

В. Г. Балан,

к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедри менеджменту інноваційної та інвестиційної діяльності,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1577-0636>

Б. Д. Пацай,

к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедри статистики, інформаційно-аналітичних систем
і демографії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5636-9219>

DOI: 10.32702/2306-6814.2026.2.214

ЗАСТОСУВАННЯ FUZZY FUCOM ТА FUZZY SAW В ОЦІНЮВАННІ СТРАТЕГІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІДПРИЄМСТВА

V. Balan,

PhD in Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Management of Innovation
and Investment, Taras Shevchenko National University of Kyiv

B. Patsai,

PhD in Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Statistics, Information
and Analytical Systems and Demography, Taras Shevchenko National University of Kyiv

APPLICATION OF FUZZY FUCOM AND FUZZY SAW IN ASSESSING THE COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES

У статті розроблено методичний підхід до оцінювання стратегічного потенціалу підприємства. Для визначення важливості складових (вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання) використовується Fuzzy FUCOM, а для розрахунку рівня стратегічного потенціалу підприємства — метод Fuzzy SAW. Трансформація побудованої нечіткої моделі нелінійного програмування згідно з Fuzzy FUCOM в crisp-модель здійснена на основі формул нечітких обчислень, а для дефазифікації — GMIR (Graded Mean Integration Representation). Для програмної реалізації та чисельного розв'язання оптимізаційної задачі було використано мову програмування Python разом із бібліотекою наукових обчислень SciPy із використанням двох алгоритмів оптимізації SLSQP та COBYLA. Проведена апробація запропонованого методичного підходу на основі кейсу оцінювання групою експертів рівня стратегічного потенціалу будівельної компанії. Результати даного дослідження дають змогу вдосконалити та розширити інструментарій сучасного стратегічного управління підприємствами.

Due to the increasing dynamism, uncertainty, complexity, unpredictability, and unstructured nature of the environment in which enterprises operate, this article emphasizes the need to improve the methodological tools of strategic management, in particular, the assessment of the strategic potential of enterprises based on the application of fuzzy set theory and fuzzy multi-criteria analysis

methods. A methodological approach to assessing the strategic potential of an enterprise has been developed. Fuzzy FUCOM (Full Consistency Method) is used to determine the importance of components (weighting coefficients of assessment criteria), and Fuzzy SAW (Simple Additive Weighting) is used to calculate the level of strategic potential of an enterprise. A linguistic assessment scale with corresponding triangular membership functions for the application of Fuzzy FUCOM has been proposed, which to a greater extent ensures the conditions of transitivity and variability of assessments. The transformation of the constructed fuzzy model of nonlinear programming according to Fuzzy FUCOM into a crisp model is carried out on the basis of fuzzy calculation formulas, and for defuzzification — GMIR (Graded Mean Integration Representation). The Python programming language together with the SciPy scientific computing library was used for software implementation and numerical solution of the optimization problem. To ensure the reliability of the results and avoid local minimum traps, cross-validation was used with two fundamentally different optimization algorithms: SLSQP (Sequential Least Squares Programming) — a method of sequential quadratic programming, and COBYLA (Constrained Optimization BY Linear Approximation) — a method of linear approximation. Both methods showed complete convergence to an identical result. The proposed methodological approach was tested on the basis of a case study of the assessment by a group of experts of the level of strategic potential of a construction company. The results of this study make it possible to improve and expand the toolkit of modern strategic enterprise management.

Ключові слова: стратегічний потенціал, теорія нечітких множин, терм-множина, нечіткий багатокритерійний аналіз, Fuzzy FUCOM, Fuzzy SAW-метод.

Key words: strategic potential, fuzzy set theory, term set, fuzzy multi-criteria analysis, Fuzzy FUCOM, Fuzzy SAW method.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

В умовах нестабільності й непередбачуваності зовнішнього середовища, загострення конкуренції будь-яке підприємство, що прагне мати сильну позицію на ринку, повинно приділяти належну увагу формуванню, діагностиці та вдосконаленню управління стратегічним потенціалом [3, с. 117]. Значення стратегічного потенціалу підприємства (ССП) вимірюється ступенем спроможності використовувати ним можливості й ресурси, а також відповідати на виклики зовнішнього оточення. Отже, аналіз стратегічного потенціалу може дати змогу керівництву підприємства оцінити наявність усіх видів ресурсів (виробничих, фінансових, трудових, технологічних, інформаційних тощо) та ефективність їх використання, а також оцінити компетенції та знання, що дають змогу підприємству ефективно адаптуватися до змін зовнішнього середовища та реалізовувати свої стратегічні плани [5, с. 20].

Управління стратегічним потенціалом — це процес, що є невід'ємною частиною сучасного стратегічного менеджменту, що забезпечує успішне функціонування, успіх у конкурентній боротьбі та розвиток підприємства у довгостроковій перспективі. Відповідно до цього виникає потреба в розробці нових методичних підходів до оцінювання стратегічного потенціалу підприємства та його складових з урахуванням нечіткості та невизначеності вхідної інформації.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Різноманітні аспекти дослідження стратегічного потенціалу підприємств, зокрема процесу його формування, аналізу й оцінювання знайшли своє відображення у роботах таких вчених, як Л.Є. Довгань, З.Є. Шершньова, О.І. Маслак, В.В. Микитенко, І.П. Отенко, М.Г. Санко, В.В. Тарасенко, Л.С. Ладонько, В.А. Павлова, Г.Т. П'ятницька, О.В. Березін, О.В. Головаш, О.І. Жилінська, В.В. Макаrenchенко, І.А. Ігнат'єва, Т.В. Гавриленко, А.Ю. Сербенівська та ін.

Серед вітчизняних публікацій за темою аналізу та оцінювання стратегічного потенціалу підприємства із використанням нечіткого інструментарію слід виділити роботи [1; 2; 3; 13]. Зокрема автори [1; 2] пропонують визначати рівень ССП за допомогою кодів значень функцій на базі нейронної мережі Хопфілда, що дає змогу врахувати як кількісні, так і якісні параметри, які характеризують рівень стратегічного потенціалу, прискорити швидкість обробки інформації й, відповідно, визначити належність оцінки стратегічного потенціалу підприємства до певного рівня. У роботі [3] для оцінювання ССП побудована ієрархія проблемної ситуації, де ідентифіковані локальні потенціали підприємства, які шляхом декомпозиції розбиті на складові. Обчислення важливості локальних потенціалів здійснюється на основі інтеграції двох розрахункових схем нечіткого методу аналітичної ієрархії. Для обчислення інтегральних оцінок рівня локальних потенціалів і стра-



Рис. 1. Етапи методичного підходу до оцінювання рівня стратегічного потенціалу підприємства

Джерело: розроблено авторами.

тегічного потенціалу підприємства використовується метод Fuzzy SAW. Подібний підхід застосовується й у [13] на етапі оцінювання ССП для управління ним та його складовими.

Проте, незважаючи на наявність суттєвого прогресу в дослідженні стратегічного потенціалу та його складових, залишаються недостатньо вивченими питання, пов'язані з методичним забезпеченням його аналізу та оцінювання на основі врахування нечіткості вхідної інформації.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ (ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ)

Метою даного дослідження є вдосконалення методичного забезпечення оцінювання стратегічного потенціалу підприємства на основі застосування інструментарію стратегічного аналізу та нечітко-множинної теорії, зокрема методів нечіткого багатокритерійного аналізу Fuzzy FUCOM та Fuzzy SAW.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одним із найбільш перспективних підходів для проведення аналізу та оцінювання ССП є застосування інструментарію нечітко-множинної теорії та нечіткої логіки. Нечіткі методи та моделі мають високу адаптаційну здатність до експертних даних, до якісного, вербального опису параметрів, що аналізуються, є достатньо гнучкими й адекватними вхідним да-

ним. Підхід на основі застосування нечітких описів дає змогу інтегрувати, звести воедино всю наявну неоднорідну інформацію (детерміновану, статистичну, лінгвістичну й інтервальну) про підприємство та його діяльність.

Авторами розроблений методичний підхід до оцінювання стратегічного потенціалу підприємства із використанням методів нечіткого багатокритерійного аналізу, зокрема Fuzzy FUCOM (FUII COnsistency Method) [8] та Fuzzy SAW. Основні етапи застосування цього підходу представлено на рис. 1.

На етапі 1 для розв'язання поставлених задач оцінювання рівня ССП мають бути залучені провідні фахівці та експерти підприємства, які мають відповідні компетенції та навички.

На етапі 2 необхідно виділити складові стратегічного потенціалу підприємства (критерії оцінювання). Дана проблема є достатньо складною і її розв'язання має базуватися на ґрунтовному стратегічному аналізі підприємства та його оточення.

Далі більш детально зупинимося на етапі 3. Для обчислення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання потенціалу підприємства скористаємося одним із методів нечіткого багатокритерійного аналізу — Fuzzy FUCOM. Вибір даного методу визначення важливості критеріїв оцінювання зумовлений значно меншою кількістю порівнянь $(n-1)$ порівняно з методом Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process) $((n(n-1)/2)$ [3] та Fuzzy BWM $(2n-3)$ [4], які

Етап 3. Застосування Fuzzy FUCOM для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання стратегічного потенціалу.



Рис. 2. Удосконалений алгоритм застосування методу Fuzzy FUCOM

Джерело: розроблено авторами на основі [8].

Таблиця 1. Лінгвістична 7-рівнева шкала з відповідними трикутними нечіткими числами для визначення відносної важливості об'єктів при їх парному порівнянні

Лінгвістичні терми для визначення відносної важливості об'єктів	Позначення	Нечіткі значення у трикутному вигляді
Однакова важливість (Equal)	EI	(7/7; 7/7; 7/7)
Майже однакова важливість (Almost Equal)	AE	(7/7; 7/7; 7/6)
Надзвичайно слабка перевага (Very Weak)	VW	(7/7; 7/6; 7/5)
Незначна перевага (Weak)	W	(7/6; 7/5; 7/4)
Досить сильна перевага (Fairly Strong)	FS	(7/5; 7/4; 7/3)
Сильна перевага (Strong)	S	(7/4; 7/3; 7/2)
Дуже сильна перевага (Very Strong)	VS	(7/3; 7/2; 7/2)

Джерело: розроблено авторами.

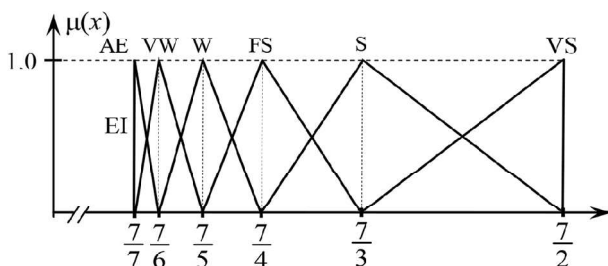


Рис. 3. Графічне представлення трикутних функцій належності для шкали, представленої в табл. 2

Джерело: розроблено авторами.

часто використовуються для розв'язання даної проблеми.

Відповідно до процедури застосування цього методу (рис. 2) на кроці 1 необхідно проранжувати ідентифіковані критерії оцінювання в порядку спадання переважності.

Багато зробити це на основі досягнення консенсусу членів експертної групи, який можна досягти, наприклад, за допомогою процедур методу Дельфі. Якщо m вказує на число визначених критеріїв, то після застосування процедури ранжування, одержимо упорядкований набір критеріїв, який для зручності, не об-

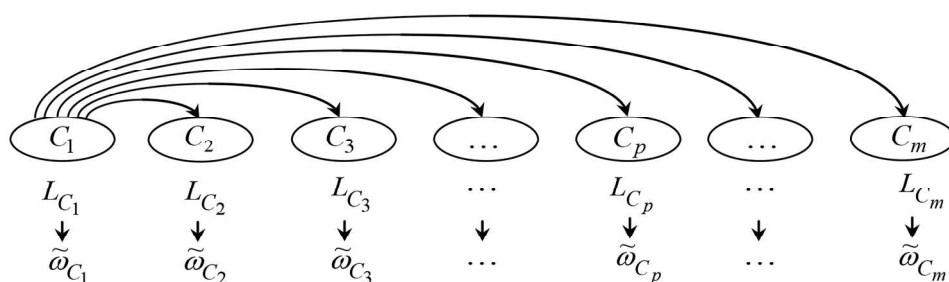


Рис. 4. Парні порівняння найбільш важливого критерію з іншими критеріями

Джерело: побудовано авторами на основі [8].

межуючи загальності, може бути відображений так: $C_1 \succ C_2 \succ C_3 \succ C_4 \succ \dots \succ C_m$ (зазначимо, що у наведеній послідовності можуть бути наявні знаки нестрогої переваги, тобто деякі критерії можуть бути рівноважними (наприклад, $C_1 \succ C_2 \approx C_3 \succ C_4 \succ \dots \succ C_m$)).

На кроці 2 на основі лінгвістичної шкали (табл. 1, рис. 3) здійснюються парні порівняння найбільш важливого критерію C_1 з іншими (C_1 з C_2 , C_1 з C_3 , C_1 з C_4 , ..., C_1 з C_m) для визначення відносної важливості (рис. 4) відповідних критеріїв. Зазначимо, що дана шкала відрізняється від наведеної в [4; 8], але вона більш варіативна, більш адекватна при оцінюванні об'єктів, для яких при їх парному порівнянні немає надзвичайно сильної переваги одного над іншим та більшою мірою забезпечує умови транзитивності, які є важливими при застосуванні даного методу через його специфіку в контексті забезпечення максимальної узгодженості порівнянь експертів.

Застосовуючи представлення лінгвістичних термів у вигляді нечітких трикутних чисел (табл. 1), на кроці 3 можна отримати нечіткі оцінки у вигляді: $\tilde{w}_{C_j}^k = (x_{C_j}^k; y_{C_j}^k; z_{C_j}^k)$, ($j = \overline{1, m}$), причому $\tilde{w}_{C_1}^k = (1; 1; 1)$, $k = \overline{1, K}$.

На кроці 4 для кожного k -го експерта ($k = 1, 2, \dots, K$) необхідно розрахувати відносну важливість критеріїв при порівнянні з у вигляді:

$$\tilde{\Phi}_{C_j/C_{j+1}}^k = \frac{\tilde{w}_{C_{j+1}}^k}{\tilde{w}_{C_j}^k} = \frac{(x_{C_{j+1}}^k; y_{C_{j+1}}^k; z_{C_{j+1}}^k)}{(x_{C_j}^k; y_{C_j}^k; z_{C_j}^k)} = \left(\frac{x_{C_{j+1}}^k}{z_{C_j}^k}, \frac{y_{C_{j+1}}^k}{y_{C_j}^k}, \frac{z_{C_{j+1}}^k}{x_{C_j}^k} \right) \quad (1).$$

Таким чином буде побудовано нечіткий вектор:

$$\tilde{\Phi}^k = (\tilde{\Phi}_{C_1/C_2}^k; \tilde{\Phi}_{C_2/C_3}^k; \dots; \tilde{\Phi}_{C_{m-1}/C_m}^k) \quad (2).$$

На кроці 5 необхідно агрегувати одержані нечіткі оцінки за формулою (3):

$$\tilde{\Phi}_{C_j/C_{j+1}} = \frac{1}{K} \bigoplus_{k=1}^K \tilde{\Phi}_{C_j/C_{j+1}}^k = \left(\varphi_{C_j/C_{j+1}}^\alpha; \varphi_{C_j/C_{j+1}}^\beta; \varphi_{C_j/C_{j+1}}^\gamma \right), \quad j = \overline{1, m} \quad (3).$$

Далі на кроці 6 необхідно дослідити групову узгодженість оцінок експертів, наприклад, обчисленням значення девіації від середнього значення та встановленням відповідного максимального рівня відхилення. Якщо розраховане значення перевищує встановлене значення, то необхідно переглянути експертні оцінки, застосувавши, наприклад, процедуру методу Fuzzy Delphy.

На кроці 7 модель нечіткого нелінійного програмування для обчислення $\tilde{w}_j = (\alpha_j; \beta_j; \gamma_j)$, ($j = \overline{1, m}$) може бути визначена так (4):

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon} \rightarrow \min \\ \left| \tilde{w}_j(-) \tilde{w}_{j+1} \otimes \tilde{\Phi}_{C_j/C_{j+1}} \right| \leq \tilde{\varepsilon}, \quad j = \overline{1, m-1}; \\ \left| \tilde{w}_j(-) \tilde{w}_{j+2} \otimes \tilde{\Phi}_{C_j/C_{j+1}} \otimes \tilde{\Phi}_{C_{j+1}/C_{j+2}} \right| \leq \tilde{\varepsilon}, \quad j = \overline{1, m-2}; \\ \frac{1}{6} \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j + 4 \sum_{j=1}^m \beta_j + \sum_{j=1}^m \gamma_j \right) = 1; \\ \alpha_j \leq \beta_j \leq \gamma_j; \alpha_j \geq 0, j = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (4).$$

Далі на кроці 8 необхідно записати систему рівнянь та нерівностей у crisp-вигляді (за кожною компонентою нечіткого числа) — співвідношення (5):

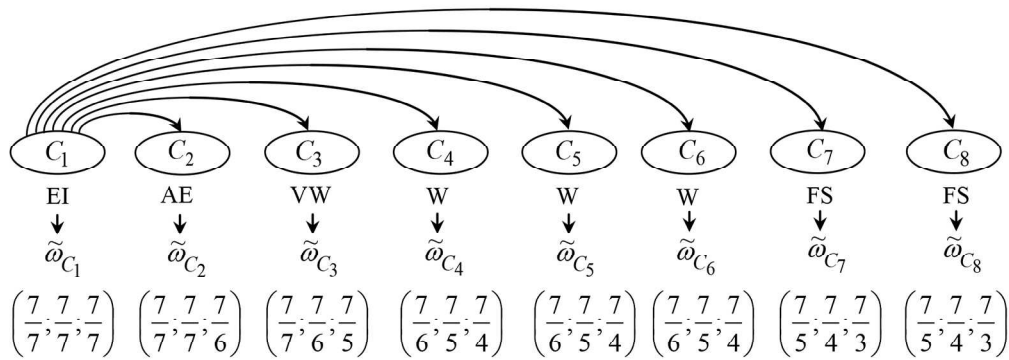


Рис. 5. Експертні лінгвістичні та відповідні нечіткі оцінки важливості складових (критеріїв оцінювання) стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development"

Джерело: визначено на основі групового консенсусу експертів.

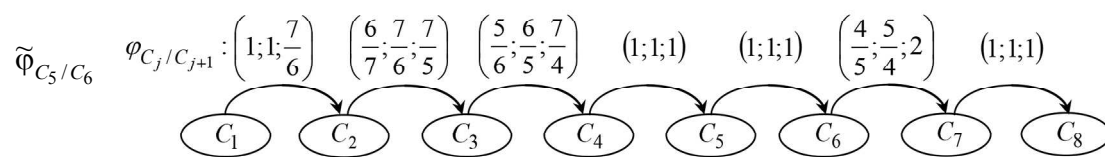


Рис. 6. Розраховані нечіткі значення $\tilde{\varphi}_{C_j/C_{j+1}}$ ($j = 1, 2, \dots, 7$)

Джерело: розраховано авторами.

$\varepsilon \rightarrow \min$

$$\begin{cases}
 \left| \alpha_j - \gamma_{j+1} \times \varphi_{C_j/C_{j+1}}^\gamma \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_j - \beta_{j+1} \times \varphi_{C_j/C_{j+1}}^\beta \right| \leq \varepsilon; \left| \gamma_j - \alpha_{j+1} \times \varphi_{C_j/C_{j+1}}^\alpha \right| \leq \varepsilon; j = \overline{1, m-1} \\
 \left| \alpha_j - \gamma_{j+2} \times \varphi_{C_{j+1}/C_{j+2}}^\gamma \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_j - \beta_{j+2} \times \varphi_{C_{j+1}/C_{j+2}}^\beta \right| \leq \varepsilon; \\
 \left| \gamma_j - \alpha_{j+2} \times \varphi_{C_{j+1}/C_{j+2}}^\alpha \right| \leq \varepsilon; j = \overline{1, m-2}. \\
 \frac{1}{6} \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j + 4 \sum_{j=1}^m \beta_j + \sum_{j=1}^m \gamma_j \right) = 1; \\
 \alpha_j \leq \beta_j \leq \gamma_j; \alpha_j \geq 0; j = \overline{1, m}.
 \end{cases} \quad (5).$$

Розв'язуючи побудовану задачу нелінійного програмування, можна визначити невідомі значення $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, j = \overline{1, m}$ та сформувати на 9 кроці нечіткі значення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання: $\tilde{w}_j = (\alpha_j; \beta_j; \gamma_j)$.

Розглянемо застосування Fuzzy FUCOM для визначення важливості складових стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development" із використанням лінгвістичної 7-рівневої шкали, наведеної у табл. 1. Для цього експертами виділені такі складові (критерії оцінювання) стратегічного потенціалу: C_1 — маркетинговий потенціал; C_2 — фінансово-економічний потенціал; C_3 — виробничий потенціал; C_4 — управлінсько-організаційний потенціал; C_5 — ресурсно-сировинний потенціал; C_6 — інноваційно-технологічний потенціал; C_7 — інвестиційний потенціал; C_8 — інформаційний потенціал.

На рис. 5 наведені експертні лінгвістичні та відповідні нечіткі оцінки важливості складових (критеріїв оцінювання) стратегічного потенціалу компанії "CCG Development" (визначені на основі групового консенсусу п'яти експертів), а на рис. 6 — розраховані нечіткі значення $\tilde{\varphi}_{C_j/C_{j+1}}$ ($j = \overline{1; 7}$).

Зазначимо, що $\tilde{\varphi}_{C_4/C_5}$ та $\tilde{\varphi}_{C_7/C_8}$ одержані на основі евристики (якщо при порівнянні критерію з іншими критеріями, наприклад, з C_j та C_{j+1} , одержані однакові оцінки важливості, то при обчисленні відносних важливостей доцільно скористатися наступним співвідношенням: $\tilde{\varphi}_{C_j/C_{j+1}} = (1; 1; 1)$). Використовуючи результати наведені на рис. 6, можна обчислити наступні нечіткі значення:

$$\tilde{\varphi}_{C_1/C_2} \otimes \tilde{\varphi}_{C_2/C_3} = \left(\frac{6}{7}; \frac{7}{6}; \frac{49}{30} \right); \quad \tilde{\varphi}_{C_2/C_3} \otimes \tilde{\varphi}_{C_3/C_4} = \left(\frac{5}{7}; \frac{7}{5}; \frac{49}{20} \right); \quad \tilde{\varphi}_{C_3/C_4} \otimes \tilde{\varphi}_{C_4/C_5} = \left(\frac{5}{6}; \frac{6}{5}; \frac{7}{4} \right); \quad \tilde{\varphi}_{C_4/C_5} \otimes \tilde{\varphi}_{C_5/C_6} = (1; 1; 1);$$

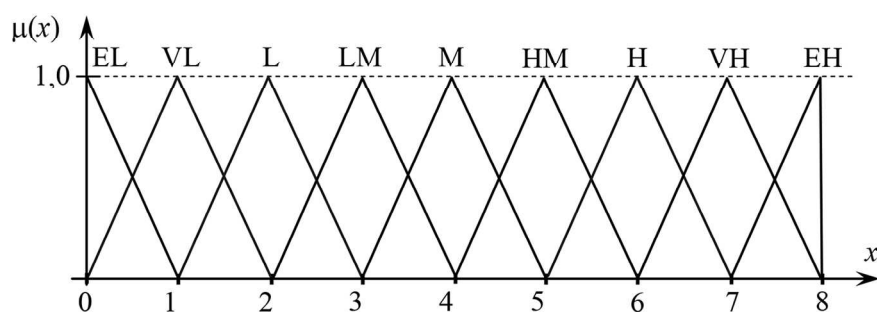


Рис. 7. Функції належності термів лінгвістичного оцінювання рівня локальних потенціалів стратегічного потенціалу

Джерело: розроблено авторами на основі [4].

Таблиця 2. Лінгвістичні оцінки експертів рівня стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development" за критеріями оцінювання

Локальні потенціали	Експерти				
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
C_1 – маркетинговий потенціал	H	HM	M	HM	H
C_2 – фінансово-економічний потенціал	HM	HM	M	HM	H
C_3 – виробничий потенціал	HM	M	M	HM	LM
C_4 – управлінсько-організаційний потенціал	H	M	HM	H	H
C_5 – ресурсно-сировинний потенціал	VH	H	H	VH	H
C_6 – інноваційно-технологічний потенціал	VH	VH	H	H	VH
C_7 – інвестиційний потенціал	H	VH	H	H	H
C_8 – інформаційний потенціал	LM	M	LM	M	LM

Джерело: побудовано авторами на основі експертних оцінок.

$$\tilde{\varphi}_{C_5/C_6} \otimes \tilde{\varphi}_{C_6/C_7} = \left(\frac{4}{5}, \frac{5}{4}; 2 \right); \tilde{\varphi}_{C_6/C_7} \otimes \tilde{\varphi}_{C_7/C_8} = \left(\frac{4}{5}, \frac{5}{4}; 2 \right).$$

Тоді система рівнянь та нерівностей у crisp-вигляді задачі нелінійного програмування з невідомими α_j ; β_j ; γ_j , ($j = \overline{1, 8}$) матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\alpha_1 - \gamma_2| \leq \varepsilon; |\beta_1 - \beta_2| \leq \varepsilon; \left| \gamma_1 - \frac{7}{6} \alpha_2 \right| \leq \varepsilon; \left| \alpha_2 - \frac{6}{7} \gamma_3 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_2 - \frac{7}{6} \beta_3 \right| \leq \varepsilon; \left| \gamma_2 - \frac{7}{5} \alpha_3 \right| \leq \varepsilon; \\ \left| \alpha_3 - \frac{5}{6} \gamma_4 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_3 - \frac{6}{5} \beta_4 \right| \leq \varepsilon; \left| \gamma_3 - \frac{7}{4} \alpha_4 \right| \leq \varepsilon; |\alpha_4 - \gamma_5| \leq \varepsilon; |\beta_4 - \beta_5| \leq \varepsilon; |\gamma_4 - \alpha_5| \leq \varepsilon; \\ |\alpha_5 - \gamma_6| \leq \varepsilon; |\beta_5 - \beta_6| \leq \varepsilon; |\gamma_5 - \alpha_6| \leq \varepsilon; \left| \alpha_6 - \frac{4}{5} \gamma_7 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_6 - \frac{5}{4} \beta_7 \right| \leq \varepsilon; |\gamma_6 - 2\alpha_7| \leq \varepsilon; \\ |\alpha_7 - \gamma_8| \leq \varepsilon; |\beta_7 - \beta_8| \leq \varepsilon; |\gamma_7 - \alpha_8| \leq \varepsilon; \\ \left| \alpha_1 - \frac{6}{7} \gamma_3 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_1 - \frac{7}{6} \beta_3 \right| \leq \varepsilon; \left| \gamma_1 - \frac{49}{30} \alpha_3 \right| \leq \varepsilon; \left| \alpha_2 - \frac{5}{7} \gamma_4 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_2 - \frac{7}{5} \beta_4 \right| \leq \varepsilon; \left| \gamma_2 - \frac{49}{20} \alpha_4 \right| \leq \varepsilon; \\ \left| \alpha_3 - \frac{5}{6} \gamma_5 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_3 - \frac{6}{5} \beta_5 \right| \leq \varepsilon; \left| \gamma_3 - \frac{7}{4} \alpha_5 \right| \leq \varepsilon; |\alpha_4 - \gamma_6| \leq \varepsilon; |\beta_4 - \beta_6| \leq \varepsilon; |\gamma_4 - \alpha_6| \leq \varepsilon; \\ \left| \alpha_5 - \frac{4}{5} \gamma_7 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_5 - \frac{5}{4} \beta_7 \right| \leq \varepsilon; |\gamma_5 - 2\alpha_7| \leq \varepsilon; \left| \alpha_6 - \frac{4}{5} \gamma_8 \right| \leq \varepsilon; \left| \beta_6 - \frac{5}{4} \beta_8 \right| \leq \varepsilon; |\gamma_6 - 2\alpha_8| \leq \varepsilon; \\ \frac{1}{6} \left(\sum_{j=1}^8 \alpha_j + 4 \sum_{j=1}^8 \beta_j + \sum_{j=1}^8 \gamma_j \right) = 1; \\ \alpha_1 \leq \beta_1 \leq \gamma_1; \alpha_1 \geq 0; \alpha_2 \leq \beta_2 \leq \gamma_2; \alpha_2 \geq 0; \\ \alpha_3 \leq \beta_3 \leq \gamma_3; \alpha_3 \geq 0; \alpha_4 \leq \beta_4 \leq \gamma_4; \alpha_4 \geq 0; \\ \alpha_5 \leq \beta_5 \leq \gamma_5; \alpha_5 \geq 0; \alpha_6 \leq \beta_6 \leq \gamma_6; \alpha_6 \geq 0; \\ \alpha_7 \leq \beta_7 \leq \gamma_7; \alpha_7 \geq 0; \alpha_8 \leq \beta_8 \leq \gamma_8; \alpha_8 \geq 0. \end{array} \right.$$

Таблиця 3. Нечіткі експертні оцінки у триангулярні формі рівня ССП за критеріями оцінювання

Локальні потенціали	Експерти					Агреговані оцінки
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	
$\tilde{P}_1$	(5; 6; 7)	(4; 5; 6)	(3; 4; 5)	(4; 5; 6)	(5; 6; 7)	(4,2; 5,2; 6,2)
$\tilde{P}_2$	(4; 5; 6)	(4; 5; 6)	(3; 4; 5)	(4; 5; 6)	(5; 6; 7)	(4,0; 5,0; 6,0)
$\tilde{P}_3$	(4; 5; 6)	(3; 4; 5)	(3; 4; 5)	(4; 5; 6)	(2; 3; 4)	(3,2; 4,2; 5,2)
$\tilde{P}_4$	(5; 6; 7)	(3; 4; 5)	(4; 5; 6)	(5; 6; 7)	(5; 6; 7)	(4,2; 5,2; 6,2)
$\tilde{P}_5$	(6; 7; 8)	(5; 6; 7)	(5; 6; 7)	(6; 7; 8)	(5; 6; 7)	(5,4; 6,4; 7,4)
$\tilde{P}_6$	(6; 7; 8)	(6; 7; 8)	(5; 6; 7)	(5; 6; 7)	(6; 7; 8)	(5,6; 6,6; 7,6)
$\tilde{P}_7$	(5; 6; 7)	(6; 7; 8)	(5; 6; 7)	(5; 6; 7)	(5; 6; 7)	(5,2; 6,2; 7,2)
$\tilde{P}_8$	(2; 3; 4)	(3; 4; 5)	(2; 3; 4)	(3; 4; 5)	(2; 3; 4)	(2,4; 3,4; 4,4)

Джерело: побудовано авторами на основі експертних оцінок.

Таблиця 4. "Зважені" нечіткі оцінки рівня локальних потенціалів та інтегрального рівня ССП

«Зважені» нечіткі оцінки рівня локальних потенціалів (при різних значеннях α)			
α	$\alpha = 0,0$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,9$
$\tilde{P}_1^* = \tilde{w}_1 \otimes \tilde{P}_1$	(0,6709; 0,8306; 0,9903)	(0,7507; 0,8306; 0,9105)	(0,8146; 0,8306; 0,8466)
$\tilde{P}_2^* = \tilde{w}_2 \otimes \tilde{P}_2$	(0,4606; 0,9204; 1,1045)	(0,6905; 0,9204; 1,0124)	(0,8744; 0,9204; 0,9388)
$\tilde{P}_3^* = \tilde{w}_3 \otimes \tilde{P}_3$	(0,3627; 0,6656; 0,8526)	(0,5142; 0,6656; 0,7591)	(0,6353; 0,6656; 0,6843)
$\tilde{P}_4^* = \tilde{w}_4 \otimes \tilde{P}_4$	(0,4004; 0,6022; 0,7180)	(0,5013; 0,6022; 0,6601)	(0,5820; 0,6022; 0,6138)
$\tilde{P}_5^* = \tilde{w}_5 \otimes \tilde{P}_5$	(0,5148; 0,7412; 0,8570)	(0,6280; 0,7412; 0,7991)	(0,7186; 0,7412; 0,7528)
$\tilde{P}_6^* = \tilde{w}_6 \otimes \tilde{P}_6$	(0,5339; 0,7644; 0,8802)	(0,6491; 0,7644; 0,8223)	(0,7413; 0,7644; 0,7759)
$\tilde{P}_7^* = \tilde{w}_7 \otimes \tilde{P}_7$	(0,3544; 0,5800; 0,6736)	(0,4672; 0,5800; 0,6268)	(0,5574; 0,5800; 0,5894)
$\tilde{P}_8^* = \tilde{w}_8 \otimes \tilde{P}_8$	(0,1636; 0,3181; 0,4116)	(0,2408; 0,3181; 0,3648)	(0,3026; 0,3181; 0,3274)
$\tilde{P} = \bigoplus_{j=1}^8 \tilde{w}_j \otimes \tilde{P}_j$	(3,4611; 5,4225; 6,4878)	(4,4418; 5,4225; 5,9552)	(5,2264; 5,4225; 5,5290)

Джерело: розраховано авторами.

Для програмної реалізації та чисельного розв'язання оптимізаційної задачі було використано мову програмування Python разом із бібліотекою наукових обчислень SciPy (модуль `scipy.optimize`) [11]. Дана бібліотека використовується для широкого спектру алгоритмів умовної оптимізації, зокрема використаних у роботі методів SLSQP та COBYLA. Для забезпечення достовірності результатів та уникнення пасток локальних мінімумів було застосовано перехресну верифікацію (cross-validation) з використанням двох принципово різних алгоритмів оптимізації:

1) SLSQP (Sequential Least Squares Programming) — метод послідовного квадратичного програмування [6; 7] — градієнтний метод, який ефективно працює з гладкими функціями та складними обмеженнями рівності/нерівності й забезпечує високу точність локального пошуку;

2) COBYLA (Constrained Optimization BY Linear Approximation) — метод лінійної апроксимації [9] — безградієнтний метод (прямого пошуку), який будує симплекс та лінійно апроксимує обмеження. Він є більш стійким до негладких функцій. На відміну від градієнтних методів (як SLSQP), які використовують інформацію про нахил функції для вибору напрямку, COBYLA будує локальні лінійні моделі функції та обмежень. При застосуванні даного методу не обчислюються похідні, а будуються лінійні апроксимації функції. Це робить його стійким до "шуму" та розривів.

Обидва методи показали повну збіжність до ідентичного результату (з точністю до 8-го знаку після коми). Варто зазначити, що також була спроба скористатися комбінованим методом "Штрафних функцій + Dual Annealing" [12], який демонструє низьку швидкість збіжності до області оптимальних значень. Це пояснюється великою кількістю змінних. Простором пошуку є величезний 24-вимірний куб. Водночас, використання методу диференціальної еволюції (Differential Evolution) [10] виявилось неефективним через високу обчислювальну складність: алгоритм потребує значних часових витрат, і навіть при збільшенні ліміту до 50 000 ітерацій задовільний розв'язок знайдено не було.

Отже, одержані такі вагові коефіцієнти важливості складових стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development":

$$\begin{aligned} \tilde{w}_1 &= (0,1597; 0,1597; 0,1597); \tilde{w}_2 = (0,1151; 0,1841; 0,1841); \tilde{w}_3 = (0,1232; 0,1395; 0,1591); \\ \tilde{w}_4 &= (0,1047; 0,1184; 0,1317); \tilde{w}_5 = (0,1047; 0,1184; 0,1317); \tilde{w}_6 = (0,1047; 0,1184; 0,1317); \\ \tilde{w}_7 &= (0,0831; 0,0995; 0,1145); \tilde{w}_8 = (0,0831; 0,0995; 0,1145). \end{aligned}$$

Для лінгвістичного оцінювання рівня локальних потенціалів стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development" на етапі 4 будемо використовувати наступну терм-множину: $T = \{\text{надзвичайно низький} — \text{Extremely Low (EL)}, \text{дуже низький} — \text{Very Low (VL)}; \text{низький} — \text{Low (L)}; \text{низький-середній} — \text{(LM)}; \text{середній} — \text{(M)}; \text{високий-середній} — \text{(HM)}; \text{високий} — \text{High (H)}; \text{дуже високий} — \text{Very High (VH)}, \text{надзвичайно високий} — \text{Extremely High (EH)}\}$. Семантика термів задається нечіткими числами на інтервалі $[0; 8]$ (рис. 7) з відповідними функціями належності — EL: $(0; 0; 1)$; VL: $(0; 1; 2)$; L: $(1; 2; 3)$; LM: $(2; 3; 4)$; M: $(3; 4; 5)$; HM: $(4; 5; 6)$; H: $(5; 6; 7)$; VH: $(6; 7; 8)$; EH: $(7; 8; 8)$.

Результати лінгвістичного оцінювання експертами рівня складових локальних потенціалів стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development" наведені в табл. 2.

На етапі 5 лінгвістичні оцінки перетворимо у відповідні нечіткі числа оцінки в триангулярній формі (табл. 3). У табл. 3 також наведені агреговані (середні) оцінки складових стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development", розраховані на 6 етапі за формулою (6):

$$\tilde{P}_j = \frac{1}{K} \bigoplus_{k=1}^K \tilde{P}_j^k = \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_j^k; \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_j^k; \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c_j^k \right) = (a_j; b_j; c_j) \quad (6).$$

Після цього на етапі 7 здійснюється перевірка групової узгодженості оцінок експертів, наприклад, визначенням рівня девіації від середніх оцінок. У разі перевищення встановленого рівня може бути застосована процедура Fuzzy Delphy.

Для "уточнення" (зменшення рівня нечіткості, розмитості) одержаних нечітких оцінок використовується - переріз, який для заданого нечіткого числа в триангулярному вигляді $\tilde{u} = (a, b, c)$ визначається за формулою $\tilde{u}_\alpha = (a(1-\alpha) + \alpha b, b, c(1-\alpha) + \alpha b)$, (табл. 4, рис. 8).

На етапі 8 інтегральне значення рівня стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development" з урахуванням важливості його складових можна обчислити за формулою методу Fuzzy SAW (7):

$$\tilde{P} = \bigoplus_{j=1}^m \tilde{w}_j \otimes \tilde{P}_j = \bigoplus_{j=1}^m (\alpha_j; \beta_j; \gamma_j) \otimes (a_j; b_j; c_j) = \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j a_j; \sum_{j=1}^m \beta_j b_j; \sum_{j=1}^m \gamma_j c_j \right) = (P_a; P_b; P_c) \quad (7).$$

Інтегральне значення рівня стратегічного потенціалу будівельної компанії "CCG Development" при різних значеннях наведено в табл. 4.

Слід зазначити, що інтегральне дефазифіковане значення рівня ССП для будівельної компанії "CCG Development" становить $P = 5,3478$ бала (при можливому максимумі 8 балів), що свідчить про достатньо високий рівень стратегічного потенціалу підприємства.

На етапі 9 отримана інформація щодо рівня ССП та його складових може бути використана для розробки стратегічних рекомендацій та стратегічного набору підприємства.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасних умовах складного та турбулентного середовища функціонування підприємств їх успішна діяльність залежить від формування та ефективного використання його стратегічного потенціалу, оскільки він визначає стратегічні можливості підприємства, забезпечує ефективне використання його ресурсів та резервів, розробку та реалізацію стратегій розвитку.

У даній статті розроблено новий методичний підхід до оцінювання стратегічного потенціалу підприємства, який апробовано для будівельної компанії з урахуванням нечіткості даних, одержаних від експертів (у вигляді лінгвістичних експертних оцінок), що зумовило застосування нечіткої методології: теорії нечітких множин та нечіткого багатокритерійного аналізу, зокрема Fuzzy FUCOM та Fuzzy SAW. Запропонована лінгвістична шкала оцінювання з відповідними трикутними функціями належності для застосування Fuzzy FUCOM більшою мірою порівняно з оригінальною шкалою забезпечує умови транзитивності та варіативності оцінок. Трансформація побудованої нечіткої моделі нелінійного програмування згідно з Fuzzy FUCOM в crisp-модель здійснена на основі формул нечітких обчислень, а для дефазифікації — GMIR (Graded Mean Integration Representation). Для програмної реалізації та чисельного розв'язання оптимізаційної задачі було використано мову програмування Python разом із бібліотекою наукових обчислень SciPy. Результатом застосування запропонованого методичного підходу є "зважені" нечіткі оцінки локальних потенціалів та інтегральна оцінка рівня стратегічного потенціалу підприємства.

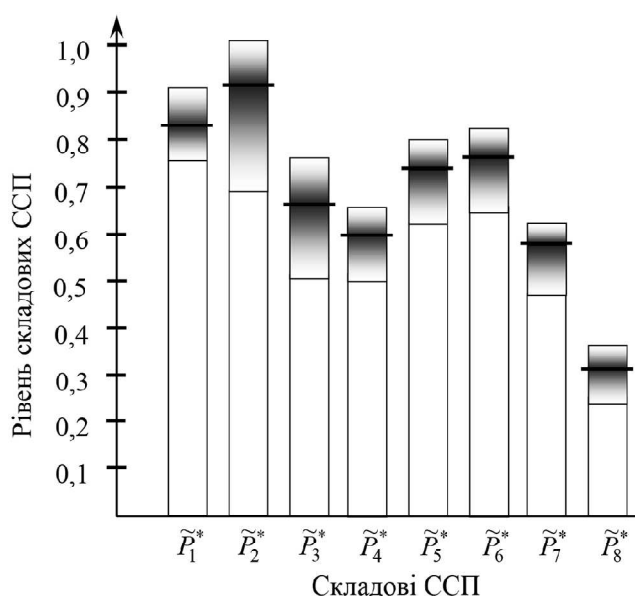


Рис. 8. "Зважені" нечіткі оцінки локальних потенціалів підприємства (при $\alpha = 0,5$)

Джерело: побудовано авторами на основі розрахунків.

Подальші розвідки за темою даного дослідження можуть бути спрямовані:

- на адаптацію розробленого методичного підходу до підприємств інших галузей на основі ідентифікації відповідних локальних потенціалів та їх декомпозиції на складові;
- на його застосування для компаративного оцінювання стратегічних потенціалів підприємств-конкурентів.

Література:

1. Антонюк О.В. Оцінка стратегічного потенціалу підприємства з використанням нейронної мережі Хопфілда. Вісник Хмельницького національного університету. 2010. Т. 1. № 4. С. 34—37.

2. Азарова А.О., Антонюк О.В. Математичні моделі оцінювання стратегічного потенціалу підприємства та прийняття рішень щодо його підвищення: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2012. 168 с.

3. Balan V., Makarchenko V. Fuzzy approach to assessing the strategic potential of a dairy processing enterprise. International Scientific Journal "Internauka". Series: "Economic Sciences". 2023. № 3(71). С. 115—130. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-3-8684>

4. Guo S., Zhao H. Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems. 2017. Vol. 121. P. 23—31. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010>

5. Koval Z. Theoretical and methodological approaches to assessing the strategic potential of an enterprise. Technology Audit and Production Reserves, 2025. No. 5/4(85). P. 20—25. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.341477>

6. Kraft D. A software package for sequential quadratic programming. DFVLR, Oberpfaffenhofen, 1988. 33 p.

7. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. 2nd ed. New York: Springer, 2006. 664 p.

8. Pamucar D., Ecer F. Prioritizing the weights of the evaluation criteria under fuzziness: the Fuzzy Full Consistency Method — FUCOM-F. Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. 2020. Vol. 18. No. 3. P. 419-437. <https://doi.org/10.22190/FUME200602034P>

9. Powell M.J.D. A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. In: Gomez, S., Hennart, J.P. (eds) Advances in Optimization and Numerical Analysis. Mathematics and Its Applications. Springer, Dordrecht, 1994. Vol 275. Pp. 51—67. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8330-5_4 1994.

10. Storn R., Price K. Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization. 1997. Vol. 11 (4). P. 341—359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>

11. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., Reddy T. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Nature Methods. 2020. Vol. 17. Pp. 261—272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

12. Xiang Y., Sun D.Y., Fan W., Gong X.G. Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model. Physics Letters. 1997. Vol. 233 (3). P. 216—220. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(97\)00474-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(97)00474-X)

13. Zhylynska O., Makarchenko V. Strategic potential management fuzzy model. Neuro-fuzzy modeling technologies in economics. 2025. № 14. P. 3—31. <https://doi.org/10.33111/nfmte.2025.003>

References:

1. Antoniuk, O.V. (2010), "Assessment of the strategic potential of an enterprise using a Hopfield neural network", Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, vol. 1, no. 4, pp. 34—37.

2. Azarova, A.O. and Antoniuk, O.V. (2012), Matematychni modeli otsiniuvannia stratehichnoho potentsialu pidpriemstva ta pryiniattia rishen shchodo yoho pidvyshchennia: monohrafiia [Mathematical models for assessing the strategic potential of an enterprise and making decisions about its improvement: monograph], VNTU, Vinnytsia, Ukraine.

3. Balan, V. and Makarchenko, V. (2023), "Fuzzy approach to assessing the strategic potential of a dairy processing enterprise", International Scientific Journal "Internauka". Series: "Economic Sciences", vol. 3 (71), pp. 115—130. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-3-8684>

4. Guo, S. and Zhao, H. (2017), "Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems, vol. 121, pp. 23—31. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010>

5. Koval, Z. (2025), "Theoretical and methodological approaches to assessing the strategic potential of an enterprise", Technology Audit and Production Reserves, vol. 5/4 (85), pp. 20—25. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.341477>

6. Kraft, D. (1988), A software package for sequential quadratic programming, DFVLR, Oberpfaffenhofen, DEU.

7. Nocedal, J. and Wright, S.J. (2006), Numerical Optimization, 2nd ed. Springer, New York, USA.

8. Pamucar, D. and Ecer, F. (2020), "Prioritizing the weights of the evaluation criteria under fuzziness: the Fuzzy Full Consistency Method — FUCOM-F", Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 419—437. <https://doi.org/10.22190/FUME200602034P>

9. Powell, M.J.D. (1994), "A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation". Advances in Optimization and Numerical Analysis. Mathematics and Its Applications, Springer, Dordrecht, vol 275, pp. 51—67. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8330-5_4 1994.

10. Storn, R. and Price, K. (1997), "Differential Evolution — A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces", Journal of Global Optimization, vol. 11 (4), pp. 341—359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>

11. Virtanen, P. Gommers, R. Oliphant, T.E. Haberland, M. and Reddy, T. (2020), "SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python" Nature Methods, vol. 17, pp. 261—272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

12. Xiang, Y. Sun, D.Y. Fan, W. and Gong, X.G. (1997), "Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model", Physics Letters, vol. 233 (3), pp. 216—220. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(97\)00474-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(97)00474-X)

13. Zhylynska, O. and Makarchenko, V. (2025), "Strategic potential management fuzzy model", Neuro-fuzzy modeling technologies in economics, vol. 14, pp. 3—31. <https://doi.org/10.33111/nfmte.2025.003>

Стаття надійшла до редакції 10.01.2026 р.