

В.Д. Кишенько, канд. техн. наук
С.С. Шаруда, канд. техн. наук

ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ УПРАВЛІННІ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Розглянуто причини виникнення багатокритеріальності при управлінні складними технологічними об'єктами та можливі шляхи її розв'язання. Наведено вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації на основі методу досяжних цілей.

Ключові слова: складна система, багатокритеріальна оптимізація, часткові критерії, невизначеність, метод досяжних цілей, конфлікти.

Одночасне та взаємопов'язане протікання основних процесів є серйозним фактором, що ускладнює кількісну оцінку хлібопекарського виробництва. Широкий діапазон зміни якості сировини суттєво впливає на перебіг технологічного процесу, і таким чином, здійснює постійні збурюючі дії, які ускладнюють управління процесом через значну невизначеність системи, для усунення якої можна використовувати управляючі дії на різних етапах технологічного процесу. Таким чином, однакові кінцеві результати функціонування технологічного процесу можна отримати при різних режимних параметрах та різній структурі технологічної схеми, що забезпечує широкий вибір управляючих дій при проектуванні технологічної схеми та при її аналізі з метою покращення системи управління. Але широкий вибір різних параметрів та режимів процесу при проектуванні технологічної схеми призводить до того, що перебрати всі можливі варіанти структури та вибрати оптимальні практично неможливо. Ця задача може бути вирішена при системному підході з використанням методів математичного моделювання, базових принципів сценарного підходу, багатокритеріальної оптимізації та сучасних інформаційних систем.

Метою функціонування систем виробництва хліба є максимальний вихід виробів найкращої якості. Вона реалізується послідовним виконанням ряду задач, головні з яких — оптимізація технологічного процесу та автоматичне управління ним, що забезпечує досягнення цілі функціонування.

Проблема вибору в складних системах управління, до яких відносять і хлібопекарське виробництво, © В.Д. Кишенько, С.С. Шаруда, 2010

Multipurpose appearing under complex technological objects management is reviewed. Possible solutions for multicriteria optimization is shown with example based on goal reaching method.

Key words: complex system, multicriteria optimization, partial criteria, vagueness, goal reaching method, conflicts.

стосується в першу чергу формування функціональної, технічної структури, програмного та інформаційного забезпечення. В складних системах управління визначити найкращий варіант за допомогою формалізованих методів не вдається, тобто вибір завжди приймається в умовах невизначеності, коли задача погано структурована. Процедура вибору в складних системах передбачає застосування спеціальних методів: залучення думок експертів з використанням нечіткої логіки, застосування комп'ютерних підсистем підтримки прийняття рішень, урахування множини варіантів та конкретної відповідальності: в складних системах завжди є особа, яка приймає рішення [5,6]. В основі всякого вибору лежить критеріальна оцінка, яка визначається як кількісно, так і якісно із залученням теорії нечітких множин.

Найбільш загальною математичною моделлю прийняття оптимального рішення є задача багатокритеріальної оптимізації, викликана такими причинами:

1. Необхідність забезпечення оптимальності технологічних параметрів об'єкта при різних умовах його функціонування, тобто забезпечення екстремальних значень критерію оптимальності при невизначеності умов, в яких доводиться працювати. При цьому невизначеність може мати або кількісний характер, виражений за допомогою параметра v , що приводить до задачі оптимізації

$$\min_{x \in D_x} Q(\bar{x}, v) \text{ для всіх } v \in [v^-, v^+], \quad (1)$$

де $Q(\bar{x}, v)$ — критерій оптимальності, D_x — допустима область зміни критерію;

або якісний характер, пов'язаний із зазначенням конкретних умов функціонування. В останньому випадку ефективність і якість роботи для кожного режиму можуть визначатися різними критеріями оптимальності.

Якщо невизначеність функціонування має кількісний характер, то задача оптимізації зводиться до задачі векторної оптимізації шляхом дискретизації критерію оптимальності $Q(\bar{x}, v)$ за параметром v і розглядання частинних критеріїв оптимальності функцій

$$Q_i(\bar{x}) = Q(\bar{x}, v_i), \text{ где } v_i \in [v^-, v^+] \quad (2)$$

Такий підхід до задачі оптимального функціонування дозволяє враховувати вплив зовнішніх факторів (температури, вологості й т.д.) на критерій оптимальності і обмеження управління.

2. Наступною причиною багатокритеріальності є множинність вимог до характеристик функціонуючої системи або її ділянки. Їх можна звести до системи нерівностей.

$$q_i(\bar{x}) \leq q_i^+, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

де q_i^+ — граничне значення i -ї технічної вимоги.

У цьому випадку частинні критерії оптимальності звичайно в явному вигляді відсутні і їх доводиться вводити за допомогою виразів:

$$Q_i(\bar{x}) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } q_i(\bar{x}) \leq q_i^+; \\ w_i(q_i(\bar{x}) - q_i^+), & \text{якщо } q_i(\bar{x}) > q_i^+. \end{cases} \quad (4)$$

Тут w_i — ваговий коефіцієнт, що враховує важливість i -го обмеження ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$).

Таким чином, розв'язок системи нерівностей зводиться до розв'язання задачі векторної оптимізації:

$$\begin{cases} Q_1(\bar{x}) \rightarrow \min(\max), \\ Q_2(\bar{x}) \rightarrow \min(\max), \\ \dots, \\ Q_n(\bar{x}) \rightarrow \min(\max), \\ g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1, \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2, \\ \dots, \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m, \\ d_j \leq x_j \leq D_j, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (5)$$

Існує багато методів розв'язку подібних задач, представлених в літературі [1, 2].

3. При постановці задачі оптимального управління одним з основних питань є вибір критерію оптимальності $Q(\bar{x})$. З одного боку, критерій повинен мати конкретний фізичний зміст, а з іншого боку — найповніше характеризувати об'єкт управління. Однак вимоги функціональної повноти важко задовольнити за допомогою тільки одного скалярного показника, тому що він звичайно описує конкретну властивість об'єкта. У зв'язку із цим доводиться розглядати сукупність показників $(Q_1, \dots, Q_n)$, кожний з яких має наочну фізичну інтерпретацію і дозволяє оцінити якість оптимального рішення $\bar{x}^*$ з різних поглядів.

Отже, необхідність забезпечення функціональної повноти показників, що конкретизують оптимальні властивості об'єкта управління при одночасній їхній фі-

зичній наочності приводить до багатокритеріальності. Наприклад, при оптимальному управлінні хлібопекарською піччю необхідно розглядати одночасно кілька частинних критеріїв оптимальності, які відображують різні властивості об'єкта, що приводить до наступної задачі векторної оптимізації:

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{x} \in D_x} Q_1(\bar{x}), \max_{\bar{x} \in D_x} Q_2(\bar{x}), \min_{\bar{x} \in D_x} Q_3(\bar{x}), \\ & \max_{\bar{x} \in D_x} Q_4(\bar{x}), \min_{\bar{x} \in D_x} Q_5(\bar{x}), \end{aligned} \quad (6)$$

де D_x — допустима область зміни критерію, $Q_1(\bar{x})$ — навантажувальна здатність, $Q_2(\bar{x})$, $Q_3(\bar{x})$ — статична завадостійкість, $Q_4(\bar{x})$ — продуктивність, $Q_5(\bar{x})$ — виробнича потужність. Оптимальний варіант повинен мати екстремальні значення за кожним із частинних критеріїв $(Q_1, \dots, Q_n)$.

4. У тих випадках, коли об'єкт управління складається з декількох взаємозалежних вузлів і блоків, оптимальність усього комплексу визначається ефективністю і якістю його окремих частин, кожна з яких може бути охарактеризована, принаймні, хоча б одним частинним критерієм оптимальності $Q_i(\bar{x})$.

У цьому випадку функціонування всього об'єкта можна вважати найкращим, якщо за рахунок вибору керованих параметрів $\bar{x}$ забезпечуються екстремальні значення всіх частинних критеріїв оптимальності як основних підцілей однієї загальної мети функціонування.

5. Іншою ситуацією, що приводить до багатокритеріальності, є випадок, коли функціонально-логічна модель досліджуваного об'єкта управління відсутня і потрібно її побудувати таким чином, щоб зовнішні чинники щонайкраще відповідали експериментальним даним.

У зв'язку з цим, параметри моделі $\bar{x}$, побудованої за допомогою еквівалентних схем заміщення компонент, можуть не мати безпосереднього відношення до внутрішніх процесів в об'єкті, а повинні підбиратися таким чином, щоб щонайкраще апроксимувати експериментально отримані зовнішні параметри об'єкта управління.

Якщо позначити варіант системи управління через P , який належить множині цих варіантів, тоді критерій повинен забезпечити екстремум

$$I(p) \rightarrow \text{extr} \quad (7)$$

Часто задача зводиться до так званої аргументної, коли найкращий варіант p^* є аргументом $\text{extr} I(p)$

$$p^* = \arg \text{extr} I(p), p \in P \quad (8)$$

При синтезі складних систем управління завжди існує множина критеріїв

$$I = (I_1, I_2, \dots, I_m), \quad (9)$$

тобто це є вектор, за яким оцінюється вибір на різних етапах функціонування системи. При цьому часто виникають суперечливі вимоги

$$I_1 \rightarrow \min \quad (10)$$

а

$$I_j \rightarrow \max \quad (11)$$

Така задача стосовно виробництва немає розв'язку, наприклад, коли I_j — випуск продукції, а I_1 — витрати. В таких умовах, коли є вимоги до системи управління, які вступають в протиріччя одна одній, зазвичай застосовуються методи зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріальної, а саме: лінійна згортка, мультиплікативний підхід, $\min$ — $\max$ критерій, використання

контрольних показників, метод заданого пріоритету, метод гнучкого пріоритету, метод «справедливого компромісу».

Управління технологічними процесами хлібопекарського виробництва є багатокроковим процесом прийняття рішень. Кожен крок в процедурі вибору рішення пов'язаний з певною цільовою функцією управління і є набір керуючих дій для і-ї ділянки виробництва хліба.

Вирішення багатокритеріальної задачі за своєю природою компромісне та засноване на суб'єктивній інформації. Процес знаходження рішення складається з двох етапів: спочатку відбувається розпізнавання ситуації, а потім, за допомогою закладених сценаріїв здійснюється формування оптимального управління у відповідності із критеріями управління технологічними процесами хлібопекарського виробництва [7].

Постановка задачі оптимального управління технологічними процесами хлібопекарського виробництва в загальному вигляді:

$$F = \max_{Q^j \in R^n} F, A_{i(\min)}^j \leq A_i^j \leq A_{i(\max)}^j \quad (12)$$

де R^n — простір параметрів стану; $A_{i(\min)}^j \leq A_i^j \leq A_{i(\max)}^j$ — область допустимої зміни параметрів, причому $A_{i(\min)}^j$ «нижче норми», $A_{i(\max)}^j$ «вище норми».

При вирішенні задач оптимального управління технологічними процесами хлібопекарського виробництва були виділені такі множини критеріїв: K_i^* —

якість, P_i^* — продуктивність, W_i^* — втрати, а ситуаційна згортка при врахуванні ситуаційної пріоритетності критеріїв матиме вигляд:

$$F = \bigcup_i \lambda_i^j (U_{i-1}^k A_i^j) \{Q_i^j(A_i^j)\} \quad (13)$$

де i — номер ситуаційно-значущої зони, $i=1, \dots, n$; j — номер критерію, $j=1, \dots, m$; k — кількість критеріїв управління; Q_i^j — j -ий критерій управління для ситуаційно-значущої зони i ; A_i^j — набір параметрів для критерію Q_i^j ; λ_i^j — пріоритет критерію управління для i -ї ситуаційно-значущої зони (експертно-визначені оптимальні (ідеальні) значення j -го критерію).

Задачу багатокритеріальної оптимізації розглянемо на прикладі оптимізації відділення приготування опари при виробництві хліба пшеничного, для якого використані такі моделі:

$$\tau_{\text{op,op}}(t_{\text{op}}, W_{\text{op}}) = 0.10328 t_{\text{op}}^2 + 0.052237 W_{\text{op}}^2 - 0.070034 t_{\text{op}} W_{\text{op}} - 1.2532 t_{\text{op}} - 5.0528 W_{\text{op}} + 193.21 \quad (14)$$

$$I_{\text{op,op}}(t_{\text{op}}, W_{\text{op}}) = -0.089916 t_{\text{op}}^2 - 0.28438 W_{\text{op}}^2 + 0.80972 t_{\text{op}} W_{\text{op}} - 49.826 t_{\text{op}} + 12.543 W_{\text{op}} - 416.91 \quad (15)$$

$$\text{Втр}_{\text{op,op}}(t_{\text{op}}, W_{\text{op}}) = -0.44744 t_{\text{op}}^2 - 1.8553 W_{\text{op}}^2 + 4.1749 t_{\text{op}} W_{\text{op}} - 259.21 t_{\text{op}} + 120.12 W_{\text{op}} + 83.755 \quad (16)$$

де $\tau_{\text{op,op}}$ — тривалість бродіння опари, год; t_{op} — температура опари, °C; W_{op} — вологість опари, %; $I_{\text{op,op}}$ —

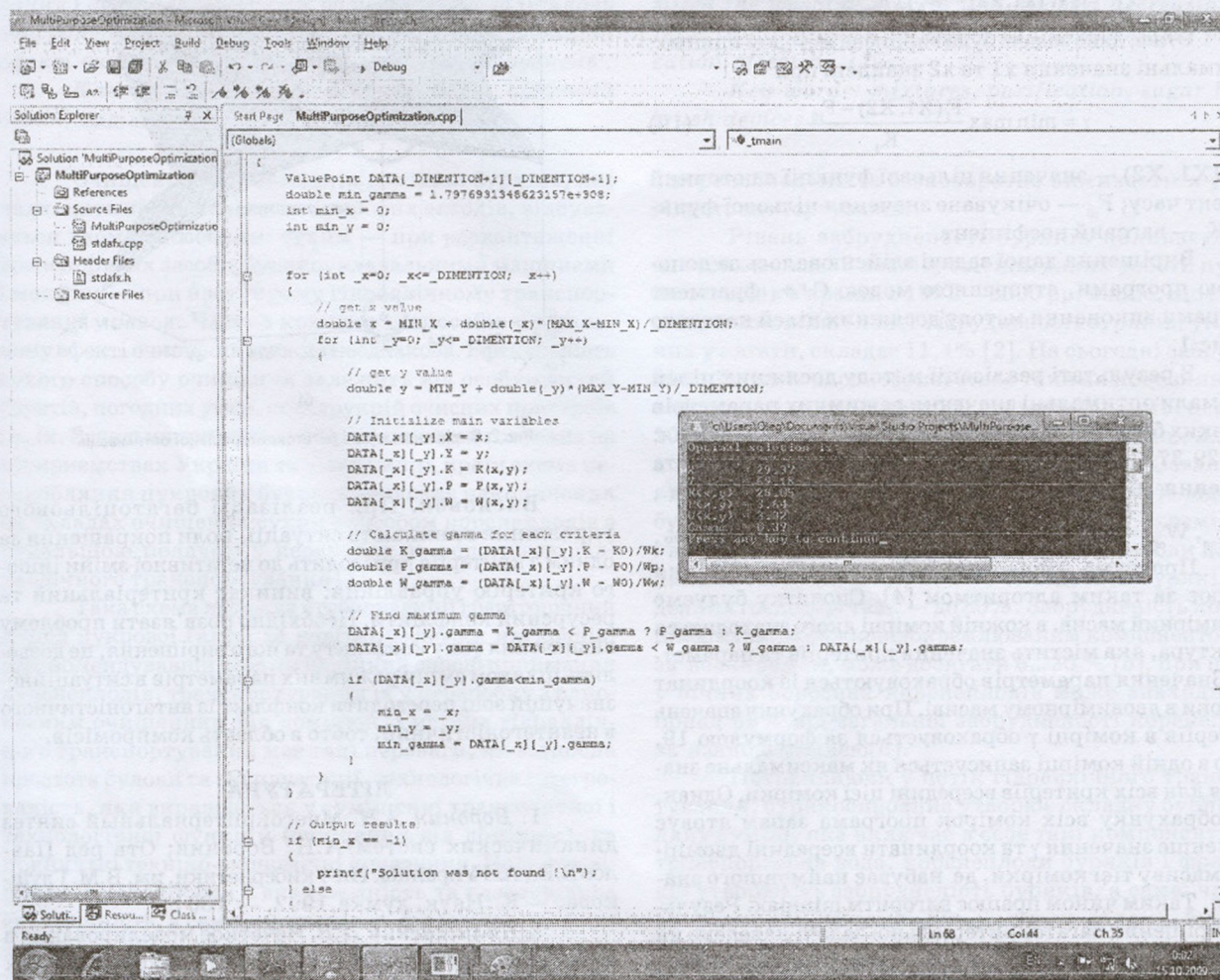


Рис. 1. Реалізація алгоритму досяжних цілей мовою програмування C++.

інтенсивність бродіння опари, $\frac{\text{млCO}_2}{\text{кг} \cdot \text{хв}}$; $\text{Втр}_{\text{бр.оп}}$ — втрати сухих речовин борошна при бродінні опари, %.

Позначимо $\tau_{\text{бр.оп}}(t_{\text{оп}}, W_{\text{оп}}) = P(x_1, x_2)$, $I_{\text{бр.оп}}(t_{\text{оп}}, W_{\text{оп}}) = K(x_1, x_2)$, $\text{Втр}_{\text{бр.оп}}(t_{\text{оп}}, W_{\text{оп}}) = W(x_1, x_2)$, а x_1, x_2 — відповідно температура та вологість опари.

Згідно із методом досяжних цілей [3], оптимального результату можна досягти при умові знаходження у мінімального значення, для якого є вірною наступна система нерівностей:

$$\begin{cases} P(x_1, x_2) - K_p \gamma \leq P_0 \\ K(x_1, x_2) - K_k \gamma \leq K_0 \\ W(x_1, x_2) - K_w \gamma \leq W_0 \end{cases} \quad (17)$$

«менше норми» $x_1 < \text{«вище норми»}$, «менше норми» $x_2 < \text{«вище норми»}$, де P_0, K_0, W_0 — сподівання при пошуку оптимального значення. Фактично дані значення визначають точку в просторі критеріїв до якої повинно прямувати оптимальне рішення. K_p, K_k, K_w — вагові коефіцієнти, які визначають наскільки близько повинно бути рішення до оптимального результату. Чим ближче значення вагового коефіцієнта до нуля, тим більш важливим є критерій для пошуку оптимального рішення.

Перетворили нерівність 17 до вигляду:

$$\begin{cases} (P(x_1, x_2) - P_0) / K_p \leq \gamma \\ (K(x_1, x_2) - K_0) / K_k \leq \gamma \\ (W(x_1, x_2) - W_0) / K_w \leq \gamma \end{cases} \quad (18)$$

Отже, дана задача була вирішена методом minmax: оптимальні значення x_1 та x_2 знайдені при

$$\gamma = \min \max \frac{F_i(X_1, X_2) - F_{i0}}{K_i} \quad (19)$$

де $F_i(X_1, X_2)$ — значення цільової функції в поточний момент часу; F_{i0} — очікуване значення цільової функції; K_i — ваговий коефіцієнт.

Вирішення даної задачі здійснювалось за допомогою програми, створеною мовою C++, фрагмент програми виконання методу досяжних цілей наведено на рис.1.

В результаті реалізації методу досяжних цілей отримали оптимальні значення режимних параметрів при яких буде здійснюватись багатоцільове управління: $t_{\text{оп}} = 29,37^\circ\text{C}$, $W_{\text{оп}} = 69,17\%$ та такі $\text{Gamma}(\gamma) = 0,39$ та значення цільових функцій: $\tau_{\text{бр.оп}}(t_{\text{оп}}, W_{\text{оп}}) = 3,64$ год.,

$I_{\text{бр.оп}}(t_{\text{оп}}, W_{\text{оп}}) = 28,05 \frac{\text{млCO}_2}{\text{кг} \cdot \text{хв}}$, та $\text{Втр}_{\text{бр.оп}}(t_{\text{оп}}, W_{\text{оп}}) = 3,30\%$.

Програма отримання оптимального значення працює за таким алгоритмом [4]. Спочатку будуємо двовимірний масив, в кожній комірці якого знаходиться структура, яка містить значення критеріїв та параметрів. Значення параметрів обраховуються із координат комірки в двовимірному масиві. При обрахунку значень критеріїв в комірці у обраховується за формулою 19, тобто в одній комірці записується як максимальне значення для всіх критеріїв всередині цієї комірки. Однак, при обрахунку всіх комірок програма запам'ятовує найменше значення γ та координати всередині двовимірного масиву тієї комірки, де набуває найменшого значення. Таким чином працює алгоритм minmax. Результат вирішення багатокритеріальної задачі наведено на рис.2(а — для двох критеріїв, б — для трьох критеріїв).

З рис.2 (а, б) видно, що при різних критеріях управління оптимальні значення режимних параметрів

будуть змінюватись і в багатокритеріальному просторі (якість, продуктивність, втрати) існують зони, в яких можна знайти оптимальне рішення і навпаки, яскраво видно, що покращення одного з критеріїв призводить до різкого погіршення іншого. Аналогічно проведена оптимізація і для інших ділянок технологічного процесу хлібопекарського виробництва.

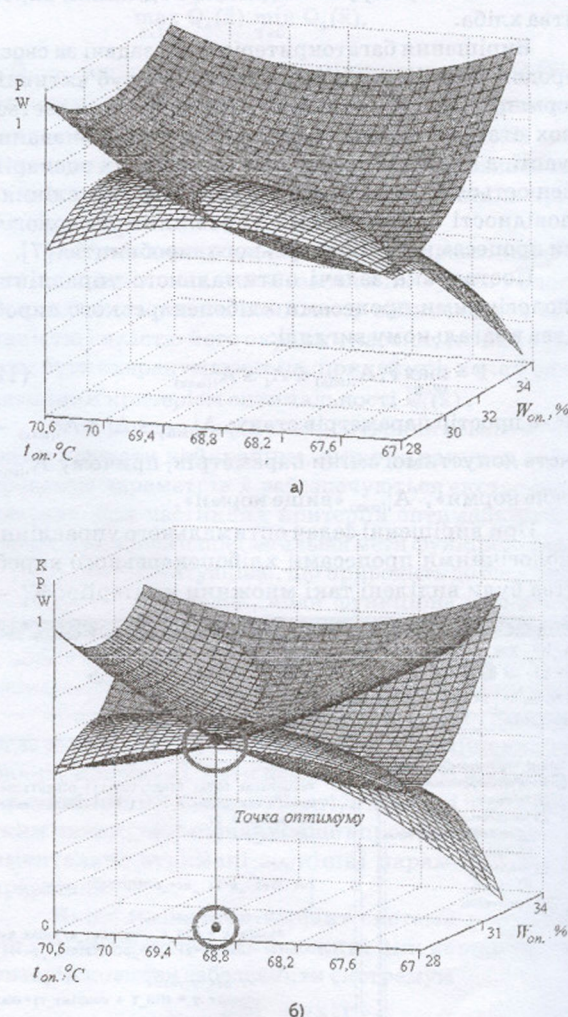


Рис.2. Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації.

Висновок. При реалізації багатоцільового управління виникають ситуації, коли покращення за одним з критеріїв призводить до негативної зміни іншого критерію управління: виникає критеріальний та ресурсний конфлікти. Необхідно розв'язати проблему визначення типу конфлікту та його вирішення, це дозволить шляхом зміни режимних параметрів в ситуаційно-значущій зоні переводити конфлікт із антагоністичного в неантагоністичний, тобто в область компромісів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А.Н. Воронин; Отв ред Павлов В.В.; АН Украины. Ин-т кибернетики. им. В.М. Глушкова. — К.: Наук. думка, 1992. — 160 с.
2. Дилигенский Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология: Монография / Н.В. Дилигенский,

Л.Г. Дымова, П.В.Севастьянов. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 336 с.

3. Новосельцев В.И. Теоретические основы системного анализа/ В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин. — М.: Майор, 2006. — 592с.: ил.

4. Трифонов А.Г. Многокритериальная оптимизация: [Электронный ресурс]. — Режим доступа http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/16.php

5. Шаруда С.С. Лінгвістична апроксимація технологічних показників хлібопекарського виробництва / С.С. Шаруда, В.Д. Кишенько // Штучний інтелект. — Донецьк: ДонДІШІ, 2008. — №4. — С. 188–192.

6. Шаруда С.С. Оцінка показників якості хлібопекарської продукції методами кваліметрії та багатомірного шкалювання / С.С. Шаруда, В.Д. Кишенько // Харчова промисловість. — К.: НУХТ, 2008. — № 6. — С. 19–22.

7. Шаруда С.С. Сценарний підхід в управлінні хлібопекарським підприємством/ С.С. Шаруда, В.Д. Кишенько // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — В.: ВНТУ, 2009. — №2 (83). — С. 13–16.

Надійшла до редколегії 01.04.10 р.