

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, О.К. КОПАЙГОРА, Ю.С. ГАВРИШКЕВИЧ, А.О. БОЙЧЕНКО

Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБА

Розроблено метод формалізації технологічних ситуацій і стратегії ідентифікації енергоефективного виробництва хліба з лікувально-профілактичними характеристиками. Одержані математичні залежності енергоспоживання від чинників технологічного процесу: випікання хліба, продуктивності, швидкості стрічки тунельної печі, сили борошна та витрат газу. Побудовано модель причинно-наслідкових зв'язків питомих витрат електрики зі змінними, які характеризують температурні режими, вологість в пекарній камері, витрати тепла, інтегральні показники якості стадій дозування борошна, приготування опори, тіста, вистоювання, випікання, заморожування. Визначено оптимальні режими випікання хліба та побудовано компоненти оптимального компромісного режиму випікання хлібу. Запропоновано систему інтелектуального управління енергоспоживанням хлібозаводу. В цій системі використані автоматизовані системи управління енергоспоживанням кожної зі стадій виробництва хліба, а також багатовимірні нечіткі логічні регулятори (БНЛР). Ці адаптивні локальні системи управління технологічними процесами в комбінації з локальними системами управління електроспоживанням по кожній стадії виробництва хліба визначають оптимальні рішення щодо замовлення активної та реактивної потужностей підприємства в періоди обмеження потужності енергосистеми.

Ключові слова: формалізація, ресурси, автоматизоване управління.

V. KHOROLSKY, O. KOPAYHORA, Y. HAVRYSHKEVYCH, A. BOYCHENKO
Donetsk National Universities of Economics and Tradenamed after Mykhailo Tugan-Baranovsky

SYSTEM OF OPTIMAL MANAGEMENT OF PANIFICATION ON ENERGY CONSUMPTION

The method of formalizing technological situations and strategies for identifying energy efficient production of bread with therapeutic and preventive characteristics is developed. Mathematical dependences of energy consumption on the factors of technological process such as bread baking, productivity, speed of the tunnel kiln ribbon, flour force and gas consumption are obtained. The model of the reason-consequent relationship of the specific costs of electricity with the variables that characterize: temperature regimes, humidity in the bakery chamber, heat consumption, integral indicators of quality of stages of batching of flour, preparation of support, dough, standing, baking, freezing is constructed. The optimal modes of bread baking are determined and the components of the optimal - compromise mode of bread baking are constructed. The system of intelligent management of energy consumption of the bakery is proposed. This system uses automated energy management systems for each of the bread production stages, as well as multi-dimensional fuzzy logic controllers (MDFLC). These adaptive local process control systems, in combination with local power management systems at each stage of bread production, determine the optimal solutions for ordering the active and reactive power of an enterprise during periods of power system power limitation.

Keywords: formalization, resources, automated control.

Постановка проблеми. Стратегічною метою розвитку харчової промисловості України до 2030 року є забезпечення населення країни безпечною сільськогосподарською продукцією, підвищення якості харчів до стандартів країн ЄС і гарантування високих стандартів життєзабезпечення для регіонів з техногенним забрудненням.

Стратегічна концепція енергоефективності підприємств промислового комплексу України до 2035 року [1] є основою для підтримання фізичної і особливо економічної доступності щодо одержання громадянами країни безпечних еколого чистих харчових продуктів в об'ємах й асортименті, які відповідають встановленим раціональним нормам споживання харчових продуктів й необхідних для активного і здорового образу життя. Забезпечення безпечними продуктами харчування гірників, воїнів ЗСУ, дітей і населення, що проживає на забруднених територіях, спеціальними продуктами харчування вимагає від науковців розробки інноваційного енергоефективного обладнання з цифровими системами інтелектуального управління [2, 3]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на розширення запровадження інноваційного обладнання хлібопекарень, інтелектуалізації процесів виробництва хлібобулочних виробів, на наш погляд, недостатньо вивченими є питання енергоефективності цих процесів, управління виробництвом продукції з мінімізацією енергозатрат, та розробки алгоритмів управління інтелектуальними системами енергоспоживання. Це пояснюється, зокрема, відсутністю надійних проектних рішень щодо розробки технологічного обладнання з високим рівнем енергоефективності. Аналіз публікацій вітчизняних вчених: А.П. Ладанюк, В.Г. Трегуб, І.В. Ельперін, В.Д. Цюцюра, Л.Я. Ауерман, В.М. Хроменков, В.Г. Мирончук, І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов, А.І. Українець, С.С. Шаруда, В.Д. Кишенько [3–8], – свідчить про відсутність дослідження питань комп'ютерного моделювання процесу випічки хліба за критерієм мінімізації енергозатрат в технологічній системі: дозування – опара – тісто – випікання. Викладене вище зумовлює актуальність обраної теми досліджень, спрямованої на розробку алгоритмів цифрового управління енергоефективністю хлібобулочних виробів за критерієм мінімізації питомих енергозатрат.

Метою статті є розробка математичної моделі енергоефективності технологічних процесів виробництва хліба на базі інтелектуальних систем управління енергоспоживанням хлібозаводу.

Виклад основного матеріалу. В Україні в останні п'ять років почали впроваджуватись пекарні з високим рівнем автоматизації. Розроблена і успішно впроваджується концепція сучасного економічно-ефективного централізованого виробництва хліба та хлібобулочних виробів з випічкою та заморожуванням.

Виробництво хліба є досить складною виробничою системою, стан якої описується великою кількістю технологічних показників. Ці показники утворюють складні взаємозв'язки і можуть мати протилежні тенденції зміни в процесі функціонування системи [2, 3].

Подібна багатокритеріальність процесу випікання хліба викликає природне прагнення знайти такі технологічні, організаційні та технічні рішення, які дозволяють одночасно цілеспрямовано змінювати ряд показників, забезпечуючи в кінцевому результаті підвищення ефективності виробництва і зниження енерговитрат, тобто оптимізувати режим електроспоживання хлібокомбінату.

У даному випадку під оптимізацією розуміється таке управління режимами споживання електроенергії, за якого деякий критерій якості управління на заданому інтервалі часу досягає, в умовах заданих обмежень, свого екстремального (максимального чи мінімального) значення. У загальному вигляді завдання формулюється таким чином:

$$Y = f(X) \rightarrow \text{ext} \quad (1)$$

де

$$X = \{x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

При виборі та формулюванні мети оптимізації (1) як захід ефективності, як правило, розглядаються економічні (собівартість продукції, збиток, прибуток) або технічні (продуктивність, витрата електроенергії та ін.) показники [3].

Система обмежень (2) дозволяє виділити з безлічі варіантів режими, допустимі регламентом технологічного процесу, серед яких і ведеться пошук оптимального рішення. Ці обмеження можуть виражатися рівністю і нерівностями або логічними співвідношеннями, при цьому робочий діапазон зміни параметрів процесу задається у вигляді двосторонніх балансових обмежень, а структура виробничих зв'язків – у вигляді аналітичних або емпіричних залежностей [3].

Визначення оптимальних режимів здійснюється за допомогою підстановки в цільову функцію векторів обмежень, що відповідають значенням конкретних умов даного промислового об'єкта, а також зовнішніх умов, що задаються керуючою системою більш високого рангу. При цьому в області енергоспоживання промислових підприємств існує ряд специфічних особливостей, що ускладнюють вирішення завдання оптимізації [4–8].

До них можна віднести наступне:

- 1) Високу розмірність розв'язуваної задачі та інтегральні критерії якості;
- 2) Невизначеність вихідних даних.
- 3) Ймовірнісний характер зміни параметрів процесу. Реальні виробничі об'єкти перебувають під впливом випадкових збурень, тому ефективність оптимальних рішень виявляється проблематичною, особливо в умовах виробництва з жорсткими обмеженнями енергетичних ресурсів.

Всі ці зауваження повною мірою відносяться і до виробництва хліба. По-перше, для нижнього рівня управління (окремих апаратів та машин), існує кілька показників, що відображають ефективність використання основних елементів виробничого процесу: обладнання, сировини і енергоресурсів. Іншими словами, метою оптимізації процесу є отримання найкращого співвідношення між кількістю і якістю виробленого хліба з одного боку, і матеріальними і енергетичними витратами з іншого.

По-друге, в якості математичного опису процесу виробництва хліба використовуються статистичні моделі електроспоживання, оскільки аналітичний висновок цільових функцій практично неможливий в силу своєї трудоемкості і нестачі вихідних даних. Крім того, неповні вихідні дані не дозволяють однозначно описати стан об'єкта при значних відхиленнях режиму роботи від усталеного (спочатку досліджуваного) і екстраполювати отримані залежності на область оптимальних рішень. Тому для більш коректного рішення задачі оптимізації пропонується застосувати математичний апарат теорії нечітких множин [8–10].

Переважна частина моделей прийняття рішення в нечітких умовах носить нормативний характер і являє собою формалізацію етапу вибору, коли безліч альтернатив, критерії, цілей та обмеження вважаються заданими. При цьому, відповідно до класифікації, виділяється кілька типів нечіткої функції: нечітко обмежена функція, нечітке розширення чіткої функції, нечітка функція від чітких змінних і чітка функція від нечітких змінних [9].

У випадку завдання нечіткої оптимізації формулюється таким чином: знайти такий вектор $X = (x_1, \dots, x_n)$, для якого:

$$\tilde{y} = \tilde{f}(X) \rightarrow \text{ext} \quad (3)$$

за умов:

$$\tilde{\varphi}_i(X) \subseteq \tilde{B}_i, \quad i = \overline{1, m}; \quad (4)$$

де $\tilde{f}(X)$ – нечітка цільова функція; ext – нечіткий екстремум; $\tilde{\varphi}_i(X)$ – нечіткі функції-обмеження; \tilde{B}_i – нечіткі числа-обмеження. У класичних задачах оптимізації максимум або мінімум функції

$f(x)$ в заданій області досягається в певній точці x^* . У задачах нечіткої оптимізації потрібно знати поведінку функції не тільки в точці x^* , але і в її околі. Для цієї мети використовується поняття максимізуючої і мінімізуючої множини.

Нехай $f(x)$ – реальна функція, визначена на множині X . Припустимо, що вона обмежена зверху $\sup(f)$ і знизу $\inf(f)$. Максимізуюча множина M функції $f(x)$ є нечіткою множиною з функцією приналежності:

$$\mu_M(x) = \frac{f(x) - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)}, \quad \forall x \in X. \quad (5)$$

Нечіткий максимум $f(M)$ функції $f(x)$, тобто нечітка множина на Y , є образом максимізуючої множини при відображенні f з функцією приналежності:

$$\mu_{f(M)}(y) = \sup_{x \in f^{-1}(y)} \mu_M(x); \quad (6)$$

де Y – область змін функції $f(x)$.

Мінімізуюча множина функції $f(x)$ визначається як максимізуюча множина функції $(-f(x))$.

Для реального промислового підприємства, крім мінімуму енерговитрат, є кілька близьких за цінністю критеріїв управління: продуктивність, якість продукції та ін., що обумовлено комплексністю кінцевих показників виробництва. Це повною мірою відноситься і до виробництва хліба, де критеріями управління, крім мінімуму енерговитрат, може бути максимум продуктивності і якості хліба та інші показники.

За Белманом – Заде [9, 10] задача нечіткої оптимізації в умовах декількох цілей розв'язується на основі принципу злиття, тобто нечітке рішення D визначається як результат операції перетину нечітких множин цілей G і обмежень C :

$$D = G_1 \cap \dots \cap G_n \cap C_1 \cap \dots \cap C_m; \quad (7)$$

де

$$\mu_D = \mu_{G_1} \wedge \dots \wedge \mu_{G_n} \wedge \mu_{C_1} \wedge \dots \wedge \mu_{C_m} = \min(\mu_{G_1}, \dots, \mu_{G_n}, \mu_{C_1}, \dots, \mu_{C_m}); \quad (8)$$

Багатокритеріальну оптимізацію в нечіткому середовищі можна представити у вигляді системи:

$$\langle X, C_1, \dots, C_n, L \rangle, \quad (9)$$

де X – універсальна множина альтернатив; L – решітка; $C_i (i = 1, \dots, n)$ – критерії оптимізації.

Нечітка постановка завдання багатокритеріального вибору передбачає, що відома множина порівнюваних альтернатив $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ і множина критеріїв порівняння $C = \{C_1, \dots, C_n\}$, причому нечітка оцінка альтернативи A_j за критерієм C_i характеризується функцією приналежності $\mu_{R_{ji}}(r_{ji}), r_{ji} \in R$. Якщо всі критерії розглядати як рівнозначні і порівнянні, то відповідно до принципу злиття (11) маємо набір:

$$\langle X, D, L \rangle,$$

де

$$D = C_1 \cap \dots \cap C_n; \quad (10)$$

тобто один з варіантів перетину нечітких множин цілей.

При знаходженні рішення рівні приналежності в оптимальній множині визначаються у вигляді перетину нечітких оцінок R_j з так званою максимізуючою множиною M^* , функція належності якої

$$\mu_{M^*}(r) = [r / r_{\max}] \quad (11)$$

відображає ступінь наближення поточного значення оцінки до максимально можливого:

$$r_{\max} = \sup \left(\bigcup_{j=1}^m \sup \mu_{R_j}(r_j) \right) \quad (12)$$

Таким чином, в якості нечіткої оптимальної альтернативи береться екстремум перетину (10)

Оскільки працювати з сімействами множин досить важко, бажано апроксимувати нечітку множину чіткою, тому розкладемо нечітку множину цілі на ряд множин рівня і представимо задачу нечіткого математичного програмування у вигляді сімейства звичайних задач оптимізації:

$$f^{(\alpha_i)}(x) \rightarrow \text{ext} \quad (13)$$

за обмежень:

$$A(x) \leq B; \quad x \geq 0, \quad (14)$$

де $\alpha \in [0, 1]$, $\mu_{\tilde{f}}(f) \geq 1 - \alpha$.

Таким чином, цільова функція максимізується (мінімізується) на множині тих альтернатив, які зі ступенем не меншою α вважаються допустимими у вихідній задачі.

Окремим випадком багатокритеріального підходу є задача лінійної векторної оптимізації, коли попередньо знайдені найкраще і найгірше рішення служать границями нечітких діапазонів в задачі нечіткого лінійного програмування [9, 10]. При цьому вихідні дані групуються в матрицю можливих рішень (матрицю втрат), представлену в табл. 1, рядки якої містять опис альтернатив A_j , а стовпці відповідають критеріям C_i .

Елементи матриці з функцією приналежності (11) виражають кількісну невідповідність технологічного режиму A_j відносно критерію C_i , тобто показують: яка частка досліджуваного показника втрачається, якщо здійснюється режим A_j замість оптимального для даного критерію режиму A_i .

Для зіставлення оцінок за ознаками різної природи втрати нормалізуються за формулою:

$$\bar{r}_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{i \min}}{r_{i \max} - r_{i \min}}; \tag{15}$$

де r_{ij} – поточна оцінка за i -ю ознаці, $[r_{i \max}, r_{i \min}]$ – діапазон допустимих значень за i -ю ознакою.

Таблиця 1

Загальний вид матриці можливих рішень

Ознаки \ Варіанти	C_1	C_2	...	Втрати (ступінь ризику)
A_1	μ_{11}	μ_{12}	...	
A_2	μ_{21}	μ_{22}	...	
...	
A_m	μ_{m1}	μ_{m2}	...	
Еталонна оцінка	μ_{01}	μ_{02}		
Вагові коефіцієнти ознак	w_1	w_2	...	$\sum_{i=1}^n w_i = 1$

Вибір конкретного рішення із зазначеної множини здійснюється методом цільового програмування, ідея якого полягає у знаходженні рішень, розташованих якомога ближче до вектора одночасно недосяжних цілей (ідеальної точки) [9–11]. У загальному вигляді правило вибору найкращого варіанту може бути записано:

$$D(\omega, A) = \sum_{i=1}^n \omega_i (C_i) \cdot \rho(A_j, A_{em}), D_{ef} = \min D(\omega, A_j); \tag{16}$$

де $\omega_i (C_i)$ – вагові коефіцієнти ознак, $\rho(A_j, A_{em})$ – узагальнений показник відмінності поточної та еталонної оцінок за i -ю ознакою.

У класичних задачах багатоцільової оптимізації для пошуку оптимально-компромісного рішення використовуються елементи теорії ігор, коли всі розглянуті варіанти рішень описуються у вигляді платіжної матриці у грі двох осіб, а завдання зводиться до визначення такої оптимальної стратегії першого гравця, за якої очікувані втрати r_{ij} по відношенню до всіх критеріїв C_i були б мінімальними.

В умовах невизначеності пошук оптимального рішення утруднений тим, що кожному варіанту рішення в загальному випадку відповідає не одне значення оціночної функції r_{ij} , а деяка множина. Тому нечітка платіжна матриця, що представляє собою синтез теорії ігор і теорії нечітких множин, містить для кожного критерію вибору сукупність оцінок – для кожного α -зрізу нечіткої цільової функції [8, 9] (табл. 2).

Нечітка платіжна матриця для задачі багатоцільової оптимізації

Варіанти \ Ознаки	C_1	C_2	...	C_n
A_1	$\mathbf{0}$	$\alpha_i : r_{1,2}^{\alpha_i}$...	$\alpha_i : r_{1,n}^{\alpha_i}$
A_2	$\alpha_i : r_{2,1}^{\alpha_i}$	$\mathbf{0}$...	$\alpha_i : r_{2,n}^{\alpha_i}$
...
A_m	$\alpha_i : r_{m,1}^{\alpha_i}$	$\alpha_i : r_{m,2}^{\alpha_i}$...	$\mathbf{0}$

Тоді за аналогією з класичною платіжною матрицею умова оптимізації може бути сформульована таким чином: знайти сукупність $C^{\alpha_i} \rightarrow \max$ (на кожному α -рівні) за умови:

$$\begin{cases} -\lambda_1^{a_k} r_{11}^{a_k} - \lambda_2^{a_k} r_{21}^{a_k} - \dots - \lambda_m^{a_k} r_{m1}^{a_k} \geq C^{a_k} \\ -\lambda_1^{a_k} r_{12}^{a_k} - \lambda_2^{a_k} r_{22}^{a_k} - \dots - \lambda_m^{a_k} r_{m2}^{a_k} \geq C^{a_k} \\ \dots \\ -\lambda_1^{a_k} r_{1n}^{a_k} - \lambda_2^{a_k} r_{2n}^{a_k} - \dots - \lambda_m^{a_k} r_{mn}^{a_k} \geq C^{a_k} \\ -\lambda_1^{a_k} r_{12}^{a_k} - \lambda_2^{a_k} r_{22}^{a_k} - \dots - \lambda_m^{a_k} r_{m2}^{a_k} \geq C^{a_k} \\ \lambda_1^{a_k} + \lambda_2^{a_k} + \dots + \lambda_m^{a_k} = 1 \\ \lambda_j \geq 0; (j = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (17)$$

де $\lambda_j^{\alpha_i}$ – компоненти оптимальної стратегії (на даному α -рівні); C^{α_i} – ціна гри (на даному α -рівні), $r_{ij}^{\alpha_k}$ – нечіткі значення оціночної функції (втрат) на даному α -рівні. Кожне рішення зводиться до

знаходження максимального значення функції $F = \sum_{j=1}^m y_j$, де $y_j = \lambda_j / C$ за умов:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n r_{ij} \cdot y_j \geq 1 & (i = \overline{1, n}); \\ y_j \geq 0 & (j = \overline{1, m}); \end{cases} \quad (18)$$

Перевага такого підходу в тому, що він дозволяє користуватися звичайними обчислювальними методами знаходження оптимальних рішень, зберігаючи переваги нечіткої постановки завдання – усунення невизначеності вихідних даних і гнучкість моделі управління.

Розглянемо приклад оптимізації режиму електроспоживання для нижнього рівня управління виробництва – окремої тунельної печі. Технологічний процес підготовки борошна й виробництва опаритіста є проміжною ланкою в довгому технологічному ланцюжку, а продуктивність всіх наступних стадій технологічного циклу виробництва хліба залежить від сили борошна F_1 , $F_{спів}$ – співвідношення сортів борошна, F_{qr} – витрати пару, P – тиск розрідження. Тому випуск інноваційного виду харчової продукції планується на максимально можливому рівні, і виникає необхідність оптимізації за критерієм максимуму Q_{\max} випуску заморожених сортів хліба.

Для забезпечення високих техніко-економічних показників виробництва хліба необхідно, щоб борошно мало високий вміст клейковини, низьку складову забруднюючих компонентів, тому третім критерієм управління буде сукупність показників якості хліба. Розглянемо ці показники докладніше. Хімічний та органолептичний аналіз складу хліба в основному залежить від якості сировини і визначається за складом опари, і в першу чергу, часткою вмісту в ній додатків – продуктів підготовки борошна. Збільшення частки збагаченого тіста інгредієнтами, призводить до зростання якості хліба. Як показали дослідження закономірностей технологічного процесу, зазначені критерії якості хліба є взаємозалежними, тобто збільшення вмісту інгредієнтів, як правило, супроводжується зменшенням часу підготовки опаритіста тощо [3–5].

Отже, в оптимізаційних розрахунках будемо використовувати єдиний (комплексний) критерій якості хліба, який найбільш просто і достовірно визначається при експрес-аналізі вмісту інгредієнтів у хлібі. При цьому показники якості $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$ технологічних стадій (дозування, бродіння опари, замісу тіста та бродіння, вистоювання тістових заготовок, випікання хліба й замороження (k_8)) можна задати у вигляді додаткових балансових обмежень.

Таким чином, аналіз особливостей виробництва хліба виявив, як мінімум, три основних критерії, які

можуть використовуватися при знаходженні оптимальних технологічних режимів: максимум продуктивності тунельної печі, якості готового хліба і мінімум енергозатрат.

Умова мінімуму енергозатрат записується у вигляді нечіткої цільової функції. Наприклад, для тунельної печі № 1 ПАТ «Криворіжхліб» вона має вигляд:

$$W = b_1 \cdot H + b_2 \cdot Q_{\text{хліб}} + b_3 \cdot t_{\text{заг}} + b_4 \cdot V_{\text{стр.}} + b_5 \cdot \text{Інгр} + b_0 \rightarrow \min \quad (19)$$

Рівняння, що описують цільові функції продуктивності тунельної печі і якості хліба, можуть бути знайдені класичними методами множинної регресії або також з використанням методів нечіткої ідентифікації. У простому випадку для тієї ж печі № 1 отримані наступні залежності:

$$Q_{\text{хліб}} = 263,9 \cdot V_{\text{стр.}} + 9,116 \cdot F_1 + 40,15 \cdot \text{Інгр} + 0,05332 \cdot t_{\text{заг.}} - 480,9 \rightarrow \max \quad (20)$$

$$F_1 = -2,21 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{хліб}} + 0,279 \cdot F_{\text{спів.}} - 1,272 \cdot \text{Інгр} + 40,69 \rightarrow \max \quad (21)$$

де F_1 і Інгр – сила борошна й вміст інгредієнтів у відсотках хліба; H – параметр, який характеризує витрати газу; $F_{\text{спів.}}$ – витрати повітря та газу; $Q_{\text{хліб}}$ – продуктивність тунельної печі.

$V_{\text{стр.}}$ і $t_{\text{заг.}}$ – умови випікання: швидкість стрічки (м/хв.) і температура в горні тунельної печі (°C).

Адекватність запропонованих рівнянь експериментальним даним підтверджується значеннями F -критерія Фішера (для першого $F = 5,399$, для другого $F = 6,129$) і середньоквадратичної помилки (відповідно 3,08% і 2,64%). Таким чином, отримані рівняння множинної регресії цілком можуть використовуватися для вирішення завдання нечіткої оптимізації процесу виробництва хліба.

Необхідно відзначити суперечливість зазначених критеріїв. З рівнянь (20) і (21) видно, що для підвищення обсягів виробництва необхідна інтенсифікація процесу випікання, яка приведе до збільшення енергозатрат в результаті зростання навантаження газодуттєвих засобів. Підвищення якості хліба досягається за рахунок збільшення частки високозбагачених інгредієнтів і зниження швидкості випікання, при цьому зростають питомі енерговитрати і знижується продуктивність процесу. При цьому зниження енергозатрат супроводжується збільшенням продуктивності процесу і зменшенням часу випікання тістових заготовок, тобто скороченням часу підготовки опари та тіста до процесу вистоювання й випікання.

Наявність декількох суперечливих критеріїв обумовлює рішення задачі в два етапи: оптимізація за кожним критерієм окремо і знаходження режиму, оптимального (компромісної для всіх умов).

Для розрахунку коректного і реалізованого на практиці оптимального режиму необхідно задатися системою обмежень, яка описує допустимий робочий діапазон керованих параметрів процесу, регламентований технологічними інструкціями, стандартами та іншими нормативними документами та експертними оцінками обслуговуючого персоналу (табл. 3). Подібні чисельні обмеження в теорії управління називають балансовими і математично формують у вигляді одно- і двосторонніх нерівностей [9, 10].

Таблиця 3

Допустимі межі зміни технологічних і якісних показників процесу виробництва хліба на прикладі тунельної печі ПАТ «Криворіжхліб»

Технологічні показники	Допустимі значення	Одиниці виміру
$V_{\text{стр.}}$ – Швидкість стрічки	1,5–2,5	м/хв
$t_{\text{заг.}}$ – Температура загоряння	160–320	°C
H – витрати газів	$(8-11) \cdot 10^3$	кПа
$k_{\text{тонк.}}$ – Частка лікувальних інгредієнтів	35–40	%
$K_{\text{тісто}}$ – вміст вологи в тісті	25–30	%
V_i – вологість м'якуша	50–60	%
K_m – кислотність м'якуша	10–15	%
P_m – пористість м'якуша	1,2–1,8	віднос. од.

Слід зазначити, що вказані змінні не є незалежними, оскільки довільна зміна будь-якого параметра позначається на інших показниках процесу. Авторами монографії [3] доведено, що питомі витрати електроенергії E_1 у виробництві хліба залежить від цілого ряду технологічних і режимних параметрів: сили борошна, висоти хліба, розрідження в збірному колекторі, швидкості стрічки та ін. Тобто виробництво хліба являє собою складну систему технологічних, теплотехнічних та енергетичних процесів, яка і визначає структуру зв'язків технологічних і режимних факторів. Аналіз структури зв'язків проводиться на підставі теоретичних і професійних (експертних) оцінок. Схематично вона може бути представлена у вигляді спрямованого графа (рис. 1), вершини якого відповідають розглянутим параметрам процесу, а дуги вказують напрям причинно-наслідкових зв'язків.

На рис.1 можна виділити ряд характерних взаємозв'язків. Наприклад, вище нами доведено, що продуктивність ($Q_{\text{хліб}}$) і енергоспоживання (W) та питомі витрати електрики (E_1) тунельної печі залежать від витрат газу в газовідвідному тракті (H) і швидкості стрічки ($V_{\text{стр.}}$), витрат тепла в пекарній камері $q_{e.m.}$,

вологості в пекарній камері – M , тиск розрідження T .

Однак ці режимні параметри в свою чергу залежать від складу і газопроникності пари, кількості інгредієнтів і стану тіста ($k_{інгр.}$ і $k_{тіст.}$) і температури в горні (t_1, t_2, t_3, t_4). Ці параметри впливають на кількість втрат тепла ($q_{в.т}$) і температуру відхідних газів ($Q_{п/г}$, $m/г$), які не повинні перевищувати значень, допустимих для даного типу печі. Склад опари ($K_{оп}$, $K_{тіста}$) теоретично повинен регламентуватися наявною сировиною F_1 і змінюється за рахунок режиму випікання ($k_{інгр.}$, $t_{заг.}$, $V_{стр.}$, H , $q_{в.т}$). Таким чином, практично всі змінні процесу входять у декілька причинно-наслідкових ланцюгів, що відображають різні виробничі зв'язки. Під час розв'язання задачі оптимального управління функціональна схема реального процесу задається у вигляді так званих структурних обмежень – математичних (функціональних або регресійних) рівнянь, які описують найбільш суттєві причинно-наслідкові зв'язки процесу. Загальна структура обмежень задачі оптимізації енергоспоживання тунельної печі наведена на рис. 2.

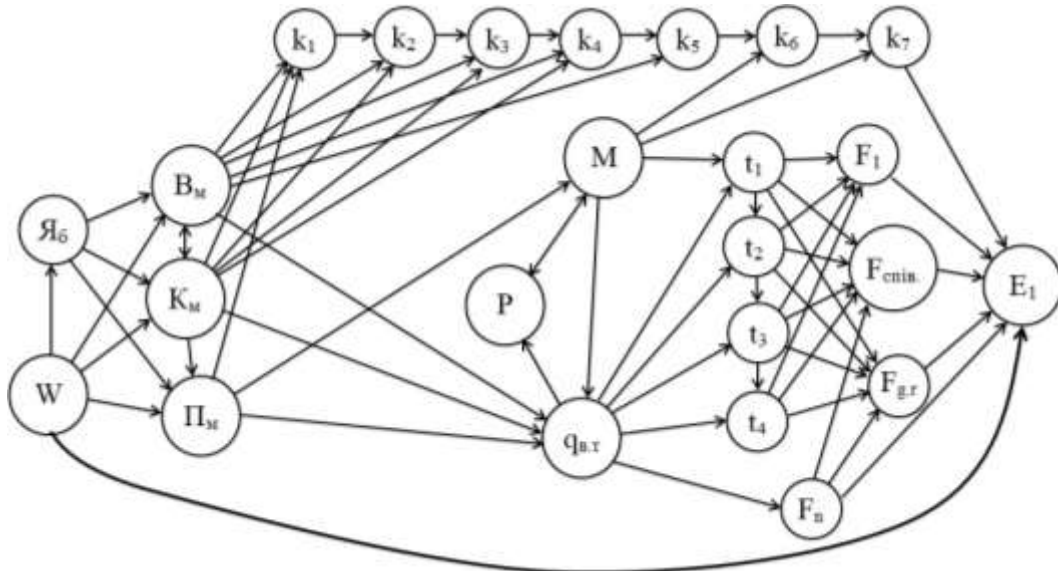


Рис. 1. Граф-модель оптимізації витрат електроенергії.

Математично вона записується у вигляді системи рівнянь виду:

$$W = 0,9846H + 2,349Q_{хліб} + 2,966t_2 + 922V_{стр} + 41,69F_1 - 634 \rightarrow \min \tag{22}$$

де

$$Q_{хліб} = 263,9V_{стр} + 9,116F_1 + 40,15K_{інгр} + 0,053t_3 + 1,597 \geq Q_{хліб\ план} \tag{23}$$

$$V_{стр} = (0,616Q_{хліб} + 0,041H + 2,14t_1 - 14,47K_6 - 35,59K_7) \tag{24}$$

$$0,9 \leq V_{стр} \leq 2,5 \text{ м/хв.}$$

$$H = 0,1791Q_{хліб} - 2,107t_1 + 20,15W_x + 23,01 \tag{25}$$

де W_x – вологість хліба.

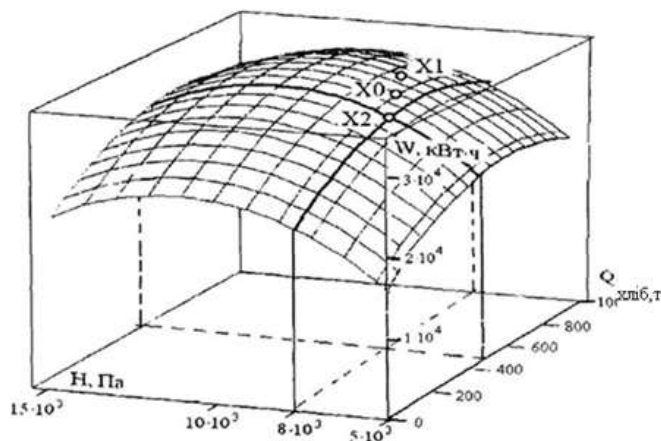


Рис. 2. Геометрична інтерпретація оптимізації енергоспоживання залежно від продуктивності тунельної печі і розрідження в газовідвідному тракті

Геометрично дану задачу можна представити у вигляді багатовимірної поверхні, на якій точка оптимуму має найменшу ординату уздовж осі W . Приклад такої залежності в проєкціях на осі $Q_{\text{хліб}}$ і H (при фіксованих значеннях інших параметрів процесу) наведено на рис. 2. Як видно з діаграми, в даному випадку мінімум функції електроспоживання спостерігається за мінімально допустимих (граничних) значень обсягу виробництва і розрядження в газовідвідному тракті.

В цілому, завдання багатоцільової оптимізації процесу формалізується наступним чином при обмеженнях:

$$\begin{cases} Q_{\text{хліб}}(x_i, y_i) \rightarrow \max \\ K_{\text{хліб}} \rightarrow \text{заданих значень} \\ W(x_i, y_i) \rightarrow \min \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} x_{i.\min} \leq x_i \leq x_{i.\max}; \\ y_{j.\min} \leq y_j \leq y_{j.\max}; \end{cases} \quad (27)$$

де $x_{i.\min} \dots x_{i.\max}$ і $y_{j.\min} \dots y_{j.\max}$ – допустимі діапазони зміни параметрів технологічного процесу виробництва хліба; $y_j(x_i)$ – функціонали, що відображають взаємозв'язки параметрів процесу.

Відповідно до методики нечіткої оптимізації, результати вирішення даної задачі наведені в табл. 4 у вигляді α -зрізів нечітких множин з характерними рівнями приналежності $\pm 0,5$; $\pm 0,8$ і 1 . При цьому порівняння режимів, оптимальних для різних критеріїв управління, підтверджує їх суперечливість, так як оптимальні значення досягаються при різних поєднаннях параметрів процесу. Наприклад, для режиму ($Q_{\text{хліб}} = \max$) характерні оптимальні чинники: температура випікання хліба, швидкості конвеєрної стрічки і співвідношення газ – повітря, гірша якість хліба в режимах ($W = \min$) і (Якість = Я задане) спостерігається мінімальна продуктивність тунельної печі.

Таблиця 5

Нечітка платіжна матриця для задачі багатоцільової оптимізації процесу виробництва хліба (на прикладі тунельної печі № 1 ПАТ «Криворіжхліб»)

Критерій \ Змінна	X_1 $Q_{\text{хліб}}$	X_2 Якість = max	X_3 $W = \min$
$Q_{\text{хліб}}$	0	-0,326	-0,326
Якість	-0,022	0	-0,010
W при...			0
$\alpha = -0,5$	-0,608	-0,295	
$\alpha = -0,8$	-0,570	-0,278	
$\alpha = 1$	-0,536	-0,260	
$\alpha = 0,8$	-0,503	-0,245	
$\alpha = 0,5$	-0,473	-0,230	

Тому, відповідно до викладеної вище методики, для знаходження оптимально-компромiсного режиму за всіма критеріями складаємо матрицю втрат з нечіткими елементами, яка наведена в табл. 5.

Аналіз матриці показує, що для всіх розглянутих режимів характерно порівняно невелике відхилення від оптимальних значень за показниками якості хліба. У той же час велика різниця розрахункових значень електроспоживання між режимом X_0 ($W = \min$) і рештою вказує на значну чутливість цього критерію до зміни параметрів технологічного процесу.

Оптимально-компромiсний режим визначається з використанням елементів теорії ігор [9]. Для розглянутого випадку рішення наведено в табл. 6, а значення технологічних параметрів – в табл. 4 і на рис. 2, де оптимально-компромiсний режим позначений точкою X_3 .

Особливістю сучасного управління електроспоживанням підприємствами харчової промисловості є впровадження систем енергоменеджменту і автоматизованих систем контролю і обліку електроенергії (АСКОЕ).

Таблиця 6

Компоненти оптимально-компромiсного режиму процесу випікання хліба

Критерій \ Рівень α	X_1 $Q_{\text{хліб}} = \max$	X_2 Якість = max	X_3 $W = \min$	Ціна, грн.
-0,5	0,349	0	0,651	-0,212
-0,8	0,364	0	0,636	-0,207
1	0,378	0	0,622	-0,203
0,8	0,393	0	0,607	-0,198
0,5	0,408	0	0,592	-0,193

Усі криворізькі підприємства харчової промисловості розраховуються з ПАТ «Дніпрообленерго» за спожиту електроенергію за ринковим тарифом [3, 12].

Перехід на цей тариф стимулює енергоменеджмент підприємств харчової промисловості до впровадження інтелектуальних систем управління технологічними лініями виробництва хліба шляхом узгодженого управління технологічними процесами виробництва замороженого хліба різних сортів. Інтелектуалізація і адаптація процесів виробництва продукції забезпечує виробництво продукції заданої якості і мінімізацію затрат електроенергії з врахуванням збурень характеристик вхідної сировини, її спектральних характеристик якості, які виникають в результаті планування постачання різних сортів муки, жирів тощо.

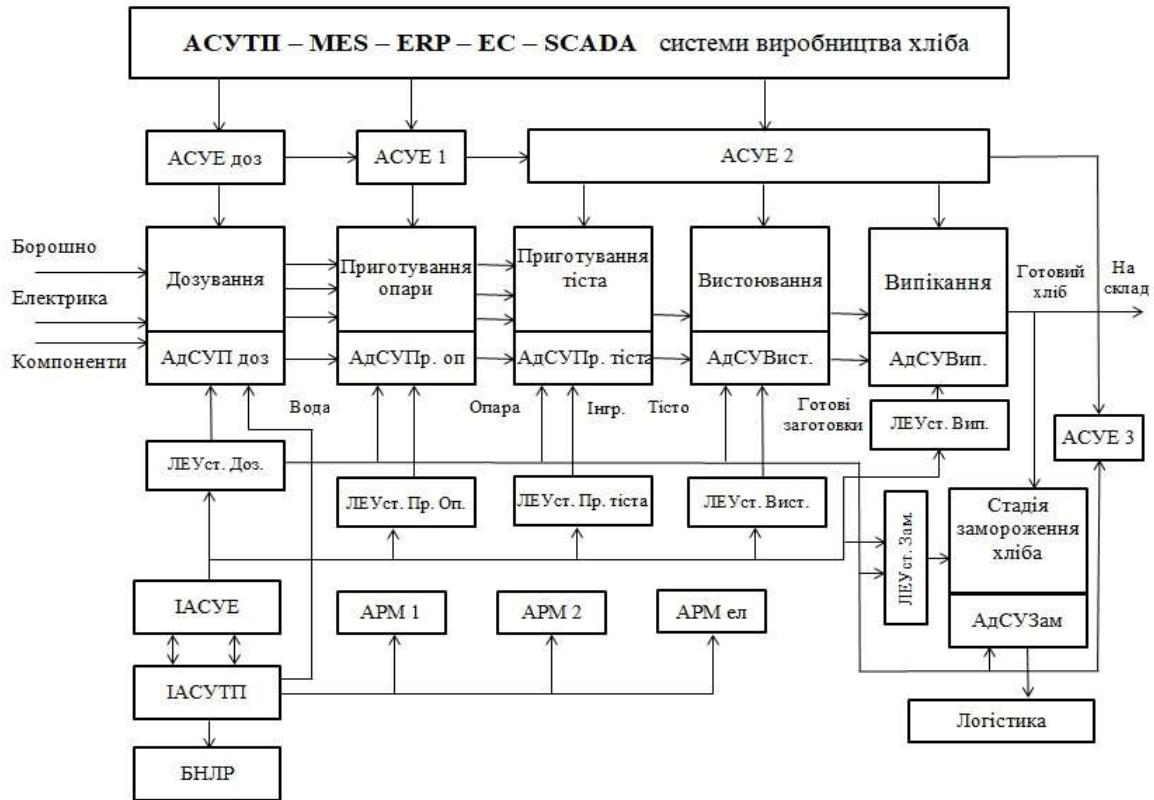


Рис. 3. Система інтелектуального управління енергоспоживанням хлібозаводу

На рис. 3 наведено систему інтелектуального управління енергоспоживанням хлібозаводу. Архітектура такої ІАСУЕ складається із наступних підсистем автоматизованої адаптивної системи управління дозуванням, АСУЕ₁ приготування опари, АСУЕ₂ приготування тіста, вистоювання і випікання, АСУЕ₃ – стадії замороження хліба. Автоматизована система управління технологічного процесу виробництва хліба складається із локальних адаптивних систем управління процесами: дозування, приготування опари, тіста, вистоювання, випікання, транспортування і стадії замороження хліба, розроблених на базі багатовимірного нечіткого логічного регулятора (БНЛР) [2, 3].

Кожна із цих стадій управляється локальними системами енергоспоживання ЛЕУ_{ст}ДОЗ, ЛЕУ_{ст}Пр.оп, ЛЕУ_{ст}Пр.тіста, ЛЕУ_{ст}Пр.вистоювання, ЛЕУ_{ст}Пр.випікання, ЛЕУ_{ст}Пр.заморожування з автоматизованих робочих місць АРМ₁, АРМ₂, АРМ_{ел}.

Інтегрована інтелектуальна система забезпечує оптимізацію виробництва портфеля замовлень споживачів продукції 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 інтегрованість ЕС з АСУТП – MES – ERP систем, що забезпечує узгоджену роботу управлінської та інформаційної підсистем АСУ підприємства щодо діагностики проблемних ситуацій, технологічно-енергетичних ситуацій і прийняття рішень щодо замовлення реактивної потужності P_r , активної потужності Q_i , команд на пошук оптимальних рішень щодо визначення стаціонарних енергорегуляторів (СЕР).

Таким чином, на основі досліджень параметрів споживання активної, реактивної потужностей для підприємств харчової промисловості розроблено інтелектуальну систему узгодженого управління електроспоживанням хлібозаводу в періоди обмежень енергосистемою потужностей по активному і реактивному навантаженню. Результати цього аналізу використані при побудові адаптивних процедур оперативного прогнозування електричних навантажень підприємства харчової промисловості, які ґрунтуються на статистичних методах і методах штучних нейронних мереж [3].

Висновки. На основі досліджень питомих параметрів електроспоживання для підприємств харчової промисловості виконано ідентифікацію та моделювання впливу технологічних змінних, які визначають процес виробництва хліба. Розроблено автоматизовану систему інтелектуального управління

електроспоживанням хлібозаводу з оптимізацією локальних енергетичних установок технологічних стадій дозування, приготування опари, тіста, вистоювання, випікання та замороження. Система дозволяє зменшити витрати виробництва продукції (борошна), води, газу інших інгредієнтів, контролювати параметри енергоефективності та якості хліба та максимізувати продуктивність енергетичного обладнання з врахуванням вартості електрики за рівень напруги та постачання (оптової ціни), що дозволяє виконати «точно у термін» замовлення споживачів.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року: безпека, енергоефективність конкурентоспроможність [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugoe/control/uk/doccatalogy/list?curzDiz=50359>.
2. Хорольський В.П. Інтелектуальна система управління та моніторингу робочих характеристик технологічного обладнання хлібобулочних заводів / В.П. Хорольський, Д.Ю. Ключев, С.М. Коржов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 6. – С. 55–62.
3. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів / В.П. Хорольський, Ю.М. Коренюк, А.В. Возняк, О.В. Омельченко, Д.П. Заїкіна, О.К. Копайгора, А.В. Шейна ; за ред. В.П. Хорольського. – Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д.О., 2019 – 204 с.
4. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : підруч. / А.П. Ладанюк, В.Г. Трегуб, І.В. Ельперін, В.Д. Цюцюра. – К. : Аграр. освіта, 2001. – 224 с.
5. Ауерман Л.Я. Технология хлебопекарного производства / Л.Я. Ауерман – СПб : Профессия, 2005. – 416 с.
6. Хроменков В.М. Технологическое оборудование хлебозаводов и макаронных фабрик / В.М. Хроменков. – СПб : ГЦОРД, 2014. – 496 с.
7. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / В.Г. Мирончук, І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов, А.І. Українець та ін. – Вінниця : Нова книга, 2007. – 640 с.
8. Шаруда С.С. Інтелектуальна система сценарного управління хлібопекарським виробництвом / С.С. Шаруда, В.Д. Кишенько // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 5/3(47). – С. 66–70.
9. Згуровский М.З. Интергрированные системы оптимального управления и проектирования : учебное пособие / Згуровский М.З. – К. : Вища школа, 1990. – 351 с.
10. Сироджа И.Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления / Сироджа И.Б. – К. : Наукова думка 2002. – 418 с.
11. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5-и т. Т. 5 Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
12. Логацький В.М. Удосконалення тарифної політики у сфері електроенергетики для досягнення центральної та макроекономічної збалансованості / В.М. Логацький // Економіка України. – 2019. – № 3. – С. 3–21.

References

1. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku: bezpeka, enerhoefektyvnist konkurentospromozhnist [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugoe/control/uk/doccatalogy/list?curzDiz=50359>.
2. Khorolskyi V.P. Intelktualna systema upravlinnia ta monitorynhu robochykh kharakterystyk tekhnolohichnoho obladnannia khlibobulochnykh zavodiv / V.P. Khorolskyi, D.Iu. Kliuiev, S.M. Korzhov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – № 6. – С. 55–62.
3. Intelktualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv / V.P. Khorolskyi, Yu.M. Korenots, A.V. Vozniak, O.V. Omelchenko, D.P. Zaikina, O.K. Kopaihora, A.V. Sheina ; za red. V.P. Khorolskoho. – Kryvyi Rih : FOP Cherniavskyyi D.O., 2019 – 204 s.
4. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti : pidruch. / A.P. Ladaniuk, V.H. Trehub, I.V. Elperin, V.D. Tsiutsiura. – K. : Ahrar. osvita, 2001. – 224 s.
5. Auierman L.Ia. Tekhnolohyia khlebopekarnoho proyzvodstva / L.Ia. Auierman – SPb : Professyia, 2005. – 416 s.
6. Hromenkov V.M. Tehnologicheskoe oborudovanie hlebozavodov i makaronnih fabrik / V.M. Hromenkov. – SPb : GCORD, 2014. – 496 s.
7. Myronchuk V.H. Obladnannia pidpriemstv pererobnoi ta kharchovoi promyslovosti / V.H. Myronchuk, I.S. Hulyi, M.M. Pushanko, L.O. Orlov, A.I. Ukrainets ta in. – Vinnytsia : Nova knyha, 2007. – 640 s.
8. Sharuda S.S. Intelktualna systema stsenarnoho upravlinnia khlibopekarskym vyrobnytstvom / S.S. Sharuda, V.D. Kyshenko // Skhidno-Yevropeiskyy zhurnalпередovykh tekhnolohii. – 2010. – № 5/3(47). – С. 66–70.
9. Zgurovskij M.Z. Intergrirovannye sistemy optimalnogo upravleniya i proektirovaniya : uchebnoe posobie / Zgurovskij M.Z. – K. : Visha shkola, 1990. – 351 s.
10. Sirodzha I.B. Kvantovye modeli i metody iskusstvennogo intellekta dlya prinyatiya reshenij i upravleniya / Sirodzha I.B. – K. : Naukova dumka 2002. – 418 s.
11. Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya : uchebnik v 5-i t. T. 5 Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod red. K.A. Pupkova, N.D. Egupova. – 2-e izd. pererab. i dop. – M. : Izdatelstvo MG TU im. N.E. Baumana, 2004. – 784 s.
12. Lohatskyi V.M. Udoshkonalennia taryfnoi polityky u sferi elektroenerhetyky dlia dosiahnennia tsentralnoi ta makroekonomichnoi zbalansovanosti / V.M. Lohatskyi // Ekonomika Ukrainy. – 2019. – № 3. – С. 3–21

Рецензія/Peer review : 19.1.2020 р.

Надрукована/Printed : 16.2.2020 р.

Стаття рецензована редакційною колегією