром. Зазвичай, кожний вузол включає перевірку однієї незалежної змінної. Якщо змінна, яка перетворюється у вузлі, приймає категоріальні значення, то кожному можливому значенню відповідає гілка, що виходить із цього вузла дерева. Якщо значенням змінної є число, то перевіряється, більше або менше це значення деякої константи. Для підвищення точності класифікації будемо використовувати нейрон-нечітке дерево рішень, яке має властивість адаптації параметрів за допомогою нейромережевого навчання [12, 13].

На рис. 3 наведено лише частину основного дерева рішень з двома інтегрованими вихідними вузлами. Ці вузли додані до дерева рішень, щоб сформулювати виведення діагностуючих правил рішень: щодо забезпечення параметрів холоду, а, отже, і продуктивності ХМ, та транспортування холоду до холодильної камери ( $\Sigma Q \rightarrow Y_1$ ); мікроклімату в холодильній камері ( $\Sigma M \rightarrow Y_2$ ) та відповідно до ситуації, коли  $y_1$  не відповідає заданим параметрам холодозабезпечення  $\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \dots, \bar{Y}_8\}$ , холодопродуктивності  $Y_1$  і параметрам  $\bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \dots$ , наведеним в моделі (2).

Тоді необхідно спрогнозувати також  $Y_2$  – параметри мікроклімату холодильної камери  $\{M\}$ , які не забезпечують оптимальний режим заморожування  $\{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_7\}$ , тобто  $\bar{y}_{як.ном.} \notin \bar{y}_{як.зад.}$

Отже, будемо класифікувати два стани холодозабезпечення холодильних камер:  $\bar{Y}_1 \in 1$ ;  $\bar{Y}_1 \in 0$  та два стани мікроклімату:  $\bar{Y}_2 \in 1$ ;  $\bar{Y}_2 \in 0$ . При цьому будемо використовувати нейромережевий принцип навчання, який інтерпретує цикл зворотного зв'язку по ієрархічному нечіткому дереву рішень [12]. Адаптація параметрів  $Y_1$  і  $\bar{Y}_1$ ,  $Y_2$  і  $\bar{Y}_2$  значно покращує точність класифікації дерева рішень без втрати інформації про якість заморожуваного продукту харчування, витрат енергії та діагностики параметрів холодопродуктивності та працездатності компресорів ХМ.

З метою обчислення, наприклад,  $Y_1$ , з усіх листів вузла, які відповідають класу 1 («так») знайдені значення ваги  $\alpha_{m1}$  підсумовуються. У даному випадку  $\alpha_{m1}$  ( $0 \leq \alpha_{m1} \leq 1$ ) можливо інтерпретувати як ступінь належності, що  $m$ -й шлях може класифікувати клас 1. Утім відзначимо, що у всіх листових вузлів, що відповідають класу 0 «ні» знайдені значення ваги  $\alpha_{m2}$  підсумовуються, щоб знайти  $\bar{Y}_1$ . З метою довільного набору даних вагу класу  $l$  на  $m$ -листовому вузлі визначимо наступним чином:

$$\mu^i_{path_m} \times \alpha_{ml}, \quad (4)$$

де  $\mu^i_{path_m}$  – ступінь належності  $path_m$ , яку обчислюють за формулою:

$$\mu^i_{path_m} = \prod_{j=1, \dots, 7} F_{jm}(S'_j), \quad (5)$$

де  $F_{jm}$  – функція належності  $j$ -ї змінної, яку визначено на  $m$ -шляху.

Кожний  $m$ -й шлях ( $m = 1, \dots, 7$ ) визначається на просторі вхідних шляхів у перетині від кореневого вузла до  $m$ -го листового вузла. Наприклад,  $path_6$  на рис. 3 можна класифікувати як клас 1 («так») зі ступенем належності  $\alpha_{62}$  [12]. Ступінь належності всіх листових вузлів, що відповідають класу  $l$ , підсумовуються щодо розрахунку прогнозних значень належності:

$Y_l^i$  ( $l = 1, 2$ )  $i$ -го набору при проходженні через дерево рішень;

$$Y_l^i = \sum_{m=1}^7 \mu^i_{path_m} \times \alpha_{ml}, \quad (6)$$

де  $0 \leq Y_l^i \leq 1$ .

Після завершення процесу класифікації формуються класи від найбільшого ступеня належності  $l_0$

$$l_0 = \arg \max_{i=1, 2} \{Y_l^i\}. \quad (7)$$

У випадку оцінки параметрів мікроклімату холодильної камери  $\{M\}$  за параметрами  $X_{\text{як}} = f(x_1, x_2, \dots, x_7)$  оцінка «так» відповідає класу оптимального заморожування, проте оцінка «ні» відповідає класу неоптимального заморожування продукту харчування.

На основі побудованого нейро-нечіткого дерева рішень (рис. 3), що приймає рішення ОПР (диспетчер-оператор, технолог), розробимо інтелектуальну систему підтримки прийняття оперативних рішень (ІСППОР). Для цього запишемо основні нечіткі правила класифікації:

– оптимального мікроклімату холодильної камери  $\{M\}(xk_1, xk_2, \dots, xk_N)$  та якості заморожуваного продукту;

– ефективності параметрів холодозабезпечення (енергоєфективності) холодильних камер промислового холодильника.

Для оцінки мікроклімату  $\{M\}$  холодильної камери запишемо наступні правила:

IF( $x_1$  is  $F_{11}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{11})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{11})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{11}$   $\wedge$   $x_3$  is  $F_{31}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{21})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{22})$   
 IF( $x_2$  is  $F_{11}$   $\wedge$   $x_4$  is  $F_{41}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{31})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{32})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{12}$   $\wedge$   $x_5$  is  $F_{51}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{41})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{42})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{12}$   $\wedge$   $x_5$  is  $F_{52}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{51})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{52})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$   $\wedge$   $x_3$  is  $F_{31}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{61})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{62})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$   $\wedge$   $x_4$  is  $F_{41}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{71})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{72})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_2$  is  $F_{21}$   $\wedge$   $x_5$  is  $F_{51}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{81})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{82})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_6$  is  $F_{61}$   $\wedge$   $x_7$  is  $F_{71}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{91})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{92})$   
 IF( $x_1$  is  $F_{13}$   $\wedge$   $x_4$  is  $F_{41}$   $\wedge$   $x_6$  is  $F_{61}$   $\wedge$   $x_7$  is  $F_{71}$ ) THEN  $x_{zr} = \text{YES}(\alpha_{101})$  and  $x_{zr} = \text{NO}(\alpha_{102})$

Для холодозабезпечення холодильних камер запишемо наступні нечіткі правила роботи компресорних машин і холодильних апаратів промислового холодильника:

IF( $Y_1$  is  $K_{11}$   $\wedge$   $Y_2$  is  $K_{21}$ ) THEN  $Y_{\text{хол}} = \text{YES}(\alpha_{11})$  and  $Y_{\text{хол}} = \text{NO}(\alpha_{11})$   
 IF( $Y_1$  is  $K_{11}$   $\wedge$   $Y_3$  is  $K_{31}$ ) THEN  $Y_{\text{хол}} = \text{YES}(\alpha_{21})$  and  $Y_{\text{хол}} = \text{NO}(\alpha_{22})$   
 IF( $Y_1$  is  $K_{12}$   $\wedge$   $Y_3$   $\wedge$   $Y_4$  is  $K_{43}$ ) THEN  $Y_{\text{хол}} = \text{YES}(\alpha_{43})$  and  $Y_{\text{хол}} = \text{NO}(\alpha_{43})$   
 .....  
 IF( $Y_5$  is  $K_{51}$   $\wedge$   $Y_6$   $\wedge$   $Y_7$   $\wedge$   $Y_8$   $\wedge$   $Y_9$  is  $K_{89}$ ) THEN  $Y_{\text{хол}} = \text{YES}(\alpha_{89})$  and  $Y_{\text{хол}} = \text{NO}(\alpha_{90})$

На основі розроблених нечітких правил, нечіткого регулятора і АСУТП промислового холодильника [4] запропонуємо інтелектуальну систему керування. На рис. 4 наведено схему такої системи у вигляді функціональних блоків: АРМ-диспетчера; АРМ-оператора (технолога); ІВМ – інтелектуальних виконавчих механізмів; МКП – монітору корпоративної продуктивності; ПЗ – програмного забезпечення; серверів, MES, ERP, Промислового Інтернету-речей (ІоТ), цифрової платформи «Іжа». А також з системами керування параметрами мікроклімату холодильної камери ПРХ, виконаними в SCADA-системі Trace Mode [13] і системи цифрових датчиків температури, вібрацій, продуктивності, потужності, геометрії продукту заморожування, вологи тощо [10, 14]. Система забезпечує завдяки МКП коректну візуалізацію технологічного процесу, передачу даних про хід технологічного процесу в режимі реального часу (SCADA-система Trace Mode, інтеграція контролерів виконана за допомогою системи OS-9 і мови програмування стандартів IEC 1131.3).

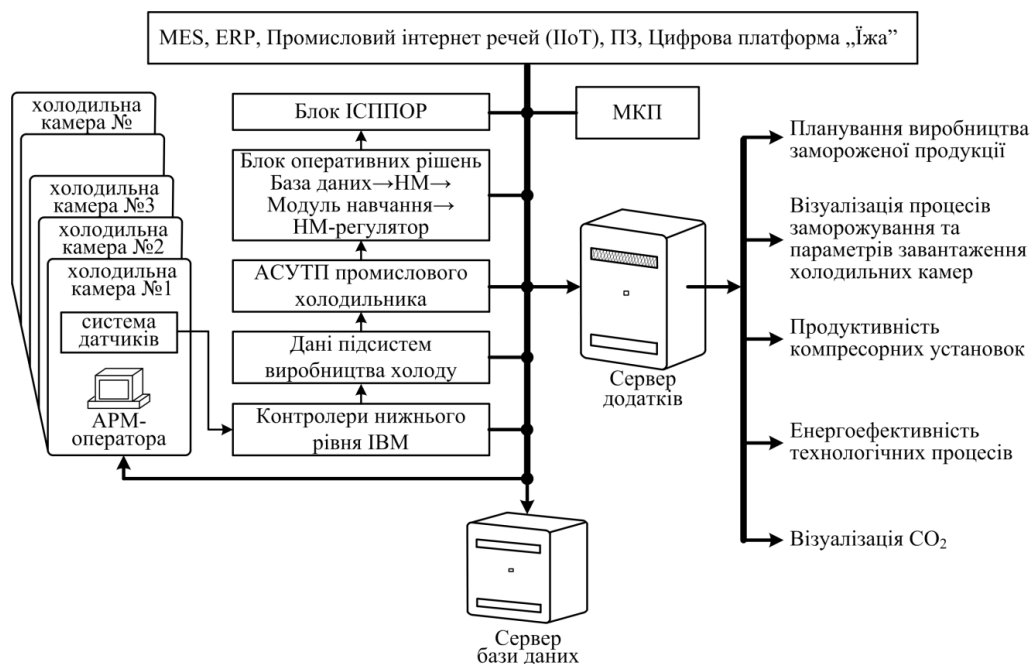


Рис. 4. Функціональні блоки системи керування промисловим холодильником

Параметри візуалізації, що наведені на рис. 4, дозволяють технологу (АРМ-оператора) контролювати за допомогою МКП як якісні показники – параметри заморожуваного продукту, так і параметри мікроклімату холодильної камери, управлінські параметри, параметри збурень, енергетичні параметри компресорних машин. Результати імітаційних досліджень на спеціальному лабораторному стенді холодильної камери показали, що розроблена система:

- забезпечує вимоги до якості цифрового управління холодопродуктивністю компресорних машин (перерегулювання цифрової системи складає 5 %, що забезпечує показники якості заморожування продукції);
- є адаптивною по відношенню до умов виконання технологічного процесу щодо заморожування продуктів харчування зі змінними структурами продукту;
- забезпечує мінімізацію викидів CO<sub>2</sub> та запобігає втраті смакових властивостей заморожуваного продукту.

### Висновки

Розроблено технічні рішення щодо реалізації системи інтелектуального керування процесами заморожування продуктів харчування зі змінними характеристиками якості. За умови нечіткої інформації розроблено моделі холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника й побудовано дерево нечітких рішень. Спроектовано нейронечіткий регулятор з інтелектуальними виконавчими механізмами керування холодопродуктивністю компресорів, конденсаторів-випарників в АСУТП смарт-холодильника, забезпечуючи задані параметри мікроклімату холодильних камер із заданими параметрами якості продукції та мінімізацією викидів CO<sub>2</sub>.

Імітаційне моделювання системи інтелектуального керування технологічним процесом заморожування продуктів харчування в умовах лабораторного полігонного стенду підтвердило: показники якості цифрового керування процесом; система забезпечує коректну візуалізацію технологічного процесу та запобігає втрачання смакових властивостей заморожуваного продукту.

### Література

1. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів : навч. посіб. / М. М. Масліков. – К.: НУХТ, 2007. – 335 с.

2. Тітлов О. С., Горикін С. Ф. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості : навч. посіб. / О. С. Тітлов, С. Ф. Горикін. – Львів : Новий світ 2000, 2011. – 286 с.
3. Холодильні установки : Підручник / І. Г. Чумак, В. П. Чепурненко, С. Ю. Лар'яновський та ін.; За ред. І. Г. Чумака. – Одеса : Рефпринтінфо, 2006. – 550 с.
4. Хорольський В.П., Коренець Ю.М., Гончаренко В.А., Яровий Д.В., Расчехмаров І.В. Теоретичні основи багаторівневого автоматизованого керування холодозабезпеченням промислових холодильників // Обладнання та технології харчових виробництв. – Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. Вип. 2 (43). – С. 122–130.
5. Дячек П. И. Холодильные машины и установки : учеб. пособ. / П. И. Дячек. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 424 с.
6. Владіміров В. М. Малі холодильні компресори : навч. посіб. / В. М. Владіміров. – Донецьк : ДонНУЕТ, 2006. – 326 с.
7. Теплохолодотехніка : Навч. посіб. / С. М. Василенко, В. І. Павелко, А. В. Форсюк та ін.; За заг. ред. С. М. Василенко – К. : Ліра-К, 2019. – 258 с.
8. Хмельнюк М. Г., Подмазко О. С., Подмазко І. О. Холодильні установки та сфери їх використання : Підручник / М. Г. Хмельнюк, О. С. Подмазко, І. О. Подмазко. – Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2014. – 484 с.
9. Румянцев Ю. Д., Калюнов В. С. Холодильная техника : Учебник / Ю. Д. Румянцев, В. С. Калюнов. –СПб.: Изд-во «Профессия», 2005. - 360 с.
10. Покотилов В. В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло- и холодоснабжения / В. В. Покотилов. – Вена : фирма «HERZ Armaturen», 2010. – 178 с.
11. Маакс В., Эккерт Г. –Ю., Кошпен Жан Луи. Учебник по холодильной технике : Основы-Комплектующие-Расчеты / Пер. с фр. под ред. докт. техн. наук В. Б. Сапожникова. – М. : Изд-во Московского университета, 1998. – 1142 с.
12. Нейро-нечёткие методы в интеллектуальных системах обработки и анализа многомерной информации / Т. В. Абрамова, Е. В. Ваганова, С. В. Горбачев, В. И. Сырямкин, М. В. Сырямкин. Томск: Изд-во Томского университета, 2014. – 442 с.
13. Компьютерные технологии при проектировании и эксплуатации технологического оборудования : учебное пособие / Г. В. Алексеев и др. – Саратов : Вузовское образование, 2017. – 171 с.
14. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.

#### References

1. Maslikov M. M. Kholodylna tekhnolohiia kharchovykh produktiv : navch. posib. / M. M. Maslikov. – K.: NUKhT, 2007. – 335 s.
2. Titlov O. S., Horykin S. F. Kholodylnne obladnannia pidpriemstv kharchovoi promyslovosti : navch. posib. / O. S. Titlov, S. F. Horykin. – Lviv : Novyi svit 2000, 2011. – 286 s.
3. Kholodylni ustanovky : Pidruchnyk / I. H. Chumak, V. P. Chepumenko, S. Yu. Larianovskiy ta in.; Za red. I. H. Chumaka. – Odesa : Refpryntinfo, 2006. – 550 s.
4. Khorolskyi V.P., Korenets Yu.M., Honcharenko V.A., Yarovy D.V., Raschekhmarov I.V. Teoretychni osnovy bahatorivnevoho avtomatyzovanoho keruvannia kholodozabezpechenniam promyslovykh kholodylnykyv // Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv. – Kryvyi Rih : DonNUET, 2021. Vyp. 2 (43). – S. 122–130.
5. Dyachek P. I. Holodilnye mashyny i ustanovky : ucheb. posob. / P. I. Dyachek. – Rostov n/D: Feniks, 2007. – 424 s.
6. Vladimirov V. M. Mali kholodylni kompresory : navch. posib. / V. M. Vladimirov. – Donetsk : DonNUET, 2006. – 326 s.
7. Teplokhologodotekhnika : Navch. posib. / S. M. Vasylenko, V. I. Pavelko, A. V. Forsiuk ta in.; Za zah. red. S. M. Vasylenko – K. : Lira-K, 2019. – 258 s.
8. Khmelniuk M. H., Podmazko O. S., Podmazko I. O. Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia : Pidruchnyk / M. H. Khmelniuk, O. S. Podmazko, I. O. Podmazko. – Kherson : FOP Hrin D. S., 2014. – 484 s.
9. Romyancev Yu. D., Kalyunov V. S. Holodilnaya tehnika : Uchebnik / Yu. D. Romyancev, V. S. Kalyunov. –SPb.: Izd-vo «Professiya», 2005. - 360 s.
10. Pokotilov V. V. Reguliruyushie klapany avtomatizirovannyh sistem teplo- i holodosnabzheniya / V. V. Pokotilov. – Vena : firma «HERZ Armaturen», 2010. – 178 s.
11. Maake V., Ekkert G. –Yu., Koshpen Zhan Lui. Uchebnik po holodilnoj tehnike : Osnovy-Komplektuyushie-Raschety / Per. s fr. pod red. dokt. tehn. nauk V. B. Sapozhnikova. – M. : Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1998. – 1142 s.
12. Nejro-nechyoitkie metody v intellektualnyh sistem obrabotki i analiza mnogomernoj informacii / T. V. Abramova, E. V. Vaganova, S. V. Gorbachev, V. I. Syryamkin, M. V. Syryamkin. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 2014. – 442 s.
13. Kompyuternye tehnologii pri proektirovanii i ekspluatcii tehnologicheskogo oborudovaniya : uchebnoe posobie / G. V. Alekseev i dr. – Saratov : Vuzovskoe obrazovanie, 2017. – 171 s.
14. Frajden Dzh. Sovremennye datchiki : spravochnik. – M. : Tehnosfera, 2005. – 592 s.

Рецензія/Peer review : 20.12.2021

Надрукована/Printed :30.12.2021