

УДК 519.8:378.147:004.9

В. І. Кудін¹, О. Є. Іларіонов¹, В. В. Циганок^{1,2}, О. О. Власенко^{1,2},
О. С. Подскребко¹, О. А. Золотухіна¹

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська, 64/13, 01601 Київ, Україна

²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна
e-mail: o.vlasenko@knu.ua

Розвиток процедур прийняття рішень вільного вибору дисциплін з урахуванням компетентності учасників навчального процесу

Розглянуто інтегровану математичну модель формування індивідуальної освітньої траєкторії (ІОТ) студента, яка поєднує методи багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) і формалізоване оцінювання рівня компетентності учасників навчального процесу. Обґрунтовано доцільність застосування ряду методів АНР, TOPSIS, ELECTRE, ранжування для оптимізації вибору елективних дисциплін в умовах багатокритеріальності та конфлікту критеріїв. Приділено увагу задачі вибору, удосконалену включенням функції інтегральної оцінки урахування коефіцієнта компетентності студента та порогових обмежень. Розроблено алгоритм реалізації моделі, наведено ілюстративний приклад вибору дисципліни, описано загальні риси архітектури інформаційно-консультативної системи підтримки прийняття рішень. Установлено, що інтеграція компетентнісного підходу з MCDM-методами підвищує обґрунтованість, прозорість і стратегічну узгодженість освітніх рішень.

Ключові слова: індивідуальна освітня траєкторія, елективні дисципліни, багатокритеріальне прийняття рішень (MCDM), оцінювання компетентності, метод аналізу ієрархій (АНР), TOPSIS, оптимізація вибору, освітня аналітика.

Вступ

Сучасна парадигма вищої освіти орієнтована на персоналізацію навчання, що передбачає формування індивідуальної освітньої траєкторії (ІОТ) як інструменту реалізації академічної свободи здобувача. Ключовим елементом ІОТ є вибір елективних дисциплін, який безпосередньо впливає на професійний профіль, рівень сформованості компетентностей і конкурентоспроможність випускника.

© В. І. Кудін, О. Є. Іларіонов, В. В. Циганок, О. О. Власенко, О. С. Подскребко, О. А. Золотухіна

Однак зростання кількості альтернатив, різноманітність критеріїв відбору (академічні, професійно-кар'єрні, організаційні, особистісні) та їхній суперечливий характер ускладнюють процес прийняття обґрунтованого рішення. Інтуїтивні підходи або неформальні рекомендації не гарантують оптимальності вибору. Виникає потреба у формалізованих, науково обґрунтованих інструментах підтримки, здатних структурувати задачу та запропонувати кількісне рішення. Таким інструментом виступають методи багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Making, MCDM).

Метою дослідження є розвиток відомих алгоритмів і процедур (складові інтегрованої багатокритеріальної моделі формування ІОТ). Зокрема, включенням у різні MCDM-методи формалізованого оцінювання рівня компетентності студента, розроблення ряду процедур алгоритмів, які подаються у вигляді послідовності покрокових дій. Уведенням у розгляд відповідних структур базових профілів для алгоритмів проведення обчислень для реалізації відповідної процедури (системи підтримки прийняття рішень).

MCDM-методи у формуванні ІОТ: порівняльний аналіз

Для розв'язання задачі вибору елективів найбільш застосованими є наступні методи.

1. *Метод адитивної згортки.* Метод приведення задачі багатокритеріальної оптимізації до однокритеріальної оптимізації за наявності вагових коефіцієнтів значимості критеріїв (формується адитивна згортка критеріїв за ваговими коефіцієнтами). Встановлення значимості критеріїв здійснюється окремими (різноманітними) експертними процедурами.

2. *Метод аналізу ієрархії (АНР).* Метод дозволяє працювати з якісними критеріями, в якому переваги між критеріями описуються нечітко, а в результаті отримуються їхні кількісні оцінки (вагові коефіцієнти). У методі використовується поняття матриці попарних порівнянь. АНР ґрунтується на декомпозиції задачі в ієрархічну структуру (ціль – критерії – альтернативи) та попарному порівнянні елементів кожного рівня за шкалою Сааті [1]. *Переваги:* наочність, можливість оцінювання узгодженості суджень, ефективність при 4–8 альтернативах. *Недоліки:* зростання кількості порівнянь при великій кількості критеріїв.

3. *Метод TOPSIS.* Метод базується на ідеї вибору альтернативи, найближчої до позитивно-ідеального розв'язку та найвіддаленішої від негативно-ідеального [2]. У методі використовується зважена евклідова метрика. *Переваги:* простота, інтуїтивність. *Недоліки:* чутливість до масштабування оцінок.

4. *Методи ELECTRE та PROMETHEE.* Ці методи використовують концепцію надмірності (outranking) [3, 4]. Вони порівнюють пари альтернатив за кожним критерієм із застосуванням порогів узгодженості та неузгодженості. Ефективні в умовах неповної компенсації низьких оцінок за одними критеріями та високими за іншими.

5. *Методи ранжування без урахування компетентності та з її урахуванням.* Ґрунтуються на агрегуванні індивідуальних упорядкувань, які надаються студентами або іншими експертами. В базовому варіанті, без урахування компетентності, кожен учасник формує свій профіль — упорядкований список дисциплін, після чого за допомогою балів, приписаних місцям (наприклад, за перше місце — макси-

мальний бал, за останнє — мінімальний), обчислюються сумарні бали для кожної дисципліни. Нормування цих сум дає ваги, які інтерпретуються як колективна перевага. Розвиток цього підходу передбачає врахування компетентності осіб, що приймають рішення (ОПР). Компетентність може бути виражена кількісно, наприклад, через нормований рейтинговий бал студента або експерта. Тоді внесок кожної ОПР у сумарний бал дисципліни зважується її коефіцієнтом компетентності. Такий механізм дозволяє підвищити об'єктивність колективного рішення, надаючи більшої ваги думкам більш підготовлених або досвідчених учасників.

Висновок щодо вибору методу. У межах MCDM-методів важко надати перевагу одному з підходів до розв'язання задач. Урахування контенту поставленої задачі може надавати нові аргументи з вибору методу чи алгоритму. У багатьох реальних задачах доцільно використовувати (і використовуються) методи АНР як універсальні. Зокрема, на етапі визначення ваг критеріїв для їхнього впорядкування застосовні різні варіанти методів ранжування. Також є можливості поєднання різних підходів на основі згаданих методів.

Формалізація задачі вибору елективних дисциплін

MCDM-методи багатокритеріальної оптимізації можуть бути застосовані як до неперервної так і до дискретної постановки задач, як у просторі вихідних змінних так і у просторі критеріїв. Зокрема, у просторі критеріїв задача вибору елективних дисциплін у межах ІОТ є класичною багатокритеріальною задачею (дискретний випадок вибору з обмеженої кількості альтернатив), що описується такими основними компонентами:

— множиною альтернатив $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ — доступні елективні дисципліни;

— множиною критеріїв $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ — параметри оцінювання, що відображають різні аспекти вибору.

Вважаємо, що кожна альтернатива A_i характеризується вектором оцінок $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$. Задача полягає у виборі альтернативи (в просторі критеріїв), що максимізує інтегральну цільову функцію:

$$F(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{ij}, \quad (1)$$

де w_j — ваговий коефіцієнт j -го критерію, що відображає його відносну важливість для конкретного студента; x_{ij} — нормалізоване значення i -ї компоненти альтернативи за j -м критерієм.

Сума всіх вагових коефіцієнтів w_j дорівнює одиниці — $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Для розв'язання такої задачі потрібно наповнити змістом (значеннями) вектори альтернатив і встановити значення вагових коефіцієнтів. Зокрема, застосувати методи, що запропоновані вище.

Інтеграція моделі оцінювання компетентності

Традиційні MCDM-підходи враховують не лише об'єктивні характеристики альтернатив, а і суб'єктивні вподобання осіб, що приймають рішення, наприклад, студентів. При цьому, як правило, не береться до уваги, що готовність студента до опанування дисципліни так і до її вибору визначається його поточним рівнем компетентності. Згадана складова значима у системі якості вибору в подальшому.

Рівень компетентності, як параметр, природно зазнає змін, і для підвищення рівня об'єктивності суджень студента потрібен механізм актуального коригування (оцінювання) на основі участі в минулих і поточних проектах оцінювання. Саме для підвищення об'єктивності вибору пропонується введення коефіцієнта компетентності та механізмів його уточнення.

Наприклад, якщо R_i — поточний рейтинговий бал студента, R_{\max} — максимально можливий бал, то нормований показник компетентності визначається за формулою:

$$K_i = \frac{R_i}{R_{\max}}, K_i \in [0, 1]. \quad (2)$$

Також при оцінюванні може встановлюватись і порогове значення K_{\min} , яке визначає мінімально допустимий рівень компетентності для вибору дисциплін підвищеної складності. Якщо $K_i < K_{\min}$, то студент може обмежуватись у виборі окремих альтернатив (наприклад, курсів, що вимагають високого рівня попередньої підготовки).

Інтегральна функція прийняття рішення оцінювання студента може набувати вигляду:

$$F_{final}(A_i) = \alpha \cdot F(A_i) + \beta \cdot K_i, \alpha + \beta = 1, \quad (3)$$

де α, β — параметри, що визначають баланс між якістю альтернативи за критеріями та рівнем підготовки студента. Такий підхід дозволяє узгодити вибір дисципліни з академічним потенціалом студента, запобігаючи як заниженню складності траєкторії так і нереалістичним очікуванням.

Процедури і алгоритми реалізації інтегрованого оцінювання компетентності в моделі

Процедура 1. Вибір дисципліни (блоку дисциплін) студентами — без врахування компетентності.

Нехай $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ — множина студентів (виборців), а $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ — множина дисциплін (кандидатів), наприклад, нехай $n = m = 4$.

Студент-виборець робить своє індивідуальне впорядкування дисциплін-кандидатів, вказує відповідно порядковий номер за значимістю — (a, b, c, d) . Вважаємо, що за кожне місце у впорядкуванні приписуються свій бал. Наприклад, за 1-е місце (a) у впорядкуванні — d -балів, за 2-е місце (b) — $(d - 1)$ -бал, за 3-е (c) — $(d - 2)$ -балів, відповідно за останнє місце — $d = 1$. Місця впорядкування подаються односторонньо (не поділяються).

Початковий профіль заповнення можна подати в такому вигляді (табл. 1).

Таблиця 1. Профіль індивідуальних упорядкувань дисциплін студентами (без урахування компетентності)

Дисципліни	Студенти-виборці				Сума балів
	k_1	k_2	k_3	k_4	S
d_1	c	a	b	a	s_1
d_2	d	d	c	d	s_2
d_3	b	b	d	c	s_3
d_4	a	c	a	b	s_4

Алгоритм 1.

1. Кожен студент задає свій варіант впорядкування дисциплін (формує відповідний стовпець).

2. Проводимо перетворення створеного профілю (перекодування) — вносимо в таблицю відповідні бали за місця впорядкування.

3. Формуємо порядкові суми (за кожною із дисциплін), тобто s_1, s_2, s_3, s_4 .

4. Знаходимо загальну суму балів (за всіма дисциплінами) за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^d s_i, d = 4.$$

5. Знаходимо вагу кожної дисципліни за формулою:

$$r_i = \frac{s_i}{S}, i = \overline{1, d} (d=4), 1 \geq r_i \geq 0, \sum_{i=1}^d r_i = 1, d = 4.$$

6. Проводимо впорядкування знайдених ваг за спаданням. Чим більший ваговий коефіцієнт, тим більша значимість дисципліни.

7. За відомої загальної кількості студентів, що підлягають розподілу, можна визначити і чисельність кожної із груп за дисципліною, наприклад, за базовою формулою:

$$x_i = [(r_i \times P)], i = \overline{1, d} (d = 4), \quad (4)$$

де x_i — чисельність групи за дисципліною i ; P — загальна чисельність студентів, $[.]$ — ціла частина числа.

Процедура 2. Вибір дисципліни (блоку дисциплін) студентами — з урахуванням компетентності.

У цьому випадку табл. 1 зазнає деякої трансформації (включенням рядка компетентності студента-виборця). Сучасна технологія звітності в навчальному процесі надає можливість встановлювати рейтинг кожного учасника навчального процесу. Вважаємо, що цей показник відомий і попередньо уже проведено його нормування в межах, наприклад, 1.

Тоді включення такої інформації можна відобразити у табл. 2, як компетентність виборця — рядок $k_{10}, k_{20}, k_{30}, k_{40}$.

Таблиця 2. Профіль індивідуальних упорядкувань дисциплін студентами (з урахуванням компетентності)

Дисципліни	Студенти-виборці				Сума балів
	k_1	k_2	k_3	k_4	S
d_1	c	a	b	a	s_1
d_2	d	d	c	d	s_2
d_3	b	b	d	c	s_3
d_4	a	c	a	b	s_4
Компетентність	k_{10}	k_{20}	k_{30}	k_{40}	—

Алгоритм 1, який наведено вище, зазнає змін лише в пункті 2. А саме, проводимо перетворення створеного профілю (перекодування) — вносимо до таблиці відповідні бали за місця впорядкування та скалярно множимо отриманий рядок (вектор) на вектор компетентності виборців (студентів) — $(k_{10}, k_{20}, k_{30}, k_{40})$ та знаходимо суми рядків: s_1, s_2, s_3, s_4 .

Процедура 3. Як відомо, вибір дисципліни (блоку дисциплін) студентом обумовлюється врахуванням ряду критеріїв і їхньої пріоритетності, а тому додатковою

мотивацією студентів при прийнятті рішень є врахування не лише рівня компетентності, а також важливості критеріїв.

Можна навести ряд критеріїв, які реально враховуються студентами при прийнятті рішень, зокрема:

- популярність дисципліни;
- складність (використовуваної математичної бази знань);
- тривалість курсу;
- якість викладання (компетентність викладачів);
- технічне забезпечення дисципліни.

На основі методів ранжування (без та з урахуванням компетентності) можна запропонувати наступний профіль наступного вигляду: критерії оцінювання, експерти-студенти (табл. 3).

Таблиця 3. Оцінювання важливості критеріїв студентами-експертами з урахуванням їхньої компетентності

Студенти-експерти	Компетентність	Критерії вибору дисципліни			
		kr_1	kr_2	kr_3	kr_4
k_1	k_{10}	c	a	b	a
k_2	k_{20}	d	d	c	d
k_3	k_{30}	b	b	d	c
k_4	k_{40}	a	c	a	b
Сума балів	S	s_1	s_2	s_3	s_4

Алгоритм 2.

1. До табл. 3 вносимо дані: наприклад, 4 критерії вибору дисциплін (kr_1, kr_2, kr_3, kr_4), 4 студенти-експерти (k_1, k_2, k_3, k_4) та їхні відповідні компетентності — ($k_{10}, k_{20}, k_{30}, k_{40}$).

2. Студенти заповнюють відповідні рядки внесенням вагомості критеріїв балами (без повторів), наприклад, в табл. 3 — при 4-х критеріях ($a = 1, b = 2, c = 3, d = 4$).

3. Проводимо нормування заповнених рядків (експертами) — операція ділення елементів заповнених рядків на максимальну оцінку.

4. Знаходимо суми стовпців (за критеріями) s_1, s_2, s_3, s_4 (при врахуванні компетентності відповідні стовпці критеріїв множаться скалярно на вектор компетентності ($k_{10}, k_{20}, k_{30}, k_{40}$)).

5. Знаходимо загальну суму балів (за всіма 4-а критеріями) за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^d s_i, d = 4.$$

6. Знаходимо вагу кожного критерія за формулою:

$$r_i = \frac{s_i}{S}, i = \overline{1, d} (d = 4), 1 \geq r_i \geq 0, \sum_{i=1}^d r_i = 1, d = 4.$$

7. Проводимо впорядкування знайдених ваг критеріїв за спаданням. Чим більший ваговий коефіцієнт тим більша значимість критерію.

Це надає інформацію про те, якими критеріями та їхньою значимістю мотивувалися студенти при виборі дисципліни (чи не виборі).

Процедура 4. Коригування загальної компетентності учасників навчального процесу.

Слід зазначити, що діяльність учасників навчального процесу може тривати протягом тривалого часу, причому (можливо) з різною ефективністю. Врахування еволюції компетентності учасників спрямовано на врахування часових змін, з метою попередити та зменшити вплив некомпетентностей на якість рішень, що приймаються.

Наприклад, поточна успішність студента відслідковується в процесі навчання (рейтинговий бал), який впливає на різні показники (призначення стипендії тощо). Якщо відомий рейтинговий бал студента j та його максимальний рівень

$$R_j^{(i)}, R^{(i)} = \max_j R_j^{(i)} \quad K_j^{(i)} = R_j^{(i)} / \sum_{j=1}^n R_j^{(i)} = R_j^{(i)} / R^{(i)}, n = 4 \text{ (тобто, проведено нормування)}$$

та розрахунок для j -го студента його компетентності на i -й ітерації оцінювання, то результуюча компетентність на всіх ітераціях може бути оцінена співвідношенням: $K_j^{(i)} = \max_{i \in I} K_j^{(i)}, j \in J$ — оптимістично та песимістично — $K_j^{(i)} = \min_{i \in I} K_j^{(i)}, j \in J$.

При реальному включенні студента в процедуру оцінювання доцільним є введення також порогових меж компетентності $K_{\min}^{(i)}, k \in I$.

Аналогічні співвідношення можна навести і для інших учасників оцінювання.

Загальна схема реалізації інтегрованої моделі вибору дисципліни з використанням процедур оцінювання компетентності

Крок 1. Визначення рівня компетентності. Обчислення K_i за формулою (2), введення параметра K_{\min} та перевірка умови $K_i < K_{\min}$. У разі невиконання — коригування множини учасників процедури вибору.

Крок 2. Окреслення множини критеріїв, їхнє структурування (якісні, кількісні, нормування).

Крок 3. Застосування процедур зі складовою урахування компетентності учасників навчального процесу з вибору дисципліни.

Примітка. При використанні АНР проводяться унікальні дії, а саме:

— побудова ієрархії критеріїв: глобальна ціль (вибір оптимальної дисципліни) — групи критеріїв (академічні, професійні, організаційні, особистісні) — конкретні критерії;

— формування матриць попарних порівнянь на всіх рівнях роботи методу, обчислення векторів локальних пріоритетів, перевірка узгодженості суджень експертів (студентів) — коефіцієнт $CR \leq 0,1$;

— побудова матриці попарних порівнянь рішень з нормалізованими оцінками x_{ij} ;

— обчислення базової інтегральної оцінки за формулою (1);

— коригування з урахуванням компетентності за формулою (3);

— ранжування та вибір;

— упорядкування альтернатив за спаданням F_{final} та вибір $A_{opt} = \operatorname{argmax} F_{final}(A_i)$.

Зауваження. Для великої кількості альтернатив (понад 10) доцільно попереднє фільтрування за обов'язковими вимогами або застосування гібридних схем (наприклад, TOPSIS для всього переліку, АНР — для фінального відбору).

Практичний приклад урахування компетентності студента

У припущенні, що окреслено множину альтернатив, проведено побудову коефіцієнтів компетентності та знайдено вагові коефіцієнти критеріїв, можна показати процес завершальної стадії роботи системи вибору дисциплін вибіркового блоку.

Наприклад, студенти мали рейтинговий бал $R_i = 170$ та вище при $R_{\max} = 200$, тобто переважання $K_i = 0,85$.

Оскільки, порогове значення було встановлено $K_{\min} = 0,7$, тому обмежень немає.

Доступні чотири дисципліни (див. табл. 4): A_1 — Data Science, A_2 — Project Management, A_3 — Cybersecurity, A_4 — AI Systems.

Критерії (з вагами, визначеними методом АНР):

C_1 — актуальність для кар'єри ($w_1 = 0,40$);

C_2 — складність курсу ($w_2 = 0,15$);

C_3 — практична складова ($w_3 = 0,30$);

C_4 — відповідність науковим інтересам ($w_4 = 0,15$).

Таблиця 4. Матриця рішень (нормалізовані оцінки за 10-бальною шкалою)

Альтернатива	Критерії			
	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	8	9	7	8
A_2	5	4	7	8
A_3	6	8	6	7
A_4	9	9	8	9

Обчислення $F(A_i)$ згідно формули (1):

$$F(A_1) = 0,4 \cdot 8 + 0,15 \cdot 9 + 0,3 \cdot 7 + 0,15 \cdot 8 = 8,1;$$

$$F(A_2) = 0,4 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,3 \cdot 7 + 0,15 \cdot 8 = 5,95;$$

$$F(A_3) = 0,4 \cdot 6 + 0,15 \cdot 8 + 0,3 \cdot 6 + 0,15 \cdot 7 = 6,75;$$

$$F(A_4) = 0,4 \cdot 9 + 0,15 \cdot 9 + 0,3 \cdot 8 + 0,15 \cdot 9 = 8,8.$$

При $\alpha = 0,7$, $\beta = 0,3$ остаточні оцінки:

$$F_{final}(A_1) = 0,7 \cdot 8,1 + 0,3 \cdot 0,85 = 5,67 + 0,255 = 5,925;$$

$$F_{final}(A_2) = 0,7 \cdot 5,95 + 0,255 = 4,165 + 0,255 = 4,420;$$

$$F_{final}(A_3) = 0,7 \cdot 6,75 + 0,255 = 4,725 + 0,255 = 4,980;$$

$$F_{final}(A_4) = 0,7 \cdot 8,8 + 0,255 = 6,160 + 0,255 = 6,415.$$

Результат: оптимальною є дисципліна A_4 (AI Systems). Врахування компетентності підвищило загальні оцінки всіх альтернатив на однакову величину, однак відносне ранжування збереглося, що свідчить про стабільність моделі.

Структурні елементи архітектури інформаційно-консультаційної системи

Для практичного впровадження моделі пропонується архітектура інформаційно-консультаційної системи (ІКС), що містить такі модулі:

- 1) базу знань дисциплін — метадані елективних курсів (силабуси, викладачі, формат, передумови, статистика успішності, зв'язки з іншими дисциплінами);
- 2) модуль профілювання студента — збір і актуалізація даних про інтереси, кар'єрні цілі, академічну історію, поточне навантаження;
- 3) MCDM-виконувач — реалізація алгоритмів АНР, TOPSIS, можливість комбінування методів, налаштування ваг і порогів;
- 4) інтерфейс візуалізації — ранжовані списки, радарні діаграми, сценарії вибору («кар'єрний», «дослідницький», «збалансований»);
- 5) модуль зворотного зв'язку — оцінювання студентом реальної відповідності курсу очікуванням, корекція ваг критеріїв для майбутніх сесій, уточнення метаданих.

Інтеграція такої системи з LMS-платформами закладу освіти дозволить автоматизувати процес академічного консультування та підвищити якість формування ІОТ.

Висновки

1. Наукова новизна. Запропоновано процедури та алгоритми розвитку ряду класичних методів під інтегровану багатокритеріальну модель формування ІОТ. Вперше поєднано методи ранжування, MCDM-методи, (АНР, TOPSIS) з формалізованим оцінюванням компетентності студента через нормований рейтинговий показник і порогові обмеження. Це дозволяє враховувати не лише переваги студента, але й його реальну «готовність» до опанування дисциплін.

2. Практична значущість. Розроблений алгоритм забезпечує прозоре, обґрунтоване та індивідуалізоване прийняття рішень, мінімізує суб'єктивність вибору. Наведений приклад наглядно підтверджує відносну простоту та працездатність моделі. Запропонована архітектура ІКС створює передумови для удосконалення спрямованого на впровадження в освітній процес.

3. Перспективи подальших досліджень. Подальші розробки можуть бути спрямовані на:

- використання гібридних MCDM-схем (АНР-TOPSIS, АНР-PROMETHEE);
- врахування нечіткості вхідних даних (Fuzzy АНР, Fuzzy TOPSIS);
- інтеграцію з онтологічними моделями освітніх програм;
- машинне навчання для прогнозування успішності студента на основі обраної ІОТ.

1. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980.
2. Hwang C. L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, 1981.
3. Roy B. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 1991, 31(1), 49–73. DOI: 10.1007/BF00134132
4. Brans J. P., Vincke Ph. A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making. *Management Science*, 1985, 31(6), 647–656. DOI: 10.1287/mnsc.31.6.647
5. Opricovic S., Tzeng G. H. Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(2), 445–455. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1

6. Srivastava S., Tripathi A., Arora N. Multi-criteria decision making (MCDM) in diverse domains of education: a comprehensive bibliometric analysis for research directions. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer, 2024. DOI: 10.1007/s13198-024-02332-9
7. Yuksel F. S., Kayadelen A. N., Antmen Z. F. A Systematic Literature Review on Multi-Criteria Decision Making in Higher Education. *International Journal of Assessment Tools in Education*, 2023, 10(1), 12–28. DOI: 10.21449/ijate.1107982
8. Mardani A., Jusoh A., Nor K. M. D., et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomika Istrazivanja*, 2015, 28(1), 516–571. DOI: 10.1080/1331677X.2015.1075139
9. Behzadian M., Kazemzadeh R. B., Albadvi A., Aghdasi M. PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 2010, 200(1), 198–215. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.01.021
10. Згуровський М. З., та ін. Прийняття рішень: теорія і методи. Київ: Наукова думка, 2010. 276 с.
11. Figueira J., Greco S., Ehrgott M. (Eds.). Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer, 2005. DOI: 10.1007/0-387-23081-5
12. Triantaphyllou E. Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Springer, 2000. DOI: 10.1007/978-1-4757-3157-6
13. Воробйов Є. М., Власюк О. С. Застосування методу аналізу ієрархій для оцінки якості освітніх послуг. Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка, 2018, 69, 68–74. DOI: 10.20535/2411-1031.2018.0.141158
14. Zare M., Pahl C., Rahnama H., Nilashi M., Mardani A., Ibrahim O., Ahmadi H. Multi-criteria decision making approach in E-learning: A systematic review and classification. *Applied Soft Computing*, 2016, 45, 108–128. DOI: 10.1016/j.asoc.2016.04.020
15. Hii P. K., Goh C. F., Rasli A., Tan O. K. A Review of Two Decades of Research on the Application of Multicriteria Decision Making Techniques to Evaluate e-Learning's Effectiveness. *Knowledge Management & E-Learning*, 2022, 14(4), 466–488. DOI: 10.34105/j.kmel.2022.14.025
16. Dubas Yu., Kunanets N. Inclusion of disciplines by using Analytic Hierarchy Process (AHP). *Computational Linguistics and Intelligent Systems*, Lviv, 2022, Vol. 2, 39–49.
17. Nanayakkara C., Yeoh W., Lee A., Moayedikia A. Deciding Discipline, Course and University through Topsis. *Studies in Higher Education*, 2020, 45(12), 2497–2512. DOI: 10.1080/03075079.2019.1610865
18. Chen Y., Wang L. A hybrid multi-criteria decision-making approach for elective course selection. *International Journal of Information and Education Technology*, 2021, 11(5), 215–221. DOI: 10.18178/ijiet.2021.11.5.1518
19. Alptekin S. E., Karsak E. E. An integrated decision framework for evaluating and selecting e-learning products. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(3), 2990–2998. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.11.024
20. Chen J. K., Chen I. S. Using a novel conjunctive MCDM approach based on DEMATEL, fuzzy ANP, and TOPSIS as an innovation support system for Taiwanese higher education. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(3), 1981–1990. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.06.044
21. Mishra A. R., Chen S. M., Rani P. Multiattribute decision making based on Fermatean hesitant fuzzy sets and modified VIKOR method. *Information Sciences*, 2022, 607, 1532–1549. DOI: 10.1016/j.ins.2022.06.023
22. Joshi R. A novel decision-making method using R-Norm concept and VIKOR approach under picture fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 2020, 147, 113228. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113228
23. Krishankumar R., Mishra A. R., Rani P., Ecer F., Ravichandran K. S. Assessment of zero-carbon measures for sustainable transportation in smart cities: a CRITIC-MARCOS framework based on Q-rung fuzzy preferences. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023. DOI: 10.1109/IJOT.2023.3235316

Надійшла до редакції 26.02.2026