

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

Коренець Ю. М., старший викладач

Омельченко О. В., канд. техн. наук, доцент

Петрушина Ю.М., здобувач ОС магістра

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

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИТУАЦІЙ ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ХОЛОДИЛЬНИКІВ НА БАЗІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

UDC 664:62-193, 621.565

Khorolskiy V. P., Grand PhD of Engineering Science, Professor

Korenets Yu. M., Senior Lecturer

Omelchenko O. V., PhD in Engineering sciences, Associate Professor

Petrushyna Yu. M., A graduate of a master's degree

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

IDENTIFICATION AND PREDICTION OF EMERGENCY TECHNOLOGICAL SITUATIONS OF COOLING SUPPLY OF INDUSTRIAL REFRIGERATORS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Мета. Метою статті є розробка методів ідентифікації технологічних керованих ситуацій в роботі сучасного компресорного аміачного обладнання із системи холодозабезпечення промислового холодильника на базі штучного інтелекту.

Методи. У статті використано методи штучного інтелекту для розробки моделі та методів оцінки аварійних ситуацій і оптимізації надійності складних технологічних систем холодозабезпечення з аміачним компресорним обладнанням для заморожування продуктів харчування.

З метою одержання наукових результатів розроблено методику, яка забезпечує: розробку методів ідентифікації стану компресорних аміачних машин, побудову моделей причинно-наслідкових зв'язків (дерева несправностей) технологічного процесу холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника великої потужності; дослідження взаємозв'язків між технологічними параметрами працездатності, оцінку надійності та розпізнавання аварійних ситуацій; моделювання стану обладнання, яке пов'язано з параметрами надійності та працездатності компресорних машин. Методика дозволяє зменшити ризики від аварійних ситуацій холодильного аміачного обладнання, а методи їх оцінки залежать від можливості керованого впливу носіїв енергії технологічного процесу на людину (виробничі травми, професійні захворювання), навколишнє середовище (екологічні аварії і катастрофи) і впливу їх на виробничі території і населення (аварійні викиди аміаку, викиди мастильних матеріалів тощо). Методика рекомендує проєктантам при проєктуванні сучасних багаторівневих систем інтелектуального управління розробляти підсистеми безпеки життєдіяльності холодильних підприємств харчової промисловості розпочинати з визначення (ідентифікації) і контролю (моніторингу) потенційно небезпечних процесів виробництва безпечної харчової смарт-продукції, її збереження в холодильних камерах промислових холодильників. У той же час оцінку стану обладнання холодильних машин — холодопостачання холодильних камер підприємства-холодильника необхідно виконувати на основі нейрон-нечіткого методу обро-

Надійшла до редакції 15.09. 2022 р.

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

блення інформації з метою підвищення точності прогнозування і попередженого керування виникненням аварійних ситуацій, відмов елементів даної технічної системи, які можуть призвести до виникнення небезпечних ситуацій. Тобто необхідно, з одного боку, розробити систему моніторингу стану обладнання холодильних машин (холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника), а з іншого боку — здійснювати контроль часу надійної безаварійної експлуатації елементів обладнання холодильних машин, як прогнозного показника.

Результати. Розроблено метод ідентифікації стану холодильного обладнання промислових холодильників, що відрізняється від існуючих точністю прогнозування відмов обладнання та розпізнавання аварійних ситуацій у процесі його експлуатації. Розроблено системну модель оцінки стану компресорного обладнання холодильних машин промислового холодильника, що дозволило спроектувати інтелектуальну систему управління промисловим холодильником з підсистемами розпізнавання аварійних ситуацій, мінімізувати ризики впливу викидів аміаку та інших холодоагентів на навколишнє середовище. В інтелектуальній системі розпізнавання аварійних ситуацій в темпі з процесом виконано оцінку працездатності холодильного обладнання за допомогою розробленої структурної і параметричної ідентифікації нечіткої моделі, а також за рахунок використання генетичних алгоритмів та штучних нейронних мереж, результати якої дозволяють дослідити та встановити залежність між параметрами процесу заморожування продукції в холодильних камерах промислового холодильника і дефектами (відмовами), які є причинами виникнення аварійних ситуацій та аварій.

Ключові слова: надійність, аварійні ситуації, мінімізація ризиків, ідентифікація, холодозабезпечення, компресорні аміачні машини, нейронечітке керування, інтелектуальна система.

Постановка проблеми. Придніпровський регіон України з його потужним криворізьким гірничо-металургійним комплексом працює сьогодні в умовах дотримання екологічних вимог країн ЄС до вихідної продукції та екології довкілля. У зв'язку з цим постають питання щодо створення на підприємствах регіону такого сталого екологічного середовища, яке б відповідало отриманню продукції оптимальної якості за умови врахування обмежень, пов'язаних з рівнем техногенного забруднення, зменшення викидів CO₂ та впливу на озоновий прошарок Землі [1]. У промисловому комплексі Придніпровського регіону з техногенними територіями працюють десятки кисневих заводів, станцій з виробництва стисненого повітря, сотні промислових холодильників великої потужності, тисячі холодильних установок на складах, в супермаркетах і продовольчих магазинах, підприємствах харчової і переробної промисловості, закладах ресторанного господарства.

Для одержання низьких температур у холодильних системах використовують фізичні процеси, які супроводжуються поглинанням теплоти. Процес отримання штучного холоду за допомогою компресорних установок виконується за допомогою холодильного агента.

Сьогодні найпоширенішими холодильними агентами є аміак, хладони та їхні суміші, вода і повітря. Тренд у використанні холодоагентів зміщується до аміаку, вуглекислого газу та насичених вуглеводів. Ось вже більше п'ятдесяти років вчені усього світу приділяють увагу вивченню впливу холодильних агентів на довкілля. Було виявлено, що фреони сприяють руйнуванню озонового прошарку Землі та спричиняють парниковий ефект. Незважаючи на те, що концентрація фреонів у атмосфері значно нижча концентрації CO₂, їх ефективність по затримуванню інфрачервоного випромінювання в багато тисяч разів більша, в тому числі через значно довший період життя (наприклад, R12 — 120 років, R115 — 250 років, R11 — 60 років).

Руйнування озонового шару призводить до погіршення екологічної ситуації на території країн з високим рівнем виробництва і використання хлор-фтор-вуглеводнів (СФС), а, отже, виникла необхідність їх заборони (відбулася в червні 1990 року в Лондоні на профільній конференції) та автоматичного контролю їх впливу на навколишнє середовище.

З цієї причини для аналізу впливу використання холодильних агентів на навколишнє середовище використовують параметр TEWI (Total Equivalent Warming Impact), що носить назву сумарної еквівалентної теплової дії. Він представляє собою суму безпосереднього

потенціалу парникового ефекту в результаті емісії в атмосферу та дотичного потенціалу, викликаного емісією двоокису вуглецю в процесі виробництва електроенергії, яка необхідна для роботи холодильної установки:

$$TEWI = GWP \cdot M + \alpha \cdot B, \quad (1)$$

де GWP — потенціал глобального потепління; M — маса емісії холодильного агента в атмосферу, кг; α — частка CO_2 , що викидається в атмосферу при виробництві 1 кВт·год електроенергії; B — сумарна кількість електроенергії, яку використовує установка за весь період її роботи, кВт·год [2].

У процесі вивчення термодинамічних, теплофізичних, фізико-хімічних та фізіологічних властивостей холодоагентів та їх впливів на навколишнє середовище виникло питання розробки систем контролю захисту довкілля від його забруднення холодоагентами та розробки інтелектуальних систем захисту компресорного обладнання від викидів холодоагентів. Зрозуміло, що наукові дослідження, пов'язані зі зменшенням впливу на озоновий прошарок є особливо актуальними для територій з техногенним забрудненням, тому вимагають від науковців розробки обладнання з мінімізацією забруднення підприємствами довкілля.

Проблема розробки автоматизованих систем захисту довкілля регіону від його забруднення холодоагентами та CO_2 тісно пов'язана з проектними рішеннями щодо розробки надійного і довговічного холодильного встаткування, а також автоматизованих систем керування компресорними установками (АСК КУ).

Введемо критерій якості локальних функцій АСК КУ:

1. $CO_2 \rightarrow \min$.
2. $E_{\text{енерг}} \rightarrow \max$
3. $TEWI \rightarrow TEWI_{\text{зад}}$

У якості критерію також можливо прийняти показник Y_{np} — час надійної експлуатації елементів компресорного обладнання холодильних машин (ХМ).

Засобами досягнення надійної експлуатації визначимо параметр ХЕ — час експлуатації, який опосередковано пов'яжемо з такими чинниками: кількість аварій та відмов, час відмов системи, фізичні характеристики технічних пристроїв агрегатів компресорних установок, ступінь зношеності, $TEWI$, CO_2 , $E_{\text{енерг}}$, а показник Y_{np} виразимо через залежність виду:

$$Y_{np} = F(X_E, A, \varepsilon), \quad (2)$$

де A — параметри технологічного процесу виробництва холоду, холодопродуктивність, температура, вологість, контроль за надійною роботою холодоагентів ХМ, наявність попереджувальних ремонтних робіт (ПРР) тощо; ε — відхилення, можливі збої, людський фактор тощо.

Таким чином, якщо спроектувати систему, що автоматично враховує ці чинники, то мінімізація аварійних ситуацій призведе до підвищення надійності і довговічності холодильного компресорного обладнання та, відповідно, до виконання критеріїв 1, 2, 3.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для більшості підприємств харчової промисловості України промислові холодильники забезпечують безпеку продуктів харчування за рахунок впровадження інтелектуальних систем автоматизованого керування технологічними процесами заморожування.

Принцип їх дії базуються на створенні підсистем керування промисловою безпекою й охороною праці, основним критерієм ефективної роботи яких є оцінка і керування технологічними ризиками.

Технологічний ризик, відповідно до визначення авторів [2, 3, 4], — є кількісною мірою небезпеки, що характеризується можливістю виникнення небажаних подій на виробничому об'єкті і оцінка вартості їх наслідків.

Термін «ризик» об'єднує два поняття: «поява небезпеки» і «втрата потужності внаслідок появи даної небезпеки». Розрахунок відповідних величини відбувається для ризиків,

пов'язаних, як з ідентифікацією й оцінкою небезпеки (прогноз події), так і з оцінкою прогнозних втрат (наслідок події).

Небезпека є ймовірною категорією, яка може змінюватись у просторі і за часом. Під характеристикою небезпеки, пов'язаної з конкретною подією (аварією, аварійною ситуацією), розуміють ймовірність прояву цієї події (відмови, аварії, небезпечного випадку, інциденту) в даному місці і в заданий час.

З точки зору концепції безпеки стан обладнання промислових холодильників (ПРХ) щодо оцінки рівня безпеки і визначення її критеріїв вивчають з різних позицій — надійності системи та стійкості системи до впливів зовнішнього середовища [5, 6].

Під «надійністю», відповідно до [5, 6], розуміють властивість готовності технологічного обладнання і діючих на нього властивостей безвідмовності і ремонтпридатності та підтримування технічного обслуговування.

У зв'язку з тим, що холодильне обладнання ПРХ піддається фізичному зношенню і експлуатується з нормативним терміном відпрацювання [5, 6, 7, 8, 9], найбільш цінним критерієм безпеки таких технічних систем є показник «довговічності». Довговічність — це властивість холодильного обладнання виконувати необхідну функцію до досягнення межового стану за даних умов його використання і технічного обслуговування.

Отже, з точки зору оцінки безпеки аміачних компресорних ХМ, найбільш цінним показником є критерій довговічності.

З метою оцінки надійності обладнання промислових холодильників виокремимо час від початку експлуатації об'єкта системи до його переходу в небезпечний стан (відмова або аварійний стан системи в цілому) [5, 6].

На основі вивчення наукових праць вітчизняних вчених [1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11] створено базу знань та базу прецедентів щодо виникнення аварій, аварійних ситуацій холодильного компресорного обладнання в процесі його експлуатації. Авторами статей [10, 11] побудовано моделі причинно-наслідкових зв'язків для кожного із виділених кластерів ПРХ: Компресор — Електрообладнання — Конденсатор — Насоси — Холодоносії — Випарники холодильних камер. Це дозволило їм розробити алгоритми та побудувати систему керування холодопостачанням холодильних камер промислових холодильників.

Метою статті є розробка методів ідентифікації технологічних керованих ситуацій в роботі сучасного компресорного аміачного обладнання із системи холодозабезпечення промислового холодильника на базі штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. Розрахунок показників надійності холодильних систем будемо виконувати за допомогою методів математичної статистики та теорії ймовірності [5, 12].

У теорії надійності за випадкову величину (ВВ) приймають час (t) роботи елементів системи. Тоді функція щільності розподілу $f(t)$ (диференційний закон розподілу) слугує характеристикою розсіювання строків служби, характеризує частоту відмови обладнання ХМ [12, 13].

$$f(t) = \frac{(dH(t))}{dt} = \frac{(dP(t))}{dt}, \quad (3)$$

де

$$H(t) = p(T < t)$$

де $H(t) = \int_0^t f(t)dt$ — інтегральна функція розподілення характеризує ймовірність відмови до заданого моменту часу.

Кількісно оцінити надійність елементів технічних систем промислових холодильників (ПРХ) можна за допомогою критеріїв надійності: ймовірності безвідмовної роботи протягом визначеного часу $P(t)$ або зворотної їй величини — ймовірності відмови $H(t)$; частоти відмов $f(t)$; інтенсивності відмов $\lambda(t)$. Для об'єктів, які відновлюються — напра-

цювання на відмову t_{cp} , параметру потоку відмов $\omega(t)$, середнього напрацювання до першої відмови T_{cp} .

Випадкові величини (ВВ) можуть бути дискретними (ДВВ), що характеризуватимуться переривчастим розподіленням (число відмов, число об'єктів з відмовами за певний час та ін.), або неперервними (НВВ) (термін служби, час простою та ін.).

Для ДВВ використовують такі закони розподілення, як закон Пуасона-Бернуллі, розподілення Паскаля, геометричний, біноміальний, вироджений і логарифмічний розподіл.

Для НВВ — нормальний, рівномірний, експоненційний, логарифмічний розподіл, а також трикутний, гама-розподілення, розподілення Вейбула, Ст'юдента, Коші, Парето [5, 6, 12].

З метою проектування сучасних «розумних» підприємств-промислових холодильників (ПРХ) з високим рівнем надійності забезпечення якості заморожування м'ясної продукції до -40°C , рибної продукції до -10°C , м'яса птиці до $-8...-12^{\circ}\text{C}$, охолодження до $0...-10^{\circ}\text{C}$ напівфабрикатів, молочно-жирової продукції, гастрономічних товарів, плодово-овочевої продукції, зелені тощо, необхідно виконати наступні дослідження:

1. Провести аналіз існуючого рівня безпеки, часу до відмови обладнання холодильних машин (ХМ) — холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника, системний аналіз технічної системи обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ та визначити вимоги до системи оцінки рівня безпеки обладнання ПРХ.

2. Побудувати системну модель оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ та розробити математичну модель оцінки стану обладнання ПРХ з урахуванням параметрів заморожування та охолодження продуктів харчування з використанням апарату теорії нечіткої логіки.

3. Розробити інтелектуальну систему прогнозування аварійних ситуацій, а також аварій з системами підтримки прийняття рішень та оцінки ризиків від викидів холодоагентів у реальному масштабі часу.

Отже, в процесі виконання проектних рішень щодо розробки «розумних» (смарт) підприємств ПРХ у відповідності до завдань програми «Індустрія — 4.0», необхідно спочатку розробити математичну модель стану обладнання ХМ. Вона повинна відрізнятися від існуючих особливістю побудови на основі оброблення інформації про технологічний процес холодозабезпечення з використанням апарату нечіткої логіки. Для цього визначимо вимоги до математичного забезпечення системи оцінки стану обладнання ХМ та системи холодозабезпечення ПРХ.

На основі аналізу умов виникнення і процесу розвитку відмов в технічній системі «ХМ — система холодозабезпечення холодильних камер» необхідно також розробити методи управління захистом від втрат холодоагенту.

Основним етапом прогнозування рівня безпечного стану обладнання ХМ являється виявлення впливу поведінки того чи іншого параметру робочого процесу холодопостачання на зношення технічної системи, що призводить до відмови. Як показала практика експлуатації ХМ, зовнішні вражаючі впливи на один із елементів системи холодопостачання обов'язково буде впливати певним чином на показники надійності елементів і всієї системи в цілому [5].

Цю задачу будемо вирішувати шляхом експертних оцінок, способів оброблення нечіткої інформації з використанням нечіткої логіки та нейронних мереж. Як було доведено в наукових статтях та монографіях авторів [13, 14, 15, 16], математична теорія нечітких множин (нечіткої логіки) — теорія, яка математично оперує із змістовим сенсом слів людини-оператора, дозволяє описувати нечіткі поняття та знання, оперувати цими знаннями і робити нечіткі висновки. Наявність математичних засобів відбиття нечіткої вхідної інформації дозволяє побудувати модель оцінки обладнання ХМ системи холодопостачання ПРХ.

Якщо в якості критерію прийняти показник $Y_{пр}$ — час надійної експлуатації елементів обладнання ХМ, а засобами її досягнення X_E — час експлуатації, час відмови системи, кількість аварій та відмов, фізичні характеристики технічних пристроїв агрегатів компре-

сорних машин, ступень зношеності, корозії, то тоді показник Y_{np} можна виразити через залежність виду:

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

де A — параметри технологічного процесу виробництва холоду: холодопродуктивність, температура, вологість, контроль за надійною роботою холодоагентів ХМ, наявність попереджувальних ремонтних робіт (ПРР) тощо; ε — відхилення, можливі збої, людський фактор тощо.

З метою ідентифікації ситуацій безпеки та аварій спочатку відзначимо особливості об'єкта керування холодозабезпеченням холодильних камер ПРХ: ХМ з точки зору вимог до математичного забезпечення; складність і високу структурованість технічної системи обладнання ХМ; відсутність даних обліку ступеня старіння, зношеності елементів технічної системи обладнання ХМ (прогнозування умов і час появи відмови об'єкта); невизначеність і нечіткість інформації при розрахунку вхідних складових (історія експлуатації обладнання ХМ, аварійні простої, ремонтний період, період експлуатації, одержані пошкодження); робота ХМ у режимі реального часу.

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

Так як ми маємо великий об'єм інформації, що спотворена перепонами і погрішностями вимірювання технологічних параметрів холодопостачання, то необхідна самоорганізація даних для виявлення в них областей (кластерів), які спричиняють відмови в роботі та викликають неполадки технологічного обладнання [11, 13, 14].

У процесі самоорганізації даних системи обладнання ХМ необхідно:

- виділити ті зміни і області значень (кластери), які тісно пов'язані з відмовами в роботі, пошкодження технологічного обладнання;
- визначити центри кластерів і використати їх для налагодження нечіткої моделі.

Математичне забезпечення системи оцінки стану обладнання ХМ, показників його безпеки повинно бути побудовано з урахуванням перерахованих вище особливостей функціонування компресорних холодильних машин.

Для розробки нечіткої моделі прогнозування рівня безпеки системи обладнання ХМ необхідно описати ситуацію пошуку несправностей, яка зв'язує множину передумов відновлення X_E і множину появи відмов Y_{np} . Множину X_E будемо виявляти на основі оброблення інформації про параметри технологічного процесу і подій на обладнанні ХМ та системи холодопостачання.

Вхідна інформація надходить від інформаційної системи АСУ-АСУТП холодильника — підприємства (верхній і середній рівень АСУТП — локальні системи керування ХМ) у вигляді станів обладнання — кластери: «Компресор», «Конденсатор», «Випарник», «Камери-контейнери», «Холодопостачання», «Холодильне поле камер-контейнерів», «Витрати холодильного агента», «Витрати води, повітря, електрики». Ці дані надходять для збігання на сервер бази даних. У табл. 1 наведена інформація про параметри технологічного процесу холодопостачання ХМ промислового холодильника.

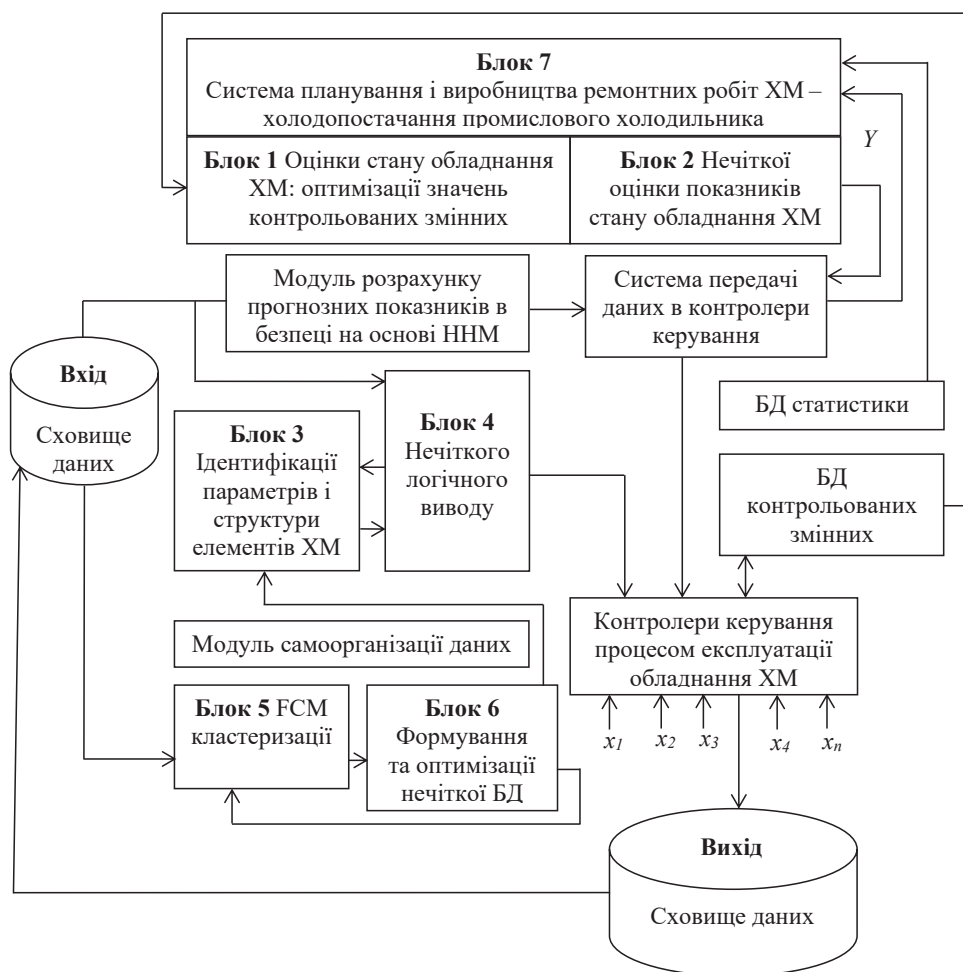
На рис. 1 наведено системну модель оцінки компресорного обладнання ХМ — холодозабезпечення промислового холодильника.

На функціональній схемі представлені такі блоки:

- модуль розрахунку прогнозних показників на основі 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.

Таблиця 1 — Інформація про параметри технологічного процесу холодопостачання

Інформація надається постійно в процесі холодопостачання камер-контейнерів підприємства-холодильника	Інформація надається на АРМ диспетчера-оператора один раз за зміну
1. Холодопродуктивність. 2. Холодильне поле кожної камери-контейнера. 3. Енергетичні характеристики та температурні режими компресорів машинної зали. 4. Стан системи контролю холодильного агента. 5. Стан системи випарників і конденсаторів. 6. Відповідні показники температурних параметрів камер для зберігання: 1) м'яса рогатої худоби, свиней в формі туш, напівтуш, четвиртин; 2) риби; 3) птиці тощо. Інформація надається на АРМ холодильщика у вигляді строки бази даних із робочої станції оброблення даних ХМ — холодопостачання промислового холодильника. 7. Параметри камер-холодильників. Дані про геометричні параметри та властивості продуктів харчування (робочі характеристики заморожування, охолодження).	1. Тип продукції. 2. Вимірювання температури в камерах зберігання м'ясних продуктів. 3. Вимірювання якості продукції в процесі її надходження в камеру. 4. Оптимальні режими роботи системи заморожування/охолодження продуктів. 5. Стійкість обладнання ХМ — холодопостачання промислового холодильника. 6. Дані про витрати електрики, холодильного агента, води, повітря тощо. 7. Дані про зупинку обладнання, параметри завантаження-розвантаження камер. 8. Дані про можливі дефекти обладнання і фактичну якість продукції. Планування вагомості технологічних параметрів заморожування/охолодження.

**Рисунок 1** — Системна модель оцінки обладнання холодильних машин холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника

Робота цих блоків виконується паралельно. Блок оптимізації формує дані для навчання НМ блока розрахунків. Цей набір даних формується на основі оптимізації ретроспективних даних за час експлуатації ХМ. Адекватність одержаних результатів перевіряється на імітаційній моделі. Нечітка модель, навчена за допомогою одержаних даних, дозволяє визначити/встановити безпечний режим експлуатації компресорного обладнання ХМ системи холодопостачання холодильного підприємства та фактичні терміни експлуатації до відмови системи.

У той же час оцінку стану обладнання ХМ — холодопостачання холодильних камер підприємства-холодильника необхідно виконувати на основі нейрон-нечіткого методу (ННМ) оброблення інформації з метою підвищення точності прогнозування і попереджувального керування виникненням аварійних ситуацій, відмов елементів даної технічної системи, що призводять до виникнення аварій. Тобто необхідно, з одного боку, розробити систему моніторингу стану обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер ПРХ, а з іншого боку — контролювати, як прогнозний показник, час надійної безаварійної експлуатації елементів обладнання ХМ. Такий підхід дозволить проєктантам побудувати: системну модель оцінки стану обладнання ХМ промислового холодильника; структурну модель оцінки стану обладнання ХМ; алгоритм оцінки стану обладнання ХМ — холодозабезпечення промислового холодильника; алгоритм прийняття рішення ОПР (диспетчера-холодильщика) щодо експлуатації обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника.

Перераховані вище алгоритми внесені до блоку 7 — системи планування і виробництва ремонтних робіт ХМ — холодозабезпечення ПРХ, який взаємодіє з системою передачі даних у контролери керування ТП виробництва штучного холоду.

Якщо в якості показника надійності обладнання ХМ холодопостачання ПРХ і їх елементів визначити критерії безвідмовності (Y_{np} , %) і критерій довговічності (I , %), то тоді ми можемо ввести наступні стани обладнання ПРХ: поладжаний стан, $I \rightarrow$ пошкодження $\rightarrow$ неполаджаний, але працездатний стан, $Y_{np} \rightarrow$ відмова $\rightarrow$ непрацездатний стан, $Y_{непр}$.

Якщо пошкодження, то є неполаджаний стан, але працездатний. У нашому випадку (рис. 1) стан системи обладнання — холодопостачання ПРХ визначається за допомогою блоку 1, в якому виконується оптимізація значень контрольованих змінних, які надходять із бази даних. На вхід даного блоку подаються параметри робочого процесу і робочі характеристики ХМ (час експлуатації, параметри технічного паспорту обладнання). Наприклад, для компресорних агрегатів такими чинниками можуть бути: холодопродуктивність, температура холодопостачання на вході та виході, час роботи агрегату тощо.

На вхід блоку 2 надходять сигнали наступних змінних: термін експлуатації ХМ після останнього ремонту (Tr); кількість незапланованих зупинок агрегатів або їх ремонтів ($N_{зуп}$); результати оцінки параметрів процесу із блоку 1 (I). Вихід блоку 2 — показник Y , % надійності компонента системи обладнання ХМ — холодозабезпечення ПРХ.

З точки зору побудови математичної моделі оцінки стану обладнання ХМ — холодозабезпечення ПРХ і оцінки процесу виникнення відмови елементів технічної системи та його обладнання, необхідно уявити її вихідні змінні (Y_k , Y_{km}), як показники стану обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер ПРХ. Останні визначають рівень надійності елементів: k — рівень технологічних об'єктів (підмоделі), m — рівень компресорних машин і механізмів (елементи підмоделей).

Статичну модель представимо у вигляді наступної залежності:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (5)$$

де x_i — вхідні змінні (фактори), які суттєво впливають на стан обладнання; m — кількість факторів; Y — показник стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ (критерій безвідмовності).

Оцінку стану обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер ПРХ будемо виконувати 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 наведена в таблиці 2.

Таблиця 2 — Інформація у вигляді лінгвістичних змінних для розробки нечіткої бази знань оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ

Вхідні змінні, x_i (i — кількість змінних) k — рівень технологічних об'єктів		Вихідні змінні — показник стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ, Y_{kn}		
		n — рівень машин і механізмів		
x_1	Термін експлуатації ($T_{ек}$)	Блок 1 Y_1 — холодильна машина	y_{11}	Холодильна машина — компресор
x_2	Кількість позапланових зупинок, ремонтів (N_3)	Блок 1 Y_1 — холодильна машина Блок 2 Y_2 — система керування ХМ	y_{12}	Електродвигун — тиристорний перетворювач частоти
x_3	Критерій довговічності (I)		y_{13}	Холодопродуктивність компресора
x_{31}	Стан системи ХМ: витрати холодильного агента		y_{14}	Температура холодильного агента
x_{32}	Робота компресора: потужність активна, реактивна		y_{15}	Тиск конденсації, температура охолодженого середовища
x_{32} x_{33}	Робота компресора: потужність активна, реактивна Температура на виході компресора		y_{16}	Температура холодоносія на виході із випарника, температура кипіння
			y_{21}	Положення регулюючого вентиля — температура — холодопродуктивність
x_{34}	Холодопродуктивність	Блок 2 Y_2 — система керування ХМ Блок 3 Y_3 — холодопостачання фенкойлів	y_{22}	Витрати холодильного агента, питомі витрати електрики
x_{35}	Тип холодильного агента		y_{23}	Витрати води
x_{36}	Заміри температури ХМ у процесі холодопостачання		y_{31}	Продуктивність випарника-чілера
x_{37}	Рівень мастила	Блок 3 Y_3 — холодопостачання фенкойлів Блок 4 Y_4 — холодопостачання камер ПРХ	y_{32}	Продуктивність циркуляційного насосу
x_{311}	Час заморожування / тривалість охолодження		y_{41}	Температура у камерах контейнера
x_{312}	Густина охолодженого продукту	Блок 4 Y_4 — холодопостачання камер ПРХ Y_5 — види технічних пристроїв	y_{42}	Температура продукту, його геометрія
x_{313}	Теплопровідність замороженого продукту		y_{43}	Вологість
x_{314}	Продуктивність холодильної камери ПРХ		y_{51}	Пристрої АСУ-АСУТП протиаварійного захисту
x_{315}	Дані про наявність дефектів у процесі охолодження / заморожування туші	Y_5 — види технічних пристроїв	y_{52}	Електрообладнання ХМ, АД-ТПЧ
x_{316}	Холодильне поле камери ПРХ		y_{53}	Динамічне обладнання автоматики контролю
x_{317}	Дані про геометрію (Φ) туші (півтуші, четвертини) ВРХ		y_{54}	Опорні системи (вузли, рами контейнерів)

Побудову нечіткої моделі оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ для моделі (рис. 2) зведено до таких етапів: визначення структури, завдання нечітких множин, завдання функцій належності, вибору алгоритму розрахунку нечіткого введення.

Модель оцінки стану ХМ — холодозабезпечення холодильних камер ПРХ поділена на чотири підмоделі за критерієм Y — показник стану обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер — контейнерів промислового холодильника (критерій безвідмовності, %):

Y_1 — модель 1 холодильної машини (Y_{11} — компресор; Y_{12} — електродвигун — тиристорний перетворювач компресора; Y_{13} — холодопродуктивність компресору; Y_{14} — температура холодильного агенту; 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 вентиль — температура, холодопродуктивність; Y_{22} — витрати холодильного агенту);

T_p — термін експлуатації ХМ після останнього ремонту;

N_3 — кількість непланових зупинок компресорного обладнання, обладнання контролю параметрів холодоагентів;

X_m — фактори впливу, які необхідні для розрахунку критерію довговічності (I_d , %)

Y_3 — модель холодопостачання фенкойлів (Y_{31} — продуктивність випарника чілера; Y_{32} — продуктивність циркуляційного насоса);

Y_4 — модель холодопостачання N_i ($i = 1, 2, \dots, n$) камер контейнерів (Y_{41} — температура у холодильних камерах контейнеру, Y_{42} — температура продукту, Y_{43} — вологість).

На рисунку 2 наведено структуру моделі оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ, а інформація у вигляді лінгвістичних змінних наведена в таблиці 2. Система відношень, яка відповідає структурі моделі оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ, має наступний вигляд:

$$Y = \prod Y_k = Y_1 \& Y_2 \& Y_3 \& Y_4, Y_k = \prod Y_{kn}, \quad (6)$$

$Y_{kn} = f(x)$, тому що алгебраїчний добуток ($\cap$) зберігає безперервність нечіткої моделі відносно параметрів функцій належності.

Кожна модель (Y_k) виконує розрахунок показників надійності елементів, які відносяться до неї (Y_{kn}), на основі сукупності технологічних параметрів виробництва холоду та холодозабезпечення ПРХ і статистичних даних про відмови вузлів компресорів, випарників, конденсаторів тощо.

Механізм відбору інформації для оцінки надійності роботи ХМ — холодопостачання холодильних камер є ідентичним раніш розглянутому, але він може відрізнитись набором контролерів у зв'язку з різною структурою схем обробки інформації для кожного продукту харчування [11, 12].

У нашому випадку з метою підвищення ролі інформаційного забезпечення системи керування холодозабезпеченням холодильними камерами промислового холодильника та підвищення безпеки продукції (замороженої, охолодженої) необхідно також побудувати логічні схеми оброблення інформації для оцінки критерію довговічності (I , %) компресорів $K_{c1,2}$, конденсаторів $K_{n1,2}$, насосів $N_{1,2}$, випарників $B_{1,2}$, електрообладнання, пристроїв АСУ-АСУТП тощо.

Вхідні параметри нечіткої моделі оцінки стану обладнання (МОСО) ХМ — холодозабезпечення холодильних камер промислового холодильника за допомогою фазифікації представлені у вигляді лінгвістичних змінних X , які задані на універсальних множинах за допомогою терм-множини T_i . Вони характеризуються функціями належності $X_j^\theta(x_i)$ (j — кількість термів лінгвістичних змінних).

Кожна функція належності $X_j^\theta(x_i)$ для лінгвістичних змінних X оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ має наступні характеристики [12, 13, 14]:

— множину рівня 1, яку будемо називати ядром нечіткої множини X , яку позначимо у вигляді:

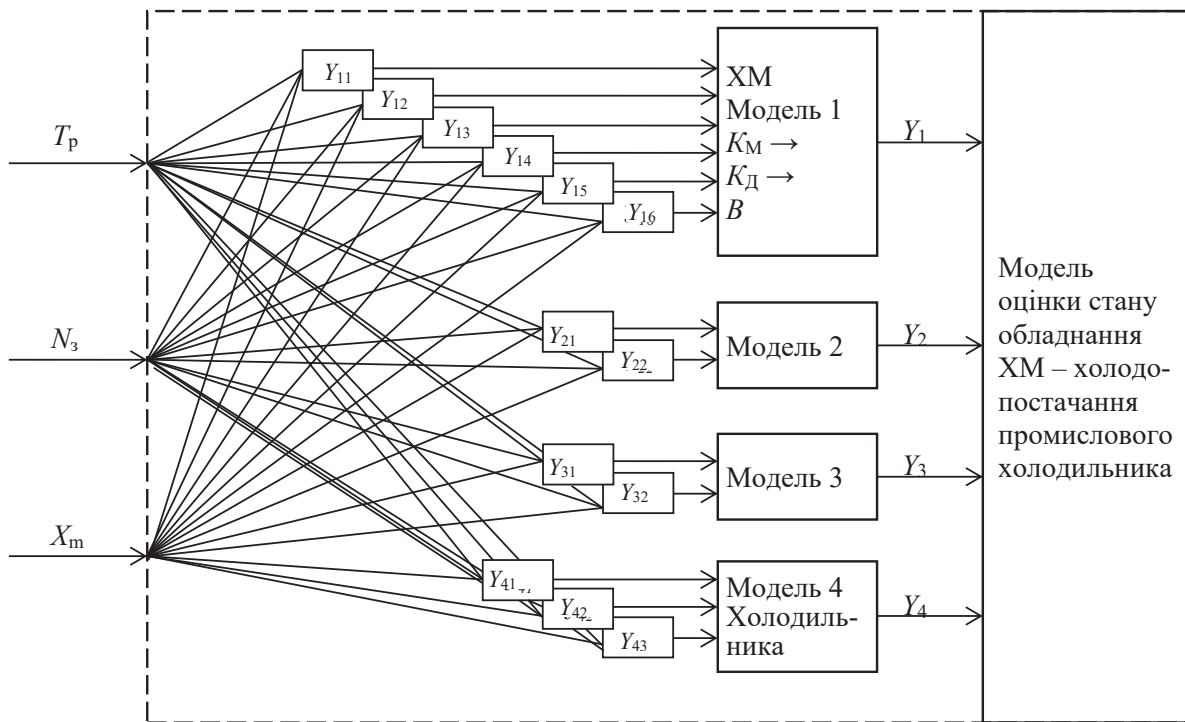


Рисунок 2 — Структура моделі оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ

$$X^0; X^0 = \{x \in X | X(x) = 1\}; \quad (7)$$

— множину рівня 0, яку будемо називати носієм нечіткої множини X , яку позначимо:

$$X_0; X_0 = \{x \in X | X(x) > 0\}. \quad (8)$$

Якщо нечітка множина змінних x_i має порядковий номер $i = 1, 2, \dots$ наприклад, x_{i1} , то його носій і його ядро записується у вигляді:

$$X_j = \{x_i \in X_i | X_j(x_i) > 0\},$$

$$X_i = \{x_i | x_j^{\min} \leq x_i \leq x_j^{\max}\}, \quad (9)$$

де $x_i^{\min}$, $x_i^{\max}$ — мінімальне і максимальне значення змінної x_i .

Для лінгвістичної змінної оцінки стану обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер ПРХ $< x, T_x, X >$ визначимо терм-множину $T_x = \{X_2\}$ з $i = 1, n$ термами, пронумерованими еталонними нечіткими множинами від 1 до n .

Будемо вважати, що універсальна множина XER , де R — вісь дійсних чисел. Множина T_x повинна бути упорядкована у відповідності з виразом:

$$(\forall X_i \in T_x) (\forall X_j \in T_x) |i > j \leftrightarrow (\exists x' \in x_{0i}) (\forall x'' \in x_{0j}) (x' > x'') \quad (10)$$

який означає, що терм, який має носій і розташований ліворуч, одержує менший номер.

Виходячи із визначення і ознак лінгвістичної змінної оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ, її функція належності повинна задовольняти наступним умовам:

$$\begin{aligned} X_1(x) &= 1, \text{ якщо } x < x^1; \\ X_1(x) &\in [0, 1], \text{ якщо } x > x^1; \\ X_q(x) &\in [0, 1], \text{ якщо } x < x^q; \\ X_q(x) &= 1, \text{ якщо } x > x^q \end{aligned} \quad (11)$$

де $x^j = \arg \max X_i(x); i = 1, q; x \in X_{0i}$.

$$(\forall X_i \in T_x) \neg 0 \max(X_i(x) \wedge X_{i+1}(x) = 1), \quad (12)$$

$$(\forall X_i \in T_x) \neg \exists x \in X (X_j(x) = 1). \quad (13)$$

Лінгвістичні змінні та терм-множина підмоделей оцінки критерію довговічності (I, %) компресорів № 1, № 2, ..., № n, станцій, конденсаторів, які працюють на холодозабезпечення морозильних камер з м'ясом туш (напівтуш, четвертин) великої рогатої худоби (ВРХ) наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 — 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			
$T_{зм}$	Температура кипіння	-40...-50 °C	Низька, середня, висока
$B_{х.а.}$	Масові витрати холодильного агенту	кг/с	Низькі, середні, високі
$Q_{х.п.км.}$	Холодопродуктивність КМ	кДж/кг	Низька, середня, висока
$Q_{х.п.в.}$	Холодопродуктивність випарника (В)	кВт	Низька, середня, висока
D	Критерій накопичення пошкоджень	0 — 100%	Низька, середня, висока
D_2	Скоригований критерій накопичення пошкоджень	0 — 100%	Низька, середня, висока
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	°C	Норма, нижче норми, вище норми
$I_{тп}$	Інтенсивність теплопередачі	на 1°C	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 холодильних камер заморожування			
$\tau_o, \tau_{кз}$	Тривалість охолодження, час заморожування	с	Висока, середня, низька
ρ	Густина охолодженого продукту	кг/м ³	Висока, середня, низька
λ	Теплопровідність замороженого продукту	Вт(м·к)	Висока, середня, низька
$\Phi_{т.п.}$	Форма туші, її геометрія	м ²	Стандартна, близька до стандарту, нестандартна

Позначення змінної	Назва змінної	Універсальна множина	Терм-множина для оцінок
$D_{кз}$	Критерій накопичення пошкоджень	0 — 100%	Низька, середня, висока
$I_{кз}$	Критерій довговічності камери заморожування	0 — 100%	Дуже низька, низька, середня, висока, дуже висока

У зв'язку з незначним об'ємом інформації про особливості функцій належності нечітких змінних при побудові нечіткої моделі конкретного холодильного обладнання ПРХ використовуємо шматочно-лінійні функції сигмоїдального виду [13, 14, 15]. У подальшому їх характер може бути уточнено, особливо на етапі ідентифікації нечіткої моделі.

Для оцінки обладнання ХМ — холодозабезпечення холодильних камер ПРХ використовуються такі терми:

VL — дуже високий рівень значення змінної;

L — низький рівень значення змінної;

M — середній рівень значення змінної;

H — високий рівень значення змінної;

VH — дуже високий рівень значення змінної.

Високу ефективність в задачах прогнозування технологічних процесів показала нечітка модель, у правій частині якої знаходиться лінійне рівняння, побудоване на базі нечітких моделей Тагакі-Сугено [13, 14, 15, 16]. Така модель відноситься до гарно вивченого класу моделей, які успішно використовуються з урахуванням та використанням великої кількості даних і не чутлива до завад і погрешностей вимірювання за рахунок усереднених механізмів виводу у.

Для цілей оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ запишемо її у вигляді:

$$R^{\theta}: \text{якщо } x_1 \in X_1^{\theta}, x_2 \in X_2^{\theta}, \dots, x_m \in X_m^{\theta},$$

то

$$y = a_0^{\theta} + a_1^{\theta} x_1 + a_2^{\theta} x_2 + \dots, a_m^{\theta} x_m \in Y_{\theta}, \quad (14)$$

де X_m^{θ} — нечітка множина, яка характеризує вхідні змінні x_i ; $i = 1, m$ — кількість змінних; $\theta = 1, n$ — кількість правил; y^{θ}, Y^{θ} — вихідні змінні θ -го порядку і відповіді нечіткої множини (показник стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ); a — коефіцієнти лінійних рівнянь консеквентна агрегування правил оцінки стану обладнання ХМ — холодопостачання ПРХ, виконаної в нечіткій базі знань.

У нашому випадку база знань (БЗ) для оцінки стану системи в цілому складає 3808 правил. Нечітка імплікація правил в базі знань має такий вигляд:

$$\bigcup^n (\bigcap^m x_i = X_j^{\theta}(x_i, d^{\theta}) \rightarrow y_L = Y_i). \quad (15)$$

Правила в нечіткій базі знань для оцінки критерію накопичення пошкоджень D в системі компресор-випарник-конденсатор-камера по схемі Мамдані сформульовані наступним чином [13, 14]:

1. Якщо холодопродуктивність ХМ номінальна, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ відповідають номінальним значенням, то значення критерію накопичення пошкоджень дуже низьке.

2. Якщо холодопродуктивність ХМ номінальна, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ теж близьке до раціонального, то значення критерію накопичення пошкоджень низьке.

3. Якщо холодопродуктивність ХМ номінальна, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ нижче раціонального, то значення критерію накопичення пошкоджень середнє.

4. Якщо холодопродуктивність ХМ середня, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ відповідають номінальним значенням, то значення критерію накопичення пошкоджень низьке.

5. Якщо холодопродуктивність ХМ середня, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ відповідають середнім значенням, то значення критерію накопичення пошкоджень середнє.

6. Якщо холодопродуктивність ХМ середня, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ відповідають низьким значенням, то значення критерію накопичення пошкоджень високе.

7. Якщо холодопродуктивність ХМ низька, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ відповідають високим значенням, то значення критерію накопичення пошкоджень середнє.

8. Якщо холодопродуктивність ХМ низька, а навантаження на камерне обладнання для кожної камери ПРХ середнє, то значення критерію накопичення пошкоджень високе.

У таблиці 4 наведена база знань для D уявлення у вигляді матриці знань.

Таблиця 4 — Матриця знань для оцінки критерію накопичення пошкоджень (D)

$\tau_{\text{кз}}$ Q	L	M	H
L	VH	H	M
M	H	M	L
H	M	L	VL

Аналогічно проведемо корекцію накопичення пошкоджень $D_{\text{кз}}$ камери заморожування м'яса ВРХ відносно температури заморожування $T_{\text{кз}}$ і тривалості охолодження τ_o (часу заморожування $\tau_{\text{кз}}$) і розрахунку критерію довговічності та параметрів холодозабезпечення камер ПРХ.

Для цього необхідно також побудувати спочатку правила нечіткої бази знань (БЗ) для оцінки критерію часу заморожуванням м'ясних продуктів, потім нечітку базу знань для оцінки критерію довговічності компресорних установок ХМ та конденсатора-випарника.

Розрахунок виходу Y^0 в θ -му правилі виконується за допомогою лінійного рівняння виду:

$$Y^0 = a_0^0 + a_1^0 x_1 + a_2^0 x_2 + \dots + a_n^0 x_n. \quad (16)$$

Тоді нечітка модель оцінки стану обладнання ХМ — холодозабезпечення ПРХ буде записана в загальному вигляді рівнянням виду:

$$\bigcup_{j=1}^{k_j} (\bigcap_{i=1}^n x_i = x_{i,p}) \rightarrow Y = a_{j,0} + a_{j,1} x_1 + a_{j,2} x_2 + \dots + a_{j,n} x_n, j = 1, m. \quad (17)$$

Розглянемо структуру дефазифікації (ДЕФ) і нечіткого виведення (НВ) для запропонованої моделі (17).

Для реалізації нечіткого логічного виведення запропонованої моделі оцінки стану обладнання ХМ — холодозабезпечення камер ПРХ будемо використовувати нейрон-нечіткі мережі, які дозволяють автоматично синтезувати вхідні дані, оскільки архітектура нейрон-нечіткої мережі ізоморфна нечіткій базі знань [12, 13, 14, 15].

Процедуру перетворення Fuz (Fuzzyfication) (ФАЗ) дійсного значення x змінної x в лінгвістичне X' , нечіткого виведення FI (FuzzyInference) (НВ) лінгвістичного виведення Y' по відомому входу X' і сукупності правил $R = \{R^1, \dots, R^n\}$, а також перетворення Def (Defuzzyfication) (ДЕФ) лінгвістичного значення виходу Y' в дійсне y^0 , виконано за допомогою процедур, наведених в [13, 14, 15, 16].

Перейдемо до розробки багаторівневої інтелектуальної системи керування технологічним процесом заморожування м'ясної продукції в холодильних камерах промислового холодильника. На рис. 3 наведено інтелектуальну систему управління промисловим холодильником великої потужності для зберігання заморожених м'ясних продуктів.

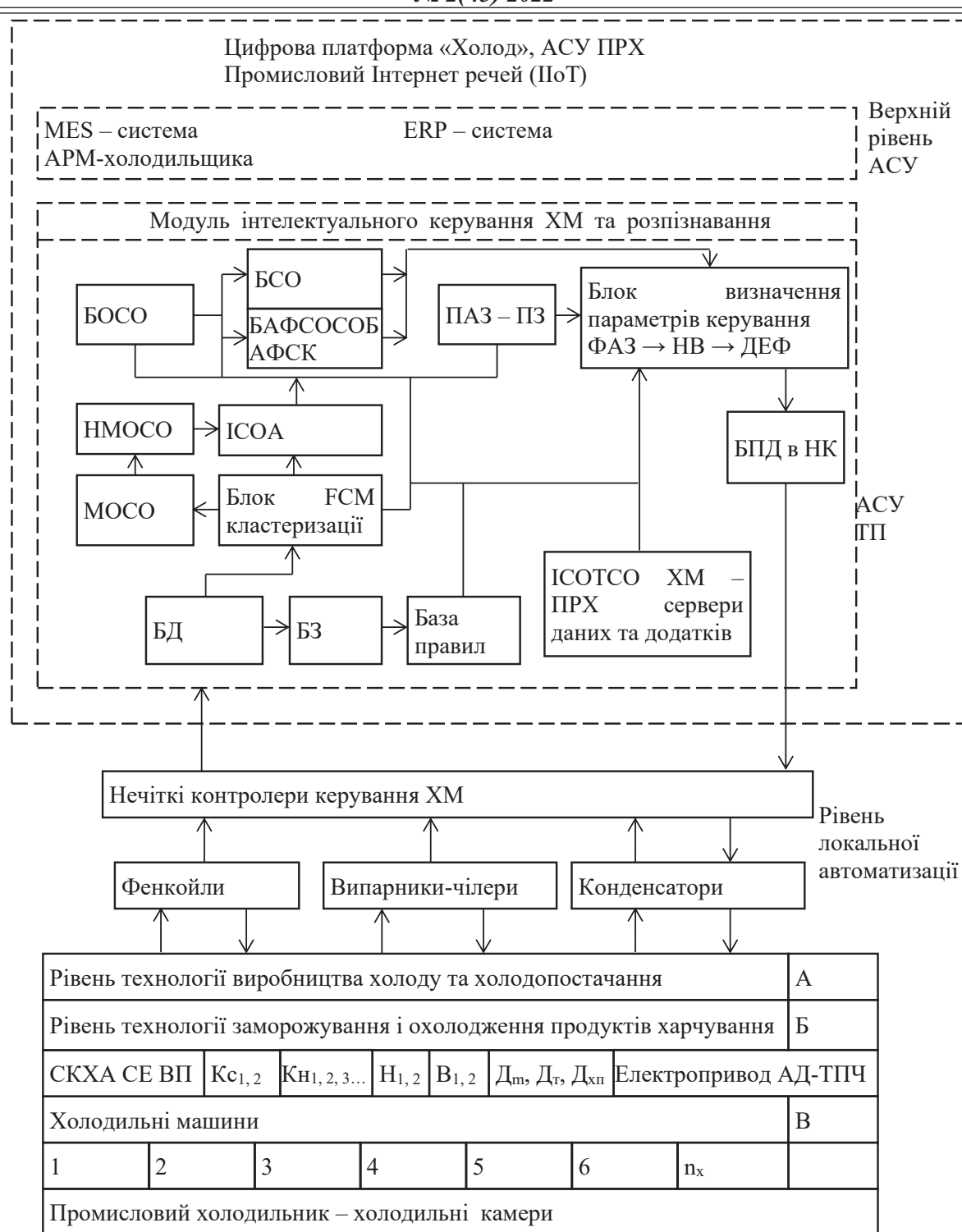


Рисунок 3 — Інтелектуальна система керування ХМ — холодозабезпечення ХК смарт-ПРХ

Відмінною рисою таких систем є наявність підсистем прогнозування та розпізнавання аварійних ситуацій (АС), аварій (А), які працюють в реальному масштабі часу.

У системі передбачено три рівні керування:

1. АСК з цифровою платформою «Холод», промисловим Інтернет-речей, ERP-системами керування потоками грошей та MES-системами оперативного керування технологічним процесом заморожування м'ясних продуктів.

2. Інтелектуальний рівень підтримки прийняття оперативних рішень (ІСППОР) та оцінки ризиків від виникнення аварійних ситуацій (АС), аварій (А), стану холодильного агенту та обладнання (інтелектуальне АРМ холодильника), який утворює рівень АСУ ГП

промислового холодильника. На цьому рівні реалізовано функцію самоорганізації (БСО — блок самоорганізації даних), а саме: аналіз стану холодильного обладнання, ідентифікація, створення бази даних (БД), бази знань (БЗ), бази правил та формування інформаційного масиву; БОСО — блок оцінки стану обладнання; ІСОА — інтелектуальна система оцінки аварійних ситуацій та аварій, МОСО — модель оцінки стану обладнання; НМОСО — нечітка модель оцінки стану обладнання, БАФСКС — блок алгоритмів формування системи команд, БАФСОСО — блок алгоритмів формування системи оцінки стану обладнання, ПАЗ-ПЗ — програмно-алгоритмічне забезпечення — програмне забезпечення виконання ППР.

3. Нижній адаптивний рівень АСК КУ — керування локальними системами холодильних машин: компресорами (Кс), конденсаторами (Кн), насосами (Н), випарниками (В) з системою датчиків (Д), електроприводами гвинтових компресорних установок з АД-ТПЧ і СД поршневих компресорних установок та блоком подання нечітких даних (БП Д) у нечіткі контролери керування.

Висновки. Розроблено системну модель оцінки стану компресорного обладнання холодильних машин промислового холодильника, що дозволило спроектувати інтелектуальну систему управління промисловим холодильником з підсистемами розпізнавання аварійних ситуацій, мінімізувати ризики впливу викидів аміаку та інших холодоагентів на навколишнє середовище.

Розроблено метод ідентифікації стану холодильного обладнання промислових холодильників, який відрізняється від існуючих точністю прогнозування відмов обладнання та розпізнавання аварійних ситуацій у процесі його експлуатації. Цей метод оцінки працездатності холодильного обладнання виконано за допомогою розробленої структурної і параметричної ідентифікації нечіткої моделі за рахунок використання генетичних алгоритмів та штучних нейронних мереж, і результати якого дозволяють дослідити та встановити залежність між параметрами процесу заморожування продукції в холодильних камерах промислового холодильника і дефектами (відмовами), які є причинами виникнення аварійних ситуацій та аварій.

Розроблено інтелектуальну систему керування технологічним процесом заморожування м'ясних продуктів, в якій використано системи розпізнавання аварійних ситуацій.

Список літератури

1. Теплохолодотехніка : навч. посіб. / заг. ред. С. М. Василенко. Київ : Ліра-К, 2019. 258 с. ISBN 978-617-7605-70-5.
2. Биченок М. М., Іванюта С. П., Яковлев Є. О. Ризики життєдіяльності у природно-техногенному середовищі. Київ : Інститут проблем національної безпеки, 2008. 160 с.
3. Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. Київ : Наукова думка, 2008. 544 с.
4. Saaty T. L., Vargas L. G. Decision making with the analytic network process. Economical, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks. New York City : Springer, 2006. 288 p.
5. Frank H. Knight. Risk Uncertainty and Profit. Eastford, Connecticut : Martino Fine Books, 2014. 394 p.
6. Сухенко В. Ю., Сухенко Ю. Г., Муштрук М. М. Показники надійності обладнання харчових виробництв. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2016. № 4. С. 12–16.
7. Надійність сільськогосподарської техніки / за ред. М. І. Черновол. Київ : Урожай, 2010. 242 с.
8. Хмельнюк М. Г., Подмазко О. С., Подмазко І. О. Холодильні установки та сфери їх використання : підручник. Херсон : ФОП Грін Д. С., 2014. 484 с.
9. Чернець М., Невчас А., Скварок Ю. Дослідження і підвищення зносостійкості матеріалів та оцінка довговічності і надійності триботехнічних систем. Дрогобич-Люблін, 2000. 329 с.
10. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Петрушина Ю. М. Теоретичні основи оцінки надійності обладнання холодильних машин на основі нейронечіткого методу іденти-

фікації їх стану. Вісник ХНУ. Серія «Технічні науки». Хмельницький : ХНУ, 2022. Вип. 2 (307). С. 103–109. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-307-2-103-1089>.

11. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Петрушина Ю. М. Оцінка працездатності холодильних машин промислових холодильників в темпі з процесом холодопостачання. Обладнання та технології харчових виробництв. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2022. Вип. 1 (44). С. 53–65. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2022-44-1-53-65>.

12. Руденко В. М. Математична статистика : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 304 с.

13. Сироджа И. Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления. Киев : Наукова думка, 2002. 418 с.

14. Russell S. J., Norvig P., Davis E. Artificial intelligence: a modern approach. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2010. 1132 p.

15. Вороновский Г. К. и др. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Харьков : Основа, 1997. 112 с.

16. 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.

References

1. Vasylenko, S. M. et al. (2019). *Teplokhodotekhnika* [Thermal and refrigeration engineering], Kyiv, Lira-K, 258 p.

2. Bychenok, M. M., Ivaniuta, S. P., Yakovliev, Ye. O. (2008). *Ryzyky zhyttiediialnosti u pryrodno-tekhnohennomu seredovyshchi* [Life risks in the natural and man-made environment], Kyiv, Institute for National Security Problems, 160 p.

3. Lysychenko, H. V., Zabulonov, Yu. L., Khmil, H. A. (2008). *Pryrodnyi, tekhnohennyi ta ekolohichnyi ryzyky: analiz, otsinka, upravlinnia* [Natural, technogenic and environmental risks: analysis, assessment, management], Kyiv, Naukova dumka, 544 p.

4. Saaty, T. L., Vargas, L. G. (2006). Decision making with the analytic network process. Economical, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks, New York City, Springer, 288 p.

5. Frank, H. Knight. (2014). Risk Uncertainty and Profit, Eastford, Connecticut, Martino Fine Books, 394 p.

6. Sukhenko, V. Yu., Sukhenko, Yu. H., Mushtruk, M. M. (2016). *Pokaznyky nadiinosti obladnannia kharchovykh vyrobnytstv* [Indicators of reliability of food production equipment], *Standartyzatsiia. Sertyfikatsiia. Yakist.* [Standardization. Certification. Quality.], No. 4, pp. 12–16.

7. Chernovol, M. I. et al. (2010). *Nadiinist silskohospodarskoi tekhniki* [Reliability of agricultural machinery], Kyiv, Urozhai, 242 p.

8. Khmelniuk, M. H., Podmazko, O. S., Podmazko, I. O. (2014). *Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia* [Refrigeration plants and areas of their use], Kherson, FOP Hrin D. S., 2014. 484 p.

9. Chernets, M., Nevchas, A., Skvarok, Yu. (2000). *Doslidzhennia i pidvyshchennia znosostiikosti materialiv ta otsinka dovhovichnosti i nadiinosti trybotekhnichnykh system* [Research and improvement of wear resistance of materials and assessment of durability and reliability of tribological systems], Drohobych-Liublin, 329 p.

10. Khorolskyi, V. P., Korenets, Yu. M., Petrushyna, Yu. M. (2022). *Teoretychni osnovy otsinky nadiinosti obladnannia kholodylnykh mashyn na osnovi neironechitkoho metodu identyfikatsii yikh stanu* [Theoretical foundations for assessing the reliability of refrigeration machine equipment on the basis of the neuro-fuzzy method for identifying their state], *Visnyk KhNU. Seriiia "Tekhnichni nauky"* [Bulletin of KhNU. Series "Technical Sciences"], 2(307), pp. 103–109. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-307-2-103-1089>

11. Khorolskyi, V. P., Korenets, Yu. M., Petrushyna, Yu. M. (2022). *Otsinka pratsezdatsnosti kholodylnykh mashyn promyslovykh kholodylnykh v tempi z protsesom kholodopostachannia*

[Evaluation of the operability of refrigeration machines of industrial refrigerators at a pace with the refrigeration process], *Obladnannia ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv* [Food production equipment and technologies], 1 (44), pp. 53–65. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2022-44-1-53-65>

12. Rudenko, V. M. (2012). *Matematychna statystyka* [Math statistics], Kyiv, Center for Educational Literature, 304 p.

13. Sirodzha, I. B. (2002). *Kvantovye modeli i metody iskusstvennogo intellekta dlya prinyatiya reshenij i upravleniya* [Quantum models and artificial intelligence methods for decision making and management], Kiev, Naukova dumka, 418 p.

14. Russell, S. J., Norvig, P., Davis, E. (2010). *Artificial intelligence: a modern approach*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1132 p.

15. Voronovskij, G. K. et al. (1997). *Geneticheskie algoritmy, iskusstvennye neyronnye seti i problemy virtualnoj realnosti* [Genetic Algorithms, Artificial Neural Networks and Problems of Virtual Reality], Harkov, Osnova, 112 p.

16. Horolskiy, V. P. et al. (2020). *Tsifrovi systemy intelektualnogo upravlinnya pidpnyemstvami promyslovogo kompleksu regionu* [Digital systems of intellectual management of enterprises of the industrial complex of the region], Kryvyi Rih, Chernyavskiy D. O., 561 p.

Objective. The purpose of the article is to develop methods for identifying technological controlled situations in the operation of modern ammonia compressor equipment from the refrigeration system of an industrial refrigerator based on artificial intelligence.

Methods. The article uses artificial intelligence methods to develop a model and methods for assessing emergency situations and optimizing the reliability of complex technological systems for providing cold with ammonia compressor equipment for freezing food.

In order to obtain scientific results, a methodology has been developed that provides: the development of methods for identifying the state of compressor ammonia machines, the construction of models of cause-and-effect relationships (fault tree) of the technological process of refrigeration supply of refrigeration chambers of an industrial refrigerator of high power; study of the relationship between technological performance parameters, assessment of reliability and recognition of emergency situations; modeling of the state of equipment associated with the parameters of reliability and performance of compressor machines. The technique allows to reduce the risks from emergencies of ammonia refrigeration equipment, and the methods for their assessment depend on the possibility of a controlled impact of energy carriers of the technological process on a person (industrial injuries, occupational diseases), the environment (environmental accidents and disasters) and their impact on production areas and the population (accidental releases of ammonia, releases of lubricants, etc.). The methodology recommends that designers, when designing modern multi-level intelligent control systems, develop subsystems for the life safety of refrigeration enterprises in the food industry, to begin with the definition (identification) and control (monitoring) of potentially dangerous processes for the production of safe food smart products, their storage in refrigerators. At the same time, the assessment of the state of equipment of refrigerating machines — the refrigeration supply of refrigerating chambers of a refrigerating enterprise must be performed on the basis of a neuron-fuzzy information processing method in order to improve the accuracy of forecasting and preventive management of the occurrence of emergencies, failures of elements of this technical system, which can lead to hazardous situations. That is, it is necessary, on the one hand, to develop a system for monitoring the condition of refrigeration equipment (refrigeration supply of industrial refrigerators), and on the other hand, to control the time of reliable trouble-free operation of refrigeration equipment elements as a predictive indicator.

Results. A method for identifying the state of refrigeration equipment of industrial refrigerators has been developed, which differs from the existing ones in the accuracy of predicting equipment failures and recognizing emergency situations during its operation. A system model for assessing the state of the compressor equipment of refrigeration machines of an industrial refrigerator has been developed, which made it possible to design an intelligent control system for an industrial refrigerator with subsystems for recognizing emergency situations, to minimize the risks of the impact of ammonia and other refrigerant emissions on the environment. In an intelligent system for recognizing emergencies at a pace

with the process, the performance of refrigeration equipment was assessed using the developed structural and parametric identification of a fuzzy model, as well as through the use of genetic algorithms and artificial neural networks, the results of which allow us to investigate and establish the relationship between the parameters of the freezing process in refrigeration chambers of an industrial refrigerator and defects (failures), which are the causes of emergencies and accidents.

Key words: reliability, emergency situations, risk minimization, identification, cold supply, ammonia compressor machines, neuro-fuzzy control, intelligent system.

DOI : 10.33274/2079-4827-2022-45-2-71-77

UDC [631.576:582.711.714]:(631.362:502.21-027.236-049.34)

Tsvirkun L. O., PhD in Pedagogical sciences¹

Omelchenko O. V., PhD in Engineering sciences¹

Tsvirkun S. L., PhD in Engineering sciences²

Shilin A. S., здобувач ОС бакалавра¹

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

² Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: tserg30@ukr.net.

INCREASING RESOURCE SAVING AND OPERATIONAL EFFICIENCY OF APPLE SORTING DEVICE

УДК [631.576:582.711.714]:(631.362:502.21-027.236-049.34)

Цвіркун Л. О., канд. пед. наук¹

Омельченко О. В., канд. техн. наук¹

Цвіркун С. Л., канд. техн. наук²

Шилін А. С., A graduate of a bachelor's degree¹

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

² Криворізький національний університет (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: tserg30@ukr.net.

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ СОРТУВАННЯ ЯБЛУК РІЗНОГО РІЗНОВИДУ

Objective. The purpose of the article is to increase the resource saving and efficiency of the device for sorting apples of various varieties.

Methods. In the work for sorting apples, namely varieties Golden and Granny Smith, methods for finding singular points were used: the Harris method, the SURF method, the SIFT method, the FAST method, and others.

Results. It is noted that in modern conditions, the issue of improving food production processes and equipment is extremely relevant. It is possible to improve the process of sorting apples by using a system of tracking objects in the flow through the identification of contours of objects, namely video surveillance through unique special points. Currently, there are a large number of algorithms for selecting special points of an image, which convey information about certain features of the image. On the basis of complex analysis, it is considered that during the processing of the upper segment of the frame $f_a(x, y, t)$, the outline of the apple and its visual characteristics are determined: size (d), weight (m), color (g). At this stage special points and their descriptors are defined. Unique descriptors of singular points related to the selected object are memorized and in the future according to their location in the lower fragment of the frame $f_b(x, y, t)$ are evaluated and subject to selection. Attention is focused on the fact that due to the limited speed of the executive sorting mechanism, it is important to estimate the distances between groups of objects located close to each other. The method of multi-criteria selection

Надійшла до редакції 17.10.2022 р.

© Цвіркун Л. О., Омельченко О. В.,
Цвіркун С. Л., Шилін А. С., 2022