

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

МОМОТЮК ВІКТОРІЯ ВІКТОРІВНА

УДК 621.3.079

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС
ХЛІБОКОМБІНАТУ З СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ
НА БАЗІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти та науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Козирський Володимир Вікторович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
директор Навчально-наукового інституту
енергетики, автоматики і енергозбереження

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Федорейко Валерій Степанович,
Тернопільський національний педагогічний
університет імені Володимира Гнатюка,
завідувач кафедри машинознавства
та транспорту

кандидат технічних наук
Смітюх Ярослав Володимирович,
Національний університет харчових технологій,
заступник завідувача кафедри автоматизації
та інтелектуальних систем керування

Захист відбудеться «15» травня 2018 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «13» квітня 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В Україні функціонує близько двохсот спеціалізованих підприємств різної форми власності, які об'єднують хлібокомбінати, кондитерські цехи, макаронні фабрики. Провідними виробниками на ринку хліба в масштабах країни є: ВАТ «Київхліб», ЗАТ «Укрзернопром», ВАТ «Концерн Хлібпром», ТОВ «Хлібні інвестиції».

Проте хлібопекарські підприємства зіштовхуються із серйозними проблемами, що гальмують їх розвиток: подорожчання ресурсів сировини, неможливість поновлення обладнання у зв'язку з високою вартістю, а також зростання цін на електроенергію і воду, значний рівень оподаткування тощо.

Питома витрата електроенергії на ділянках виробництва хлібобулочних виробів, оснащених вітчизняним обладнанням, значно вище ніж на закордонних аналогах. Дослідження практики енергозбереження на українських хлібокомбінатах показало, що потенціал економії енерговитрат в середньому на 50–70 % вище, ніж існує на даний момент, що визначає актуальність модернізації електротехнологічного комплексу.

При цьому існуючі системи автоматизації технологічних процесів хлібопекарського виробництва не забезпечують оперативного комплексного керування процесом випікання хліба, при умові виконання вимог щодо енергоефективності роботи підприємства в цілому. Це викликано дією непередбачуваних та нестаціонарних збурюючих впливів, які призводять до того, що рішення щодо зміни тих чи інших параметрів приймається системою із певним запізненням, або керуючі впливи взагалі не відповідають технологічним нормативам. Відповідно виникає протиріччя між тенденцією ускладнення таких об'єктів управління, що веде до збільшення числа параметрів системи, і вимогами щодо енергоефективності електротехнологічних комплексів хлібокомбінатів.

У зв'язку з цим можна констатувати, що вирішення науково-прикладної задачі реалізації раціональних режимів функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату із використанням сучасних технологій керування технологічними процесами є важливим напрямом підвищення енергоефективності виробництва хлібобулочної продукції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження та наукові результати дисертаційної роботи відповідають пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки України на період до 2020 року, а саме напряму «3. Енергетика та енергоефективність» у контексті тематичного напряму «Технології електроенергетики та теплоенергетики».

Дослідження проводились у Національному університеті біоресурсів і природокористуванні України відповідно до наукових тематик: «Розробка теорії структурно-параметричного синтезу гібридних систем електроживлення та їх інтеграція до розподільних електричних мереж в сільських регіонах» (номер державної реєстрації 0113U003830), де автору належать виконання дослідження гібридних систем електроживлення та розроблення методики

визначення ефективності їх інтеграція до розподільних електричних мереж в сільських регіонах.

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи – дослідити режими енергоспоживання та обґрунтувати системи керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату, які покладено в основу підвищення енергоефективності та продуктивності виробництва на хлібокомбінаті.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

- провести аналіз функціонування, розробити концептуальну модель електротехнологічного комплексу виробництва продукції хлібопекарських комплексів та обґрунтувати напрями підвищення енергоефективності їх роботи із врахуванням асортименту;

- провести експериментальні дослідження на виробничому об’єкті та визначити взаємозв’язки між енергетичними, технологічними та економічними параметрами виробництва хлібобулочних продуктів щодо оцінки можливих шляхів підвищення енергоефективності;

- удосконалити комплекс моделей та параметри оцінки енергоефективності процесів виробництва хлібобулочної продукції, імітаційним моделюванням перевірити їх на технологічну адекватність та відповідність;

- обґрунтувати систему керування на базі нейронних мереж, яка враховує у разі вибору енергоефективного режиму функціонування технологічного процесу асортиментне завдання, зміну добової вартості енергоресурсів та використання когенераційного обладнання в існуючій архітектурі електротехнологічного комплексу хлібокомбінату;

- провести виробничу перевірку роботи електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочної продукції із енергоефективною системою керування та розробити рекомендації щодо практичного використання запропонованої методики підвищення енергоефективності функціонування електротехнологічного обладнання.

Об’єкт дослідження – процеси споживання енергоресурсів при виробництві хлібобулочної продукції.

Предмет дослідження – вплив взаємозв’язків, режимів енергоспоживання та закономірностей функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату на енергоефективність та продуктивність виробництва хлібобулочної продукції.

Методи дослідження. Дослідження ґрунтуються на основних положеннях тепломасообміну, основ електротехніки, математичного моделювання, теорії автоматичного керування, теорії нейронних мереж, мереж Петрі і статистичної обробки даних із використанням комп’ютерних технологій. Перевірку розроблених теоретичних положень проведено у виробничих умовах, де було підтверджено їх практичну ефективність.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше обґрунтовано принципи енергоефективного функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату з інтегрованою системою керування згідно

асортиментного завдання, зонної вартості електроенергії та режимів роботи когенераційного обладнання, що дало можливість зменшити споживання енергоресурсів на виробництво хлібобулочної продукції.

Отримав подальшого розвитку комплексний аналіз енергетичних потоків із врахуванням особливостей хлібопекарського виробництва, що дає змогу представити всі взаємозв'язки між технологічними лініями і енергетичними потоками та побудувати алгоритми енергоефективного функціонування.

Уперше синтезовано математичні моделі електротехнологічних процесів виробництва багатоасортиментної хлібобулочної продукції шляхом використання нейронних мереж та мереж Петрі, що покладено в основу енергоефективного керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату.

Практичне значення одержаних результатів. Обґрунтовано та визначено режими функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату, що реалізовано в системі енергоефективного керування, який пройшов виробничу перевірку та впровадження на промисловому об'єкті ТзОВ «Нові перспективи» с. Варковичі Дубенського району Рівненської області.

Запропоновано та реалізовано вдосконалену структуру електротехнологічного комплексу хлібокомбінату із енергоефективним керуванням робочими режимами виробничих вузлів та агрегатів. Реалізовано алгоритм керування процесом виробництва хлібобулочної продукції із використанням мереж Петрі та нейронних мереж.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. Автором особисто: обґрунтовано та проведено теоретико-практичні дослідження процесу виробництва хлібобулочних виробів, реалізовано системний аналіз виробничого комплексу, проаналізовано енергоефективність режимів роботи реального виробничого комплексу із врахуванням асортиментних обмежень та показників якості готової продукції; розроблено концептуальну модель електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочної продукції із зазначенням енергетичних та ресурсних потоків; обґрунтовано, створено та перевірено на адекватність математичні нейромережеві моделі енергетично-виробничих процесів хлібокомбінату із урахуванням асортиментного завдання; удосконалено математичні моделі у вигляді системи диференційних рівнянь температурних режимів роботи хлібопекарської печі та передачі теплових ресурсів від когенераційного обладнання; обґрунтовано та реалізовано побудову на основі мережі Петрі адекватної та енергоефективної вибірки даних для синтезу енергоефективної системи керування електротехнологічними процесами виробництва хлібобулочної продукції із урахуванням зонної вартості електроенергії; шляхом імітаційного моделювання перевірено на технологічну відповідність математичний апарат керування, який враховує у своїй роботі різні асортиментні завдання та добову вартості енергоресурсів; обґрунтовано та створено удосконалену архітектуру електротехнологічного комплексу

хлібокомбінату із енергоефективним керуванням, який враховує у разі вибору енергоефективного режиму асортиментне завдання та добову вартість енергоресурсів; обґрунтовано та розраховано параметри використання когенераційного обладнання за виробництва хлібобулочної продукції, де враховується зонна вартість електроенергії; перевірено роботу електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочної продукції із енергоефективним керуванням у виробничих умовах та розроблено рекомендації щодо практичного використання відповідного електротехнологічного обладнання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались та обговорювались на III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2015 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2016 р.); 83 Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, 2017 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання енергетики та біотехнологій» (м. Бережани, 2017 р.); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Основи автоматики 2017» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 11 наукових працях, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави та 5 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 239 сторінках комп'ютерного тексту. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків, містить 14 таблиць, 55 рисунків. Список використаних літературних джерел налічує 135 найменувань, із них 36 іноземною мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено актуальність теми, мету та завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну, практичне значення та відображено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі «**Аналіз енергетичних характеристик технологічних процесів на хлібокомбінатах та обґрунтування шляхів підвищення їх енергоефективності**» проаналізовано технології та затратні механізми виробництва хлібобулочної продукції, створено та проаналізовано структуру електротехнологічного комплексу хлібокомбінату і проведено його системний аналіз, обґрунтовано та поставлено подальші наукові завдання. ключовою передумовою для підвищення енергоефективності електротехнологічного комплексу є техніко-економічна залежність: якщо енергетичні витрати хлібозаводу складають 2,5 % від сукупних витрат, а його прибуток

дорівнює 5 % від обороту, то зниження енергетичних витрат на 10 % еквівалентно зростанню прибутку на 5 %.

Аналізуючи процес випікання хліба з точки зору системного аналізу, відзначено ряд ознак, які характерні для складних систем: у цій системі виділяється структурна сукупність підсистем, які взаємодіють між собою; кожна із систем може входити як підсистема в більш складну, у свою чергу, підсистеми можуть представляти як системи молодшого рангу. Водночас можна зробити висновок, що всі виділені підсистеми, які входять до електротехнологічного процесу виготовлення хлібобулочних виробів з'єднані послідовно; підсистеми енергопостачання підприємства впливають на окремі підсистеми електротехнологічного процесу. Таким чином, хлібокомбінат має всі ознаки складної системи з можливістю виділення окремих підсистем.

У зв'язку з цим обґрунтовано є технологічна актуальність задачі розроблення енергоефективного керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату – створення відповідної системи дозволить заощадити енергоресурси, сировину і трудові витрати обслуговуючого персоналу, що також доводить актуальність такої системи.

У другому розділі **«Аналітично-експериментальні дослідження енергозатратності технологічних процесів на хлібокомбінатах»** синтезовано концептуальну модель енергозатратності електротехнологічного комплексу хлібокомбінату, проведено пасивний експеримент на виробничому об'єкті та проведено кореляційний аналіз отриманих результатів, проаналізовано результати та удосконалено використання аналітичних моделей хлібопекарської печі та функціональних режимів когенераційної установки, запропоновано і синтезовано нейромережу розрахунку витрат енергетичних процесів за виробництва хлібобулочних виробів.

За базовий промисловий об'єкт дослідження застосовувався хлібокомбінат ТзОВ «Нові перспективи». Підприємство складається з чотирьох цехів і хлібосховища. Оскільки кондитерська продукція, що виробляється в четвертому цеху складає менше 5 % від загального асортименту, в роботі даний цех розглядати не будемо. У кожному цеху випікається певний асортимент продукції, проте у разі виникнення нештатних ситуацій є можливість виробляти продукцію в інших цехах.

Для синтезу (у *нотаціях UML*) концептуальної моделі процесу функціонування хлібокомбінату (рис. 1) виділено стадії і операції процесу випікання хліба з точки зору системного аналізу.

На основі отриманих статичних концептуальних моделей та структури електротехнологічного комплексу виробництва хлібопекарської продукції (рис. 2) можна оцінити та обґрунтувати параметри (їх значення), які потрібно дослідити на виробничому об'єкті у контексті подальшого керування ними.

Пасивний експеримент проводили протягом 90 діб на ТзОВ «Нові перспективи». Використавши методику кореляційного аналізу, оцінили вплив ключового економічного фактору (асортиментне завдання) на

енергоефективність (рис. 3). Останній показник визначали наступним чином (у рамках виконання асортиментного завдання на добу):

$$\text{Енергоефективність} = \text{ФВЕ} - \text{ПНВЕ}, \quad (1)$$

де ФВЕ – фактичні витрати енергоресурсів; ПНВЕ – планово-нормативні витрати енергоресурсів ТзОВ «Нові перспективи».

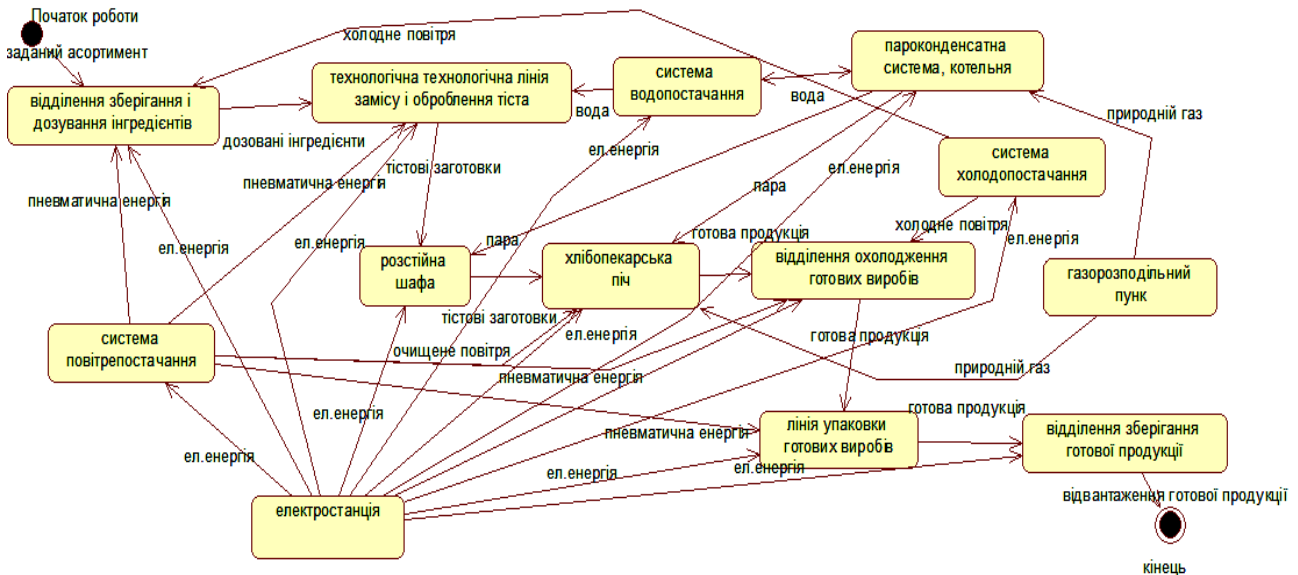


Рис. 1. Схема взаємозв'язків складових електротехнічного комплексу та енергетичних потоків виробництва хлібопекарської продукції

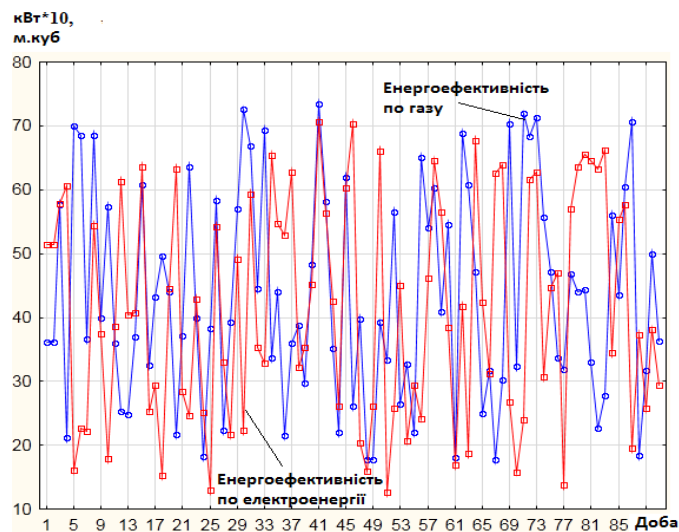


Рис. 2. Оцінка енергетичних показників виробництва хлібобулочних продуктів за виконання добового асортиментного завдання: А – витрати електроенергії; Б – витрати газу; В – енергоефективність

Отримані значення лінійного коефіцієнта кореляції між асортиментним завданням (24 показники) та енергоефективністю (по електроенергії та по газу) показали неможливість встановлення ступеня лінійного взаємозв'язку між даними важливими показниками виробничих процесів – всі коефіцієнти кореляції менше 0,3 (див. рис. 3).

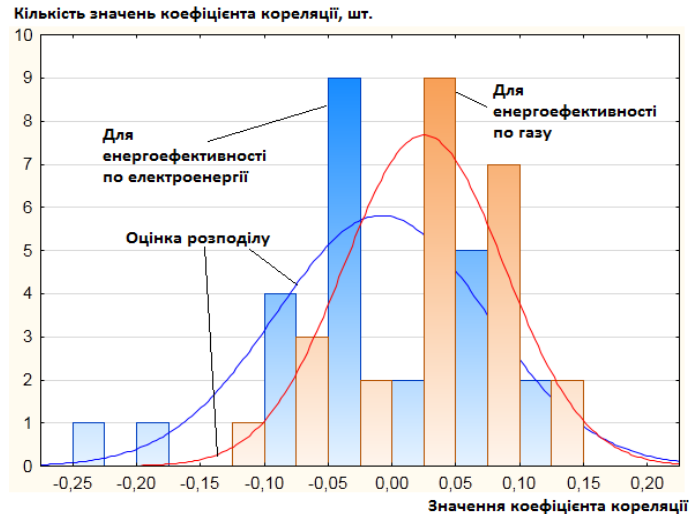


Рис. 3. Оцінка результатів лінійного кореляційного аналізу між асортиментним завданням та енергоефективністю його виконання (за витратами електроенергії та природного газу)

Отже, встановлено нелінійність та нестационарність процесів, фактичну неможливість формалізувати взаємозв'язки між виробничими параметрами з використанням класичних підходів (кореляційного аналізу), зокрема між енергоефективністю та асортиментним завданням.

Тому для моделювання і розроблення концепції функціонування електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочних виробів запропоновано використати математичний апарат нейронних мереж, які демонструють ефективність роботи саме за аналізу та оцінки таких процесів: стохастичних, нелінійних, із розмитою інформаційною складовою.

Проаналізовано, що найбільші витрати газу на підприємстві йдуть на випікання хліба та комунальні послуги, тому для детального дослідження температурних режимів роботи хлібопекарської печі та котельні підприємства, за відомими залежностями із використанням балансових рівнянь тепломасопереносу, проведено їх математичне моделювання. Удосконалені динамічні математичні моделі дозволять оцінити теплові потреби за виробництва хліба та розробити алгоритм керування електротехнологічним комплексом із когенераційним обладнанням. Проте для дослідження впливу асортиментного завдання на енергетичні потоки за виробництва хлібопродуктів синтезовано математичний апарат нейронних мереж, що здатні працювати в умовах невизначеності, нелінійності та неповноти інформації.

При побудові і аналізі нейромережі (рис. 4) регулювання енергозатратності виробничих процесів ключовою задачею було отримання оптимальних значень енергозатрат (електроенергії та теплової енергій) на виконання конкретного асортиментного завдання. Глибина навчальної вибірки становила 90 наборів навчальних даних. Для уникнення «перенавчання» нейромережі вибірка ділилась на: навчальні дані, контрольні дані та тестові дані (рис. 5).

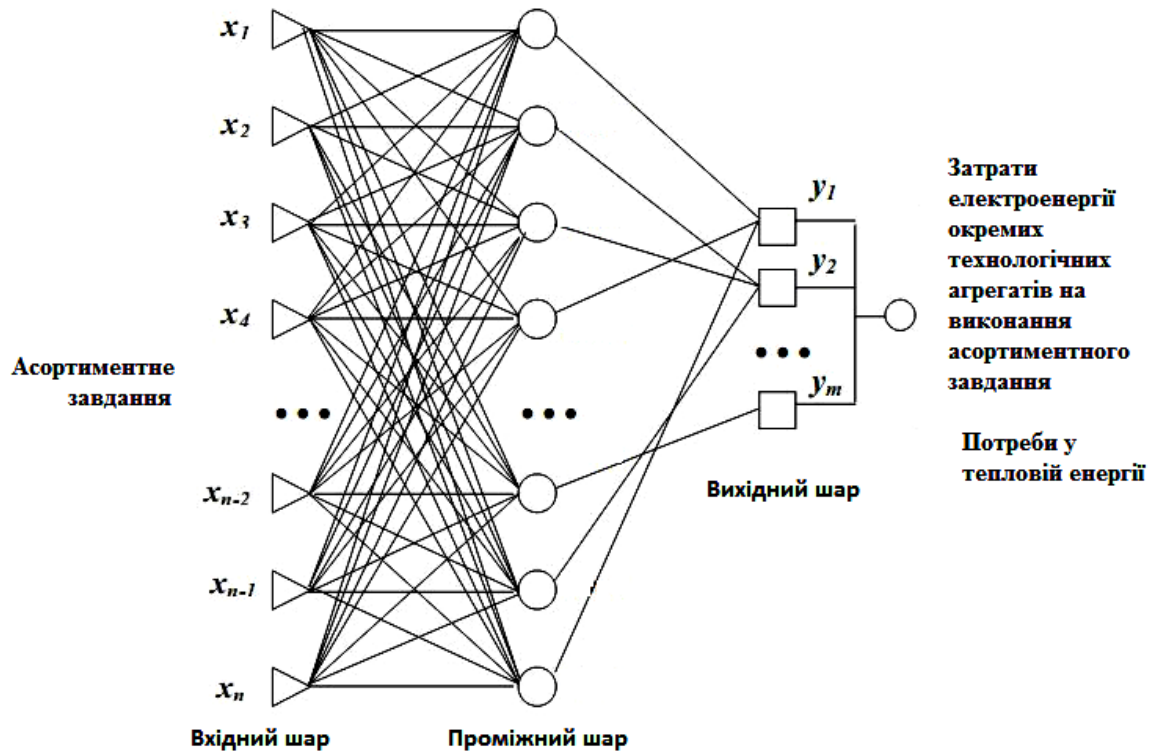


Рис. 4. Архітектура нейромережевої моделі визначення витрат енергетичних процесів при виробництві хлібобулочних виробів

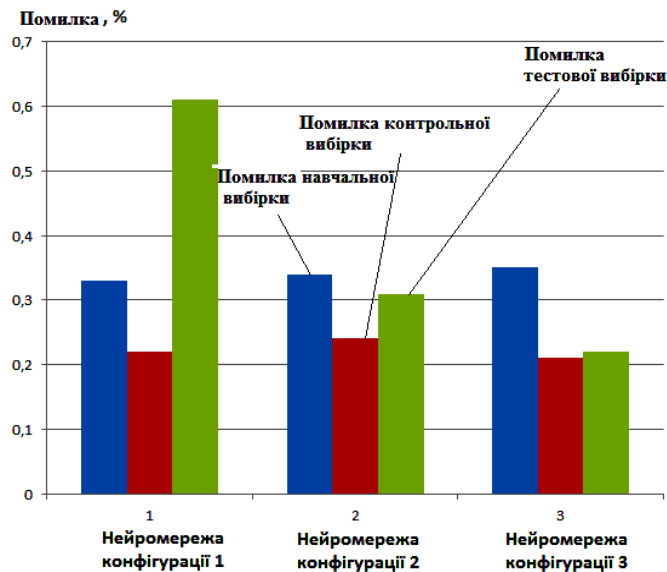


Рис. 5. Якість навчання нейронних мереж оцінки виробничих параметрів процесу випічки хліба

Таким чином, отримано адекватну нейромережеву модель, котру можна використовувати для оцінки енергоефективності процесів виробництва хліба (із наступними помилками навчання: на навчальній вибірці – 0,35 %, на контрольній вибірці – 0,2 %, на тестовій вибірці – 0,21 %).

Сформульовано принципи підвищення ефективності електро-технологічного комплексу хлібокомбінату, які включає нейромережеве моделювання (рис. 6).



Рис. 6. Принципи використання електротехнологічної системи керування з метою підвищення енергоефективності випікання хлібобулочних продуктів

Ключовою проблемою у встановленні енергоефективності електротехнологічного комплексу є узгодження зовнішнього і внутрішнього аспектів ефективності. Однак, класичні критерії не дозволяють об'єктивно провести моніторинг стану систем енергозабезпечення в плані підвищення енергоефективності і вони не працюють у динамічному режимі, що є необхідним для оцінки електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочних виробів. Саме тому пропонується динамічний критерій оцінки енергоефективності хлібокомбінату, побудований на основі оптимізації навчальних вибірок для нейромережевої системи керування:

$$\begin{cases} \text{Асортиментне_завдання} \rightarrow \text{const} \\ \text{Оплата_за_енергоресурси} \rightarrow \text{min} \end{cases} \quad (2)$$

Такий багатопараметричний критерій зорієнтований на максимізацію прибутку від функціонування електротехнологічного комплексу за рахунок використання у конкретний момент часу максимально дешевих енергоресурсів та перерозподілу теплової енергії.

У третьому розділі «Розроблення системи енергоефективного керування електротехнологічним комплексом виробництва хлібобулочних виробів із використанням мереж Петрі» обґрунтовано підходи щодо

енергоефективного керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату із використанням нейромереж моделювання часу реалізації асортиментного завдання, створення навчальних вибірок на основі нечітких мереж Петрі, керуючої нейромережі; проведено імітаційне моделювання якості функціонування такого електротехнологічного комплексу та створено його структурно-алгоритмічне забезпечення.

Одним із найскладніших завдань створення навчальної для нейромережі вибірки є формування адекватних та репрезентативних значень технологічної карти виробництва. Для цього використано мережі Петрі, результати пасивного експерименту на підприємстві (для оцінки часу функціонування електротехнічного обладнання за виконання номенклатури асортиментного завдання) та зонну вартість електроенергії, створивши на основі останніх відповідну нейромережу керування (рис. 7).

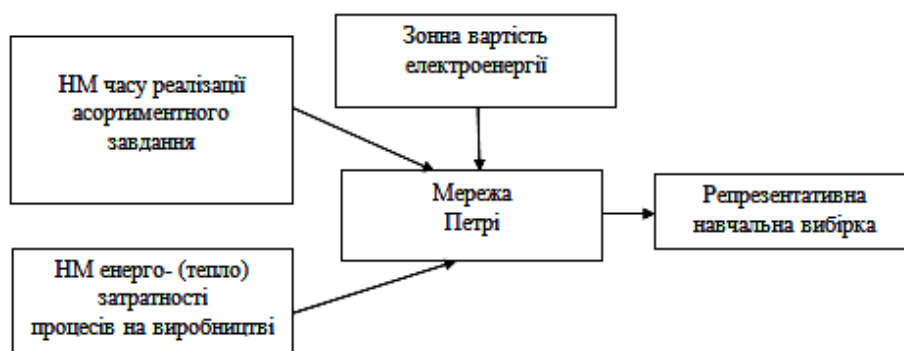


Рис. 7. Структура формування навчальної вибірки із використанням мережі Петрі

Застосування мережі Петрі відбувається наступним чином:

1. Створюється структурна модель системи у вигляді мережі Петрі.
2. Задаються значення асортименту.
3. Отримується час роботи окремого виробничого обладнання хлібокомбінату в контексті виконання асортименту на добу.
4. Вираховується із використанням нейромережі енергозатратності та теплотреби на виготовлення даного асортименту – для всіх ключових технологічних елементів.
5. Встановлюється дія зонного тарифу – погодинно.
6. Із використанням мережі Петрі і нейромережі оптимізується енерго-навантаження на окремі технологічні вузли.

У результаті розв'язку оптимізаційної задачі кращою нейромережею був багаточаровий перцептрон із наступними помилками: навчальна – 1,26 %, контрольна – 2,628 %, тестова – 1,835 %. Отримані зведені результати продемонстрували, що таку модель нейромережі можна застосовувати у разі подальших досліджень роботи електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочних виробів, у тому числі із використанням мережі Петрі.

Володіючи всіма вхідними даними та згідно встановленої концепції, побудовано мережу Петрі, узагальнене маркування якої – це п'ятірка

компонентів (P, T, I, O, m_0) , де: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – кінцева множина позицій мережі Петрі; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – кінцева множина переходів мережі Петрі; I – вхідна функція переходів, що визначається як відображення $I: P \times T \rightarrow N_0$; O – вихідна функція переходів, що визначається як відображення $O: T \times P \rightarrow N_0$; $m_0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$ – вектор початкового маркування мережі Петрі, при цьому $m_i^0 \in N_0$ і t_i^0 – компонент вектора початкового маркування мережі Петрі, що відповідає позиції $p_n \in P$ (через N_0 позначається множина натуральних чисел і нуль, тобто $N_0 = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$).

Принцип вибору таких стратегій полягає у запуску найбільш енергозатратного обладнання та процесів у нічний час – без порушення технологічних вимог щодо якості продукції та її добових об'ємів.

Відповідна послідовність дії включатиме два базові етапи:

ЕТАП 1. Отримавши необхідний асортимент, вираховуємо із технологічних вимог затрати енергоресурсів та час на виготовлення продукції згідно розрахованого асортименту (рис. 8).

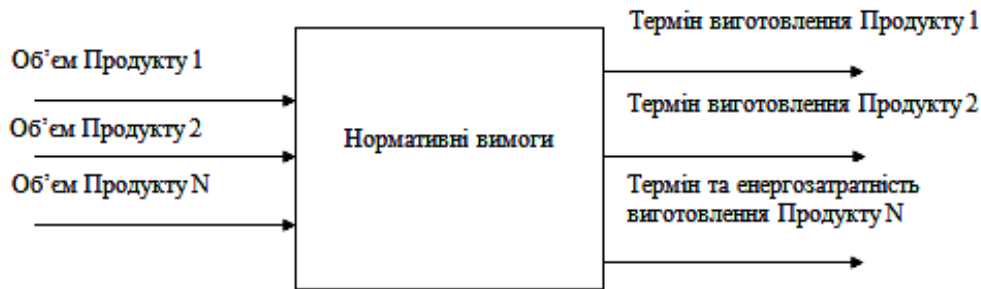


Рис. 8. Структурна схема розрахунку часу виготовлення продукції

ЕТАП 2. Створюємо нейронну мережу для вирішення мережевої задачі максимального завантаження технологічної лінії у проміжки **ЧАСУ** «дешевої» електроенергії – згідно зонного обліку енергоносіїв.

Для спрощення моделювання та аналізу простору станів застосуємо спеціалізований пакет моделювання мереж Петрі – «CPN Tools».

Загальний вигляд функціональної залежності цільового параметра від інших матиме вигляд:

$$TO = F (FE, TG, C, t), \quad (3)$$

де TO – завантаженість технологічного обладнання; FE – витрати електроенергії; TG – витрати теплової енергії; C – зонна вартість електроенергії; t – час використання виробничого обладнання для виконання асортиментного завдання.

Для моделювання використано комбінацію статичних та часових мереж Петрі, які застосовують поняття модельного часу для опису тривалості дій у реальних об'єктах. Встановлення мінімальної вартості реалізації асортиментного завдання здійснювалось із використанням нейромережі оцінки часу виготовлення продукції, енергетичних затрат, коефіцієнта енерго-ефективності (5) (1 у. о. часу в мережі Петрі приймалась рівною 20 хв (рис. 9).

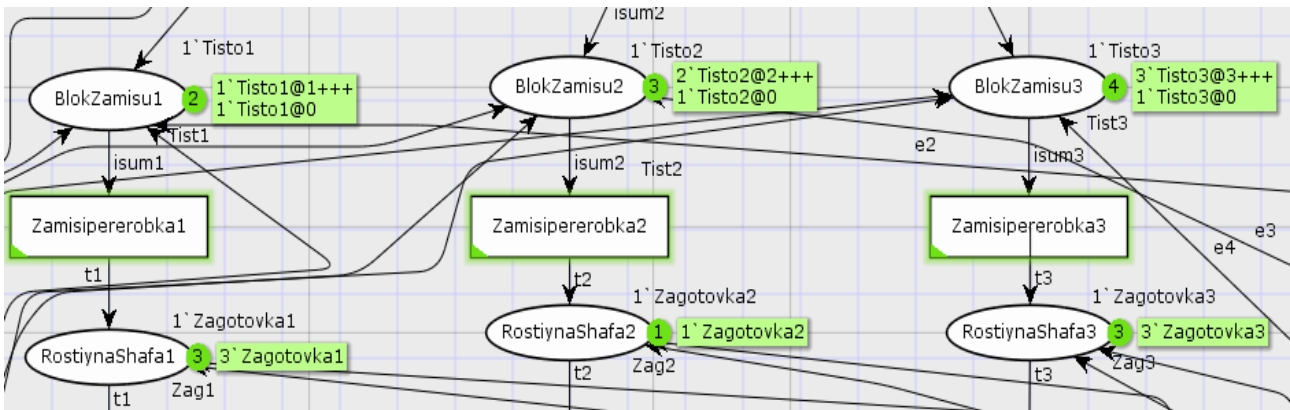


Рис. 9. Фрагмент імітаційного часового моделювання виконання асортиментного завдання (програмний продукт «CPN Tool»)

Аналізуючи найефективніший час використання обладнання, у порівнянні із роботою реального хлібокомбінату (тобто набір навчальних даних для керуючої нейромережі) можна констатувати, що оплата за використану електроенергію зменшилась на 7,3 % (порівняно із лінійним проходженням виконання асортиментного завдання). Ітераційне моделювання включало 24 експертні епохи (рис. 10) – до завершення згідно розробленого алгоритму.

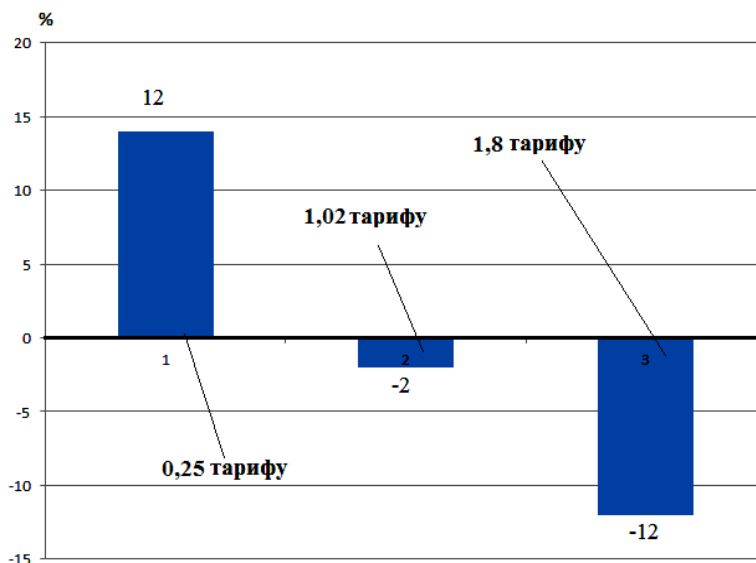


Рис. 10. Зміна часу використання електротехнологічного обладнання хлібокомбінату у різні тарифні зони (за базову прийнята робота обладнання від 0:00 годин в технологічно обґрунтованому безперервному режимі)

Для синтезу системи керування вибрали багатошаровий перцептрон (рис. 11) (MLP 24-10-29) із наступними помилками: тестова – 3,8 %, контрольна – 3,6 %, перевірна – 3,2 %.

Порівняння результатів функціонування нейромережі до оптимізації і після її реалізації, продемонстрували ефективність останньої; оцінка поверхонь відгуків теж підтвердила технологічну адекватність отриманої системи керування.

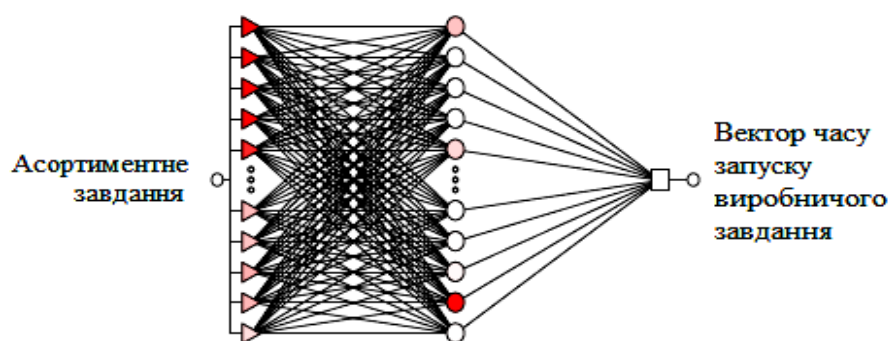


Рис. 11. Архітектура неймережевої системи керування електротехнологічним комплексом виробництва хлібобулочних виробів

У пакеті прикладного математичного програмного забезпечення «MatLAB Simulink» здійснили імітаційні дослідження функціонування неймережевої системи (рис. 12). У блоках «Data Store Read» зберігаються блоки даних асортиментного завдання, які подаються на входи відповідних неймереж. У програмній реалізації на мові «С++» створено ще один вхід – для визначення часу та передачі його значення на неймережеву систему керування виключення технологічного обладнання.

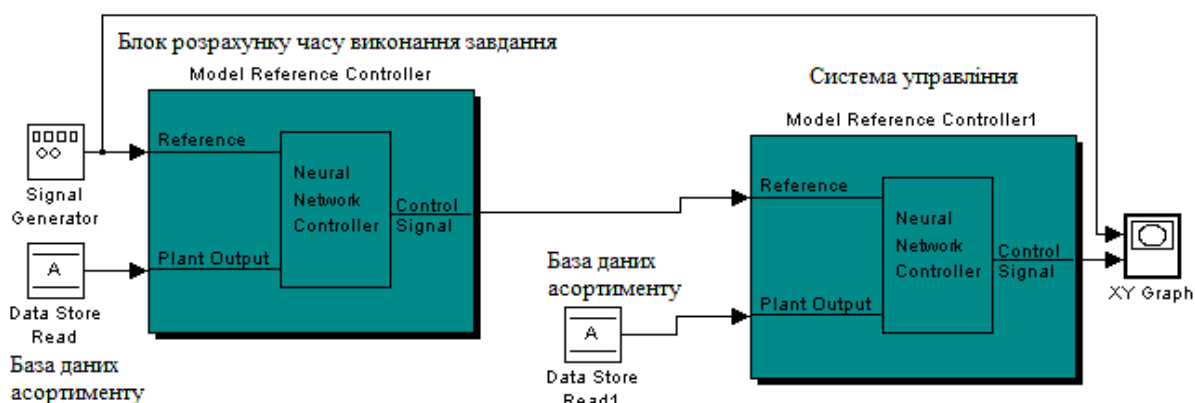


Рис. 12. Блок схема імітаційного моделювання функціонування неймережевої системи керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату

Отримані результати функціонування неймережі продемонстрували, що відповідні кількісні показники якості керування (швидкодія, кількість напівколивань) технологічно прийнятні: максимальний час самоналаштування 43 епохи, що при застосуванні сучасного мікропроцесорного обладнання становитиме не більше 30 секунд реального часу.

Розроблена енергоефективна система керування з використанням нейронних мереж електротехнологічним комплексом хлібокомбінату здійснює оперативно-диспетчерське керування виробничим комплексом на основі енергоефективної стратегії використання обладнання, оптимізацію організації технологічного процесу, облік, контроль, аналіз виробництва та оперативне керування в умовах, коли дестабілізація ситуації виникає у зв'язку з

порушеннями процесу виробництва переважно із внутрішніх причин, які можна передбачити заздалегідь. Включення когенераційного обладнання здійснюється у часи мінімальної вартості – виходячи із включень технологічного електрообладнання. Окремий модуль для таких цілей не розробляється. Перенавчання нейромережевої системи керування технологічним обладнанням виконується у випадку, якщо її функціональні характеристики не задовольняють вимогам енергоефективності.

У четвертому розділі «Дослідження енергоефективності функціонування системи керування електротехнологічним комплексом виробництва хлібобулочної продукції» розроблено методику енергоефективності роботи електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочних виробів із енергоефективною системою керування та використанням когенераційного обладнання та теоретично її перевірено; проведено виробничі дослідження принципів синтезу енергоефективного електротехнологічного комплексу хлібокомбінату; розроблено практичні рекомендації щодо практичного впровадження енергоефективних рішень при виробництві хлібобулочної продукції.

Відомо, що однією з найважливіших цілей «Smart Grid» є забезпечення практично безперервного керованого балансу між попитом і пропозицією енергії. Для цього елементи мережі повинні постійно обмінюватися між собою інформацією про параметри енергії, режими споживання і генерації, кількості споживаної енергії і планованому споживанні, комерційною інформацією. Тоді комплексне завдання системи керування електротехнологічним комплексом включатиме реалізацію двох каналів керування (рис. 13): виключення електротехнологічних агрегатів згідно асортиментного завдання із урахуванням зонності тарифікації; регулювання передачі теплоносіїв у котельню.

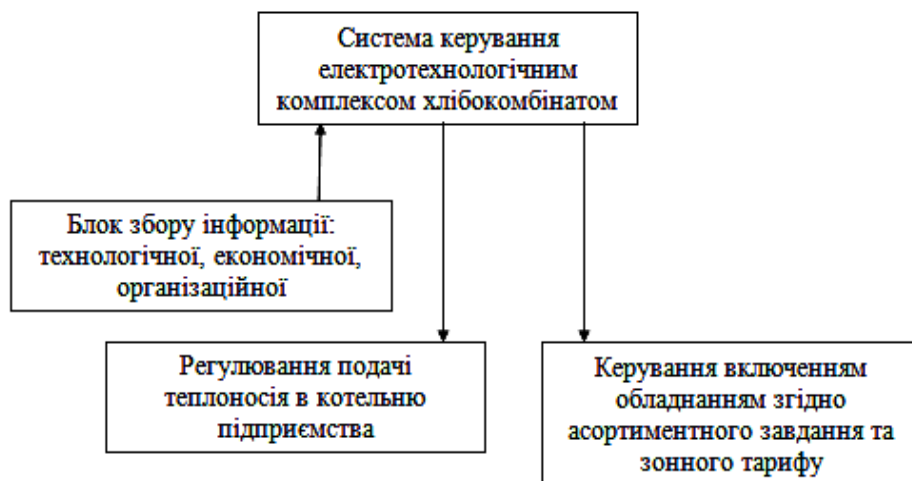


Рис. 13. Схема функціонування системи керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату

У результаті було отримано характеристики впливу часу роботи електротехнологічного обладнання виробництва хлібобулочної продукції в

різні добові тарифні зони, які продемонстрували техніко-економічну доцільність енергоефективного керування включенням агрегатів, котрі є енергоспоживачами (рис. 14). Тобто концептуальний підхід «Smart Grid»-технологій доцільно використовувати і при забезпеченні енергота ресурсоефективного виробництва на хлібокомбінаті.

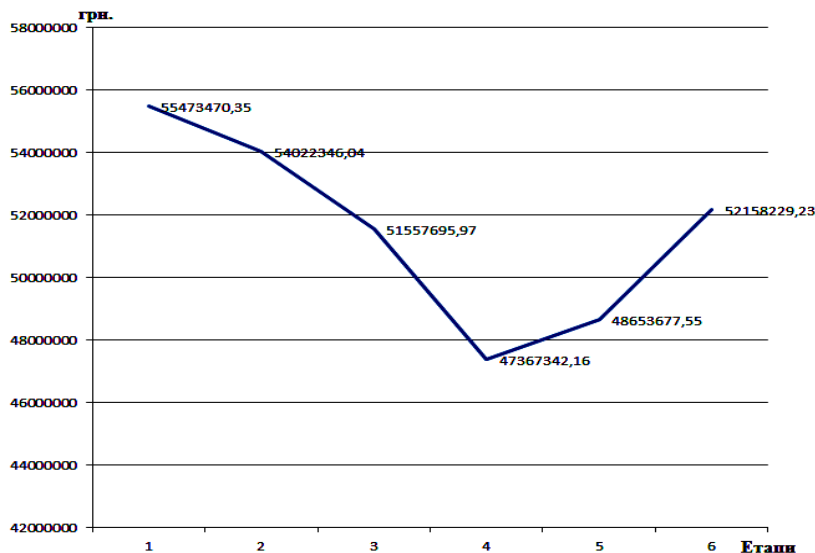


Рис. 14. Річний прибуток від впровадження когенераційного обладнання (нульове значення – без використання когенераційної установки)

Отже, можна зробити наступні висновки:

- використання когенераційного обладнання дозволяє значно економити фінансові ресурси (зі строком окупності таких проектів 2–3 роки);
- розроблена методика керування генерацією та розподілом енергетичних ресурсів хлібокомбінату згідно добової зонної вартості електроенергії (споріднена «Smart Grid»-концепції), дозволяє підвищити економічну ефективність використання когенераційного обладнання до 10 %.

Виробничі дослідження розробленого підходу щодо енергоефективного керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату виконували на раніше досліджуваному промисловому підприємстві ТзОВ «Нові перспективи». Виходячи із архітектури електротехнологічного комплексу, в існуючу систему керування було інтегровано комп'ютерні засоби та спеціалізоване програмне забезпечення (рис. 15) для забезпечення енергоефективного керування технологічними процесами виробництва хлібобулочної продукції на основі нейронних мереж.

Узагальнені економічні показники оцінки результатів включення технологічного обладнання згідно зонної вартості електроенергії на виробничому об'єкті протягом 30 днів підтверджують ефективність та перспективність такого підходу: загальна фінансова економія – 17 354,90 грн; відносне зменшення фінансових витрат на функціонування елетротехнолонічного комплексу хлібокомбінату – 10,47 %.



Рис. 15. Головне вікно програми енергоефективного керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату

На основі теоретично-імітаційних досліджень та виробничої апробації розроблено послідовність та методичні засади реалізації на виробництві енерго- та ресурсоефективних режимів роботи електротехнологічного комплексу хлібокомбінату із урахуванням зонної вартості електроенергії та доцільності використання когенераційної установки

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання реалізації раціональних режимів функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату із використанням технологій керування технологічними процесами на базі нейронних мереж, що покладено в основу підвищення енергоефективності виробництва хлібобулочної продукції.

Це дозволило сформулювати такі висновки.

1. Дослідження взаємозв'язків і режимів енергоспоживання електротехнологічного комплексу хлібокомбінату, встановлення закономірностей його функціонування обумовили можливість теоретичного обґрунтування системи керування на базі нейронних мереж виробництва виробів із хліба та можливість підвищення енергоефективності і продуктивності виробництва.

2. Аналіз функціонування традиційних електротехнологічних комплексів хлібокомбінатів, у тому числі із використанням літературних джерел, дозволив встановити, що у структурі енергоспоживання хлібопекарської галузі 5–10 % становить електроенергія, 90–95 % – паливо і теплоенергія. Між тим, якщо енергетичні витрати хлібозаводу складають 2,5 % від сукупних витрат, а його прибуток дорівнює 5 % від обороту, то зниження енергетичних витрат на 10 % еквівалентно зростанню прибутку на 5 %, що демонструє актуальність розроблення енергоефективних електротехнологічних комплексів для виробництва хлібобулочної продукції.

3. Статистичний аналіз даних отриманих у результаті пасивного експерименту на реальному виробничому об'єкті (оцінювалось значення лінійного коефіцієнта кореляції між асортиментним завданням, 24 показники та енергоефективність за витратами електроенергії та газу) показав неможливість встановлення ступеня взаємозв'язку між важливими показниками виробничих процесів хлібокомбінату – всі коефіцієнти кореляції менше 0,3.

4. У результаті досліджень на основі даних пасивного експерименту з урахуванням асортиментного завдання отримано нейромережеву модель оцінки енергоефективності процесів виробництва хлібобулочної продукції (із наступними відносними середньоквадратичними похибками навчання: на навчальній вибірці – 0,35 %, на контрольній вибірці – 0,2 %, на тестовій вибірці – 0,21 %), яка дозволила обґрунтувати структурно-функціональну схему використання мереж Петрі для формування репрезентативних навчальним вибірок для нейромережевої системи керування електротехнологічним комплексом хлібокомбіната.

5. Шляхом імітаційного моделювання із використанням спеціалізованого програмного продукту «CPN Tools» сформовано репрезентативну вибірку даних для синтезу нейромережевої системи керування, що дозволило зменшити витрати електроенергії при керованому включенні електротехнологічних вузлів згідно зонної вартості електроенергії на 4,3–8,3 % (порівняно із лінійним проходженням виконання асортиментного завдання).

6. Створено нейромережеву систему керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату на основі багатошарового перцептрону (MLP 24-10-29 із наступними похибками: тестова – 3,8 %, контрольна – 3,6 %, перевірна – 3,2 %), що є адекватною; технологічну відповідність системи керування підтверджено імітаційним моделюванням: при роботі із невідомими наборами вхідних даних швидкодія – 27–43 навчальні епохи; максимальне динамічне відхилення – 0,12–25 у. о., кількість напівколивань – 9–30.

7. Обґрунтований та розроблений енергоефективний електротехнологічний комплекс хлібокомбінату із системою керування може використовуватись на верхньому рівні існуючої комп'ютерно-інтегрованої системи керування, включаючи керування функціонуванням когенераційного обладнання, використання якого дозволяє значно економити фінансові ресурси на виробництво продукції – розрахунковий строк окупності таких проектів 2–3 роки.

8. Виробничі дослідження енергоефективного електротехнологічного комплексу хлібокомбінату згідно зонної вартості електроенергії протягом 30 діб підтверджують ефективність та перспективність розробленої концепції: загальна фінансова економія у період досліджень – 17 354,90 грн; відносне зменшення фінансових витрат на функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату – 10,47 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Енергоаудит хлібокомбінату – основа розробки енергозберігаючих технологій і створення інтелектуальної системи управління електротехнологічним комплексом. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 242. С. 124–132. *(Здобувачем проведено енергоаудит хлібокомбінату і доведено актуальність розроблення інтелектуальної системи управління енергоефективністю хлібокомбінату).*

2. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Концептуальні засади енергоефективного керування випічкою хліба з використанням інтелектуальних технологій. Енергетика і автоматика. 2016. № 2. С. 6–13. *(Здобувачем доведено, що перспективним напрямом підвищення енергоефективності виробництва хліба є створення на основі технологій штучного інтелекту систем керування хлібопекарськими печами та когенераційними установками з врахуванням асортименту та вартості електроенергії в різні добові проміжки).*

3. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Аналітичне моделювання температурних режимів процесу випікання хлібобулочної продукції. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 252. С. 7–15. *(Здобувачем проведено статистичну обробку експериментальних даних основних технологічних змінних роботи хлібопекарської печі та доведено, що розроблена математична модель є цілком адекватною обраному об'єкту).*

4. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Використання нечітких мереж Петрі для формування навчальних вибірок синтезу нейронних мереж. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 6. С. 28–34. *(Здобувачем запропоновано підхід щодо використання нечітких мереж Петрі для формування навчальної вибірки для створення нейромережі керування).*

5. Момотюк В. В. Дослідження енергоефективності функціонування електротехнологічного виробництва хлібобулочної продукції з використанням когенераційного обладнання. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 268. С. 166–175.

Стаття у наукових виданнях іншої держави

6. Obstawski P., Kozyrskyi V., **Momotyuk V.**, Zaiets N. Energy efficient intellectual control system of the electro-technological complex of a bread-baking plant. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture (Agricultural and Forest Engineering) 2017. № 70. P. 95–103. *(Здобувачем продемонстровано економічну доцільність використання енергоефективної системи керування електротехнологічним комплексом хлібокомбінату).*

Тези наукових доповідей:

7. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Розробка систем енергоефективного управління виробництвом хлібобулочних виробів. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 17–18 грудня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 16–17. *(Здобувачем доведено, що для ефективного керування хлібопекарським виробництвом доцільно будувати автоматизовані експертні системи, які призначені для підтримки процесу прийняття рішень неформалізованих задач).*

8. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Особливості моделювання температурних режимів роботи хлібопекарських печей. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 21–22 листопада 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 28–29. *(Здобувачем виведено математичну модель хлібопекарської печі по температурі та доведено, що розроблена математична модель є цілком адекватною обраному об'єкту).*

9. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Особливості використання нечітких мереж Петрі для формування навчальних вибірок синтезу нейронних мереж для електротехнологічного комплексу хлібокомбінату. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 83 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 5–6 квітня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 263. *(Здобувачем доведено, що інтелектуальні системи управління в кожний конкретний момент часу, врахувавши особливості процесу виробництва, динаміку зовнішніх і внутрішніх факторів, здатні забезпечити стабільну якість продукції та економію енергоресурсів в умовах змінюваних параметрів об'єкта).*

10. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Використання когенераційної установки для оптимізації споживання тепло та електроенергії електротехнологічним комплексом. Актуальні питання енергетики та біотехнологій: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Бережани, 18–19 травня 2017 року: тези доповіді. Бережани, 2017. С. 32–33. *(Здобувачем розроблено систему автоматичного регулювання температурного режиму в котельні, за якою можливо визначити достатню кількість теплової енергії, що виробляється когенераційною установкою для нормального режиму її функціонування).*

11. Козирський В. В., **Момотюк В. В.** Концепція використання електротехнологічної системи управління з метою підвищення енергоефективності випікання хлібобулочних виробів. Основи автоматики 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 13–15 вересня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 73–74. *(Здобувачем розроблено концепцію інтелектуального управління хлібокомбінатом згідної зонної вартості електроенергії).*

АНОТАЦІЯ

Момотюк В. В. Енергоефективний електротехнологічний комплекс хлібокомбінату. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2018.

Дисертацію присвячено розв'язанню науково-прикладного завдання, яке полягає у підвищенні енергоефективності виробничих процесів виробництва хлібобулочної продукції шляхом реалізації раціональних режимів функціонування електротехнологічного комплексу хлібокомбінату із використанням енергоефективних технологій керування технологічними процесами.

Проведено аналіз функціонування сучасних хлібопекарських комплексів, теоретичні та практичні дослідження процесу виробництва хлібобулочних виробів та обґрунтовано напрями підвищення енергоефективності режимів роботи комплексу із врахування асортиментних обмежень та показників якості готової продукції.

Розроблено концептуальну модель електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочної продукції, на її основі досліджено енергетичні потоки та комплекс математичних моделей енергетично-виробничих процесів хлібокомбінату.

Проведено експериментальні дослідження на виробничому об'єкті та визначено взаємозв'язки між технологічними та економічними параметрами виробництва хлібобулочних продуктів із метою оцінки можливих шляхів підвищення енергоефективності.

Обґрунтовано математичний апарат та удосконалено комплекс моделей оцінки енергоефективності процесів виробництва хлібобулочної продукції, імітаційним моделюванням перевірено їх на адекватність та технологічну відповідність.

Обґрунтовано використання та синтезовано систему керування, яка враховує при виборі енергоефективного режиму функціонування асортиментне завдання, добову вартість енергоресурсів та використання когенераційного обладнання, в існуючій архітектурі електротехнологічного комплексу хлібокомбінату, та шляхом імітаційного моделювання встановлює її функціональну якість.

Проведено перевірку роботи електротехнологічного комплексу виробництва хлібобулочної продукції із енергоефективною системою керування у виробничих умовах та розроблено рекомендації щодо практичного використання створеної методики підвищення енергоефективності функціонування електротехнологічного обладнання.

Ключові слова: електротехнологічний комплекс, енергоефективність, електроенергія, теплова енергія, когенерація, керування, нейронна мережа, мережа Петрі, економічна ефективність.

АННОТАЦИЯ

Момотюк В. В. Энергоэффективный электротехнологический комплекс хлебокомбината. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-прикладного задания, которое заключается в повышении энергоэффективности производственных процессов производства хлебобулочной продукции путем реализации рациональных режимов функционирования электротехнологического комплекса хлебокомбината с использованием энергоэффективных технологий управления технологическими процессами.

Проведен анализ функционирования современных хлебопекарных комплексов, теоретические и практические исследования процесса производства хлебобулочных изделий и обоснованы направления повышения энергоэффективности режимов работы комплекса с учетом ассортиментных ограничений и показателей качества готовой продукции.

Разработана концептуальная модель электротехнологического комплекса производства хлебобулочной продукции, на ее основе исследованы энергетические потоки и комплекс математических моделей энергетически производственных процессов хлебокомбината.

Проведены экспериментальные исследования на производственном объекте и определена взаимосвязь между технологическими и экономическими параметрами производства хлебобулочных продуктов с целью оценки возможных путей повышения энергоэффективности.

Обоснован математический аппарат и усовершенствован комплекс моделей оценки энергоэффективности процессов производства хлебобулочной продукции, имитационным моделированием проверено их адекватность и технологическое соответствие.

Обосновано использование и синтезирована система управления, которая учитывает при выборе энергоэффективного режима функционирования ассортиментные задачи, суточную стоимость энергоресурсов и использование когенерационного оборудования в существующей архитектуре электротехнологического комплекса хлебокомбината и путем имитационного моделирования установлено ее функциональное качество.

Создано нейросетевую систему управления электротехнологическим комплексом хлебокомбината на основе многослойного персептрона (MLP 24-10-29 с последующими ошибками: тестовая – 3,8 %, контрольная – 3,6 %, проверочная – 3,2 %), что является адекватной; технологическое соответствие системы управления подтверждено имитационным моделированием: при работе с неизвестными наборами входных данных быстродействие –

27–43 учебные эпохи; максимальное динамическое отклонение – 0,12–25 у. е., количество полуколебаний – 9–30.

Получено нейросетевую модель оценки энергоэффективности процессов производства хлебобулочной продукции (с последующими относительными среднеквадратичными погрешностями обучения: на обучающей выборке – 0,35 %, на контрольной выборке – 0,2 %, на тестовой выборке – 0,21 %), которая позволила обосновать структурно-функциональную схему использования сетей Петри для формирования репрезентативных учебным выборкам для нейросетевой системы управления электротехнологическим комплексом хлебокомбината. Статистический анализ данных, полученных в результате пассивного эксперимента на реальном производственном объекте (оценивалось значение линейного коэффициента корреляции между ассортиментным заданием, 24 показателя и энергоэффективность по расходам электроэнергии и газа) показал невозможность установления степени взаимосвязи между важными показателями производственных процессов хлебокомбината – все коэффициенты корреляции меньше 0,3.

Путем имитационного моделирования с использованием специализированного программного продукта «CPN Tools» сформирована репрезентативная выборка данных для синтеза нейросетевой системы управления, что позволило уменьшить расход электроэнергии, при управляемом включены электротехнологических узлов согласно зонной стоимости электроэнергии, на 4,3–8,3 % (по сравнению с линейным прохождением выполнения ассортиментного задания).

Обоснован и разработан энергоэффективный электротехнологический комплекс хлебокомбината с системой управления может использоваться на верхнем уровне существующей компьютерно-интегрированной системы управления, включая управление функционированием когенерационного оборудования, использование которого позволяет значительно экономить финансовые ресурсы на производство продукции – расчетный срок окупаемости таких проектов 2–3 года.

Проведена проверка работы электротехнологического комплекса производства хлебобулочной продукции с энергоэффективной системой управления в производственных условиях и разработаны рекомендации по практическому использованию созданной методики повышения энергоэффективности функционирования электротехнологического оборудования.

Ключевые слова: электротехнологический комплекс, энергоэффективность, электроэнергия, тепловая энергия, когенерация, управления, нейронная сеть, сеть Петри, экономическая эффективность.

ANNOTATION

Momotyuk V. V. Energy-efficient electrotechnical complex of bakery. – The Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.09.03 «Electrical Engineering Complexes and Systems». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to solving a scientific and applied problem, which consists in increasing the energy efficiency of production processes of bakery production by implementing rational modes of functioning of the bakery's electrical complex with the use of energy-efficient technologies of control of technological processes.

The analysis of functioning of modern baking complexes, theoretical and practical researches of the process of production of bakery products and substantiation of directions of increasing energy efficiency of the operating modes of the complex taking into account assortment constraints and quality indices of finished products are carried out.

The conceptual model of the electrotechnological complex of bakery production is developed, on its basis energy flows and a complex of mathematical models of energy-production processes of the bread-baking plant are investigated.

Experimental research was carried out at the production site and the interconnections between the technological and economic parameters of bakery products production were evaluated in order to assess possible ways to increase energy efficiency.

The mathematical apparatus was substantiated and the complex of models of estimation of energy efficiency of processes of production of bakery products was perfected, imitative modeling was checked for adequacy and technological conformity.

The use and synthesis of the control system, which takes into account the assortment task, the daily cost of energy resources and the use of cogeneration equipment in the existing architecture of the bakery's electrical complex, is taken into account when selecting the energy efficient mode of operation, and it establishes its functional quality through simulation modeling.

The work of the electrical complex for the production of bakery products with an energy efficient control system in the production environment was tested and recommendations were made regarding the practical application of the established methodology for increasing the energy efficiency of the operation of the electrotechnological equipment.

Key words: electrotechnological complex, energy efficiency, electric power, thermal energy, cogeneration, control, neural network, petri net, economic efficiency.