

О.П. РОТШТЕЙН

Єрусалимський технологічний коледж, Єрусалим, Ізраїль;
Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна,
e-mail: rothstei@g.jct.ac.il.

О.В. ЗЕЛІНСЬКА

Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна,
e-mail: o.zelinska@donnu.edu.ua.

В.П. КАМІНСЬКИЙ

Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна,
e-mail: kaminskyi.v@donnu.edu.ua.

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ
В СИСТЕМІ «ВИРОБНИК-СПОЖИВАЧ» НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ
КОГНІТИВНИХ КАРТ І ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ**

Анотація. Запропоновано підхід до постановки та розв'язання задачі оптимального вибору вимог до показників якості продукції з урахуванням інтересів виробника та споживача. Постановку задачі здійснено в термінах математичного програмування. Критерієм оптимізації є максимум близькості між рівнем привабливості товару і бажанням його придбати; керованими змінними є рівні показників, специфічних для виробника та споживача; обмеженнями є домовленості щодо необхідних рівнів показників, спільних для виробника та споживача. Для побудови залежностей, що входять у цільову функцію, використано нечіткі когнітивні карти, а оптимальні розв'язки знайдено за допомогою генетичного алгоритму. Підхід проілюстровано прикладом робота-пилососа, який є одним із побутових застосувань технології штучного інтелекту, що найбільше продаються.

Ключові слова: якість продукції, параметри якості, виробник, споживач, оптимізація, нечітка когнітивна карта, генетичний алгоритм, робот-пилосос.

ВСТУП

Якість продукції — це сукупність властивостей, що забезпечують задоволення потреб споживачів. Формування вимог до цих властивостей (показників якості) — це складний ітеративний процес, який здійснюють з урахуванням інтересів виробників та споживачів.

У чинних стандартах контролю якості виокремлено показники призначення, надійності, ощадливого використання ресурсів, ергономічності, естетичності, технологічності, транспортабельності, стандартизації та уніфікації, патентно-правові, екологічні, безпекові, економічні, а також показники стійкості до зовнішніх взаємодій.

З погляду кібернетики, показники якості є керованими змінними, вибір яких впливає на цільові функції виробника і споживача:

- виробник намагається зробити так, щоб його продукт привертав увагу споживача;
- споживач бажає бачити товар, який хочеться купити.

Під час вибору вимог до показників якості потрібно враховувати такі обставини:

- цільові функції виробника та споживача, відрізняючись одна від одної, можуть залежати від одних і тих самих показників якості;
- різноманітні показники якості не є незалежними змінними, вони взаємопов'язані і можуть впливати один на одного.

Тому виникає така задача оптимізації: як вибрати значення показників якості, щоб забезпечити максимальний збіг цільових функцій виробника та споживача.

Серед множини всіх показників якості, що впливають на інтереси виробника та споживача, завжди можна виділити три групи:

- спільні показники, які пов'язані одночасно з виробником та споживачем (наприклад, показники призначення);
- специфічні показники виробника, які пов'язані тільки з виробником (наприклад, технологія виробництва та собівартість продукції);
- специфічні показники споживача, які пов'язані тільки з інтересами споживача (наприклад, ціна товару).

Вимоги до спільних показників якості зазвичай формують маркетингологи на основі вивчення потреб ринку. Їх можна вважати відомими обмеженнями.

У цій статті запропоновано підхід до постановки і розв'язання задачі оптимального вибору вимог до показників якості продукції з урахуванням інтересів виробника та споживача. Критерієм оптимізації є різниця рівнів привабливості товару і бажання його купити. Керованими змінними слугують рівні специфічних показників виробника та споживача, а обмеженнями — фіксовані вимоги до рівнів спільних показників якості.

Для побудови залежностей, що входять у цільові функції виробника та споживача, використано метод багатофакторного моделювання за допомогою нечітких когнітивних карт (НКК), запропонований у роботі [1]. Оптимальні розв'язки знайдено за допомогою генетичного алгоритму.

Запропонований підхід проілюстровано прикладом робота-пилососа, який є одним із побутових застосувань технології штучного інтелекту, які найбільше продаються. Інформацію щодо показників якості робота-пилососа запозичено з роботи [2]. У ній наведено НКК виробника та споживача, але не розглянуто задачу оптимізації.

Ця стаття складається з трьох розділів. У розд. 1 сформульовано узагальнену постановку задачі оптимізації показників якості продукції в системі «виробник-споживач». Розділ 2 містить опис методики побудови багатофакторних залежностей за допомогою НКК. У розд. 3 розглянуто три сценарії оптимізації вимог до якості робота-пилососа за допомогою НКК та генетичного алгоритму.

1. ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ

Нехай є група експертів, які можуть сформулювати:

- цільові функції виробника та споживача, якими у розглядуваному випадку є відповідно привабливість товару і бажання його купити;
- множини показників якості, які використовують виробник та споживач;
- ступені взаємного впливу показників якості, які застосовуються під час побудови НКК виробника та споживача;
- інтервали допустимих значень спільних показників якості, які отримано в результаті домовленості між виробником та споживачем.

Тут не розглянуто методику організації експертного опитування та оброблення його результатів.

Нехай C_i — i -й показник якості. Для оцінки C_i будемо використовувати число $A_i \in [0, 1]$, яке відповідає рівню показника C_i : 0 (1) — найбільш низький (високий) рівень. Число A_i може оцінюватися безпосередньо експертом, або за допомогою функції належності нечіткій множині «перфектність показника», яка перетворює абсолютне значення i -го показника на його рівень A_i методом нечіткої перфектності [3].

Вважатимемо відомими такі множини: M_p — множина показників якості, які враховує виробник (ці показники впливають на привабливість товару); M_u — множина показників якості, які враховує споживач (ці показники впливають на бажання купити товар); $M_g = M_p \cap M_u$ — множина показників якості, які є спільними для виробника і споживача; M_{sp} — множина показників якості, які є специфічними для виробника, таких, що $M_{sp} \cup M_g = M_p$; M_{su} — множина показників якості, які є специфічними для споживача, таких, що $M_{su} \cup M_g = M_u$.

Уведемо такі позначення: A_1 — рівень привабливості товару, який залежить від показників із множини M_p ; $A_1 = F_1(M_{sp}, M_g)$ — модель залежності для обчислення A_1 ; A_2 — рівень бажання купити товар, який залежить від показників із множини M_u ; $A_2 = F_2(M_{su}, M_g)$ — модель залежності для обчислення A_2 .

Нехай також відомі обмеження для рівнів показників із множини M_g , які отримано в результаті вивчення ринку.

Суть задачі оптимізації є такою: знайти такі значення рівнів показників якості із множин $M_p = M_{sp} \cup M_g$ і $M_u = M_{su} \cup M_g$, які відповідають обмеженням на рівні показників із множини M_g і забезпечують найбільше наближення значень A_1 і A_2 , тобто

$$|A_1 - A_2| \xrightarrow{M_p, M_u} \min.$$

Блок-схему оптимізації наведено на рис. 1. Для побудови залежностей

$$A_1 = F_1(M_{sp}, M_g) \text{ та}$$

$$A_2 = F_2(M_{su}, M_g),$$

які входять до критерію оптимізації, використовуватимемо метод багатofакторного моделювання, що ґрунтується на НКК [1].

2. БАГАТОФАКТОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НКК

Відповідно до Б. Коско [4], НКК — це орієнтований граф, дуги якого зважені нечіткими термами. Приклад НКК наведено на рис. 2. Вершини графа, позначені як C_i , що названі концептами, відповідають змінним, які враховуються в моделі, а ваги дуг w_{ij} відображають сили впливів на змінні. Термін «когнітивний» означає, що вихідними даними для моделювання є суб'єктивна інформація про сили впливів, які можна описати словами «підвищується» або «знижується». Термін «нечіткі» свідчить про те, що НКК вико-

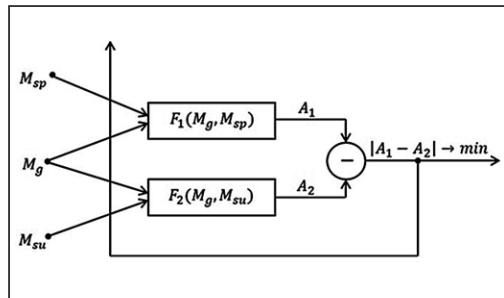


Рис. 1. Блок-схема управління параметрами якості

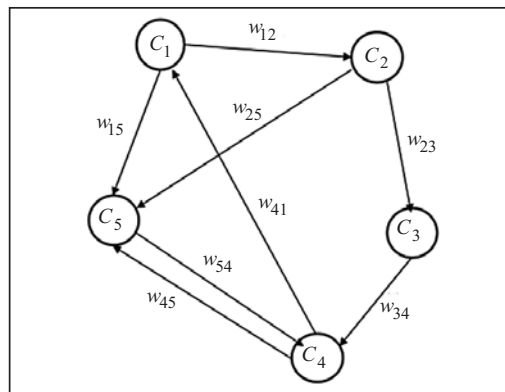


Рис. 2. Приклад нечіткої когнітивної карти

ристовує різні рівні «підвищення» та «зниження». Ці рівні задають числами з інтервалів $[0, 1]$ і $[-1, 0]$, яким відповідають терми «низький», «середній», «високий» та інші з теорії нечітких множин [5].

Концепти. Нехай $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ — відома множина концептів, тобто змінних, використаних у моделі. У цій статті концептами будемо описувати показники якості. Концепт C_i оцінюють числом $A_i \in [0, 1]$, яке відповідає рівню відповідного показника.

Зв'язки між концептами. Вага дуги, що з'єднує концепти C_i та C_j , вказує на силу впливу C_i на C_j :

- $w_{ij} > 0$ (позитивний вплив C_i на C_j), якщо підвищення (зниження) величини A_i зумовлює підвищення (зниження) величини A_j ;
- $w_{ij} < 0$ (негативний вплив C_i на C_j), якщо підвищення (зниження) величини A_i зумовлює зниження (підвищення) величини A_j ;
- $w_{ij} = 0$ (відсутність впливу C_i на C_j), якщо значення A_j не залежить від значення A_i ;

Силу впливу (w_{ij}) оцінюють експерти за допомогою лінгвістичних термів та шкали термометра, представленої у табл. 1.

Таблиця 1. Оцінка сили впливу

Шкала термометра	Лінгвістичні оцінки	Числові значення
	Позитивна максимальна	1
	Позитивна вища за середню	0.75
	Позитивна середня	0.5
	Позитивна нижча за середню	0.25
	Відсутня	0
	Негативна нижча за середню	-0.25
	Негативна середня	-0.5
	Негативна вища за середню	-0.75
	Негативна максимальна	-1

Якщо враховують думки кількох експертів, то величину w_{ij} оцінюють як зважене середнє оцінок кожного експерта.

Рекурентне співвідношення. Для опису коливального процесу в НКК використовують такі поняття:

- $(n \times n)$ — матриця сил впливів концептів C_i один на одного, у якій діагональні елементи дорівнюють нулю, тобто

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

- початковий стан НКК, що визначається вектором

$$A^0 = [A_1^0, A_2^0, \dots, A_n^0], \quad (2)$$

елементи якого дорівнюють значенням концептів на кроці $k = 0$;

- стаціонарний стан НКК, що визначається вектором

$$A^l = [A_1^l, A_2^l, \dots, A_n^l] \quad (3)$$

на такому кроці l , коли в результаті взаємодії між концептами НКК входить у стабільний режим, в якому елементи вектора (3) припиняють змінюватись.

Динаміка покрокової зміни значень концептів визначається співвідношенням

$$A_i^{k+1} = A_i^k + \sum_{j=1}^n (A_j^k - A_j^{k-1}) w_{ji},$$

яке можна записати в матричній формі [1]

$$A^{k+1} = A^k \oplus (A^k \ominus A^{k-1}) W_0, \quad A^1 = A^0 \oplus A^0 W_0,$$

де $\oplus$ та $\ominus$ — операції поелементного додавання та віднімання векторів, які виконують за такою схемою:

$$\begin{aligned} [a, b] \oplus [c, d] &= [a + c, b + d], \\ [a, b] \ominus [c, d] &= [a - c, b - d]. \end{aligned}$$

Прогноз значення вихідної змінної. Розглянемо систему «входи–вихід», в якій концепт C_n — вихідна змінна, а інші концепти $C_1, C_2, \dots, C_{n-1}$ — вхідні змінні, що впливають одна на одну. Тоді прогнозування значення вихідної змінної здійснюють за таким алгоритмом.

Крок 1. Встановити вектор (2) початкового стану НКК у вигляді

$$A^0 = [A_1^0, A_2^0, \dots, A_{n-1}^0, A_n^0 = 0].$$

Крок 2. Користуючись рекурентним співвідношенням (2), обчислити вектор (3) значень концептів у стаціонарному (сталому) стані. В отриманому векторі (3) зафіксувати значення A_n^l вихідного концепту C_n .

Крок 3. Обчислити нормоване значення величини A_n^l , отримане на кроці 2, за формулою

$$\hat{A}_n = \frac{A_n^l - \underline{A}_n}{\bar{A}_n - \underline{A}_n}.$$

Тут використано найбільше ($\bar{A}_n$) і найменше ($\underline{A}_n$) значення вихідного концепту C_n у стаціонарному стані. Величину $\hat{A}_n$ можна вважати прогнозом значення виходу, який відповідає заданому вхідному вектору (2).

Псевдокод програми багатofакторного моделювання на основі НКК представлено в [6].

3. ПРИКЛАД ЗАСТОСУВАННЯ

У цьому розділі розглянуто застосування НКК і генетичного алгоритму для оптимізації параметрів робота-пилососа за критерієм, запропонованим у розд. 1.

3.1. Параметри якості. Робот-пилосос є одним з найбільш розповсюджених у побуті застосувань високих технологій. Бажання збільшити кількість продажів роботів-пилососів стимулює дослідження, спрямовані на вдосконалення їхніх параметрів. Огляд робіт у цій галузі та перелік параметрів, які враховують виробник і споживач, наведено в роботі [3]. У ній також розглянуто НКК виробника і споживача, але задачу оптимізації параметрів якості з погляду математичного програмування не поставлено і не розв'язано.

Таблиця 2. Параметри якості робота-пилососа

Позначення	Параметр	Враховує	
		Виробник	Споживач
C_1	Привабливість (Attractiveness)	+	
C_2	Бажаність (Desirable)		+
C_3	Корисність (Utility)	+	+
C_4	Безпека (Safety)	+	+
C_5	Шум (Noise)	+	+
C_6	Результати прибирання (Cleaning performance)	+	+
C_7	Мобільність (Mobility)	+	+
C_8	Витривалість (Durability)	+	+
C_9	Потужність всмоктування (Suction Power)	+	+
C_{10}	Ємність акумулятора (Battery Capacity)	+	+
C_{11}	Зовнішній вигляд (Appearance)	+	+
C_{12}	Вартість (Cost)	+	
C_{13}	Зручність інтерфейсу (Easiness of User Interface)	+	
C_{14}	Складність інтелектуальності (Complexity of Intelligence)	+	
C_{15}	Кількість зарядок (Frequency of Charging)	+	
C_{16}	Ємність контейнера для сміття (Dust Bin Capacity)	+	
C_{17}	Обслуговування споживачів (Customer Service)		+
C_{18}	Частота обслуговування (Frequency of Maintenance)		+
C_{19}	Ціна (Price)		+
C_{20}	Естетичний дизайн (Aesthetic Design)		+
C_{21}	Легкість використання (Ease of Use)		+
C_{22}	Вага (Weight)		+
C_{23}	Інтелектуальність (Intelligence)		+
C_{24}	Діапазон прибирання (Cleaning Range)		+
C_{25}	Водонепроникність (Water Proof)		+
C_{26}	Прибирання країв (Edge cleaning)		+
C_{27}	Площа прибирання за одним зарядом (Cleaning Area per Charge)		+
C_{28}	Мультифункціональність (Multifunctionality)		+

Список параметрів якості робота-пилососа, які використовують відповідно виробник та споживач [3], представлено в табл. 2.

З табл. 2 видно, що множинами параметрів, які використано в розд. 1 для постановки задачі оптимізації, є такі:

$$M_p = \{C_1, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}\};$$

$$M_u = \{C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}\};$$

$$M_g = \{C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}\};$$

$$M_{sp} = \{C_1, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}\};$$

$$M_{su} = \{C_2, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}\}.$$

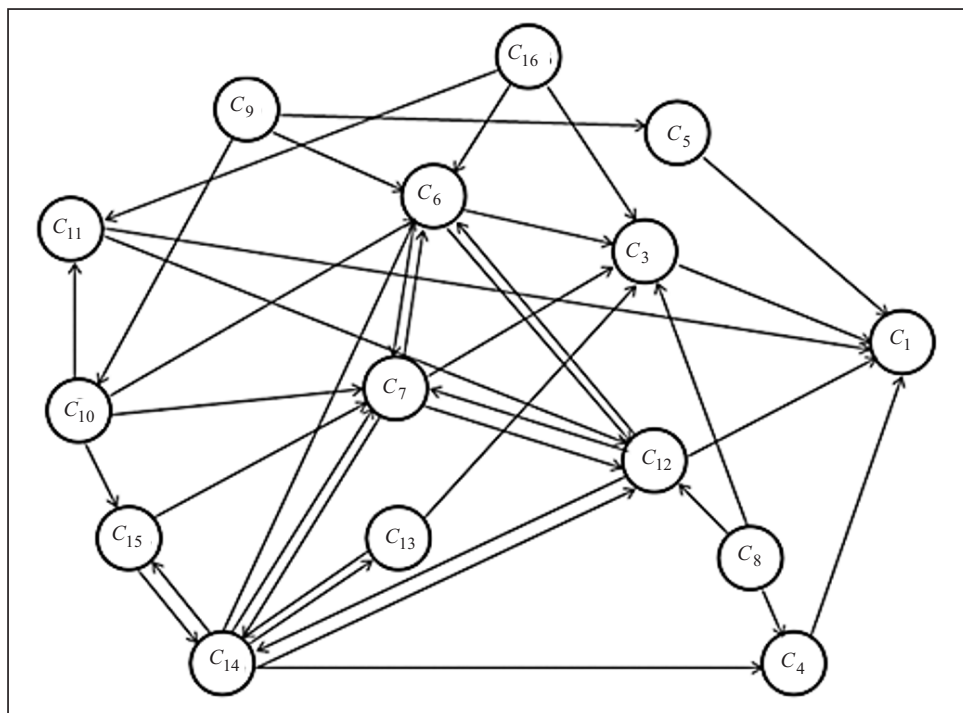


Рис. 3. Нечітка когнітивна карта виробника

3.2. Задача оптимізації. Залежності цільових функцій виробника (A_1) і споживача (A_2) від факторів впливу у загальному вигляді позначимо так:

$$A_1 = F_1 \left(\underbrace{A_3, A_4, \dots, A_{10}, A_{11}}_{M_0}, \underbrace{A_{12}, A_{13}, \dots, A_{15}, A_{16}}_{M_{sp}} \right), \quad (4)$$

$$A_2 = F_2 \left(\underbrace{A_3, A_4, \dots, A_{10}, A_{11}}_{M_0}, \underbrace{A_{17}, A_{18}, \dots, A_{27}, A_{28}}_{M_{su}} \right). \quad (5)$$

Для того, щоб оптимізувати параметри якості робота-пилососа в системі «виробник–споживач», потрібно знайти такі A_i ($i=12, 13, \dots, 28$), які забезпечують

$$|F_1(A_3, A_4, \dots, A_{16}) - F_2(A_3, A_4, \dots, A_{11}, A_{17}, A_{18}, \dots, A_{28})| \longrightarrow \min$$

за умови, що $A_3, A_4, \dots, A_{11}$ задовольняють обмеження

$$A_j \in [A_j \min, A_j \max],$$

де $A_j \min$ і $A_j \max$ — межі інтервалу допустимих значень величини A_j , $j=3, 4, \dots, 11$.

Для отримання цільових функцій (4) і (5) скористаємось апаратом НКК.

3.3. Нечітка когнітивна карта виробника. Нечітку когнітивну карту (НКК) виробника наведено на рис. 3, а матриця ваг дуг має вигляд

$$W_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{15} \\ C_{16} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (6)$$

Застосування матриці (6) дає змогу прогнозувати рівень (A_1) привабливості робота-пилососа для заданого вектора рівнів критеріїв якості заводу-виробника:

$$[A_1, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}, A_{16}].$$

Приклад 1. Нехай вектор рівнів якості для критеріїв, що впливають на A_1 (привабливість), має вигляд

A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}
0.21	0.99	0.69	0.81	0.01	0.46	0.55	0.97	0.57	0.46	0.41	0.57	0.54	0.79

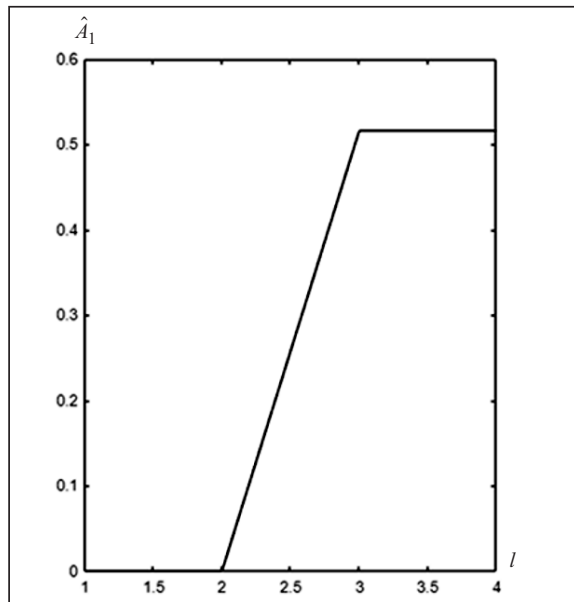


Рис. 4. Динаміка зміни параметра «Привабливість» (A_1)

Покрокову динаміку зміни цих рівнів якості з урахуванням їхнього взаємного впливу показано на рис. 4. З нього видно, що вектор (7) забезпечує привабливість робота-пилососа на рівні $A_1 = 0.51$.

3.4. Нечітка когнітивна карта споживача. Нечітку когнітивну карту (НКК) споживача наведено на рис. 5.

Матриця ваг дуг має вигляд

$$W_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{17} & C_{18} & C_{19} & C_{20} & C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} & C_{27} & C_{28} \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{17} \\ C_{18} \\ C_{19} \\ C_{20} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{25} \\ C_{26} \\ C_{27} \\ C_{28} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.5 & 0 \\ -0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0 \\ -0.5 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

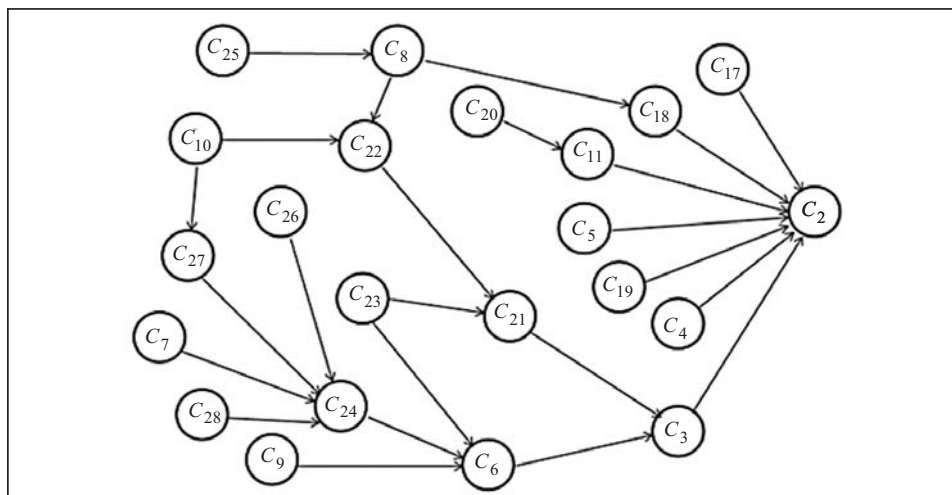


Рис. 5. Нечітка когнітивна карта споживача

Застосування матриці (8) забезпечує прогнозування рівня (A_2) бажаності покупки робота-пилососа для заданих рівнів якості, запропонованих споживачем

$$[A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{17}, A_{18}, A_{19}, A_{20}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{25}, A_{26}, A_{27}, A_{28}].$$

Приклад 2. Нехай вектор рівнів якості для критеріїв, що впливають на A_2 (бажання купити), має вигляд

A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
0.61	0.12	0.64	0.62	0.95	0.72	0.29
A_{10}	A_{11}	A_{17}	A_{18}	A_{19}	A_{20}	A_{21}
0.29	0.06	0.48	0.40	0.33	0.21	0.34
A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{25}	A_{26}	A_{27}	A_{28}
0.23	0.95	0.73	0.54	0.21	0.87	0.97

(9)

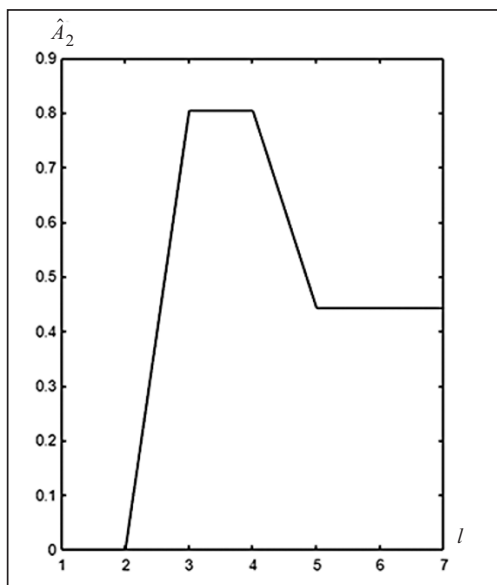


Рис. 6. Динаміка зміни параметра «Бажаність» (A_2)

Покрокову динаміку зміни цих рівнів якості з урахуванням їхнього взаємного впливу показано на рис. 6. З нього видно, що початковий вектор (9) забезпечує бажання купити робот-пилосос на рівні $A_2 = 0.44$.

3.5. Оптимізація вимог до якості робота-пилососа. Припустимо, що обмеження, представлені у табл. 3, відомі.

Задачу математичного програмування, необхідну для оптимізації вимог до якості робота-пилососа у системі «виробник–споживач», сформулюємо так: знайти такий вектор рівнів якості показників, які задає виробник (із множини M_p), тобто

$$[A_1, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}, A_{16}],$$

Таблиця 3. Обмеження щодо рівнів якості критеріїв, спільних для виробника та споживача

Рівень критерію	Сценарій		
	1	2	3
A_3	[0.60, 0.90]	[0.00, 0.30]	[0.10, 0.40]
A_4	[0.50, 0.80]	[0.10, 0.40]	[0.00, 0.30]
A_5	[0.10, 0.40]	[0.60, 0.90]	[0.30, 0.70]
A_6	[0.70, 1.00]	[0.50, 0.80]	[0.60, 0.90]
A_7	[0.70, 1.00]	[0.50, 0.80]	[0.40, 0.70]
A_8	[0.15, 0.45]	[0.60, 0.90]	[0.20, 0.50]
A_9	[0.40, 0.70]	[0.70, 1.00]	[0.70, 1.00]
A_{10}	[0.50, 0.80]	[0.10, 0.40]	[0.30, 0.60]
A_{11}	[0.60, 0.90]	[0.20, 0.50]	[0.10, 0.40]

та споживач (із множини M_u), тобто

$$[A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{17}, A_{18}, A_{19}, A_{20}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{25}, A_{26}, A_{27}, A_{28}],$$

які відповідають обмеженням на рівні спільних критеріїв з табл. 3 і забезпечують мінімальну розбіжність між привабливістю робота-пилососа (A_1) та бажанням його купити (A_2), тобто $|A_1 - A_2| \rightarrow \min$.

Для розв'язання задачі оптимізації використано генетичний алгоритм, що ґрунтується на таких концептах та операціях [7]:

- хромосома — кодована версія розв'язку;
- популяція — ініціальний набір розв'язків;
- фітнес-функція — критерій для опцій селекції;
- схрещування — операція генерації дочірніх хромосом з батьківських хромосом;
- мутація — випадкова зміна в елементах хромосоми.

Хромосома визначена як набір генів, що генерується в діапазоні заданих значень. Підмножина M_g містить елементи $A_i = R[\underline{A}_i, \overline{A}_i]$, де $R[\underline{A}_i, \overline{A}_i]$ — операція знаходження випадкового числа з інтервалу $[\underline{A}_i, \overline{A}_i]$. Підмножини M_{sp} , M_{su} містять константні значення, задані експертно.

Схрещування пари батьківських хромосом дає ріст дочірньої хромосоми. Операція схрещування відбувається через випадковий обмін генами (елементи) батьківських хромосом. Для цього кожному гену дочірньої хромосоми надають випадкове значення $\varepsilon_1 = R[1, 0]$. Якщо $\varepsilon_1 \leq 0.5$, то цей ген беруть з першої батьківської хромосоми, в іншому разі — з другої.

Кожен ген у хромосомі можна піддати мутації. Для цього випадковий номер $\varepsilon_2 = R[1, 0]$ та коефіцієнт мутації q застосовують до кожного гена. Якщо $\varepsilon_2 < q$, тоді цей ген замінюється випадковим числом з проміжку допустимих значень.

Фітнес-функція — це такий критерій, що чим краще хромосома відповідає критерію оптимізації, тим краща фітнес-функція. Для поставленої задачі оптимізації фітнес-функція має вигляд $|A_1 - A_2| \rightarrow \min$.

Відбір батьківських хромосом для схрещування не є випадковим. Перевагу віддають найкращим рішенням. Чим краща фітнес-функція, тим більша ймовірність того, що відповідна хромосома дасть потомство. Коли виконується генетичний алгоритм, розмір популяції не змінюється. Тому після схрещувань і мутацій з отриманої популяції потрібно видалити хромосоми, які мають найгірше значення фітнес-функції.

У цій роботі використано такі параметри генетичного алгоритму: розмір популяції 100; коефіцієнт мутацій 0.1; довжина хромосоми 28.

Приклад хромосоми має такий вигляд:

A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}
0.70	0.60	0.30	0.90	0.80	0.30	0.60	0.70	0.80	0.61	0.67	0.00	0.25
A_{16}	A_{17}	A_{18}	A_{19}	A_{20}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{25}	A_{26}	A_{27}	A_{28}
0.41	0.85	0.61	0.33	0.15	0.97	0.66	0.72	0.62	0.46	0.44	0.65	0.84

Приклади реалізації операцій схрещування і мутації, а також детальну структуру генетичного алгоритму наведено в роботах [1, 6].

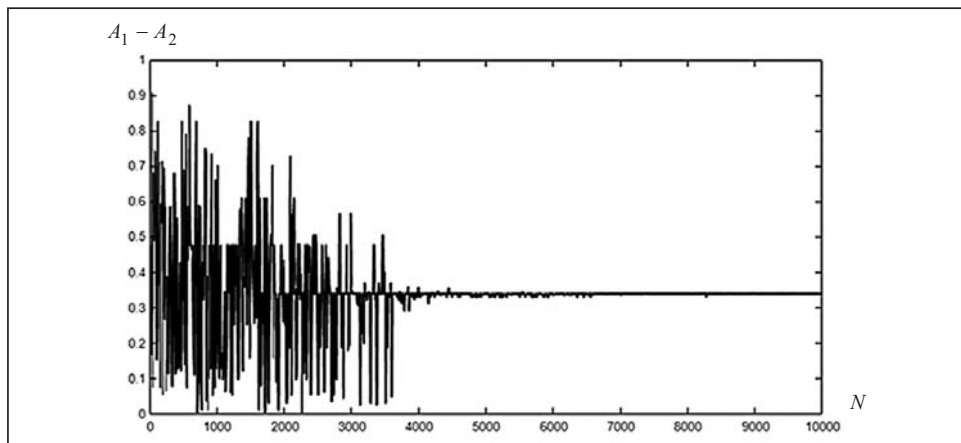


Рис. 7. Динаміка збіжності функції $|A_1 - A_2|$ до стійкого стану (сценарій 1)

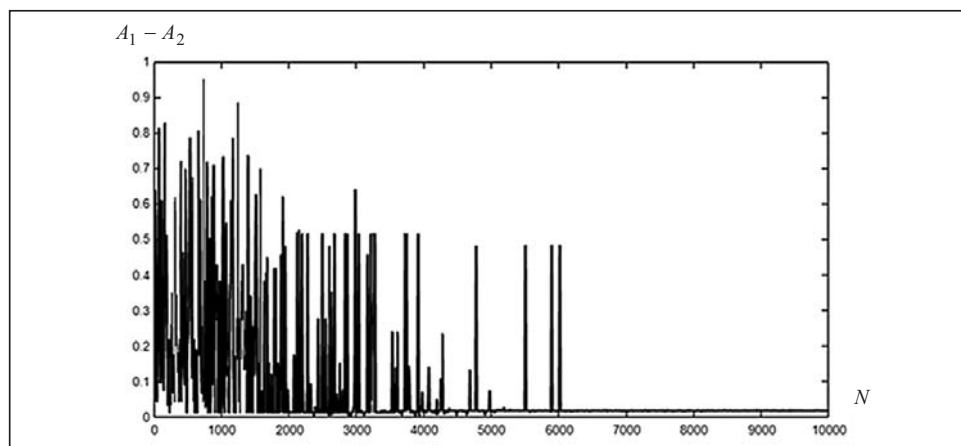


Рис. 8. Динаміка збіжності функції $|A_1 - A_2|$ до стійкого стану (сценарій 2)

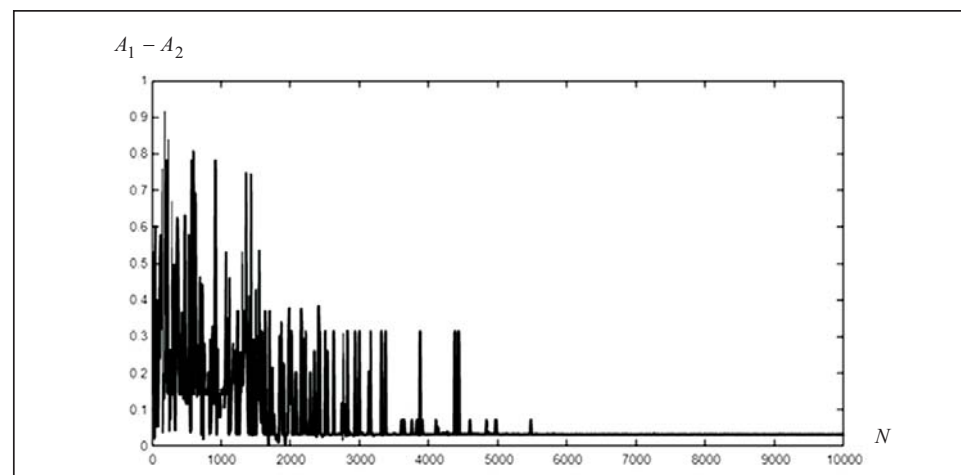


Рис. 9. Динаміка збіжності функції $|A_1 - A_2|$ до стійкого стану (сценарій 3)

Покрокову динаміку збіжності критерію $|A_1 - A_2|$ до стійкого стану у процесі генетичної оптимізації для різних сценаріїв представлено на рис. 7–9.

Таблиця 4. Оптимальні значення параметрів робота-пилососа для різних сценаріїв

Рівень критерію	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
A_1	0.46	0.75	0.45
A_2	0.80	0.74	0.48
A_3	0.71	0.00	0.20
A_4	0.56	0.29	0.27
A_5	0.11	0.72	0.60
A_6	0.91	0.71	0.81
A_7	0.94	0.53	0.55
A_8	0.29	0.76	0.37
A_9	0.58	0.75	0.88
A_{10}	0.66	0.10	0.47
A_{11}	0.62	0.34	0.10
A_{12}	0.77	0.46	0.36
A_{13}	0.84	0.48	0.16
A_{14}	0.81	0.85	0.90
A_{15}	0.93	0.12	0.03
A_{16}	0.15	0.18	0.14
A_{17}	0.74	0.97	0.82
A_{18}	0.47	0.38	0.70
A_{19}	0.63	0.60	0.43
A_{20}	0.55	0.15	0.04
A_{21}	0.53	0.79	0.47
A_{22}	0.14	0.18	0.23
A_{23}	0.81	0.53	0.69
A_{24}	0.52	0.60	0.81
A_{25}	0.02	0.74	0.62
A_{26}	0.43	0.13	0.22
A_{27}	0.41	0.24	0.15
A_{28}	0.27	0.86	0.79
$ A_1 - A_2 $	$ 0.46 - 0.80 = 0.34$	$ 0.75 - 0.74 = 0.01$	$ 0.45 - 0.48 = 0.03$

Час виходу на плато стійкого стану становить 5.7 с для сценарію 1, 8.5 с для сценарію 2, та 4.2 с для сценарію 3. Судячи з графіків, входження у стійкий режим відбувається повільно, а великі кількості кроків свідчать про складний характер нелінійної залежності цільової функції $|A_1 - A_2|$ від керованих змінних.

Оптимальні значення параметрів робота-пилососа для різних сценаріїв представлено у табл. 4. На їхній підставі можна дійти висновку, що сценарій 2 забезпечує найкращі значення цільових функцій виробника (A_1) і споживача (A_2).

ВИСНОВКИ

Оптимальний вибір параметрів якості продукції з урахуванням інтересів виробника і споживача є важливим завданням управління якістю, від якого залежить дохід підприємства. Складність розв'язання цієї задачі пов'язана з тим, що на інтереси обох сторін впливає велика кількість взаємопов'язаних кількісних і якісних факторів, які можуть бути керованими змінними.

У статті показано та проілюстровано прикладом робота-пилососа можливість розв'язання задачі оптимального вибору параметрів якості на основі інтеграції нечітких когнітивних карт і генетичного алгоритму.

Нечіткі когнітивні карти дають змогу будувати цільові функції, необхідні для розв'язання задачі оптимального вибору в термінах математичного програмування для довільної кількості керованих змінних.

Генетичний алгоритм забезпечує збіжність під час розв'язання нелінійної задачі оптимізації за прийнятний час.

Запропонований підхід можна використовувати для сценарного моделювання в системах підтримки рішень з управління якістю виробів на етапі їхнього проєктування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rotshtein A., Katelnikov D. Fuzzy cognitive map vs regression. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, N 1. P. 605–616. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00385-3>.
2. Yoon B.S., Jetter A.J. Investigation of different perspectives between developers and customers: robotic vacuum cleaners. *Proc. PICMET '14 Conference: Portland International Center for Management of Engineering and Technology; Infrastructure and Service Integration* (27-31 July 2014, Portland, USA). Portland, 2014. P. 2307–2313.
3. Rotshtein A. Reliability-based design of human performance conditions using fuzzy perfection. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 2. P. 240–252. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00128-5>.
4. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986. Vol. 24, Iss. 1. P. 65-75. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(86\)80040-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80040-2).
5. Zadeh L. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, N 3. P. 338–353.
6. Rotshtein A., Katelnikov D., Pustynnik L., Polin B. Reliability analysis of man-machine systems using fuzzy cognitive mapping with genetic tuning. *Risk Analysis*. 2022. Vol. 43, N 1. P. 1–19.
7. Gen M., Cheng R. Genetic algorithms and engineering design. New York: John Wiley & Sons, 1997.

A.P. Rotshtein, O.V. Zelinska, V.P. Kaminskyi

OPTIMIZATION OF PRODUCT QUALITY INDICATORS IN THE “PRODUCER–CONSUMER” SYSTEM BASED ON FUZZY COGNITIVE MAPS AND GENETIC ALGORITHM

Abstract. An approach to the formulation and solution of the problem of optimal selection of quality indicators for products, taking into account the interests of both the producer and the consumer, is proposed. The problem is formulated in terms of mathematical programming. The optimization criterion is the maximum closeness between the attractiveness level of the product and the desire to purchase it; the controlled variables are the levels of indicators specific to the manufacturer and the consumer; the constraints are agreements regarding the necessary levels of indicators shared by both the manufacturer and the consumer. Fuzzy cognitive maps are used to construct the dependencies that appear in the objective function, and optimal solutions are found using a genetic algorithm. The approach is illustrated by the example of a robotic vacuum cleaner, which is one of the best-selling household applications of artificial intelligence.

Keywords: product quality, quality parameters, producer, consumer, optimization, fuzzy cognitive map, genetic algorithm, robotic vacuum cleaner.

Надійшла до редакції 29.12.2023