

ХОРОЛЬСЬКИЙ В. П.

<https://orcid.org/0000-0003-4040-3229>e-mail: khoroiv@ukr.net

КОРЕНЕЦЬ Ю. М.

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

ПЕТРУШИНА Ю. М.

e-mail: petrushka.u1979@gmail.com

РАСЧЕХМАРОВ І. В.

e-mail: raschekhmarov@donnuet.edu.ua

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАМОРОЖУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ В ХОЛОДИЛЬНИХ КАМЕРАХ ПРОМИСЛОВИХ ХОЛОДИЛЬНИКІВ

У статті запропоновано сукупність теоретичних і практичних атрибутів(ознак), зв'язаних зі проектними рішеннями щодо процесів заморожування м'ясних продуктів в холодильних камерах великої вантажомісткості промислових холодильників. Розроблено систему інтелектуальних датчиків контролю параметрів геометрії туші м'яса великої рогатої худоби та ознаки стану випарників холодильної камери і системи холодозабезпечення промислового холодильника. Розроблена система автоматичного розпізнавання, яка працює в режимі реального часу та визначає: геометричні параметри локальних та інтегральних ділянок туші у вигляді параметрів, площини, радіусів, довжини, ширини, кількості точок перегину контурів, геометричного центру елементів зображень; параметри вологості та постійно аналізує простір ділянок холодильної камери.

Запропоновано інтелектуальну систему нейрокерування холодозабезпеченням холодильної камери, в якій вмонтовано дві відеокамери та матричні сенсори з п'єзоелементами оцінки форми туші великої рогатої худоби; доведено, що експертний банк зображення туші дає змогу використати еталонні методи порівняльного аналізу. Завдяки інтерфейсу з підсистемами інформаційного забезпечення система надає оператору-технологу відеоінформацію та автоматично впливає на інтелектуальні виконавчі механізми компресорів, вентиляторів, конденсаторів. Розроблено систему нейронечіткого керування процесом обмерзання випарника, в якій передбачена експертна система, алгоритм розпізнавання, банк експертного зображення випарника зі сніговою шубою та інтелектуальним механізмом ударного впливу ультразвукових коливань на поверхню приладу охолодження.

Наведено узагальнений алгоритм функціонування систем керування холодозабезпеченням холодильної камери промислового холодильника та методика його використання.

Ключові слова: холодозабезпечення, холодильні камери, нейрокерування, інтелектуальна система

VALENTYN KHOROLSKY, YURIY KORENETS, YULIYA PETRUSHYNA, IVAN RASCHEKHMAROV

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

IMPROVEMENT OF SYSTEMS FOR MONITORING AND CONTROLLING THE PROCESS OF FREEZING PRODUCTS IN REFRIGERATING CHAMBERS OF INDUSTRIAL REFRIGERATORS

The article proposes a set of theoretical and practical attributes associated with design decisions regarding the processes of freezing meat products in refrigerators with a large load capacity of industrial refrigerators. A system of intelligent sensors has been developed to control the parameters of the geometry of the carcass of cattle meat and signs of the state of the evaporators of the refrigeration chamber and the refrigeration supply system of an industrial refrigerator. An automatic recognition system has been developed that works in real time and determines: geometric parameters of local and integral sections of the carcass in the form of a plane, radii, length, width, number of contour inflection points, geometric center of image elements; humidity settings. This system constantly analyzes the space of sections of the refrigerating chamber.

An intelligent system for neurocontrol of the refrigeration supply of a refrigerating chamber is proposed, in which two video cameras and matrix sensors with piezoelectric elements for assessing the shape of a cattle carcass are mounted; it has been proved that the expert ink image bank allows using reference methods of comparative analysis. Thanks to the interface with information support subsystems, the system provides the operator-technologist with video information and automatically affects the intelligent actuators of compressors, fans, condensers. A system for neuro-fuzzy control of the evaporator freezing process has been developed, which provides for an expert system, a recognition algorithm, an expert image bank of an evaporator with a snow coat and an intelligent mechanism for the impact of ultrasonic vibrations on the surface of a cooling device.

A generalized algorithm for the operation of refrigeration control systems for the refrigerating chamber of an industrial refrigerator and a method for its use are presented.

Key words: refrigeration supply, refrigerating chambers, neurocontrol, intelligent system

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У системах керування холодозабезпеченням холодильних камер для заморожування туш великої рогатої худоби (ВРХ) з оптимальними температурними режимами -40°C і менше та підтримання вологісного режиму необхідно автоматично в темпі з процесом контролювати їх важливі параметри.

В розробленій в ДОННУЕТ імені Михайла Туган-Барановського інтелектуальній платформі «Іжа» моніторинг параметрів керування холодильними установками виконано за допомогою датчиків температури

і вологи повітря в холодильних камерах. Це дозволяє оператору за допомогою програмного інтерфейсу та візуалізації параметрів оптимізувати витрати енергії та скоротити викиди CO₂[1].

Концепція збільшення ефективності, надійності та підвищення безпеки заморожування продукції харчування вимагає від дослідників нових проектних рішень щодо контролю параметрів геометрії заморожуваного продукту великої рогатої худоби (ВРХ).

Аналіз досліджень та публікацій

У сучасних системах автоматизованого управління широко використовуються способи і пристрої визначення розмірів предметів охолодження, наприклад оптико-телевізійні або радіолокаційні [2]. Суттєвою ознакою цих способів і пристроїв є те, що виконується аналіз одержаної інформації відповідно до розроблених алгоритмів розпізнавання образів [3] та надаються висновки про координати об'єкту досліджень. Серед недоліків цього методу необхідно відмітити недостатню точність визначення геометрії об'єкту за рахунок низької завадостійкості, обмеженої можливості фільтрації завад, та неможливості швидкої адаптації при зміні параметрів холодильної камери і виду заморожуваного продукту. Тому створення способу керування рухомим об'єктом (геометрії туші ВРХ) в просторі холодильної камери з покращенням функціональними можливостями, за рахунок точності швидкодії визначення параметрів координат туші ВРХ і, як наслідок, підвищення оперативності виконання задачі оптимізації втрати споживчих характеристик продуктів харчування є важливим атрибутом проектних рішень.

Іншим важливим аспектом роботи є створення автоматичної системи візуалізації технічного стану випарника холодильної камери (обмерзання випарника) та формування команд щодо адаптивного керування процесом відтаювання випарника.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розробка та дослідження системи контролю параметрів туші великої рогатої худоби та стану випарника холодильної камери промислового холодильника системі нейроуправління холодозабезпеченням.

Виклад основного матеріалу

Для рішення цих інноваційних завдань будемо використовувати інтегровані методи нечіткої оцінки геометрії туші, її кольору з використанням як матричних сенсорів з ультразвуковими чутливими елементами, так і системи з відеокамерами комп'ютерного зору [2, 4]. Такий підхід формування інтегрального зображення туші ВРХ за допомогою нейромережових технологій дозволяє:

- одержати інтегральні інформаційні параметри зображень туші ВРХ при формуванні сигналів з ультразвукових чутливих елементів та
- система дозволяє визначити геометрію, топологію і колір туші ВРХ для порівняльних сигналів зображення і зміни положення туші, її кольору тощо.
- система визначає геометричні параметри локальних та інтегральних ділянок туші у вигляді параметрів площини, радіусів, довжини, ширини, кількості точок перетину контурів, геометричного центру і елемента зображень, ділянок холодильної камер, що постійно аналізуються. При цьому перехід до типу зображення виконується на основі обчислення адаптивного коефіцієнту (експертного навченого зображення) і того дійсного зображення туші ВРХ, яка є в холодильній камері;
- система може розпізнавати ділянку території за допомогою нейромережових технологій, що дозволяє оператору-технологу (холодильщику) аналізувати кількість туш ВРХ та можливість додаткового дозавантаження холодильної камери.

На рис. 1 наведена схема інтелектуальної системи керування холодозабезпеченням холодильної камери. В холодильній камері для заморожування м'яса у вигляді туші, представленої на рис. 1, наведено схему положення туші ВРХ з системою одноканального розподілення повітря та систему датчиків розпізнавання геометричних розмірів (ВК1, ВК2, МС1, МС2), а також відеокамера ВК3 в системі розпізнавання стану випарника.

Розпочнемо синтез цієї системи (рис. 1) з вивчення принципу дії інтегрованих датчиків контролю геометрії тіла ВРХ. У системі, як уже вказано, використано також матричний сенсор з ультразвуковим чутливим елементом.

На рис. 1 ІСКХМ – інтелектуальна система керування холодильною машиною. Відеокамери В1, В2, В3 призначені для відображення розмірів туші та стану обмерзання випарника. Інтелектуальний блок оброблення відеозображень перетворює зображення туші від відеокамери в бінарну матрицю. Блок діагностики обмерзання випарника – система візуалізації оцінки стану намерзання льоду на поверхню випарника. Блок нейромережового розпізнавання зображень туші окремими вхідними пристроями приєднаний до деяких виходів інтелектуального блоку оброблення зображення туші, схеми порівняння, пам'яті еталонів. Блоки підключення відеокамер ВК1, ВК2, ВК3 та МС1, МС2 зображень виконані у вигляді багатоканального мультиплексора. Визначення геометрії туші в статті виконано за рахунок оцінки зображень різних розмірностей і кольору та обчислення оцінки:

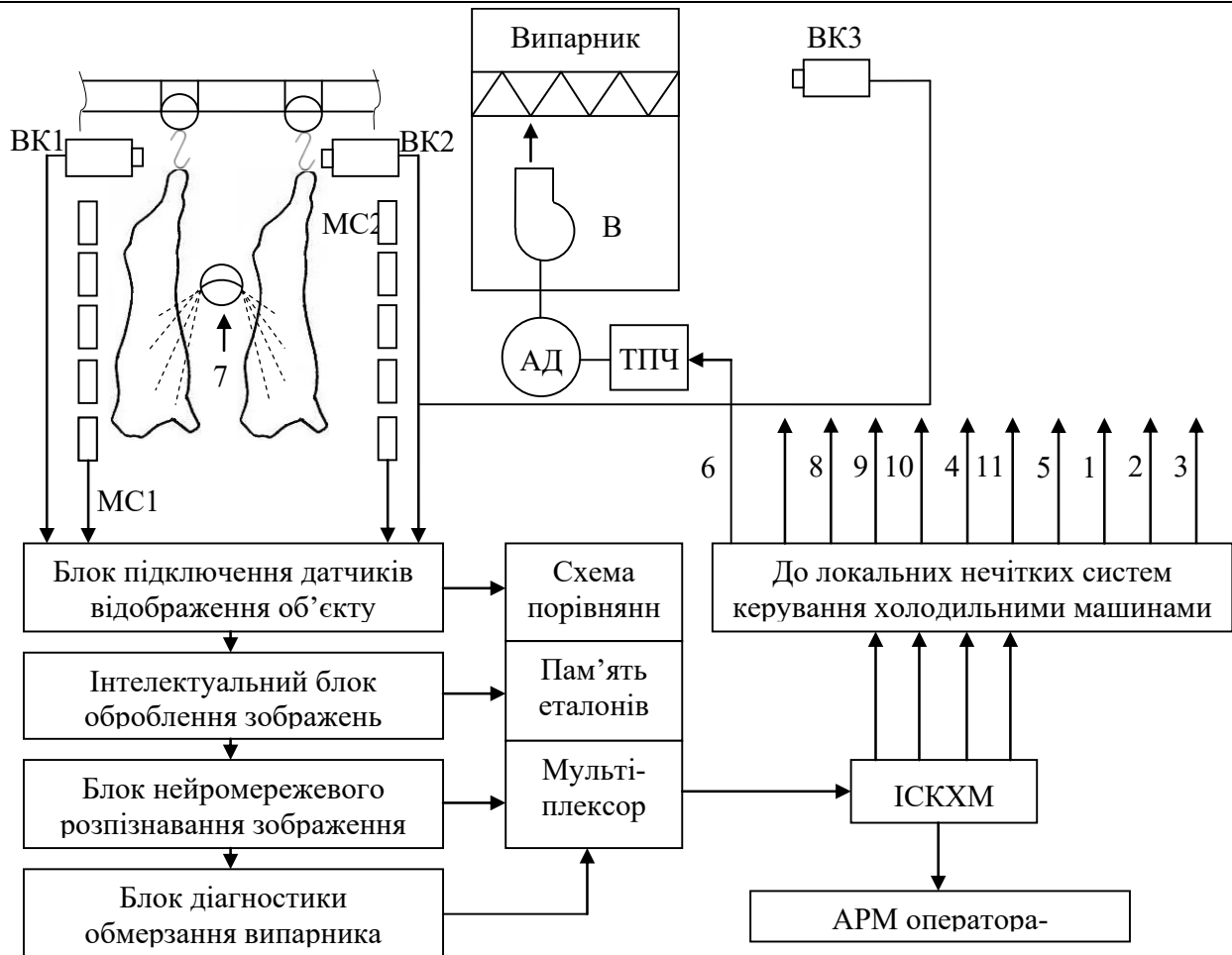


Рис. 1. Інтелектуальна система керування холодозабезпеченням холодильної камери

$$\xi = \text{arc extr} \xi [F_1(\lambda), R_1(\lambda, \nu)], \quad (1)$$

де ξ – міра наближення поточного зображення (відеосигнали з ВК1, ВК2, МС1, МС2) і еталонного зображення з параметрами R (R – еталонний розмір туші ВРХ);

$F_1(\lambda), R_1(\lambda, \nu)$ – функції, які описують геометричні розміри (геометрію) дійсної туші і еталонної відповідно.

Як правило матричний сенсор утворює з'єднання двопозиційних, або пропорційних датчиків, які розташовані на прямокутній решітці.

Положення кожного датчика визначається його адресою, тобто номерами строчки і стовбців, на пересіченні яких знаходиться.

Сукупність адресів з діючих датчиків (які мають стан «1») несуть інформацію про форму, положення і орієнтацію об'єкту, з яким контактує датчик. Якщо в якості об'єкту досліджень обрати форму і геометрію великої рогатої худоби (ВРХ), тоді в якості сенсорів ми можемо використати матричні сенсори, дія яких ґрунтується на п'єзоелектричному ефекті [4, 5]. В цих датчиках в основному використовуються гнучкі полімерні п'єзоплівки. Схема матричного датчика на основі п'єзоелектричної плівки (полівінілфториду) представлена на рис. 2, 3. Мініатюризація електричних елементів і нові технології їх виготовлення дозволили створити багатопланові інтегровані структури, які об'єднуються в одному модулі. Чутливий елемент і електронні пристрої повинні виконувати первинне оброблення сигналів.

Типовим прикладом є багатопланова матриця з п'єзометричним ефектом, яка представлена на рис. 3. Коли в процесі прикладення високочастотної змінної напруги п'єзокристал починає генерувати ультразвукові коливання, то в результаті обчислень можливо отримати інформацію про розміри об'єкта досліджень. Отже одним із варіантів датчика геометрії буде пристрій, який реалізує відлуння-імпульсний метод ультразвукової локації-геометрії тушки ВРХ. Ультразвукові перетворювачі утворюють інформаційну поверхню, на яку може реагувати система керування холодозабезпеченням ХК промислового холодильника. Об'єкт ВРХ може перекривати деяке число перетворювачів. Знаючи адресу перекритих перетворювачів, можливо одержати інформацію про площину і геометрію ВРХ (об'єкта). Сенсор дозволяє також визначати і третю координату – висоту об'єкту в точці по заданому адресу. Для цього на ультразвукові перетворювачі послідовно надходять зондуючі імпульси – короткі імпульси (<1 мкс) великої амплітуди (100-150 В). Збуджені цими імпульсами перетворювачі надсилають ультразвукову хвилю. Хвиля розповсюджується через повітря в тіло ВРХ і, досягнувши перелому у вигляді межі між двома середовищами (наприклад, поверхня об'єкту), відіб'ється від нього.

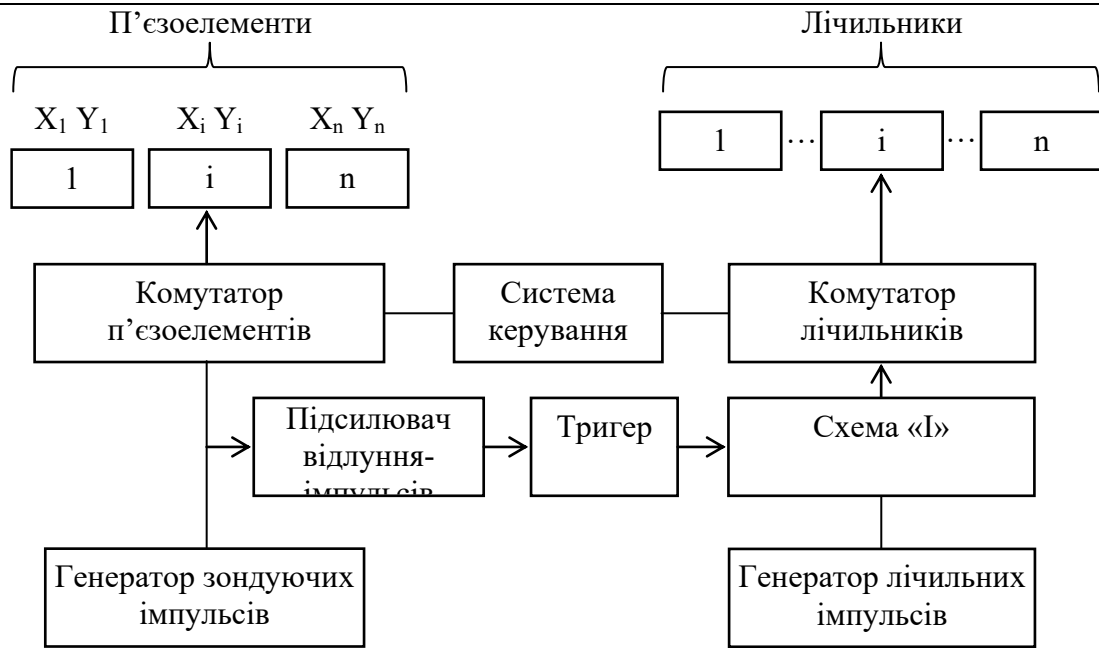


Рис. 2. Блок схема системи керування матричним сенсором

Відбиті ультразвукові коливання будуть прийняті тим же перетворювачем, що приводить до появи відлуння-імпульсів на його виході. При відомій швидкості розповсюдження ультразвукових коливань в матеріалі об'єкта, його висота (Z) в даній точці визначаються співвідношенням $Z = tv/2$, де t – інтервал часу між подачею зонduючого імпульсу і появи відлуння-імпульсу. Зонduючі імпульси від генератора надходять послідовно на п'єзодатчики через комутатор. Одночасно зонduючий імпульс надходить на тригер, формуючи на виході сигнал підвищеного рівня відлуння-сигнал після підсилення також надходить на тригер, скидаючи цей сигнал. Таким чином, довгота вихідного сигналу тригера пропорційна висоті Z об'єкта в точці за адресою X, Y , що визначається комутатором [4]. Для перетворення цієї довготи в цифровий код, імпульс тригера відкриває ключ, через який на вхід відповідного лічильника надходить сигнал, який підключає комутатор. Від високочастотного генератора надходять лічильні імпульси, накопичене число яких до появи відлуння-імпульсів пропорційно висоті об'єкту.

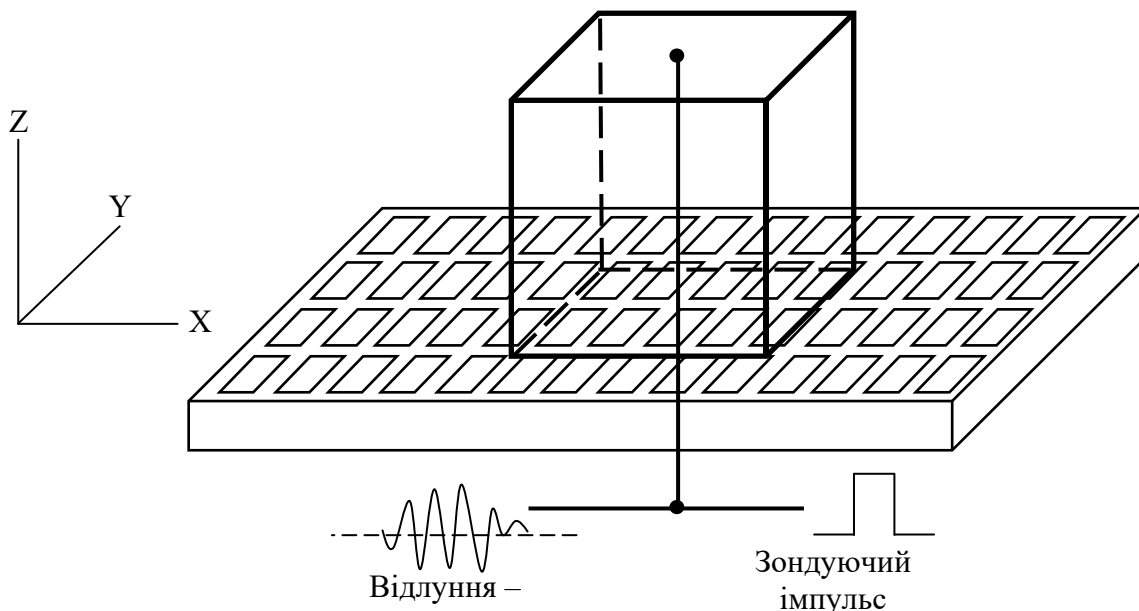


Рис. 3. Матричний сенсор з ультразвуковими чутливими елементами

Перетворювачі та лічильники підключаються на період, який визначає максимально допустиму висоту об'єкта. У відсутності відлуння-імпульсу (об'єкта в даній точці не має) лічильники переповнюються. Сигнал переповнення використовується для скиду лічильника і для комутації наступних сигналів датчика і лічильника. Із блока 4×4 ультразвукових елементів створено матричний датчик, який має 1024 елементів, утворюючих чутливу поверхню 160×160 мм². Сенсор дозволяє функціонувати на високих частотах зонduючих імпульсів ($10^6 \dots 10^9$ Гц), що визначає його швидкодію.

На рис. 4 наведено систему комп'ютерного зору холодильної камери великої потужності для

заморожування м'яса ВРХ. В системі використано банки експертного зображення ВРХ, та експертну систему і алгоритм розпізнавання обмерзання випарника холодительної камери промислового холодильника.

У системі комп'ютерного зору геометрії туші ВРХ також використано: відеокамери ВК1, ВК2 та систему сенсорів МС, реєстри вхідних даних (РВД), цифро-аналогові перетворювачі ЦАП-АПЦ, мультипроцесор паралельно-конвеєрного обчислювального середовища, алгоритм розпізнавання еталонних і реальних (поточних) моделей зображення туші ВРХ.

Система нейроуправління холодозабезпеченням дозволяє оператору-технологу автоматично керувати інтелектуальними виконавчими механізмами 1, 2, 3, 4, 5. А саме: 1 – холодопродуктивності поршневого компресора із синхронним двигуном першого каскаду; 2 – холодопродуктивності гвинтового компресора із електроприводом АД-ТПЧ; 3 – керування процесом конденсації в системі холодопостачання; 4 – керування витратами холодоагенту; 5 – керування параметрами енергозабезпечення холодильних машин.

Система дозволяє також розпізнавати на основі нечітких моделей процес обмерзання випарника холодительної камери промислового холодильника та надавати команди інтелектуальним виконавчим механізмам 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Серед них: 6 – сигнал-команда щодо зміни продуктивності АД-ТПЧ вентилятора В1; 7 – сигнал щодо зміни параметрів вентилятора В2; 8 – зміни режимів роботи тиску холодоагенту у випарнику; 9 – управління параметрами мікроклімату в холодительній камері; 10 – керування тривалістю заморожування м'яса туші ВРХ; 11 – керування процесом диспергування (обмерзання).

Перейдемо до технології контролю геометрії заморожуваного продукту в холодительній камері з відеокамерами ВК1, ВК2 і системами цифро-аналогового перетворення сигналів (ЦАП) і виведення інформації на монітор оператору-технологу.

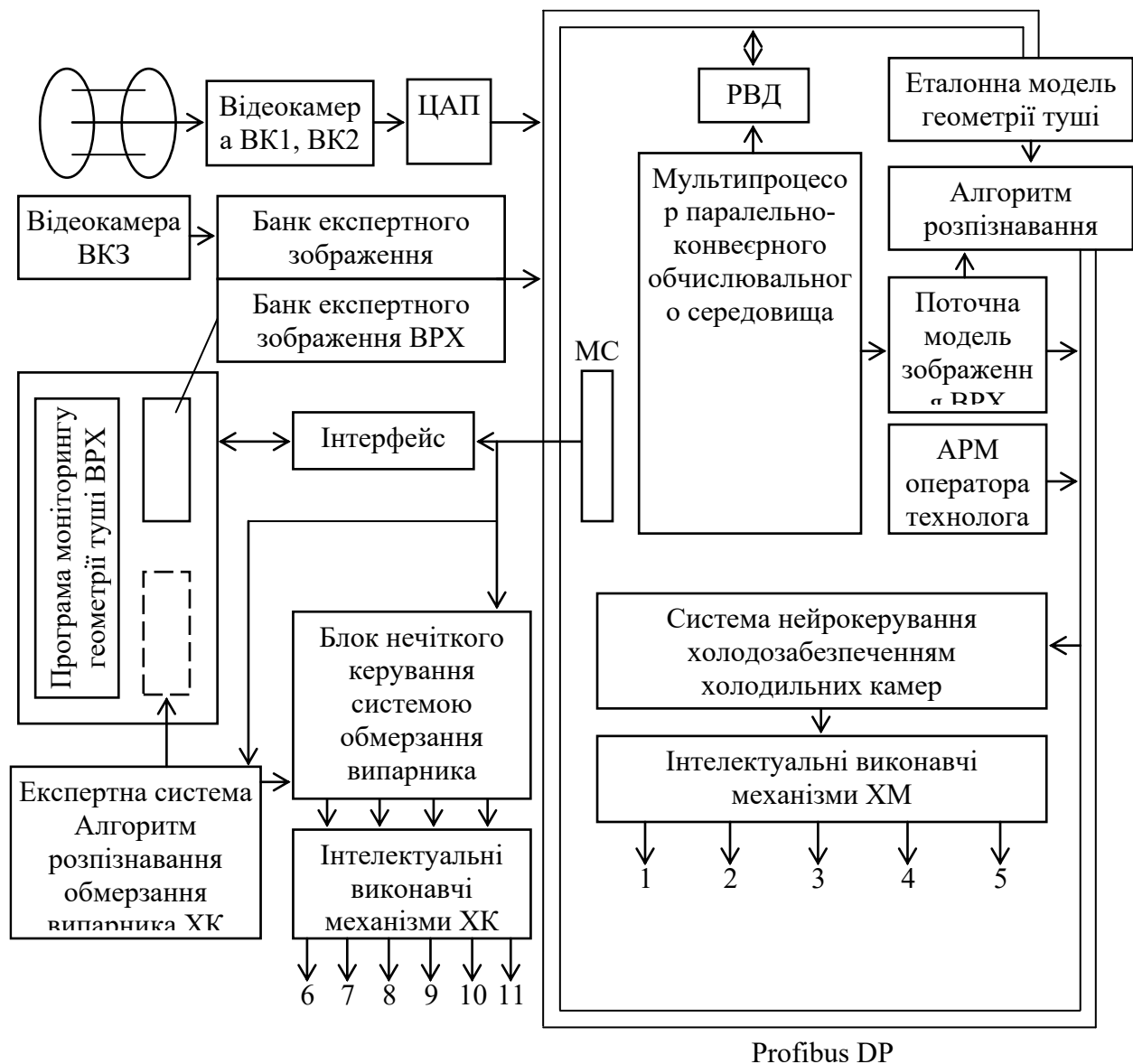


Рис. 4. Система комп'ютерного зору зображення геометрії тіла ВРХ та зображення стану випарника з системами нейрокерування РВД – реєстр вхідних даних з еталонними моделями

У системі керування процесами заморожування та оцінки геометрії тіла ВРХ використано метод нейроуправління з еталонною моделлю (*Model Reference Adaptive Control, Neural Adaptive Control*) [2, 4, 5, 6]. Запропонований підхід до побудови системи керування та контролю параметрів геометрії туші ВРХ дозволяє підвищити якість перехідного процесу часу заморожування, а також мінімізувати втрати якості продукту. Створено банк експертних зображень, який має еталон зображення багатьох ВРХ, і за допомогою алгоритму розпізнавання в системі повинен бути ідентифікований образ геометрії ВРХ у вигляді експертного розміру R [7]. Так як цифрове зображення представляє собою матрицю чорно-білого зображення туші ВРХ шкала градації сірого кольору має довжину від 0 (чорний колір) до 255 (білий колір). Таким чином, на вхід НМ можна подати значення кожного пікселя цифрового зображення ВРХ у вигляді інформаційної матриці векторів. Допустимо, що система навчена розпізнавати 10 зображень ВРХ. Отже, вихідний шар нейронної мережі повинен мати 10 нейронів, кожний з яких «навчений розпізнавати» відповідне тіло ВРХ. Якщо на виході будь-якого нейрона сигнал є максимальним по відношенню до іншого, то тоді цей нейрон є «головним» у системі розпізнавання. Оскільки він зв'язаний з образом визначеного тіла ВРХ із цієї десятки, то ідентифікаційною буде та форма ВРХ, якій відповідає даний нейрон. Відмітимо, що у випадку використання комбінації сигналів з відеокамер ВК1, ВК2, і матричних сенсорів з ультразвуковими чутливими елементами, покращено рівень ідентифікації трьохвимірному простору туші ВРХ за рахунок мультипроцесора та алгоритмів паралельно-конвеєрного обчислювального середовища [5]. Оптимізація параметрів холодозабезпечення холодильних камер ПРХ для виконання операції заморожування м'яса в системі, забезпечено також за допомогою нечітких систем розпізнавання образів [2, 3]. Нечіткі системи успішно зарекомендували себе для рішення подібних задач керування складними технологічними процесами заморожування хліба, інших продуктів харчування для людей, що мешкають на територіях, що працюють на підприємствах з техногенним забрудненнями [8].

Побудуємо нечітку систему, яка спроектована на правилах з лінгвістичними змінними, схема якої представлена на рис. 5, на вхід системи подається m -мірний вектор \vec{X} . Для кожної компоненти вектора \vec{X} , $i = 1, \dots, m$ в блоці «Ф-фазифікатор» побудований синглітон – однокрапкова нечітка множина.

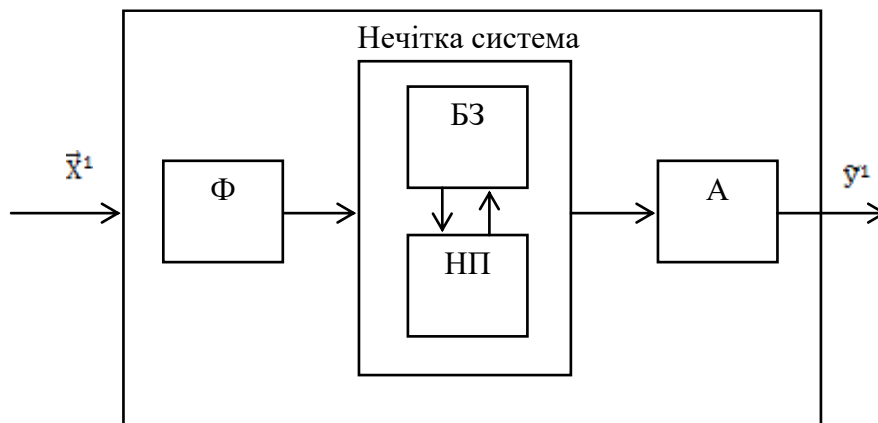


Рис. 5. Схема нечіткої системи розпізнавання з нечітким виведенням сигналів-команд
Ф – фазифікатор, БЗ – база знань, НП – нечіткий процесор, А - аналізатор

На другому етапі виконується оброблення даних за допомогою механізму нечіткого виведення, який складається із бази знань (БЗ) і нечіткого процесора (НП). База знань будується за допомогою нечітких портретів, одержаних на етапі аналізу вибірки прецедентів [2]. Слід відмітити, що стандартний для системи даного типу блок «дефазифікації» відсутній і замінено «аналізатором – А», в якому побудована модифікована нечітка множина Y. Розглянемо спосіб формування бази знань. Кожне її правило відповідає нечіткому портрету, наприклад «обмерз випарника» або портрету «обмерзання випарника». Наприклад, нехай ситуація S_1 – портрет «обмерзання випарника», тоді запишемо:

ПРАВИЛО "S₁":

ЯКЩО " $L_1 \in v_1$ " I, ..., I " $L_i \in v_1$ " I, ..., I " $L_m \in v_1$ ", ТО " $v_1 \in V_1$ "

.....

ЯКЩО " $L_1 \in v_j$ " I, ..., I " $L_i \in v_j$ " I, ..., I " $L_m \in v_j$ ", ТО " $v_1 \in V_j$ "

.....

ПРАВИЛО "S_k":

ЯКЩО " $L_1 \in v_k$ " I, ..., I " $L_i \in v_k$ " I, ..., I " $L_m \in v_k$ ", ТО " $v_1 \in V_k$ "

У нечіткому предикаті " $L_1 \in V_j$ ". лінгвістична змінна, яка відповідає побудованій на етапі експертного аналізу вибірки прецедентів, а V_j – імена класів образів, які відповідають значенням лінгвістичної змінної Кількість нечітких предикатів у полі «ЯКЩО» правила відповідає m інформативним правилам. У полі «ТО» нечітка множина V_j є монотонною функцією, що використовується в алгоритмі нечіткого виведення Цукамото [2, 4, 6]. Прийняття рішень виконується на основі механізму нечіткого виведення. Слід відзначити, що в якості операції «І» на етапі агрегування використана m -місцева логарифмічна функція:

$$f(a_1, a_2, \dots, a_m) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \exists a_i = 0 \\ \log_2((a_1 + 1), \dots, (a_m + 1)) / m & \\ \text{якщо } a_i > 0, i = 1, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

Результатом роботи алгоритму нечіткого виведення є сукупність синглетонів $V_j \sim, j = 1, \dots, k$.

Як було відзначено раніше, в системі використано блок «аналізатор – А», який працює по наступному принципу. На вхід «аналізатора» надходить нечітка дискретна множина $\{V_j | j = 1, \dots, k\}$, де кожний елемент несе інформацію про відповідний образ «обмерзання випарника». Таким чином алгоритм розпізнавання дозволяє на основі «Банку експертного зображення випарника» через інтерфейс надавати «оператору-технологу» інформацію про можливі ситуативні рішення щодо керування процесом відтавання випарника. Таким чином, використовуючи Алгоритм розпізнавання стану випарника та пристрої контролю процесу обмерзання, що базується на використанні штучних нейронних мереж [2, 3, 4, 5, 6]. Автори статті запропонували спосіб і систему автоматизованого керування процесом замерзання (див. рис. 4). В цьому способі керування важливу роль відіграє «Блок адаптивного керування системою обмерзання випарника» та інтелектуальні виконавчі механізми 6, 7, 8, 9, 10, 11. Останні керують вентиляторами випарника В1, В2, клапанами тиску всмоктування, та ультразвуковим диспергатором розморожування випарника (виконавчий механізм 11).

На рис. 6 наведено блок-схему узагальненого алгоритму функціонування системи керування холодозабезпеченням холодильних камер ПРХ.

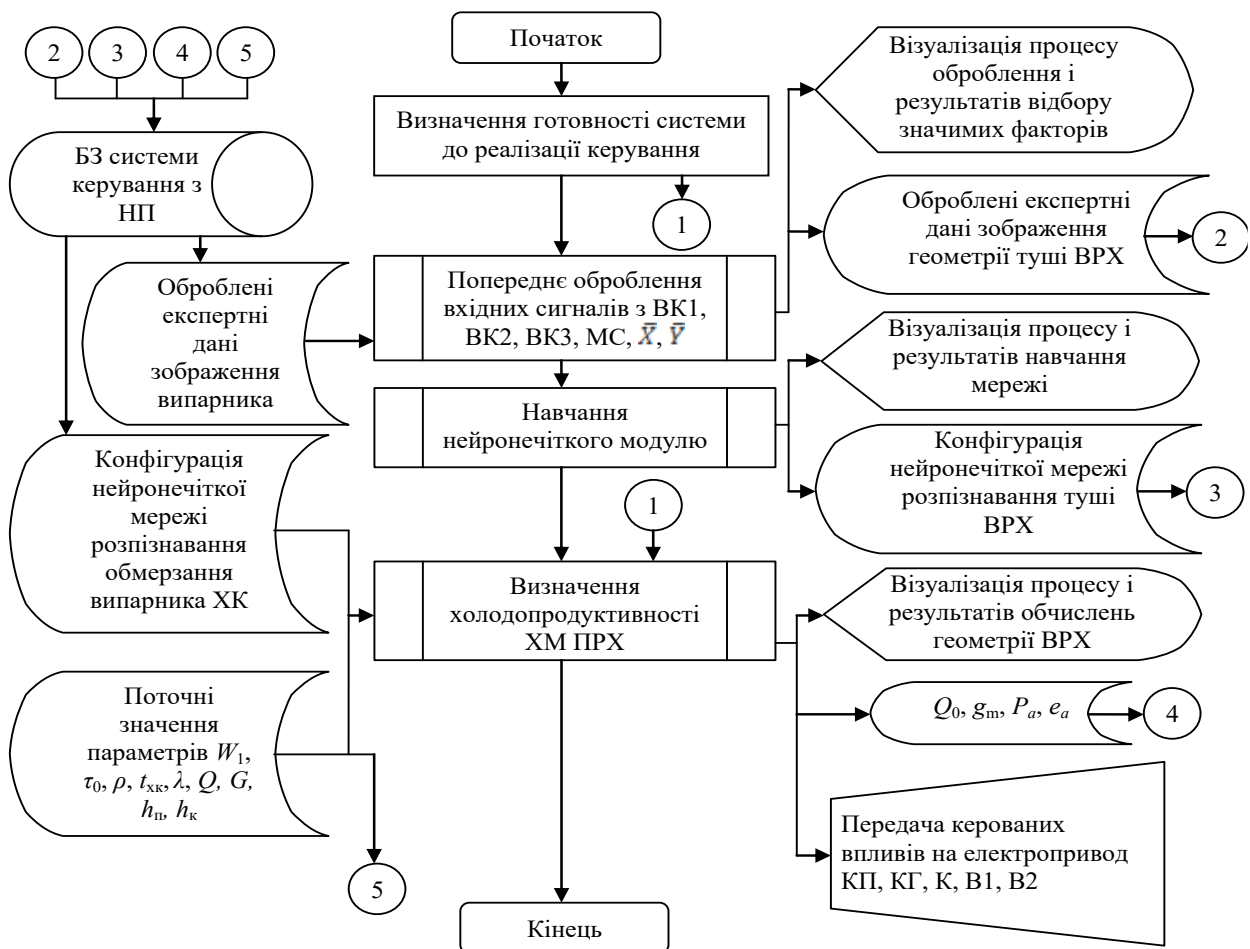


Рис. 6. Блок-схема узагальненого алгоритму функціонування системи керування холодозабезпеченням холодильної камери

На основі розроблених методів керування холодозабезпечення холодильних камер для заморожування м'яса в тушах ВРХ розробимо також алгоритмічне забезпечення системи керування. Воно включає наступні алгоритми: алгоритм попереднього оброблення цифрової інформації, алгоритми відбору значимих ознак, які визначають геометричні розміри туші ВРХ та ознаки обмерзання випарника холодильної камери; алгоритми розпізнавання стану випарника і розпізнавання зображення геометрії туші ВРХ, нейронетичкі моделі керування процесом заморожування, алгоритм розрахунку параметрів (τ_0 – тривалість заморожування, кількість теплоти, відведеної від туші ВРХ – Q_M); алгоритми розрахунку параметрів холодопродуктивності каскаду компресорів КП (компресор поршневий), КГ (компресор гвинтовий), конденсатора, вентиляторів В1, В2; алгоритми розрахунку енергетичної ефективності, алгоритм керування холодильною машиною ПРХ. Серед параметрів, які визначають базу знань технологічного процесу заморожування м'яса виокремимо наступні чинники: τ_0 – тривалість заморожування, с; R – експертний розмір шматка м'яса (геометрія ВРХ), м; ρ – густина охолоджуваного продукту ($\text{кг}/\text{м}^3$); q – питома теплота кристалізації води, $q = 3,3 \times 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$; W – вологовміст продукту ($\text{кг}/\text{кг}$), ω – частка вимороженої води; $t_{кр}$ – криоскопічна температура продукту, $^{\circ}\text{C}$; t_{oc} – температура охолодження середовища холодильної камери $^{\circ}\text{C}$; λ – коефіцієнт теплопровідності заморожуваного продукту, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$; Q_M – кількість теплоти, відведеної від продукту під час заморожування, кДж ; G – маса заморожуваного продукту, кг ; h_n , h_k – питомі ентальпії продукту відповідні у початковому та у замороженому стані, $\text{кДж}/\text{кг}$; а також інші параметри \bar{X} , \bar{Y} . Вони визначають: \bar{X}_1 , \bar{X}_2 , \bar{X}_3 – параметри якості заморожуваної продукції та мікроклімату холодильної камери, а \bar{Y}_1 , \bar{Y}_2 , \bar{Y}_3 – параметри, які визначають ефективність холодабезпечення холодильної камери та енергетичні характеристики компресорних установок [1]. Параметри, які нейромережевий процесор прогнозує оператору-технологу: Q_0 – холодопродуктивність, $\text{кДж}/\text{с}$ або кВт ; g_m – масова витрата холодильного агента; q_0 – питома холодопродуктивність ($\text{кДж}/\text{кг}$); P_a – активна потужність холодильних машин; e_a – питомі витрати електроенергії, b – коефіцієнт робочого часу ХМ.

Система керування процесом заморожування м'яса туші ВРХ працює у відповідності з узагальненим алгоритмом, блок-схема якого представлена на рис. 6. Цей алгоритм є центральним і виконує запуск та зупинку інших алгоритмів. Після запуску системи проходить перевірка її підготовки до реалізації управління і відпрацювання послідовності дій. Оператор визначає необхідність синтезу і навчання нейронетичких алгоритмів розпізнавання в залежності від якості навчання Банку експертного зображення ВРХ та Банку зображення стану випарника або наявності конфігураційних файлів відповідних вагових коефіцієнтів [2]. Формування навчальних вибірок для двох моделей виконується на основі інформації – оброблення експертних даних зображення туші ВРХ і зображення стану випарника, а також на базі знань про параметри технологічного процесу заморожування м'яса туші (W_1 , τ_0 , ρ , $t_{кр}$, λ , Q , G , h_n , h_k) та оцінки якості продукту, енергетичних параметрів процесу холодозабезпечення тощо. У залежності від типу м'яса (яловичина, телятина, свинина) із бази знань нейронетичкого комп'ютера відбувається завантаження вхідних сигналів для навчання нейронетичкого модуля керування процесом заморожування.

Результати кожного етапу керування візуалізуються для ОПР (особа, що приймає рішення), та надходять в систему нейроуправління інтелектуальними виконавчими механізмами холодильних машин промислового холодильника.

Узагальнені результати експертних оцінок досягнутих показників наведені на пелюстковій діаграмі (рис. 7). Досягнута точність управління процесом заморожування м'яса ВРХ з розпізнаванням геометрії туші та розпізнавання стану замерзання випарника є достатньою для забезпечення енергоефективної роботи холодильних машин і формування необхідних споживчих характеристик м'ясних продуктів.

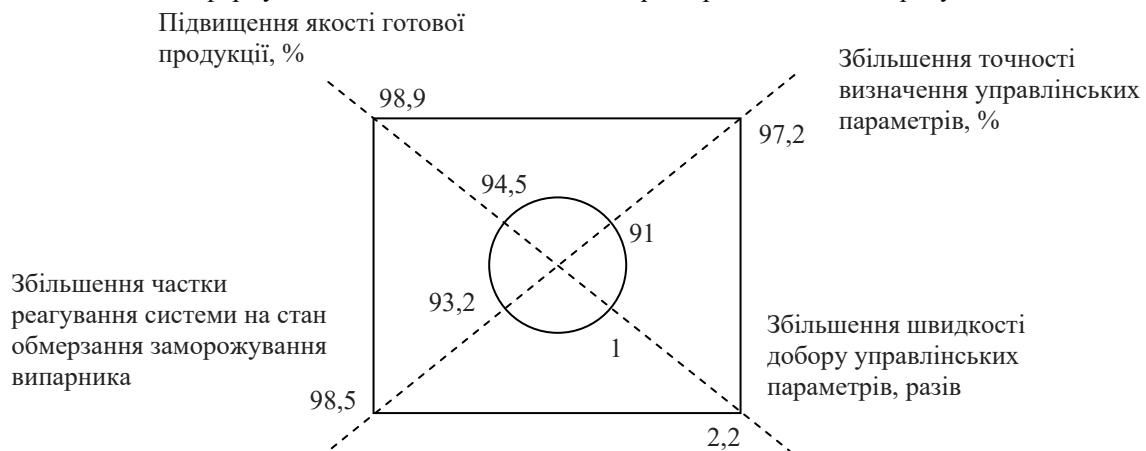


Рис. 7. Результати експертної оцінки ефективності використання інтелектуальної системи процесом заморожування

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблено систему інтелектуальних датчиків контролю параметрів туші м'яса великої рогатої худоби та ознаки стану випарників холодильної камери і системи холодозабезпечення промислового

холодильника. Розроблена Система автоматичного розпізнавання в режимі реального часу визначає:

- геометричні параметри локальних та інтегральних ділянок туші у вигляді параметрів, площини, радіусів, довжини, ширини, кількості точок перегину контурів, геометричного центру елементів зображень;
- постійно аналізує простір ділянок холодильної камери.

Запропоновано інтелектуальну систему нейрокерування холодозабезпеченням холодильної камери, в якій 2 відеокамери та матричні сенсори з п'єзоелементами оцінки форми туші великої рогатої худоби та банк її експертного зображення. Через інтерфейс з підсистеми інформаційного забезпечення система надає оператору-технологу відеоінформацію та автоматично впливає на інтелектуальні виконавчі механізми компресорів, вентиляторів, конденсаторів. Розроблено систему нечіткого керування процесом обмерзання випарника, в якій передбачена експертна система, алгоритм розпізнавання, банк експертного зображення випарника зі сніговою шубою та інтелектуальним механізмом ударного впливу ультразвукових коливань на поверхню приладу охолодження. Наведено узагальнений алгоритм функціонування систем керування холодозабезпеченням холодильної камери промислового холодильника та методику його використання.

Література

1. 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.
2. Абрамова Т. В., Ваганова Е. В., Горбачев С. В., Сырямкин В. И., Сырямкин М. В. Нейро-нечеткие методы в интеллектуальных системах обработки и анализа многомерной информации. Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 2014. 442 с.
3. Сироджа И. Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта и принятия решений и управления. Киев : Наукова думка, 2002. 418 с.
4. Лукинов А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств : учеб. пособ. Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2012. 608 с.
5. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, А. А. Пахомов, С. А. Никитин и др. Москва : Физматлит, 2008. 496 с.
6. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев и др. Харьков : Основа, 1997. 112 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. 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.

References

1. 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. Technical sciences. 2021. № 6. S. 264–271.
2. Abramova T. V., Vaganova E. V., Gorbachev S. V., Syryamkin V. I., Syryamkin M. V. Neiro-nechetkie metody v intellektualnykh sistemah obrabotki i analiza mnogomernoy informacii. Tomsk : Izd-vo Tomskogo gos. un-ta, 2014. 442 s.
3. Sirodzha I. B. Kvantovye modeli i metody iskusstvennogo intellekta i prinyatiya reshenij i upravleniya. Kiev : Naukova dumka, 2002. 418 s.
4. Lukinov A. P. Proektirovanie mehatronnyh i robototekhnicheskikh ustrojstv : ucheb. posob. Sankt-Peterburg : Izdatelstvo «Lan», 2012. 608 s.
5. Novejshie metody obrabotki izobrazhenij / A. A. Potapov, A. A. Pahomov, S. A. Nikitin i dr. Moskva : Fizmatlit, 2008. 496 s.
6. Geneticheskie algoritmy, iskusstvennye nejronnye seti i problemy virtualnoj realnosti / G. K. Voronovskij, K. V. Mahotilo, S. N. Petrashev i dr. Harkov : Osnova. 1997. 112 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. Khorolskyi V. P., Korenets Yu. M., Serebrennikov V. M. Avtomatyzovani systemy keruvannia vyrobnytstvom smart-produktiv kharchuvannia : monohrafiia. Kryvyi Rih : Vydavets FO-P Cherniavskiy D. O, 2021. 312 s.

Рецензія/Peer review : 22.01.2022 р.

Надрукована/Printed : 28.02.2022 р.