

ХОРОЛЬСЬКИЙ Валентин

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського
ORCID ID: [0000-0003-4040-3229](https://orcid.org/0000-0003-4040-3229)
e-mail: khorolv@ukr.net

КОРЕНЕЦЬ Юрій

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського
ORCID ID: [0000-0002-5873-7908](https://orcid.org/0000-0002-5873-7908)
e-mail: korenets@donmuet.edu.ua

ОМЕЛЬЧЕНКО Олександр

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського
ORCID ID: [0000-0003-0704-5909](https://orcid.org/0000-0003-0704-5909)
e-mail: omelchenko@donmuet.edu.ua

ГОНЧАРЕНКО Володимир

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

ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ В СИСТЕМІ УЗГОДЖЕНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ КОМПЛЕКСУ ПІДПРИЄМСТВО – ПРОМИСЛОВИЙ ХОЛОДИЛЬНИК

Запропоновано стратегію узгодженого управління електроспоживанням промислового холодильника підприємства харчового комплексу з виробництва продуктів харчування. Розроблено структуру інтегрованої інтелектуальної системи управління електроспоживанням підприємства-холодильника, в якій вбудовані системи автоматизованого контролю обліку електрики та управління траєкторією холодозабезпечення холодильних камер. У системі використано ситуаційний центр, промисловий Інтернет-речей (IIoT), цифрову платформу «ІЖА» з програмним забезпеченням (заморожування виробленої харчової продукції). По команді АСУЕ-АСУ верхній рівень промислового холодильника та його програмне забезпечення відпрацьовує задані параметри портфеля замовлення активної та реактивної потужностей підприємств харчового комплексу. Розроблено алгоритм управління промисловим холодильником у періоди обмежень потужності енергосистеми. Доведено, що зменшення питомих енерговитрат на виробництво однієї тонни заморожуваного продукту харчування в період обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень можливо лише за рахунок оптимізації технологічних та енергетичних параметрів холодильних машин. Наведено технології зменшення енерговитрат управлінням реактивною та активною потужностями синхронних двигунів поршневих компресорів та частотного керування асинхронних двигунів гвинтових компресорів та асинхронних двигунів конденсаторів-випарників. Виконано моделювання геометрії внутрішньо-камерного завантаження холодильних камер промислового холодильника. Розроблено нові підходи до вибору установок адаптивних регуляторів збудників синхронних двигунів, узгоджених в реальному масштабі часу з енергетичними режимами роботи холодильних машин та геометрією завантаження холодильних камер. Доведено можливість підвищення ефективності управління режимами електроспоживання підприємств харчової промисловості за рахунок узгодженого автоматизованого управління технологічними процесами охолодження та заморожування м'ясної продукції, птиці, риби, молочних продуктів, фруктів тощо та застосування автоматизованих систем управління електроспоживанням шляхом побудови експертних та людино-машинних систем прийняття рішень. Розроблені системи дозволять забезпечити вимоги енергогенеруючих компаній щодо активних і реактивних навантажень, знизити витрати у електромережах та підтримати напругу у вузлах електроприймачів в межах встановлених норм.

Ключові слова: траєкторія електроспоживання, енерговитрати, моделі, промислові холодильники, холодильні камери, синхронні двигуни, збудники, адаптація, інтелектуальні системи.

KHOROLSKY Valentyn, KORENETS Yurii,
OMELCHENKO Oleksandr, HONCHARENKO Volodymyr
Donetsk National Economy and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky

REFRIGERATION MACHINES IN THE SYSTEM OF CONSISTENT MANAGEMENT OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF THE COMPLEX ENTERPRISE-INDUSTRIAL REFRIGERATOR

The strategy of the coordinated management of electric consumption of the industrial refrigerator of the enterprise of a food complex on production of foodstuff is offered. The structure of the integrated intelligent power management system of the refrigerator enterprise has been developed, in which the systems of automated control of electricity metering and control of the refrigeration trajectory of refrigeration chambers are built-in. The system uses a situation center, industrial Internet of Things (IIoT), digital platform "FOOD" with software (freezing of food products). According to the ASUE-ACS command, the upper level of the industrial refrigerator and its software fulfill the set parameters of the portfolio of orders for active and reactive capacities of the food complex enterprises. An algorithm for controlling an industrial refrigerator during periods of power system power limitations has been developed. It is proved that the reduction of specific energy consumption for the production of one ton of frozen food during the period of power system power limitations and fan outages is possible only by optimizing the technological and energy parameters of refrigeration machines. Technologies for reducing energy consumption by controlling the reactive and active power of synchronous motors of reciprocating compressors and frequency control of asynchronous motors of screw compressors and asynchronous motors of evaporating condensers are presented. Simulation of the geometry of the in-chamber loading of the refrigerating chambers of an industrial refrigerator is performed. New approaches to the choice of adaptive regulators of synchronous motor exciters have been developed, which are coordinated in real time with the energy modes of operation of refrigeration machines and the geometry of refrigeration chamber loading. The possibility of improving the efficiency of power management

regimes of food industry enterprises through coordinated automated control of cooling and freezing of meat products, poultry, fish, dairy products, fruits and the use of automated power management systems by building expert and human-machine decision making systems. The developed systems will allow to meet the requirements of energy generating companies for active and reactive loads, reduce costs in the power grid and maintain the voltage in the nodes of electrical receivers within the established norms.

Key words: power consumption trajectory, energy consumption, models, industrial refrigerators, cold rooms, synchronous motors, exciters, adaptation, intelligent systems.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основним завданням підприємств з виробництва холоду для переробної та харчової галузей України у стратегічному періоді, розрахованому до 2035 року, є підвищення конкурентоспроможності продуктів харчування до вимог світового ринку та зменшення питомих енерговитрат для їх виробництва на 25-35% від рівня 2013 року [1].

Високий рівень енерговитрат на виробництво підприємствами харчування однієї тонни продукції стимулює їх енергоменеджмент до корпоративної реструктуризації процесів обліку та оптимізації споживання електрики, газу, води, пари, дизельного палива, оливи та інших матеріалів [2].

З метою зменшення собівартості продукції та підвищення її якості до рівня європейських стандартів на підприємствах харчової промисловості розроблені методи управління виробництвом охолодженої й замороженої продукції харчування в умовах ринкових тарифів на електроенергію [3].

Отже, зниження енергетичних витрат на ці виробничі процеси є актуальним завданням енергоменеджменту до 2035 року. Цього можна досягти впровадженням на підприємствах з виробництва холоду автоматизованих систем управління електроспоживанням холодильних машин та промислових холодильників. Робота таких систем повинна бути узгодженою з оптимізацією технологічних процесів виробництва холоду – холодопостачання N холодильних камер [4] та енергетичними параметрами синхронних й асинхронних двигунів поршневих і гвинтових компресорів холодильних машин.

Таким чином, задача подальшого удосконалення принципів інтелектуального управління процесами електроспоживання потужних комплексів з виробництва продуктів харчування високої якості в системі енергозабезпечення «підприємство – промисловий холодильник» в умовах обмежень енергопотужності системи електропостачання є актуальною та своєчасною.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблема ефективності систем енергопостачання підприємств різних галузей тісно пов'язана зі стратегією розвитку енергетики України до 2035 року [5]. Пріоритетність напрямку державної політики щодо енергозбереження на підприємствах харчової промисловості, створення зон високої енергоефективності висвітлено в працях [5–7]. Принципи науково обґрунтованого управління енергозбереженням промислових холодильників підприємств харчової галузі на основі оптимізації технологічних режимів енергоємного обладнання розроблено вченими [8–10]. Системи автоматизованого комерційного обліку й управління електроспоживанням підприємств на базі сучасних SCADA-систем розроблено в [11]. У реферованих працях доведено, що ефективність процесів електрозбереження у багатьох випадках залежить від удосконалення систем контролю витрат електрики і автоматизації енергоємних технологічних комплексів, методів штучного вирівнювання графіків навантаження [12], а також використання технологій управління збудженням синхронних двигунів з метою зниження плати за перетоки реактивної потужності та сплати за них [13].

Разом з тим, ефективність споживання електрики залежить від багатьох не вирішених питань. Серед них: автоматизація електропостачання, вміння проєктантів розробити системи інтелектуального управління інваріантними до збурень технологічних процесів в періоді обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень. Крім цього, ще недостатньо досліджень проведено стосовно розробки багаторівневих систем управління електроспоживанням харчових комплексів з впровадженням інтелектуальних систем управління реактивними та активними потужностями підприємств у періоді обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розв'язання актуальної наукової задачі автоматизованого управління траєкторією електроспоживання комплексу «підприємство харчової промисловості – промисловий холодильник – підприємство-споживач смарт-продуктів харчування» у періоді обмежень потужності енергосистеми.

Вперше перед проєктантами поставлено завдання: за рахунок розробки системи інтелектуального керування комплексом і прогнозування витрат активної й реактивної потужностей електроприводів холодильних машин з постійним контролем геометрії внутрішньо-камерного завантаження (в період термічного оброблення продуктів (вантажів), що супроводжуються відведенням теплоти від продуктів технологічними процесами охолодження, заморожування, доморожування) досягти зменшення витрат електрики та впливу збурень вхідних характеристик продукції на параметри електроспоживання комплексу.

Сформульована мети конкретизується в таких завданнях:

- дослідити процес електроспоживання харчового комплексу як об'єкта траєкторного управління активною та реактивною потужностями;

- побудувати інтегровану інтелектуальну систему управління електроспоживанням підприємств-холодильників;
- синтезувати управління траєкторією електроспоживання комплексу виробництва смарт-продуктів харчування та їх охолодження або заморожування залежно від ринкового тарифу на електроенергію.

Виклад основного матеріалу

Корпоративні підприємства харчової промисловості Придніпровського регіону (м'ясокомбінати, молокозаводи, рибокомбінат, підприємства з переробки плодоовочевої продукції, промислові холодильники), об'єднані в єдиний комплекс з виробництва смарт-продуктів харчування із загальним навантаженням від 200 до 1000 МВт, відносяться до великих споживачів електрики. Більшість технологічних виробництв електропостачання цих підприємств згідно ПУЕ відносяться до I-II категорій електроприймачів [14].

У цілому електричне господарство (ЕГ) такого комплексу підприємств та траєкторію електроспоживання можна описати залежністю виду:

$$EG = \{P_{\max} \cdot K_{\text{ПОП}} \cdot T \cdot D \cdot P_{\text{сеп}} \cdot A_{\text{П}} \cdot A_{\text{ЕП}}\}, \quad (1)$$

де P_{\max} – півгодинний максимум навантаження підприємства;

$K_{\text{ПОП}}$ – коефіцієнт попиту;

T – річне число годин використання максимального навантаження T_{\max} , год;

D – кількість встановлених електродвигунів (шт.);

$P_{\text{сеп}}$ – активна потужність двигунів, умовних електродвигунів, кВт;

$A_{\text{П}}$ – електроозброєність праці (МВт·год/люд);

$A_{\text{ЕП}}$ – продуктивність праці електротехнічного персоналу (МВт·год/люд).

Оптимізація процесів електропостачання підприємств-холодильників харчової галузі виконується шляхом управління траєкторією електроспоживання комплексу на основі причинно-наслідкової моделі, розробленої авторами статті.

На рис. 1 наведено причинно-наслідкову модель управління електроспоживанням комплексу «група підприємств з виробництва смарт-продуктів харчування – промисловий холодильник (ПРХ) – споживачі», яка відрізняється деталізацією впливів груп чинників на траєкторію електроспоживання комплексу (електричне господарство промислового комплексу, управління електроспоживанням, збурення траєкторії електроспоживання холодильних машин (ХМ), електроспоживання компресорних установок та енергоефективність холодильних камер промислового холодильника).

Необхідність економії електроенергії на підприємствах харчової галузі України на усіх стадіях виробництва замороженої продукції харчування (ЗПХ) також обумовлено зростанням у 2021 році цін на електроенергію.

У той же час, зростання її частки у собівартості продукції енергоємних технологій охолодження та заморожування складає до 20–25 % і тому потребує виконання проектних рішень щодо узгодженого керування електрообладнанням комплексу в періоди обмежень потужності енергосистеми [1, 2, 9].

Особливістю сучасного управління електроспоживанням підприємств харчової галузі є впровадження систем енергоменеджменту і автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ). Усі підприємства харчової галузі та холодильні підприємства підприємств споживачів (супермаркетів) Придніпровського регіону розраховуються за спожиту електроенергію з ПАТ «ДТЕК ДНІПРООБЛЕНЕРГО» України за ринковим тарифом [1, 3]. Перехід на цей тариф стимулює енергоменеджмент підприємств харчової галузі та холодильних підприємств до виокремлення деяких цехів (фабрик) як енергоспоживачів-регуляторів, диференційованих за категоріями та часу їх роботи протягом доби. Наприклад, допоміжні цехи підприємств з виробництва продуктів харчування і холодокомбінатів можуть стати в періоди максимального навантаження енергосистеми споживачами-електрорегуляторами (СЕР), при цьому компресорне господарство стає не лише електрорегулятором, а ще й компенсатором реактивної потужності, що дозволяє знизити вартість електроенергії на 5–10% від лімітних значень.

Іншою особливістю підприємств харчової галузі є те, що в якості електроприводів найбільш енергоємних технологічних процесів виробництва холоду використовуються синхронні двигуни (СД) поршневі компресорів потужністю від 25 кВт до 600 кВт, асинхронні двигуни гвинтових компресорів потужністю від 25 кВт до 600 кВт і двигуни змінного струму насосів конденсаторів, вентиляторів потужністю від 3 до 35 кВт, тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ), конденсаторні батареї тощо.

З метою аналізу і оптимізації електроспоживання на підприємствах харчової галузі структуру електричної мережі представимо у вигляді множини $J = [j], j = 1, 2, \dots, n$ – рівнів ієрархії, до яких відносяться: вхідні фідери на підприємстві; трансформаторні підстанції; силові трансформатори; групи електроприймачів, що розподілені на значній території комплексу (підприємств – виробників смарт-продуктів харчування; підприємств – промислових холодильників; підприємств – споживачів охолоджуваної та замороженої продукції транспортних цехів, холодильних камер). Тобто групи електроприймачів, що задіяні від однієї секції шин та/або групи електроприймачів, задіяні від одного фідера з найбільш енергоємними споживачами (поршневими компресорами з типовими синхронними

електроприводами (СД) потужністю $P_{QM} = 250-500$ кВт і більше; гвинтовими компресорами з асинхронними електроприводами потужністю до 350 кВт; конденсаторами; вентиляторами; насосами тощо).

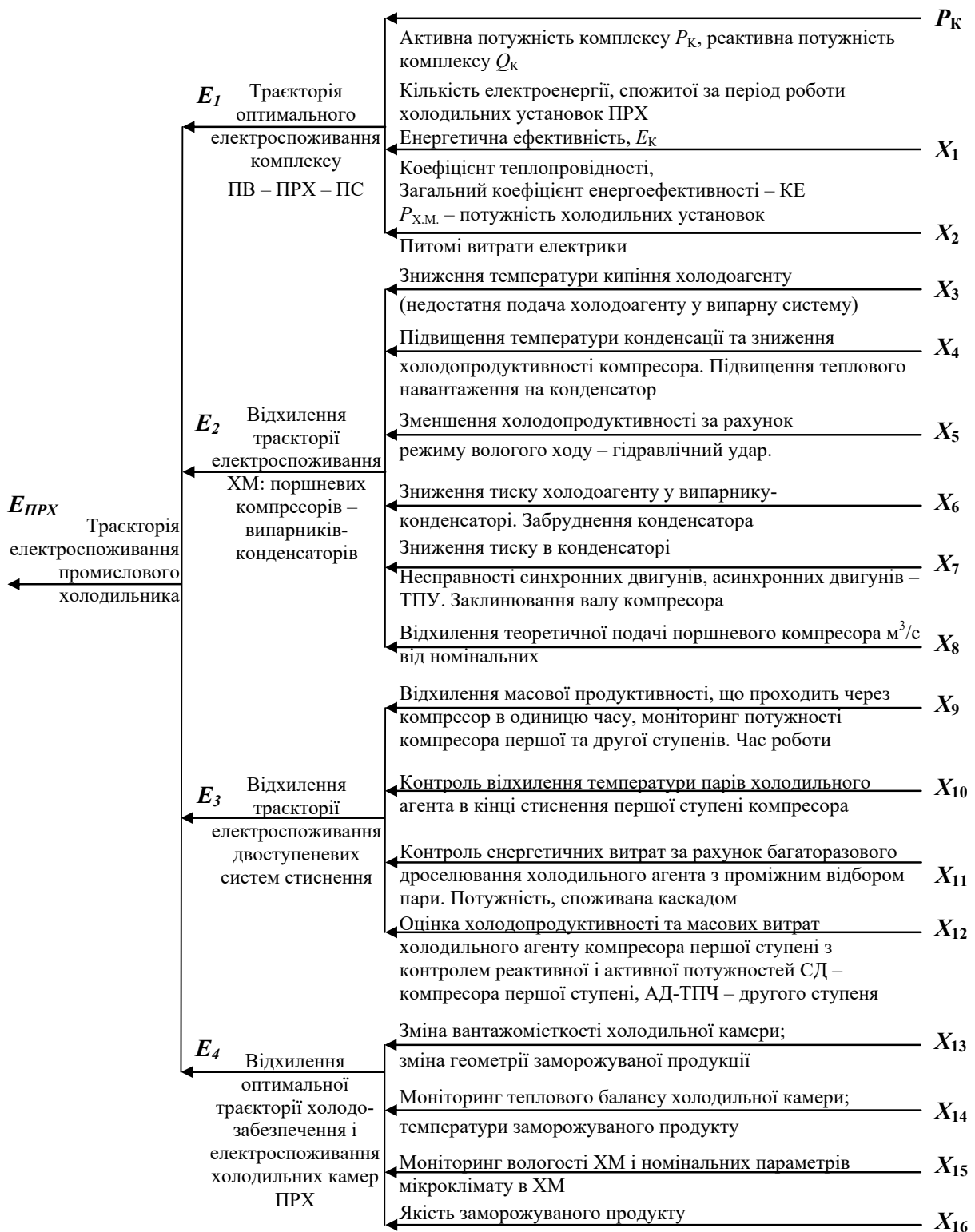


Рис. 1. Причинно-наслідкова модель управління енергоспоживанням підприємства-холодильника

У системах виробництва холоду будемо використовувати холодильні машини з інтелектуальними системами керування потенціалом енергозбереження до 20 % за рахунок автоматизованого контролю продуктивності двоступеневого стиснення (поршневий компресор з СД – перший каскад і гвинтовий компресор з АД-ТПЧ) та одержання температурних режимів заморожування м'ясних продуктів (великої рогатої худоби, ВРХ), птиці, риби, м'ясних напівфабрикатів, фруктів, ягід, молочних продуктів та ін.

Процеси заморожування характеризуються такими робочими характеристиками:

- тривалістю заморожування, параметрами середньої кінцевої температури продукту, кількістю відведеної теплоти, вологовмістом продукту, густиною охолоджуваного продукту, геометрією продукту (формою та розмірами шматка);
- тривалістю холодильного зберігання різних продуктів харчування та підтримування стабільної низької температури в холодильних камерах ПРХ, що допомагає сповільнити зміни у продуктах, які є наслідками фізичних, хімічних та біологічних процесів і призводять до втрати маси, зміни зовнішнього вигляду, хімічного складу, консистенції.
- усиханням продуктів, тобто оцінкою втрати маси через випаровування вологи, що призводить до втрати маси та погіршення якості продуктів;
- рівнем вологи, що випаровується з поверхні продукту і конденсується на поверхні охолоджувальних пристроїв у вигляді снігової шуби (шар снігу створює додатковий термічний опір, що змушує систему інтелектуального керування знижувати температуру та тиск кипіння холодоагенту, тому потрібно в реальному масштабі часу (РМЧ) контролювати витрати електроенергії);
- рівнем окислення продуктів харчування (сала, масла, жирних порід риби та ін.), що призводить до зміни смаку і кольору продуктів.

Експерти з питань заморожування та охолодження продуктів харчування [2–5] вважають, що технологічні чинники, наведені в моделі на рис. 1, визначають енергетичну ефективність X_1 та кількісні параметри електроенергії за період роботи холодильних установок ПРХ, а загальний коефіцієнт енергоефективності, коефіцієнт теплопровідності, потужність компресорних установок тісно корелюють з питомими витратами електрики на одну тону заморожуваної харчової продукції.

Експерти з енергетичного аудиту [6] вважають, що на відхилення траєкторії електроспоживання ХМ ПРХ (поршневих компресорів, гвинтових компресорів, випарників-конденсаторів, насосів, приладів охолодження тощо) впливають як технологічні, так і енергетичні заходи. Поєднання цих двох методів дозволяє знизити енергоємність процесу виробництва холоду.

Наведена методика аналізу електричного господарства ПРХ дозволяє автоматизувати процес управління траєкторією електроспоживання підприємства харчової галузі на єдиній інформаційній платформі SCADA-систем, АСКОЕ, автоматизованих систем управління електроспоживанням (АСУЕ). У свою чергу, траєкторія електроспоживання підприємств в умовах обмежень потужності енергосистеми визначає траєкторію оптимального виробництва продукції за допомогою автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУТП) [16]. Звідси слідує, що інтегровану автоматизовану систему управління підприємства, можливо представити у вигляді трьох взаємозв'язаних рівнів управління.

При цьому нижній рівень утворюють: АСУТП цехів з виробництва м'ясних продуктів, транспортування сировини (туш ВРХ), переробні цехи підприємства, цеха із заморожування м'ясної продукції; АСУЕ технологічних операцій і цехів пов'язаних між собою за допомогою SCADA-систем та автоматизованих систем управління збудниками СД, СЕР та джерелами реактивної потужності (ДРП).

Середній рівень утворюють MES-системи (Manufacturing Execution System) [17], які орієнтовані на інформатизацію задач оперативного планування і управління виробництвом охолодженої або замороженої продукції, оптимізацію виробничих процесів та витрат електроенергії, газу, води, мастильних матеріалів, дизельного палива, контролю та диспетчеризації використання планів і портфеля замовлень супермаркетів і диспетчеризації електропостачання.

Верхній рівень автоматизованого управління підприємством (АСУП) утворюють ERP-системи, які забезпечують рішення стратегічних задач виконання портфеля замовлень виробництва продукції, управління ресурсами, інвестиціями та забезпечують підтримку бізнес-процесів підприємства в цілому [1]. Цей рівень управління підприємством харчового комплексу регіону також зв'язаний з підсистемами інформаційного забезпечення, програмного забезпечення (ПЗ), прийняття стратегічних рішень, ситуаційного управління, Промислового Інтернету-речей (IIoT) та утворює з Центром ситуаційного управління (ЦСУ) підприємств-виробників продуктів харчування підприємства-холодильника цифрову платформу «ІЖА».

На рис. 2 представлена структура інтегрованої інтелектуальної системи, яка забезпечує оптимізацію виробництва портфеля замовлень споживачів (підприємств торгівлі) в періоди обмежень електроенергії за допомогою експертних систем (ЕС) шляхом побудови бази даних (БД), бази знань (БЗ), динамічної бази оперативних технологічних даних, динамічної бази оперативного стану енергосистеми та бази правил (БП).

Особливістю розробленої системи є:

1) інтегрованість ЕС з АСУТП – MES – ERP системами, Ситуаційним Центром (СЦ) комплексу, Промисловим Інтернетом-речей (IIoT), цифровою платформою «ІЖА»;

2) інтегрованість з експертною оцінкою параметрів холодопродуктивності холодильних камер, геометрії їх завантаження, температурних режимів, вологотоків, вологості, якості продукції тощо в реальному масштабі часу;

3) використання холодильних машин, до складу яких входять поршневі компресори великої продуктивності, гвинтові компресори, конденсатори-випарники, системи контролю і регулювання холодопродуктивності та холодопостачання холодильних камер.

Такий підхід забезпечує узгоджену роботу управлінської та інформаційної підсистем АСУ підприємства; діагностику проблемних ситуацій та оцінку технологічно-енергетичних ситуацій; прийняття рішень щодо параметрів P_i, Q_i ; пошук оптимальних рішень щодо визначення СЕР і ДРП.

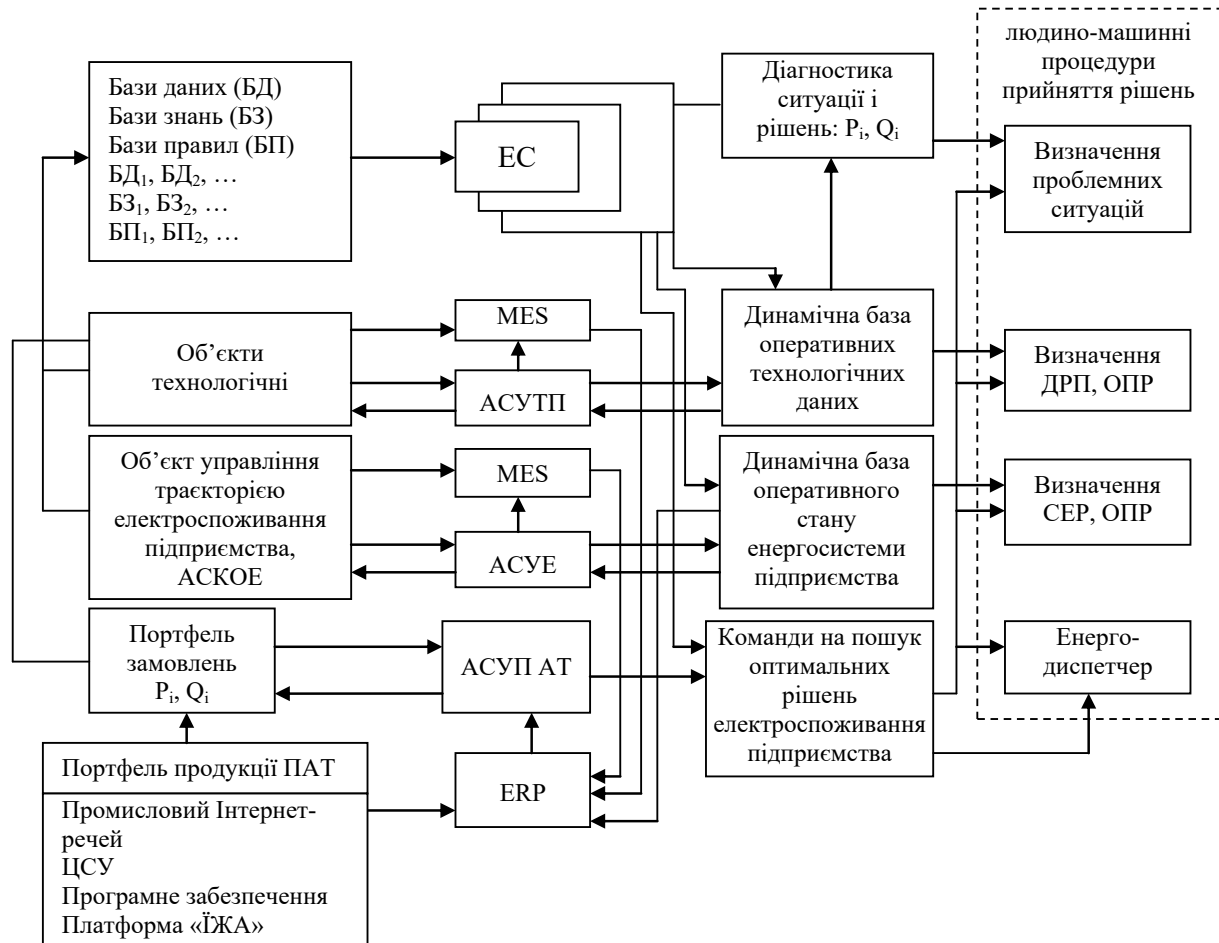


Рис. 2. Структура інтегрованої інтелектуальної системи управління електроспоживанням підприємств харчового комплексу

Нижній рівень (АСУТП, АСУЕ) є найбільш інтенсивним за об'ємом інформації. Він також є обмеженим у часі щодо реакції на збурення, як в енергетичній системі так і в технологічній системі виробництва продукції.

В АСУТП-, АСУЕ-, SCADA-системах накопичується і обробляється велика кількість технологічних, енергетичних параметрів та створюється інформативна база вихідних даних для MES-систем та цифрової платформи «ІЖА»

Накопичена в SCADA-системах інформація, у свою чергу, утворює базу даних (БД) для прогнозування як технологічних параметрів виробництва продукції, так і прогнозування параметрів P_i, Q_i . Для прогнозування P_i, Q_i в темпі з процесом у роботі використані штучні нейронні мережі моделі (ШНМ) [18].

На рисунку 3 наведені навчання ШНМ: а) для прогнозування реактивної потужності підприємства Q_{Ep} ; б) для прогнозування активної потужності P_{Ep} .

ШНМ, рис. 3, а), складається із трьох шарів мережі на вхід якої надходять Q_i, \dots, Q_k – сигнали. На виході системи одержуємо $Q_{Ep}(t+\tau^*)$ – вихідні сигнали мережі з ваговими коефіцієнтами w_{ij1}, w_{ij2} .

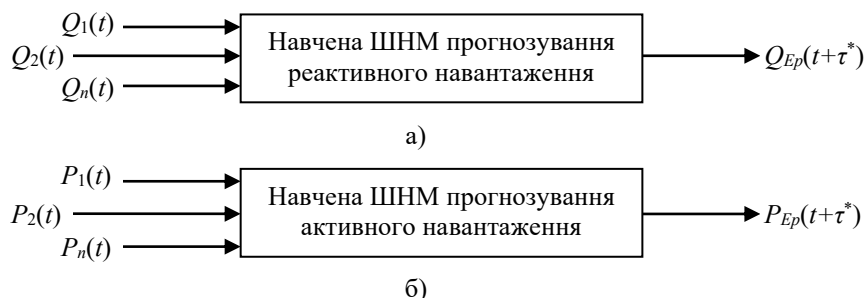


Рис. 3. Навчені ШНМ для прогнозування: а) реактивної потужності Q_{Ep} ; б) активної потужності P_{Ep}

Конфігурація мережі для прогнозування реактивного навантаження представляє структуру, у вхідному шарі якої знаходиться 4, в середньому 3, а у вихідному – 1 нейрон (ШНМ зі структурою 4-3-1). Навчання мережі проведене за допомогою комбінованого методу, послідовність навчання складає 150 вибірок, час навчання 10 с при числі ітерації (кроків) навчання 450-500.

Час навчання ШНМ, рис. 4, б), для прогнозування активних навантажень РЕР підприємства при навчанні мережі за алгоритмом зворотного розповсюдження помилки складає 5 с при 50-250 ітераціях навчання, а за комбінованим алгоритмом – 12-16 с при 1000 ітераціях навчання мережі. Після виконання прогнозу модель видає рекомендації щодо вибору числа ДРП на вводах електричної енергії та керує збудниками СД поршневих компресорів, СД насосів холодопостачання, СД – екстаустерів фабрики з виробництва ковбас, заморожуваних продуктів і т. п.

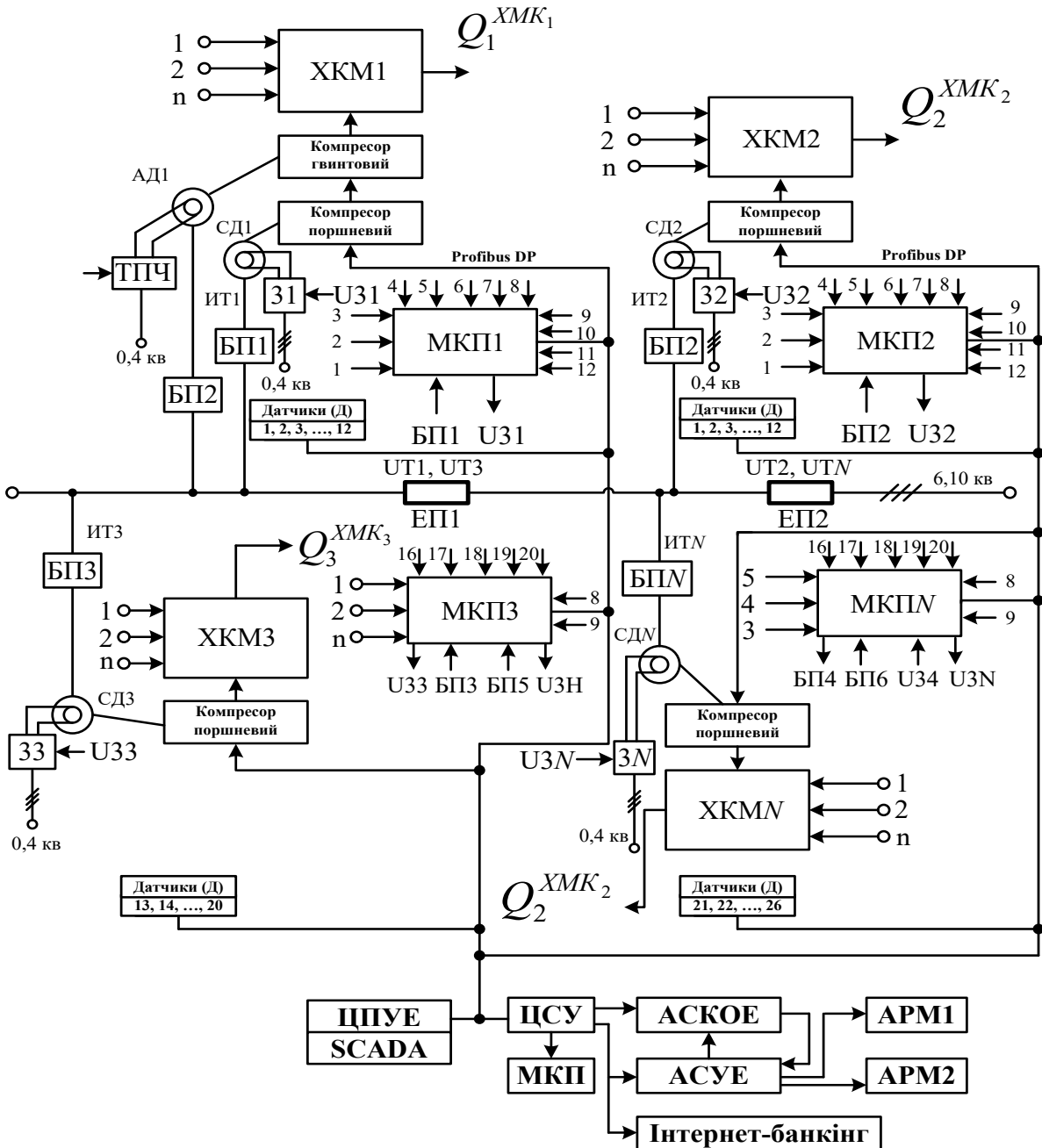


Рис. 4. Автоматизована система управління електроспоживанням промислового холодильника: ЦПУЕ – центральний нейропроцесор управління електроспоживанням ПРХ; ЦСУ – центр ситуаційного управління; МКП – монітор корпоративної продуктивності; АСКОЕ – автоматизована система контролю й обліку електроенергії; АСУЕ – автоматизована система управління електроспоживання промислового холодильника; ХМК1, ХМК2, ХМК3, ..., ХМК_N – холодильні камери 1, 2, ..., N промислового холодильника; МКП – мікроконтролер; АД1 – асинхронний двигун з ТПЧ (тиристорним перетворювачем частоти); СД1, СД2, СД_N – синхронні двигуни; УТ1, УТ2, УТ_N – напруга електроприймачів синхронних двигунів поршневих компресорів та асинхронних двигунів гвинтових компресорів; U31, U32, U3_N – напруга збудників СД; ЕП1, ЕП2 – електроприймачі холодильних установок; БП1, БП2, ..., БП_N – блоки-електроприймачі електроприводів компресорних установок; $Q_1^{XMK_1}$, $Q_2^{XMK_2}$, $Q_3^{XMK_3}$, $Q_N^{XMK_N}$ – вантажомісткість холодильних камер

Розглянемо більш детально управління траєкторією електроспоживання ПРХ в залежності від технологічних режимів роботи холодильних камер.

На рисунку 4 наведено схему автоматизованої системи управління електроспоживанням холодильних машин N холодильних камер промислового холодильника підприємства. Система електроспоживання кожної з N компресорних станцій ПРХ адаптована до нестационарних технологічних режимів роботи обладнання і характеризується інваріантністю до типу продуктів, що надходять на заморожування [3]. Траєкторії електроспоживання холодильного підприємства (холодильного комбінату) в момент T_i відповідає своя траєкторія виробництва холоду з робочими параметрами і технологічними параметрами, які визначають геометрію внутрішньо-камерного завантаження продуктами харчування першої, другої, третьої і т. д. холодильних камер, відповідно $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4 \dots$, та холодопродуктивності холодильних машин.

Температурні параметри холодильних камер характеризуються також технологічними параметрами, які визначають енергоефективність процесу заморожування. Серед них масова холодопродуктивність, кДж/кг холодильних машин $Q_{1c}(XKM1), Q_{1c}(XKM2), Q_{2c}(XKM3), Q_{3c}(XKM4)$ та, відповідно, продуктивність холодильників (т/год) – першої, другої і третьої холодильних камер; витрати вологи, що надходить до холодильних камер $W_B(XKM1), W_B(XKM2)$, та інші технологічні параметри, що контролюються датчиками $D1, D2, \dots, D20$.

Роботу холодильного комплексу оцінюють за вихідними показниками: наприклад, $Q_{Фм'яс}$ – фактична продуктивність підприємства за видами заморожуваної м'ясної продукції; $Q_{Фриб}$ – фактична продуктивність промислового холодильника з виробництва заморожуваних рибних продуктів харчування, і т. д. по кожній із N камер промислового холодильника і набором параметрів холодопродуктивності та якості продукції ($\alpha_{якВ}$) тощо.

При цьому вартість активної потужності залежить від ринкових чинників та визначається ринковим тарифом. Вартість реактивної потужності залежить від характеру навантаження електроприводів підприємств харчової продукції – холодильного комплексу та оснащення його засобами компенсації реактивного навантаження. У той же час, в якості компенсаторів реактивної потужності в системі електроспоживання електрики промисловим комплексом «підприємства-виробники – промисловий холодильний – підприємства-споживачі» використано СД компресорних установок.

У цьому випадку важливими питаннями узгодженого управління траєкторією електроспоживання будуть:

- розробка способу керування збудженням синхронних двигунів електроприводу поршневих компресорів $XKM1, XKM2, XKM3, XKM4$ і т. д. з метою зниження плати за перетоки реактивної потужності [13];
- розробка алгоритму енергетичної ефективності компенсації реактивної енергії за допомогою синхронних двигунів поршневих компресорів;
- розробка методів корегування адаптивних регуляторів збудників синхронних двигунів поршневих компресорів.

Перейдемо до обговорення результатів інтелектуального управління енергоспоживанням харчового комплексу регіону з промисловим холодильником.

Вплив коливання якісних властивостей характеристик заморожуваної продукції на активну потужність електроприводу компресорів конденсаторів-випарників досліджено у [8]. Такий підхід дозволяє опосередковано оцінити витрати електроенергії на виробництво запланованих технологічних параметрів: $Q_{Фм'яс}, Q_{Фриб}, \beta, \alpha$. При зміні характеристик м'ясних продуктів змінюються і параметри питомих витрат електрики на нормовані параметри холодопродуктивності [3].

Тоді розрахункові витрати електрики будемо оцінювати по формулі:

$$W_K = Q_{\text{конц}}^{\Phi} * K_{c,p} * (\beta_{-0,056}^K - \beta_{-0,056}^{c.p.}) * e_{\text{пнт}}^{\Phi}, \quad (2)$$

де $K_{c,p}$ – коефіцієнт, що відображає залежність температурних режимів тіла замороженого продукту від холодопродуктивності, що надходить на заморожування0;

$(\beta_{\text{темн1}}^K - \beta_{\text{темн2}}^{c.p.}) = \Delta_{\text{темн}}$ – приріст температури в тілі продукту в процесах охолодження, заморожування і доморожування;

$e_{\text{пнт}}^{\Phi}$ – питомі витрати електрики на виробництво одної тонни замороженого продукту харчування із заданими параметрами якості $\beta_{як}, \alpha_{як}$ і вологи $B_{зод} < 10\%$.

Якщо енергосистема встановила підприємству ліміт електрики в періоди обмежень потужності, тоді

$$\max \left[\sum_{j=1}^n \int_0^{t+30} P(t) dt \right] \leq \sum_{i=1}^n P_{\text{лім}} = K_{\text{поп}} \cdot P_{\text{ном}}$$

$$\max \left[\sum_{i=1}^n \int_0^{t+30} P(t) dt \right] \leq \sum_{i=1}^n P_{\text{лім}} = K_{\text{поп}} \cdot P_{\text{ном}}, \quad (3)$$

де $P(t)$ – активна максимальна потужність підприємства в періоді обмеження потужності енергосистеми;

$P_{\text{ЛЛМ}}$ – розрахункова лімітна потужність;

$P_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність;

N – кількість технологічних холодильних камер ПРХ;

$t_0 < t \leq t_{t-30}$.

Розрахована реактивна та повна потужності дорівнюють:

$$Q_p = P_{\text{ЛЛМ}} \cdot \tan \varphi, \quad S_p = \sqrt{P_{\text{ЛЛМ}}^2 + Q_p^2}. \quad (4)$$

Значенням E_k , $P(t)$, $P_{\text{ЛЛМ}}$, Q_p , S_p в кожний з періодів прогнозування t_1 , t_2 , t_3 будуть відповідати експертні значення холодопродуктивності $Q^{\Phi}_{\text{холод}1}$, $Q^{\Phi}_{\text{холод}2}$ і поточні значення параметрів φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 , $Q_{1c}^{\text{хкм}1}$, $Q_{1c}^{\text{хкм}2}$, $Q_{2c}^{\text{хкм}3}$, $Q_{3c}^{\text{хкм}4}$, $W_{\text{ex}}^{\text{хкм}1}$, $W_{\text{ex}}^{\text{хкм}2}$.

Перераховані вище параметри будемо вважати нечіткими множинами, для оцінки яких як і раніше, використаємо штучні нейронні мережі (ШНМ) [17], по інформації датчиків Д1, Д2, ..., Д20. У автоматизованій системі управління електроспоживанням (АСУЕ) нейронні мережі можуть бути використаними також в задачах оброблення інформації, ідентифікації нелінійних систем, прогнозування, фільтрації, адаптованого управління, розпізнавання образів та діагностики.

В АСУЕ виконується автоматизований контроль параметрів витрат електрики по кожній із N технологічних холодильних камер. За допомогою системи АСКОЕ побудовано прогноуюча нейромережева модель і управлінська нейромережева модель: P_i – активної потужності; Q_i – реактивної потужності; U_i – напруги.

Отже, в АСУЕ виконується моніторинг траєкторії електроспоживання ПРХ T_E^{Φ} по кожній із N технологічних холодильних камер:

$$\bar{T}_E^{\Phi} = \left\{ \bar{T}_{E1}^1, \bar{T}_{E2}^2, \bar{T}_{E3}^3, \dots, \bar{T}_{EN}^N \right\}, \quad (5)$$

якій буде відповідати траєкторія $\bar{T}_{\beta}^{\Phi} = \left\{ \bar{T}_{\beta K1}^1, \bar{T}_{\beta K2}^2, \bar{T}_{\beta K3}^3, \dots, \bar{T}_{\beta KN}^N \right\}$ виробництва заданої якості продукції

заморожування. У випадку аварій в системі енергопостачання або зменшення ліміту $P_{\text{ЛЛМ}}$, та віялових відключень $\bar{T}_{\Delta Q}^{\Phi} = \left\{ \bar{T}_{\Delta Q1}^1, \bar{T}_{\Delta Q2}^2, \bar{T}_{\Delta Q3}^3, \dots, \bar{T}_{\Delta QN}^N \right\}$ траєкторії виробництва продукції заморожування будуть

відповідати ситуації невиконання портфеля замовлень підприємств України та країн ЄС.

Вище наведеним технологічним траєкторіям будуть відповідати технологічні, фінансові, економічні ризики [27, 36, 40]. Які обумовлені змінами характеристик заморожуваної продукції, що надходить на споживання, станом технологічного обладнання та електрообладнання і відповідно електропостачанням ПРХ.

Таким чином, нормальній ситуації $\left\{ \bar{S}_E^H \right\}$ буде відповідати своя траєкторія електроспоживання $\left\{ \bar{T}_E^{\Phi} \right\}$, траєкторія

виробництва заданої якості продукції заморожування $\left\{ \bar{T}_{\beta}^{\Phi} \right\}$, траєкторія мінімізації втрати продукції $\left\{ \bar{T}_{\Delta Q}^{\Phi} \right\}$ і

мінімальні ризики не виконання планових показників щодо зниження прибутку $\bar{P}_{\Phi}^H \rightarrow \bar{P}_{\Phi}^H \text{ зад.зн.}$

У випадку проблемних, аномальних, аварійних і після аварійних ситуацій в енергосистемі АСУЕ діє таким чином. Видає рекомендації оперативному персоналу (АРМ начальнику зміни ПРХ, АРМ енергодиспетчера ПРХ). приймає рішення виведення електроспоживання на траєкторію $\left\{ \bar{T}_E^{\Phi} \right\}$. Оптимізує

параметри: $P_1(t)$, $P_2(t)$, ..., $Q_{1P}(t)$, $Q_{2P}(t)$, $Q_{3P}(t)$, ..., $Q_{1BX}(t)$, $Q_{2BX}(t)$, ..., $Q^{\Phi}_{1\text{м'ясо}}$, $Q^{\Phi}_{2\text{риба}}$ по інформації датчиків як електричних так і технологічних змінних. Крім цього ряд параметрів, що визначають, наприклад чинники холодопостачання і характеристики термічної обробки продуктів, параметри геометрії внутрішньо камерного завантаження холодильних камер φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 , ..., φ_N параметри заморожування та якості продукції будемо оцінювати за допомогою штучної п'ятишарової нейронної мережі, яка навчається за допомогою процедури зворотного розповсюдження [15].

Для прогнозування реактивного навантаження $Q_P(t)$ ПРХ у роботі використана трьохшарова ШНМ. У вхідному шарі знаходяться 4 нейрони, в середньому 3, а у вихідному 1 нейрон, тобто зі структурою 4-3-1. Для прогнозування активних навантажень $P_1(t)$, $P_2(t)$, ... в роботі використана архітектура 5-3-1 нейромережі ШНМ за допомогою алгоритму зворотного розповсюдження [17].

Виключення технологічного перевищення активної потужності підприємством $P_{\text{ном}}(t)$ в період $T_{\text{обм}}$ досягнуто контролем значення цієї потужності системою АСКОЕ через фіксовані проміжки часу t_1 , t_2 , t_3 і т. д.

Для забезпечення економічно вигідних режимів функціонування виробництва технологічних процесів заморожування(охолодження) енергосистема встановлює обмеження на рівень реактивної потужності споживачів електроенергії: максимальне і мінімальне значення реактивної потужності. Ці обмеження звичайно диференціюються в часі доби (є функціями поточного часу). Напруга на затискачах електроприймачів СД КМ UT1, UT2, UT3, UT4 при цьому не повинна виходити за допустимі межі:

максимальне і мінімальне значення, які встановлені нормативними документами (коливання напруги на електроприймачах допустимо в межах $\pm 5\%$ або від -5% до $+10\%$ від номінальної напруги) [14].

Підтримання напруги в межах установлених норм дозволяє мінімізувати втрати активної потужності в асинхронних двигунах (АД) конденсаторів, випарників і насосних агрегатів холодопостачання, тобто зменшити додаткове споживання ними реактивної потужності. Це значення суттєво, так як при підвищенні напруги на 1% реактивна потужність, яку споживає АД, збільшується на 3% [14].

Такий підхід дозволяє підвищити ефективність керування багатоступеневими компресорними холодильними машинами щодо заморожування та доморожування м'ясних продуктів харчування шляхом вибору раціональних параметрів термічного оброблення, та відповідно використати СД поршневих компресорів для генерування реактивної потужності $Q_{2P}(t)$, $Q_{3P}(t)$. Ці функції в АСУЕ виконують мікропроцесори МКП 1, 2, 3, ..., N, інформація з яких надходить до центрального нейропроцесора управління електроспоживанням (ЦПУЕ) і відповідно систем АСКОЕ і АСУЕ, АРМ.

У проектних рішеннях (рис. 4) це інтелектуальна система управління, в якій інформація з датчиків Д1-Дп стадії завантаження холодильних камер ХКМ1, ХКМ2, з датчиків технологічних параметрів поршневих та гвинтових компресорів ХМ і холодопродуктивності $D_{13}^2 - D_{20}^2$, заморожування рибопродуктів ХКМ3, з датчиків $D_{21}^3 - D_{26}^3$ холодильних камер для зберігання ягід і фруктів ХКМ15,.. ХКМ N з електроприладів (АД) технологічних апаратів, виконуючих механізмів через шину Р надходить в підсистему інформаційного забезпечення ЦСУ. Вони утворюють нижній рівень управління технологічним процесом і електроспоживанням поршневих і гвинтових компресорних установок (рівень управління контролерів).

Верхній рівень управління електроспоживанням ПРХ з ЦПУЕ і МКП моніторингу технології виробництва холоду та контролю енергетичної ефективності та холодопродуктивності з АСКОЕ і АСУЕ утворює рівень диспетчерського керування (АРМ1 – начальника зміни і АРМ2 – енергодиспетчера).

Основою диспетчерського керування є монітор корпоративної продуктивності (МКП), на якому виконується візуалізація не лише елементів системи електроспоживання ПРХ, технологічного процесу холодозабезпечення, але і їх взаємозв'язки та комунікації у динаміці. Все це створює умовну картину (схеми) енергетичного і технологічного процесу ПРХ. Крім цього АСУЕ ПРХ через інформаційні канали зв'язку MES і ERP утворюють інтелектуальну систему управління електроспоживанням підприємства (рис. 2). У таких інтелектуальних системах керування збудрення від впливу характеристик харчових продуктів на параметри витрат електрики будемо також оцінювати за допомогою нейромереж [11, 12].

Нейропроцесор ЦПУЕ виконує розпізнавання параметрів геометрії завантаження холодильних камер $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, і т. д. оцінює $\bar{U}_{T1}, \bar{U}_{T2}, \bar{U}_{T3}, \bar{U}_{T4}$ та визначає екстремум функції ЕК (економічного критерію) вигоди від генерування реактивної потужності синхронними двигунами електроприводів поршневих компресорів ПРХ.

$$EK = EP_Q - EPP_m = C_Q - C_{P_m} = f(\alpha_{opt}), \quad (6)$$

де EP_Q – економічний показник виробництва (споживання) реактивної потужності;
 EPP_m – економічний показник витрат активної потужності;
 C_Q – величина (ціна) сплати за генеровану потужність за час t ;
 C_{P_m} – величина сплати за витрачену на це активну потужність.

Чинник ЕК функціонально залежить від α_{opt} – оптимального куту завантаження синхронного двигуна поршневого компресора по реактивній потужності. Йому відповідає оптимальний режим сплати за спожиту активну потужність, що витрачається на генерацію реактивної потужності на затискачах синхронних двигунів ХКМ1, ХКМ2, ХКМ3, ХКМ4, ХКМ5 (м'ясо ВРХ).

Тобто умовою отримання такого режиму буде прогнозування ЦПУЕ за технологічними параметрами стану електроспоживання кожною холодильною камерою ПРХ $P_1, P_2, P_3, P_4, Q_{P1}, Q_{P2}, Q_{P3}, Q_{P4}$ при $\bar{U}_{T1}, \bar{U}_{T2}, \dots, \bar{U}_{T4} = const$ і $e^{\Phi_{пит}} \rightarrow e^{\Phi_{пит\ зод}}$. За допомогою навчених НМ ЦПУЕ по параметрах:

$$\begin{aligned} \{\varphi_1, Q_{1C}^{KM1}(t), \text{ЦН1}\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД1} \\ \{\varphi_2, Q_{1C}^{KM2}(t), \text{ЦН2}\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД2} \\ \{\varphi_3, Q_{3C}^{KM3}(t), \beta^2\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД3} \\ \{\varphi_3, Q_{4C}^{KM4}(t), \beta^3\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД4, і т. д.} \end{aligned}$$

Оптимальні уставки збудників СД поршневих компресорів визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{31}[n+1] &= \bar{U}_{31}[n] + K1(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{BO}) e^{-\frac{t}{T_{B1}}} \\ \bar{U}_{32}[n+1] &= \bar{U}_{32}[n] + K2(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{BO}) e^{-\frac{t}{T_{B2}}} \\ \bar{U}_{33}[n+1] &= \bar{U}_{33}[n] + K3(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{BO}) e^{-\frac{t}{T_{B3}}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{U}_{34}[n+1] = \bar{U}_{34}[n] + K4(\bar{U}_{B\max} - \bar{U}_{Bo})e^{-\frac{t}{\tau_{B4}}}, \text{ і т. д.}$$

де $\bar{U}_{B\max}$ – максимальна напруга, яка підведена до обмотки збудника;

$\bar{U}_{31}, \bar{U}_{32}, \dots$ – напруга збудника у номінальному режимі;

$\tau_{B1}, \tau_{B2}, \tau_{B3}, \tau_{B4}$ – постійні часу збудників СД поршневих компресорів;

$K1, K2, K3, K4$ – коефіцієнти, які залежать від ступеню заповнення холодильних камер $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$.

Адаптивні системи управління збудниками синхронних двигунів поршневих компресорів побудовані за допомогою алгоритмів оптимального безпошкового керування [18]. Якщо підприємства комплексу працюють з споживачами-регуляторами використовуючи диференційований тариф, то ЦПУЕ, одержуючи прогнози значення $P_1(t), P_2(t), P_3(t), \dots, P_N(t)$, оцінює траєкторію електропостачання ПРХ в моменти часу доби «ніч», У випадку відхилення $P_{\text{ФАКТ}}$ від $P_{\text{ЛІМ}}$ ЦПУЕ відпрацьовує підпрограму «збитки». Для цього в пам'ять ЦПУЕ внесена таблиця пріоритетів електроспоживачів ПРХ, диференційованих за категоріями «збитки», щодо виробництва найбільш низькотемпературних заморожуваних м'ясних продуктів $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$.

При цьому ЦСУ відпрацьовує наступне правило: якщо $P_{\text{ФАКТ}} \gg P_{\text{ЛІМ}}$, а $\beta_{\text{е м'ясо}} \rightarrow \beta_{\text{е зад}}$, $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$ і $T^{\Phi}_{\Delta Q \text{ м'ясо}}$ відповідає заданому значенню, то необхідно відключити АД гвинтових компресорів другої ступені холодильних машин системи холодопостачання на період $t_{\text{ЛІМ}}$ від мережі та включити дизель-генератори для компенсації холодопродуктивності з метою стабілізації параметрів холодозабезпечення ХКМ1, ХКМ2 і т. д.

У цій ситуації одночасно енергопотужність ПРХ буде зменшено на 10 %. По команді АСУЕ-АСУ технологічні апарати холодильних машин будуть відпрацьовувати траєкторію виробництва холоду, забезпечуючи виконання планових показників виробництва продукції.

Для періоду «перевищення ліміту» розроблено наступне правило: якщо $P_{\text{ФАКТ}} \gg P_{\text{ЛІМ}}$, а $\beta_{\text{м'ясо}} \rightarrow \beta_{\text{зад}}$, $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$ і $T^{\Phi}_{\Delta Q \text{ м'ясо}}$ відповідає заданому значенню, то необхідно відключити лише тих споживачів-регуляторів, які не пов'язані з виробництвом продуктів харчування. У цьому випадку одночасно енергопотужність комплексу буде зменшена на 20 %. По команді АСУЕ-АСУ ПРХ технологічні холодильні апарати першої, другої, третьої та інших холодильних камер м'ясної групи продукції для періоду обмежень потужності енергосистеми відпрацьовують за допомогою інтелектуальних технологій алгоритм мінімізації втрати якості замороженої (охолодженої) продукції, використовуючи технології накопичення криогенної енергії в спеціальних холодильних резервуарах [19].

Для періоду «ніч» розроблено наступне правило: якщо $P_{\text{ФАКТ}} = P_{\text{ЛІМ-НІЧ}}$, а $\beta_{\text{м'ясо-НІЧ}} \rightarrow \beta_{\text{зад}}$, $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$ і $T^{\Phi}_{\Delta Q \text{ м'ясо-НІЧ}}$ відповідає заданому значенню, то необхідно максимізувати виробництво криогенного холоду, шляхом постійного моніторингу чинників $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$ та $\alpha_{\text{як}}$ вихідного продукту.

У цьому випадку АСКОЕ-АСУЕ відпрацьовують задані значення траєкторії електроспоживання ПРХ $T^{\Phi}_{\text{Е}}$, максимізуючи чинники $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$ і максимізуючи $\alpha_{\text{якmax}}$ і відповідно $e^{\Phi}_{\text{ПІТ зад}} \rightarrow e^{\Phi}_{\text{ПІТ min}}$, а отже $\alpha_{\text{ОПТ СД1}}, \alpha_{\text{ОПТ СД2}}, \alpha_{\text{ОПТ СД3}}, \alpha_{\text{ОПТ СД4}}$ та відповідно мінімальні витрати електрики Wk .

Завдання ЕС АСУЕ – організувати своєчасне та повне використання обладнання, поточної інформації з метою визначення стану електроспоживання підприємства й надання необхідної інформації персоналу (ОПР) для прийняття рішення щодо виробництва продуктів харчування – ПРХ.

Отже, підвищення ефективності управління режимами електроспоживання підприємств харчової промисловості може бути досягнуто за рахунок узгодженого автоматизованого управління технологічними процесами охолодження та заморожування м'ясної продукції, птиці, риби, молочних продуктів, фруктів та іншої харчової продукції та використанням АСУЕ для управління процесами електроспоживання шляхом побудови ЕС та людино-машинних систем прийняття рішень.

Розроблені системи дозволяють забезпечити вимоги енергогенеруючих компаній щодо активних і реактивних навантажень, знизити витрати у електромережах та підтримувати напругу у вузлах електроприймачів в межах встановлених норм.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На основі моделі причинно-наслідкових зв'язків траєкторії електроспоживання холодильного комплексу з групою чинників, що визначають його енергоефективність, продуктивність, якість замороженої продукції та прибутковість розроблено:

- концепцію управління виробництвом продукції харчування в умовах обмеження потужності енергосистеми за рахунок оптимального керування холодопостачанням холодильних камер;
- виокремлено такі енергоспоживачі, як регулятори, компенсатори реактивної потужності для штучного вирівнювання графіків електронавантаження системи підприємства та визначено найбільш енергоємних споживачів електрики.

Побудовано багатокритеріальну систему управління електроспоживанням холодильного комплексу, в якій оптимізацію виробництва продукції портфеля замовлень споживачів в періоди обмежень електроенергії виконують: інтелектуальні системи управління електроспоживанням; автоматизовані системи управління технологічним процесом; експертні системи для розпізнавання та класифікації ситуацій за допомогою штучних нейромережових систем.

Розроблено конфігурацію мережі для прогнозування активного та реактивного навантаження енергосистеми підприємства.

Визначено структуру штучних нейронних мереж, методи їх навчання та сфери їх використання в системі узгодженого ситуаційного управління траєкторіями виробництва продукції харчування і електроспоживання холодильного комплексу.

Визначено виробничі ситуації щодо вибору раціональних режимів роботи холодильних камер ПРХ в періоди обмеження потужності енергосистеми та розпізнавання ступеня їх завантаження.

Досліджено модель залежності економічного критерію від показників: виробництва (споживання) реактивної потужності; витрат активної потужності; потоків грошей за генеровану потужність та витрачену на це активну потужність.

Визначено оптимальні кути завантаження синхронного двигуна поршневих компресорів за реактивною потужністю.

Розроблено модель оптимальних уставок збудників синхронних двигунів поршневих компресорів.

Наведено продукційні правила для відпрацювання експертною системою виконання планових показників виробництва продукції в періоди обмежень потужності енергосистеми.

Таким чином, розроблено інтелектуальну систему узгодженого управління електроспоживанням холодильного комплексу групи підприємств виробників та підприємств споживачів харчової продукції в періоди обмежень енергосистеми потужностей за активним і реактивним навантаженням. Вона дозволяє зменшити втрати виробництва продуктів харчування в періоди обмежень потужності енергосистеми та максимізувати продуктивність комплексу в період «ніч», виконавши, «точно у термін» замовлення супермаркетів та підприємств-споживачів продуктів харчування, а також виконати портфель замовлень переробних заводів України та країн ЄС.

Література

1. Хорольський В. П. Теорія та практика інноваційно-інтелектуального розвитку регіону з техногенними територіями : монографія / В. П. Хорольський, К. Д. Хорольський, К. Г. Рябикіна ; за заг. ред. В.П. Хорольського, О.Б. Чернеги. – Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2019. – 484 с.
2. Хмельнюк М. Г. Енергетичний менеджмент і аудит / М. Г. Хмельнюк, О. Ю. Яковлева, О. В. Остапенко. – Херсон : ФОП Грін Д. С., 2017. – 224 с.
3. Хмельнюк М. Г. Холодильні установки та сфери їх використання : підручник / М. Г. Хмельнюк, О. С. Подмазко, І. О. Подмазко. – Херсон : ФОП Грін Д. С., 2014. – 484 с.
4. Хорольський В.П. Теоретичні основи багаторівневого автоматизованого керування холодозабезпеченням промислових холодильників / В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець, В.А. Гончаренко, Д.В. Яровий, І.В. Расчехмаров // Обладнання та технології харчових виробництв. – Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. Вип. 2 (43). – С. 122–130.
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605 р.
6. Правила роздрібного ринку електричної енергії : затверджені постановою НКРЕКП від 14 березня 2018 р. № 312.
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. Холодильні установки : підручник / І. Г. Чумак, В. П. Чепурненко, С. Ю. Лар'яновський та ін.; За ред. І. Г. Чумака. – Одеса : Рефпринтінфо, 2006. – 550 с.
9. Курылев Е. С. Холодильные установки / Е. С. Курылев, В. В. Оносовский, Ю. Д. Румянцев. – СПб : Политехника, 2002. – 576 с.
10. Чернявський А. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств. Консультування підприємств щодо енергоефективності / Чернявський А. – Київ, 2020. – 148 с.
11. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення : навч. посібник / Г. Г. Півняк, С. І. Випанасенко, О. І. Хованська та ін. – Д. : Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.
12. Соловей О. І. Основи енергоефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посібник / О. І. Соловей, В. П. Ройзен, П. Г. Плешков. – Черкаси : видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
13. Григорьев И. В. Локальные задачи измерений и вычислений при использовании SCADA – OASyS / И. В. Григорьев, И. А. Шишков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2001. – № 8. – С. 37–41.
14. Ханаев В. В. Потребители – регуляторы: возможности и перспективы применения / В. В. Ханаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 1. – С. 59–64.
15. ПУЕ (Правила Улаштування Електроустановок) : затверджені Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. Київ, 2017.
16. Леньшин В. Н. Производственные исполнительные системы (MES) – путь к эффективному предприятию / Леньшин В. Н., Куминов В. В., Фролов Е. Б., Будник Р. А. // САПР и графика. – 2003. – № 26. – С. 42–43.
17. Kharlamov A. A. Attention mechanism usage to form framework structures on a semantic net. Neurocomputers and Attention. Manchester; New York: Manchester University Press. 1991. Vol. 11. P. 747–756.

18. Шубладзе А. М. Синтез оптимальных линейных регуляторов / А. М. Шубладзе // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12. – С. 22–23.
19. Литвинова Е. В. Сравнительная оценка способов замораживания мясного сырья с различным характером автолиза / Литвинова Е. В., Артамонова М. П., Бухтеева Ю. М. // Health, Food & Biotechnology. – 2020. – № 2. Том 2. – С. 103–115.

References

1. Khorolskyi V. P. Teoriia ta praktyka innovatsiino-intelektualnoho rozvytku rehionu z tekhnohennymy terytoriiamy : monohrafiia / V. P. Khorolskyi, K. D. Khorolskyi, K. H. Riabykyna ; za zah. red. V.P. Khorolskoho, O.B. Chernehy. – Kryvyi Rih : Vydavets FO-P Cherniavskiy D. O., 2019. – 484 s.
2. Khmelniuk M. H. Enerhetychnyi menedzhment i audyt / M. H. Khmelniuk, O. Yu. Yakovleva, O. V. Ostapenko. – Kherson : FOP Hrin D. S., 2017. – 224 s.
3. Khmelniuk M. H. Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia : Pidruchnyk / M. H. Khmelniuk, O. S. Podmazko, I. O. Podmazko. – Kherson : FOP Hrin D. S., 2014. – 484 s.
4. Khorolskyi V.P. Teoretychni osnovy bahatorivnevoho avtomatyzovanoho keruvannia kholodozabezpechenniam promyslovykh kholodylnykyv / V.P. Khorolskyi, Yu.M. Korenets, V.A. Honcharenko, D.V. Yarovi, I.V. Raschekhmarov // Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv. – Kryvyi Rih : DonNUET, 2021. Vyp. 2 (43). – S. 122–130.
5. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist» : skhvalena rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18 serpnia 2017 r. № 605 r.
6. Pravyla rozdrubnoho rynku elektrychnoi enerhii : zatverdzeni postanovoiu NKREKP vid 14 bereznia 2018 r. № 312.
7. Teplokhododotekhnika : 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. Kholodylni ustanovky : Pidruchnyk / I. H. Chumak, V. P. Chepurenko, S. Yu. Larianovskyi ta in. ; Za red. I. H. Chumaka. – Odesa : Refpryntinfo, 2006. – 550 s.
9. Курьлев Е. С. Холодильные установки / Е. С. Курьлев, В. В. Оносовский, Ю. Д. Румянцев. – СПб : Политехника, 2002. – 576 s.
10. Cherniavskiy A. Praktychnyi posibnyk z enerhetychnoho audytu promyslovykh pidpriemstv. Konsultuvannia pidpriemstv shchodo enerhoefektyvnosti / Cherniavskiy A. – Kyiv, 2020. – 148 s.
11. Systemy enerhomenedzhmentu ta yikh matematychno zabezpechennia : navch. posibnyk / H. H. Pivniak, S. I. Vypanasenko, O. I. Khovanska ta in. – D. : Natsionalnyi himychnyi universytet, 2013. – 214 s.
12. Solovei O. I. Osnovy enerhoefektyvnoho vykorystannia elektrychnoi enerhii v systemakh elektrospozhyvannia promyslovykh pidpriemstv : navch. posibnyk / O. I. Solovei, V. P. Roizen, P. H. Pleshkov. – Cherkasy : vydavets Chabanenko Yu., 2015. – 316 s.
13. Grigorev I. V. Lokalnye zadachi izmerenij i vychislenij pri ispolzovanii SCADA – OASyS / I. V. Grigorev, I. A. Shishkov // Promyshlennye ASU i kontrollery. – 2001. – № 8. – S. 37–41.
14. Hanaev V. V. Potrebiteli – regulatory: vozmozhnosti i perspektivy primeneniya / V. V. Hanaev // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. – 2008. – № 1. – S. 59–64.
15. PUE (Pravyla Ulashtuvannia Elektrostanovok) : zatverdzeni Nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy vid 21.07.2017 № 476. Kyiv, 2017.
16. Lenshin V. N. Proizvodstvennye ispolnitelnye sistemy (MES) – put k effektivnomu predpriyatiyu / Lenshin V. N., Kuminov V. V., Frolov E. B., Budnik P. A. // SAPR i grafika. – 2003. – № 26. – S. 42–43.
17. Kharlamov A. A. Attention mechanism usage to form framework structures on a semantic net. Neurocomputers and Attention. Manchester; New York: Manchester University Press. 1991. Vol. 11. P. 747–756.
18. Shubladze A. M. Sintez optimalnykh lineinykh regulyatorov / A. M. Shubladze // Avtomatika i telemehaniка. – 1984. – № 12. – S. 22–23.
19. Litvinova E. V. Sravnitel'naya ocenka sposobov zamorazhivaniya myasnogo syrya s razlichnym harakterom avtoliza / Litvinova E. V., Artamonova M. P., Buhteeva Yu. M. // Health, Food & Biotechnology. – 2020. – № 2. Том 2. – S. 103–115.

Надійшла/Paper received : 23.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.