

УДК 004.451.54

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2025-3-27>**Сергій ЩЕРБАКОВ**

аспірант кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Національний університет «Запорізька політехніка» вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063

ORCID: 0009-0002-8056-7578

Дмитро ШИРОКОРАД

доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Національний університет «Запорізька політехніка» вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063

ORCID: 0000-0002-2784-4081

Бібліографічний опис статті: Широкоград, Д., Щербаков, С. (2025). Комплексне оцінювання альтернатив при оптимізації цифрової трансформації освітнього процесу. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 233–242, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-3-27>

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ

Мета роботи. Розробити методику багатокритеріального аналізу для оптимізації вибору цифрової платформи при трансформації освітнього процесу з використанням ієрархічного моделювання критеріїв, встановлення їх вагових коефіцієнтів та оцінювання інтегральних показників альтернативних рішень, що забезпечить об'єктивність та обґрунтованість прийняття рішень у процесі діджиталізації освітнього середовища.

Методологія. Дослідження базується на застосуванні методів багатокритеріального аналізу, зокрема нормалізації показників різної природи, використанні методу аналізу ієрархій (Saaty, 2005) для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв, обчисленні інтегральних показників альтернатив за допомогою адитивної та мультиплікативної згорток та проведенні аналізу чутливості рішення до зміни вагових коефіцієнтів. Для оцінювання альтернативних цифрових платформ для освітнього процесу використано п'ять ключових критеріїв: захист персональних даних (бали від 1 до 10), економічна ефективність (витрати у тис. грн), верифікація компетенцій випускників (бали від 1 до 10), масштабованість системи (кількість одночасних підключень у тис.) та швидкість інтеграції з існуючими бізнес-процесами (час у місяцях). Розроблено алгоритм комплексного оцінювання, що передбачає послідовне виконання етапів нормалізації показників, визначення їх вагомості, розрахунку інтегральних оцінок та перевірки стійкості отриманого рішення. Для наочної інтерпретації результатів дослідження запропоновано графічний метод візуалізації, що дозволяє порівнювати альтернативи за різними параметрами та методами згортки.

Наукова новизна. Розроблено комплексну методику багатокритеріального оцінювання альтернативних цифрових рішень для трансформації освітнього процесу, яка відрізняється від існуючих підходів інтеграцією методів нормалізації, ієрархічного аналізу та різних методів згортки з подальшим аналізом чутливості. Вперше запропоновано систему взаємопов'язаних критеріїв оцінювання цифрових платформ, що враховує як технологічні, так і педагогічні аспекти їх впровадження в освітній процес. Удосконалено процедуру прийняття рішень щодо вибору оптимальної цифрової платформи з врахуванням пріоритетів закладу освіти та потреб стейкхолдерів у контексті цифрової трансформації. Розширено методологічний інструментарій оцінювання цифрових освітніх рішень шляхом впровадження комбінованого підходу до формування інтегральних показників з використанням різних типів згорток. Запропоновано новий підхід до визначення пріоритетності критеріїв оцінювання на основі експертного методу попарних порівнянь, адаптованого до специфіки освітніх технологій.

Висновки. На основі проведеного багатокритеріального аналізу визначено оптимальне рішення для цифрової трансформації освітнього процесу, що характеризується найвищими інтегральними показниками за методами адитивної (0,842) та мультиплікативної (0,801) згорток. Встановлено, що обрана альтернатива забезпечує найкращі параметри за критеріями захисту даних (нормалізоване значення 1,000), верифікації компетенцій (1,000) та масштабованості системи (1,000), що відповідає сучасним пріоритетам цифровізації освіти. Виявлено, що визначальним фактором для вибору оптимального рішення є безпека даних з ваговим коефіцієнтом 0,435, що становить 43,5% впливу на кінцеве рішення. Проведений аналіз чутливості підтвердив стійкість отриманого рішення до зміни вагових коефіцієнтів критеріїв у межах $\pm 10\%$, що свідчить про надійність запропонованого підходу. Розроблена методика може бути використана освітніми закладами для обґрунтованого вибору цифрових рішень при оптимізації освітніх процесів, забезпечуючи прозорість та ефективність інвестицій у цифрову інфраструктуру. Запропонований підхід

створює методологічне підґрунтя для формування системи моніторингу ефективності впровадження цифрових технологій в освітнє середовище на основі кількісних метрик.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз, цифрова трансформація освіти, ієрархічна модель критеріїв, нормалізація показників, інтегральна оцінка, аналіз чутливості, оптимізація освітнього процесу.

Serhii SHCHERBAKOV

Postgraduate Student at the Department of System Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063

ORCID: 0009-0002-8056-7578

Dmytro SHYROKORAD

Associate Professor at the Department of System Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063

ORCID: 0000-0002-2784-4081

To cite this article: Shyrokorad, D., Shcherbakov, S. (2025). Kompleksne otsiniuvannia alternatyv pry optymizatsii tsyfrovoyi transformatsii osvithnoho protsesu [Comprehensive Evaluation of Alternatives in Educational Process Digital Transformation Optimization]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 233–242, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-3-27>

COMPREHENSIVE EVALUATION OF ALTERNATIVES IN EDUCATIONAL PROCESS DIGITAL TRANSFORMATION OPTIMIZATION

Purpose. To develop a methodology for multi-criteria analysis to optimize the selection of a digital platform during the transformation of the educational process using hierarchical modeling of criteria, establishing their weight coefficients, and evaluating the integral indicators of alternative solutions, which will ensure objectivity and validity of decision-making in the digitalization of the educational environment.

Methodology. The research is based on the application of multi-criteria analysis methods, particularly the normalization of indicators of different nature, the use of T. Saaty's Analytic Hierarchy Process to determine the weight coefficients of criteria, calculation of integral indicators of alternatives using additive and multiplicative convolutions, and sensitivity analysis of the decision to changes in weight coefficients. For the evaluation of alternative digital platforms for the educational process, five key criteria were used: personal data protection (scores from 1 to 10), economic efficiency (costs in thousands of UAH), verification of graduates' competencies (scores from 1 to 10), system scalability (number of simultaneous connections in thousands), and speed of integration with existing business processes (time in months). A comprehensive evaluation algorithm has been developed that involves sequential execution of stages of indicator normalization, determination of their significance, calculation of integral assessments, and verification of the stability of the obtained solution. For visual interpretation of the research results, a graphical visualization method is proposed that allows comparing alternatives according to different parameters and convolution methods.

Scientific novelty. A comprehensive methodology for multi-criteria evaluation of alternative digital solutions for the transformation of the educational process has been developed, which differs from existing approaches by integrating normalization methods, hierarchical analysis, and various convolution methods with subsequent sensitivity analysis. For the first time, a system of interconnected criteria for evaluating digital platforms has been proposed, taking into account both technological and pedagogical aspects of their implementation in the educational process. The decision-making procedure for selecting the optimal digital platform has been improved, taking into account the priorities of the educational institution and the needs of stakeholders in the context of digital transformation. The methodological toolkit for evaluating digital educational solutions has been expanded through the implementation of a combined approach to the formation of integral indicators using different types of convolutions. A new approach to determining the priority of evaluation criteria based on the expert method of pairwise comparisons, adapted to the specifics of educational technologies, has been proposed.

Conclusions. Based on the conducted multi-criteria analysis, the optimal solution for the digital transformation of the educational process has been determined, characterized by the highest integral indicators using the methods of additive (0.842) and multiplicative (0.801) convolutions. It has been established that the chosen alternative provides the best parameters according to the criteria of data protection (normalized value 1.000), competency verification (1.000), and system scalability (1.000), which corresponds to the modern priorities of education digitalization. It has been revealed that the determining factor for selecting the optimal solution is data security with a weight coefficient of 0.435, which represents 43.5% of the influence on the final decision. The conducted sensitivity analysis confirmed the stability of the obtained solution to changes in the weight coefficients of the criteria within $\pm 10\%$, which indicates the reliability of the proposed approach. The developed methodology can be used by educational institutions for the substantiated selection of digital solutions when optimizing educational processes, ensuring transparency and efficiency of investments in digital infrastructure. The proposed approach creates a methodological foundation

for forming a system to monitor the effectiveness of implementing digital technologies in the educational environment based on quantitative metrics.

Key words: *multi-criteria analysis, digital transformation of education, hierarchical model of criteria, normalization of indicators, integral assessment, sensitivity analysis, optimization of the educational process.*

Актуальність проблеми. Сучасний освітній процес перебуває у стані активної цифрової трансформації, що зумовлює необхідність впровадження різноманітних технологічних рішень у навчальних закладах усіх рівнів. Ринок освітніх технологій пропонує значну кількість програмних продуктів, платформ та інфраструктурних рішень, які суттєво відрізняються за функціональністю, вартістю впровадження, складністю обслуговування та інтеграції з існуючими системами. Навчальні заклади стикаються з проблемою вибору оптимальних цифрових інструментів в умовах обмежених фінансових, технічних та кадрових ресурсів.

Застосування традиційних підходів до оцінювання альтернатив часто призводить до неефективних рішень через неврахування специфіки освітнього процесу, педагогічних вимог та особливостей різних навчальних дисциплін. Відсутність системного підходу до вибору та впровадження цифрових технологій спричиняє фрагментарність діджиталізації, несумісність різних компонентів інформаційно-освітнього середовища та неповне використання їх потенціалу.

Багатокритеріальний аналіз альтернатив при цифровій трансформації ускладнюється необхідністю балансування між технологічними, педагогічними, економічними та організаційними аспектами. Існуючі методики оцінювання не забезпечують комплексного підходу до вирішення цього завдання та не враховують динамічного характеру розвитку освітніх технологій. Розробка математичних моделей та застосування методів аналізу ієрархій дозволяє формалізувати процес прийняття рішень та оптимізувати вибір цифрових інструментів.

Актуальність проблеми посилюється швидкими темпами розвитку технологій, що вимагає від освітніх закладів гнучкості та адаптивності при впровадженні інновацій. Зростає потреба у створенні уніфікованих методологічних засад оцінювання цифрових рішень та формуванні об'єктивних критеріїв їх ефективності. Комплексне оцінювання альтернатив стає критично важливим для забезпечення ефективності інвестицій у цифрову інфраструктуру та досягнення стратегічних цілей модернізації освітньої галузі в умовах глобальної цифровізації суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси цифрової трансформації освіти вимагають системного підходу до оцінювання

наявних альтернатив для прийняття оптимальних рішень. Дослідження з цього напрямку демонструють необхідність математичного моделювання та багатокритеріального аналізу для ефективного впровадження цифрових технологій в освітній процес.

Дослідження (Zheng, Khan та Hussain, 2020) виявило три ключові фактори оцінювання цифрових освітніх платформ: проактивна поведінка користувачів, інтернет-самоефективність та якість онлайн-взаємодії. У своїй роботі (Dutta, 2020) запропоновано п'ять альтернативних моделей онлайн-навчання для індійської вищої освіти: синхронне навчання через веб-конференції, асинхронне навчання через Learning Management System, навчання через соціальні мережі, мобільне навчання та змішане навчання.

Науковцями (Arndt та Guercio, 2020) розроблено чотириступеневу методику оцінювання блокчейн-транскриптів для мобільної вищої освіти з критеріями: безпека даних, масштабованість, сумісність з наявними системами та простота користувацького інтерфейсу. Дослідниками (Sood, Pirkkalainen та Camilleri, 2020) представлено матрицю оцінювання ефективності блокчейн-рішень з шістьма вимірами: дезагрегація навчальних курсів, фінансова ефективність, портативність кредитів, захист даних, верифікація кваліфікацій та автоматизація процесу складання навчальних планів. Авторами (Ge та Hu, 2020) запропоновано багаторівневу модель «Блокчейн + вища освіта» з трьома оптимізаційними напрямками: академічні записи, фінансове управління та цифрові сертифікати.

Колективом авторів (Bhaskar, Tiwari та Joshi, 2020) створено таксономію з восьми категорій застосування блокчейну в освіті: документація, верифікація, репутація, фінансування, навчальні матеріали, ліцензування, управління ідентифікацією та інтелектуальна власність. Вітчизняним дослідником (Манчур, 2021) визначено три рівні використання блокчейн-технологій в українських установах: базовий, середній та розширений, з відповідними критеріями оцінки технічної готовності установ.

Концепція блокчейн-освіти 4.0, розроблена дослідниками (Prawiyogi et al., 2021), пропонує метрики ефективності цифрових інструментів з акцентом на персоналізацію, автономність студентів та прозорість оцінювання. У дослідженні

(Okoye et al., 2022) виявлено вісім основних бар'єрів впровадження цифрових технологій у Латинській Америці: технічна інфраструктура, фінансування, цифрові навички, мовні бар'єри, культурні фактори, політичні обмеження, регуляторні аспекти та інституційна спроможність. Групою науковців (Maestre et al., 2022) розроблено п'ятиетапний алгоритм впровадження блокчейну для управління освітніми сертифікатами, що включає критерії: криптографічну безпеку, транзакційну швидкість, енергоефективність та сумісність з наявними системами.

Аналітичним виданням (Vesti-ua.net, 2023) описано чотири основні напрямки застосування блокчейн-технологій в Україні: фінансові операції, документообіг, безпека даних та освітні сертифікати. Українськими вченими (Опірський, Балацька та Побережник, 2023) запропоновано систему з п'яти параметрів оцінювання блокчейн-рішень для української освіти: технічна сумісність, масштабованість, безпека даних, ефективність впровадження та нормативна відповідність. Дослідниками (Котуха, Фонарюк та Коцан-Олинець, 2023) виділено три групи пріоритетів цифровізації вищої освіти: технологічні, педагогічні та адміністративні, з відповідними критеріями оцінювання. Метааналізом, проведеним (Naque et al., 2023), виявлено сім ключових параметрів для багатокритеріального оцінювання блокчейн-рішень: безпека, прозорість, децентралізація, масштабованість, конфіденційність, інтероперабельність та енергоефективність.

Колективом авторів (Ткачов та співавтори, 2024) систематизовано десять переваг та шість проблем диджиталізації вищої освіти, створивши матрицю для багатовимірного аналізу альтернативних технологічних рішень. Науковцем (Kopé, 2024) запропоновано трикомпонентну модель оцінювання ефективності змішаного навчання, що поєднує технологічні, людські та педагогічні аспекти з відповідними кількісними метриками.

Дослідницькою групою (Satvik et al., 2025) розроблено ієрархічну модель бар'єрів впровадження блокчейн-технологій в освіті з чотирма рівнями: технологічні, організаційні, людські та

регуляторні, що дозволяє оптимізувати вибір технологічних рішень. У своїх працях (Sibanda, 2025) запропоновано комплексну методику оцінювання технології блокчейн в освіті, яка включає десять критеріїв оптимізації: технічну ефективність, педагогічну цінність, економічну доцільність, масштабованість, етичні аспекти, відповідність нормативам, сумісність з наявними системами, зручність використання, можливість модифікації та безпеку даних.

Розглянуті дослідження демонструють багатогранність проблеми вибору цифрових рішень для освітнього процесу та відсутність уніфікованих методик оцінювання альтернатив. Особливої уваги заслуговує використання математичного моделювання, зокрема багатокритеріального аналізу, для формалізації процесу прийняття рішень щодо впровадження інноваційних технологій в освітніх закладах. Враховуючи зростаючу інтеграцію освіти та бізнесу, постає необхідність розробки комплексної методології оцінювання цифрових рішень, які забезпечують прозорість, безпеку та ефективність управління освітніми даними.

Мета дослідження: розробити методику багатокритеріального аналізу та оптимізації вибору цифрової платформи для освітнього процесу з використанням ієрархічного моделювання критеріїв, встановлення їх вагових коефіцієнтів та оцінювання інтегральних показників альтернативних рішень для забезпечення ефективної цифрової трансформації освітнього середовища.

Виклад основного матеріалу. Для оптимізації цифрової трансформації освітнього процесу заклад вищої освіти розглядає впровадження інтегрованої цифрової платформи з використанням сучасних технологій. Для забезпечення об'єктивності вибору необхідно здійснити багатокритеріальний аналіз трьох альтернативних рішень з урахуванням комплексу критеріїв оцінювання.

Досліджувані альтернативи оцінюються за п'ятьма ключовими критеріями: захист персональних даних (K1, бали від 1 до 10), економічна ефективність (K2, витрати у тис. грн), потенціал верифікації компетенцій (K3, бали від 1 до 10),

Таблиця 1

Початкові значення показників альтернативних цифрових платформ

Критерії	K1 (захист даних)	K2 (економічна ефективність)	K3 (верифікація компетенцій)	K4 (масштабованість)	K5 (швидкість інтеграції)
A1	8	450	7	15	6
A2	9	680	9	22	8
A3	7	320	6	10	4

масштабованість системи (K4, кількість одночасних підключень у тис.) та швидкість інтеграції (K5, час у місяцях). Початкові показники трьох альтернативних рішень представлені у таблиці 1.

На підставі дослідження таблиці 1 необхідно здійснити нормалізацію показників з урахуванням типу критерію (максимізації чи мінімізації), визначити вагові коефіцієнти, розрахувати інтегральні показники та провести аналіз чутливості для обґрунтування оптимального рішення.

Для приведення різнорідних критеріїв до порівняльного вигляду проведено нормалізацію за формулами:

- для критеріїв типу «більше-краще» (K1, K3, K4):

$$n_{ij} = a_{ij} / \max(a_{ij}), \quad (1)$$

- для критеріїв типу «менше-краще» (K2, K5):

$$n_{ij} = \min(a_{ij}) / a_{ij}, \quad (2)$$

де n_{ij} – нормалізоване значення j-го показника для i-го альтернативного варіанта;

a_{ij} – вихідне значення j-го показника для i-го альтернативного варіанта;

$\max(a_{ij})$ – максимальне значення серед усіх a_{ij} для фіксованого j;

$\min(a_{ij})$ – мінімальне значення серед усіх a_{ij} для фіксованого j.

Нормалізовані значення n_{ij} належать до інтервалу від 0 до 1 представлені в таблиці 2.

За результатами опрацювання таблиці 2 встановлено, що альтернатива A2 має найвищі нормалізовані показники за трьома критеріями (K1, K3, K4), проте поступається іншим варіантам за економічною ефективністю (K2) та швидкістю інтеграції (K5).

Для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв застосовано метод попарних порівнянь за шкалою Сааті з урахуванням пріоритетності вимог до цифрових платформ в освітньому середовищі. Результати попарних порівнянь наведені в таблиці 3.

Відповідно до вивчення матриці попарних порівнянь (таблиця 3) розраховано власний вектор матриці як середнє геометричне значень кожного рядка та визначено нормалізовані вагові коефіцієнти критеріїв: $w_1 = 0,435$; $w_2 = 0,261$; $w_3 = 0,182$; $w_4 = 0,081$; $w_5 = 0,042$.

Таблиця 3

Матриця вагових коефіцієнтів методом попарних порівнянь

Критерії	K1	K2	K3	K4	K5
K1	1	3	2	5	7
K2	1/3	1	2	4	6
K3	1/2	1/2	1	3	5
K4	1/5	1/4	1/3	1	3
K5	1/7	1/6	1/5	1/3	1

Для оцінки інтегральних показників альтернатив використано два методи згортки критеріїв:

1. Адитивна згортка:

$$F_{\text{адит}}(A_i) = \sum(w_j \times n_{ij}), \quad (3)$$

2. Мультиплікативна згортка:

$$F_{\text{мульти}}(A_i) = \prod(n_{ij}^{w_j}), \quad (4)$$

де $F_{\text{адит}}(A_i)$, $F_{\text{мульти}}(A_i)$ – інтегральні оцінки i-ї альтернативи, отримані відповідно за адитивним і мультиплікативним методом;

n_{ij} – нормалізоване значення j-го критерію для i-ї альтернативи;

w_j – вага j-го критерію, що відображає його значущість.

Адитивна згортка передбачає сумування зважених нормалізованих значень, що відображає лінійну залежність між критеріями. Мультиплікативна згортка враховує взаємозалежність критеріїв, бо навіть незначне зниження одного з них суттєво впливає на загальний результат. Обидва методи дозволяють отримати узагальнений показник для порівняння альтернатив.

Результати розрахунків інтегральних показників представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Інтегральні показники альтернативних цифрових платформ

Альтернатива	Адитивна згортка	Мультиплікативна згортка
A1	0,798	0,786
A2	0,842	0,801
A3	0,799	0,785

Згідно з обчисленнями, відображеними в таблиці 4, альтернатива A2 має найвищі інтегральні показники як за адитивною (0,842), так

Таблиця 2

Нормалізовані значення показників альтернативних цифрових платформ

Критерії	K1 (захист даних)	K2 (економічна ефективність)	K3 (верифікація компетенцій)	K4 (масштабованість)	K5 (швидкість інтеграції)
A1	0,889	0,711	0,778	0,682	0,667
A2	1,000	0,471	1,000	1,000	0,500
A3	0,778	1,000	0,667	0,455	1,000

і за мультиплікативною (0,801) згортками. Для перевірки стійкості отриманого рішення проведено аналіз чутливості до зміни вагового коефіцієнта найбільш важливого критерію K1 в межах $\pm 10\%$.

При збільшенні вагового коефіцієнта w_1 на 10% (до 0,479) інтегральні показники адитивної згортки становлять: $F_{\text{адит}}(A1)' = 0,802$; $F_{\text{адит}}(A2)' = 0,853$; $F_{\text{адит}}(A3)' = 0,793$. При зменшенні w_1 на 10% (до 0,392) відповідні показники дорівнюють: $F_{\text{адит}}(A1)'' = 0,794$; $F_{\text{адит}}(A2)'' = 0,831$; $F_{\text{адит}}(A3)'' = 0,805$.

Для наочного відображення результатів багатокритеріального аналізу розроблено комплексну візуалізацію, що складається з шести компонентів (Рис. 1-6).

На (рис. 1) бачимо візуалізацію вихідних значень критеріїв для трьох альтернативних цифрових платформ (A1, A2, A3). Діаграма відображає чотири з п'яти критеріїв: K1 (захист даних),

K3 (верифікація компетенцій), K4 (масштабованість у тис.) та K5 (швидкість інтеграції у міс.).

Критерій K2 (економічна ефективність) не включений до основної діаграми рисунка 1 через значну різницю в масштабі значень. Значення K2 вимірюються в тисячах гривень (320, 450 та 680), що суттєво перевищує значення інших критеріїв, які коливаються від 4 до 22. Відображення всіх критеріїв на одній шкалі зробило б візуалізацію менш інформативною, оскільки стовпчики для K1, K3, K4 та K5 були б надто малими порівняно зі стовпчиками для K2.

На (рис. 2) представлено нормалізовані значення всіх п'яти критеріїв для трьох альтернатив. Візуалізація підтверджує перевагу альтернативи A2 за трьома критеріями (K1, K3, K4), тоді як альтернатива A3 домінує за показниками економічної ефективності (K2) та швидкості інтеграції (K5). Внаслідок нормалізації унаочнено відносні переваги кожної альтернативи.

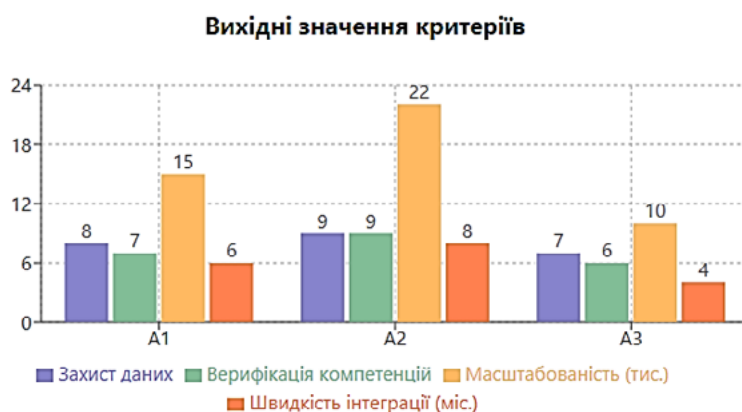


Рис. 1. Вихідні значення критеріїв альтернативних цифрових платформ

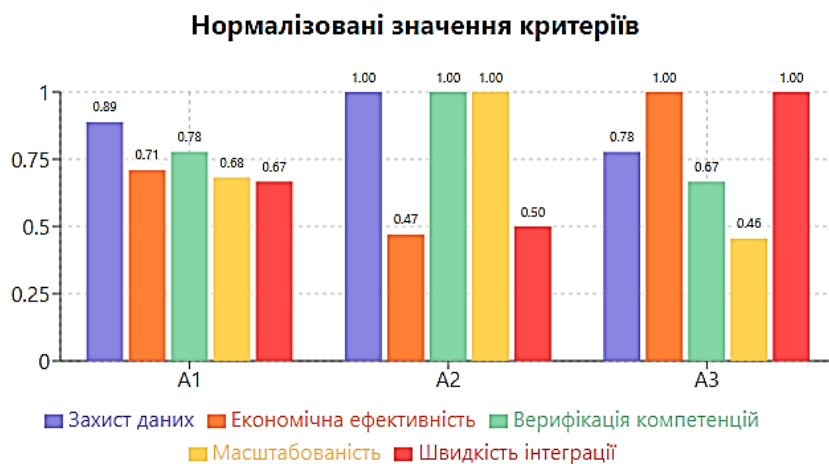
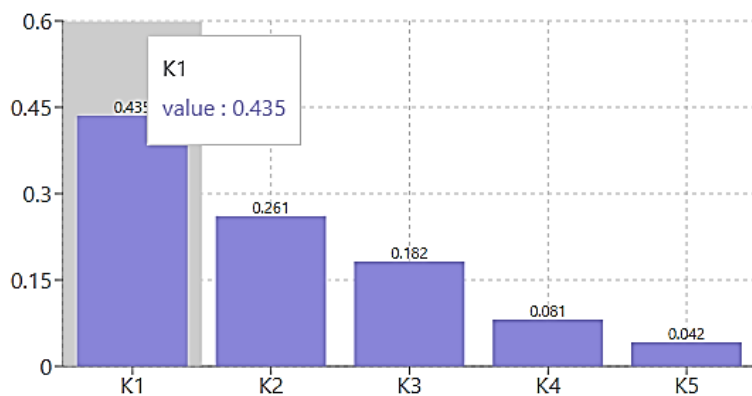
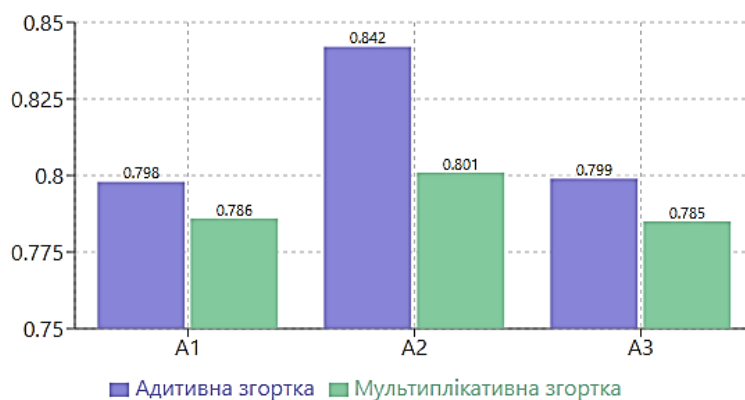
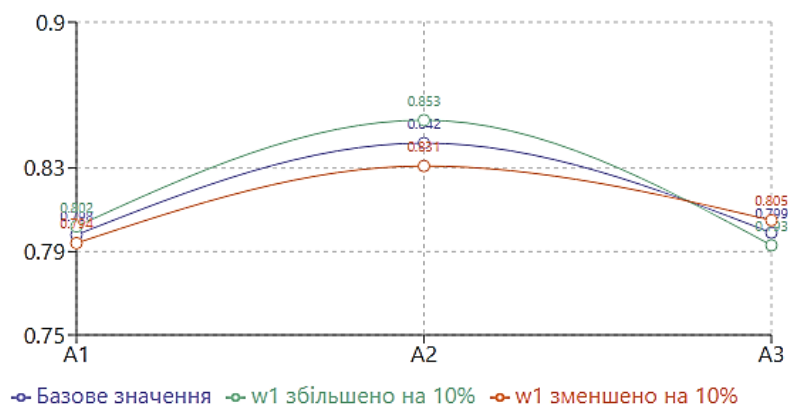


Рис. 2. Нормалізовані значення критеріїв

Вагові коефіцієнти критеріїв**Рис. 3. Вагові коефіцієнти критеріїв****Інтегральні показники****Рис. 4. Інтегральні показники за методами адитивної та мультиплікативної згортки****Аналіз чутливості рішення****Рис. 5. Аналіз чутливості рішення**

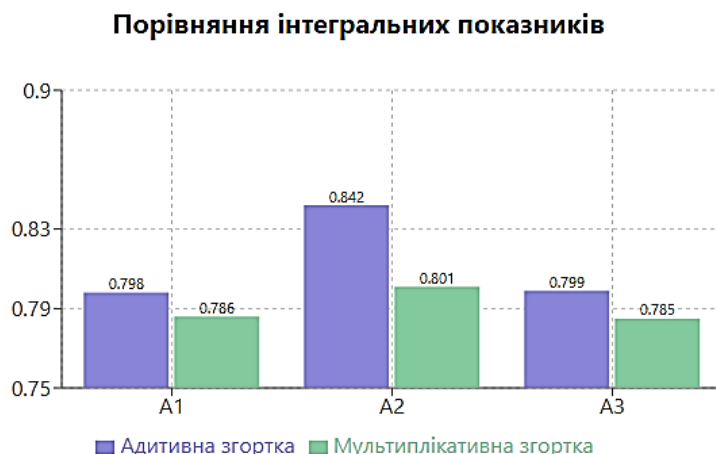


Рис. 6. Порівняння інтегральних показників альтернатив

На (рис. 3) демонструє розподіл вагових коефіцієнтів для п'яти критеріїв, отриманих методом попарних порівнянь. Візуалізація чітко показує, що найбільший пріоритет має критерій захисту даних ($w_1=0,435$), далі за значущістю йдуть економічна ефективність ($w_2=0,261$) та верифікація компетенцій ($w_3=0,182$), тоді як масштабованість ($w_4=0,081$) та швидкість інтеграції ($w_5=0,042$) мають нижчі пріоритети.

На (рис. 4) представлено порівняння інтегральних показників трьох альтернатив, розрахованих за допомогою методів адитивної та мультиплікативної згортки. Дослідження візуалізації підтверджує, що альтернатива A2 має найвищі значення за обома методами згортки, що свідчить про її оптимальність з урахуванням важливості всіх критеріїв.

На (рис. 5) відображає результати аналізу чутливості, демонструючи зміну інтегральних показників альтернатив при варіюванні вагового коефіцієнта критерію K1 в межах $\pm 10\%$. З графіка видно, що альтернатива A2 зберігає свою перевагу як при збільшенні, так і при зменшенні ваги найважливішого критерію, що свідчить про стійкість отриманого рішення.

На рисунку 6 проведено комплексне порівняння інтегральних показників трьох альтернатив з використанням різних методів оцінювання. Згідно з представленими даними, альтернатива A2 демонструє стабільну перевагу за всіма методами оцінювання, що обґрунтовує її вибір як оптимального рішення для цифрової трансформації освітнього процесу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Здійснений багатокритеріальний аналіз альтернативних моделей цифрової трансформації освітнього процесу дозволив визначити оптимальне рішення (альтернатива A2) з найвищими інтегральними показниками за адитивною та мультиплікативною згортками. Перевага даної альтернативи забезпечується завдяки кращим параметрам захисту даних, верифікації компетенцій та масштабованості, що відповідає пріоритетам сучасних освітніх закладів. Аналіз чутливості підтвердив стійкість отриманого рішення до зміни вагових коефіцієнтів. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці поетапного плану впровадження обраної цифрової платформи, оптимізації економічних витрат та створенні системи моніторингу ефективності цифрової трансформації освітнього процесу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Vesti-ua.net. Розвиток блокчейн технології в Україні. 2023. URL: <https://vesti-ua.net/uk/novyny-kompaniy/230664-rozvitok-blokcheyn-tehnologiyi-v-ukrayin.html>
2. Манчур І. Рівень використання блокчейн технології підприємствами України в сфері бухгалтерського обліку та аудиту. *Економічний аналіз*. 2021. 31(3), 183–189. <https://doi.org/10.35774/econa2021.03.183>
3. Опірський І., Балацька В., Побережник В. Сучасні можливості використання технології блокчейн у системі освіти. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2023. 29(3), 138–146. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.18073>
4. Котуха О. С., Фонарюк О. Ю., Коцан-Олинець Ю. Я. Діджиталізація вищої освіти: пріоритети, виклики, завдання. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: право, публічне управління та адміністрування*. 2023. (6). <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2022-6-01-02>

5. Ткачов С. І., Ткачова Н. О., Ткачов, А. С. Диджиталізація вищої освіти: сутність, переваги та проблеми. *Education and pedagogical sciences. Освіта та педагогічна наука*. 2024. (1 (185), 44–54. [https://doi.org/10.12958/2227-2747-2024-1\(185\)-44-54](https://doi.org/10.12958/2227-2747-2024-1(185)-44-54)
6. Feng Zheng N. A. Khan, Sabir Hussain. The COVID 19 pandemic and digital higher education: *Exploring the impact of proactive personality on social capital through internet self-efficacy and online interaction quality*. 2020. Volume 119, Article 105694, pp. 105694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2020.105694>
7. Ankuran Dutta Impact of Digital Social Media on Indian Higher Education: Alternative Approaches of Online Learning during COVID-19 Pandemic Crisis. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 2020. Volume 10, Issue 05, pp. 604–611. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijrsp.10.05.2020.p10169>
8. Kingsley Okoye, Haruna Hussein, A. Arrona-Palacios, H. Quintero, Luis Omar Peña Ortega, Angela Lopez Sanchez, E. Ortiz, José Escamilla, S. Hosseini. Impact of digital technologies upon teaching and learning in higher education in Latin America: an outlook on the reach, barriers, and bottlenecks. *Education and Information Technologies : Official Journal of the IFIP technical committee on Education*, 2022. Volume 28, Issue 2, pp. 2291–2360. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11214-1>
9. El Hadji Yaya Koné. Human and Technology Mediation for Effective Blended Learning in Digital Higher Education. *International Journal of Learning and Teaching*, 2024. Volume 10, Issue 3. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijlt.10.3.341-347>
10. T. Arndt, A. Guercio. Blockchain-Based Transcripts for Mobile Higher-Education., 2020. Volume 10, Issue 2, pp. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijiet.2020.10.2.1344>
11. Ira Sood, H. Pirkkalainen, A. Camilleri. Can Blockchain Technology Facilitate the Unbundling of Higher Education. *International Conference on Computer Supported Education*, 2020. pp. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.5220/0009339202280235>
12. Zhenxing Ge, Ying Hu. Application Research of the New Mode of “Blockchain+Higher Education”. 2020. pp. 425–430. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51431-0_61
13. P. Bhaskar, Chandan Kumar Tiwari, A. Joshi. Blockchain in education management: present and future applications. *Interactive Technology and Smart Education*, 2020. Volume 18, Issue 1, pp. 1–17. Published: 19 May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/itse-07-2020-0102>
14. Anggy Giri Prawiyogi, Q. Aini, N. Santoso, Ninda Lutfiani, Hega Lutfilah Juniar. Blockchain Education Concept 4.0: Student-Centered iLearning Blockchain Framework. *JTP – Jurnal Teknologi Pendidikan*, 2021. Volume 23, Issue 2, pp. 129–145. DOI: <https://doi.org/10.21009/jtp.v23i2.20978>
15. Raúl Jaime Maestre, Javier Bermejo Higuera, Nadia Gámez Gómez, Juan-Ramón Bermejo Higuera, Juan-Antonio Sicilia Montalvo, Lara Orcos Palma. The application of blockchain algorithms to the management of education certificates. *Evolutionary Intelligence*, 2022. Volume 16, Issue 6, pp. 1967–1984. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12065-022-00812-0>
16. Mustafizul Haque, V. V. Kumar, Preeti Singh, Adheer A. Goyal, Kamal Upreti, Ankit Verma. A systematic meta-analysis of blockchain technology for educational sector and its advancements towards education 4.0. *Education and Information Technologies : Official Journal of the IFIP technical committee on Education*, 2023. Volume 28, Issue 10, pp. 13841–13867. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11744-2>
17. Satvik Satvik, B. K. Naik, R. Dwivedi, Adilson Carlos Yoshikuni. Modelling the blockchain technology adoption barriers in the Indian education management system. *Journal of Modelling in Management*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/jm2-10-2024-0331>
18. Sibanda Sithandekile. Opportunities and Challenges of Blockchain Technology in Education: A Systematic Review. *International journal of research and innovation in applied science*, Volume X, Issue II, 2025. pp. 492–499. DOI: <https://doi.org/10.51584/ijrias.2025.10020044>
19. Saaty T. L. Analytic hierarchy process. In B. Everitt & D. Howell (Eds.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science* (Vol. 1). John Wiley & Sons. 2005. <https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a4a002>

REFERENCES:

1. Vesti-ua.net. (2023). Blockchain Technology Development in Ukraine. Retrieved from: <https://vesti-ua.net/uk/novyny-kompaniy/230664-rozvitok-blokcheyn-tehnologiyi-v-ukrayin.html>
2. Manchur, I. (2021). Level of Blockchain Technology Utilization by Ukrainian Enterprises in Accounting and Auditing. *Economic Analysis*, 31(3), 183–189. <https://doi.org/10.35774/econa2021.03.183>
3. Opirskiy, I., Balatska, V., & Poberezhnyk, V. (2023). Modern Applications of Blockchain Technology in Education Systems. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(3), 138–146. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.18073>

4. Kotukha, O. S., Fonariuk, O. Yu., & Kotsan-Olynets, Yu. Ya. (2023). Higher Education Digitalization: Priorities, Challenges, Tasks. *Problems of Modern Transformations. Series: Law, Public Management and Administration*, (6). <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2022-6-01-02>
5. Tkachov, S. I., Tkachova, N. O., & Tkachov, A. S. (2024). Higher Education Digitalization: Essence, Advantages and Problems. *Education and Pedagogical Sciences*, (1 (185), 44–54. [https://doi.org/10.12958/2227-2747-2024-1\(185\)-44-54](https://doi.org/10.12958/2227-2747-2024-1(185)-44-54)
6. Feng Zheng, N. A. Khan, Sabir Hussain (2020). The COVID 19 pandemic and digital higher education: Exploring the impact of proactive personality on social capital through internet self-efficacy and online interaction quality. *Children and Youth Services Review*, Volume 119, Article 105694, pp. 105694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chidyouth.2020.105694>
7. Ankuran Dutta (2020). Impact of Digital Social Media on Indian Higher Education: Alternative Approaches of Online Learning during COVID-19 Pandemic Crisis. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, Volume 10, Issue 05, pp. 604–611. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijrsp.10.05.2020.p10169>
8. Kingsley Okoye, Haruna Hussein, A. Arrona-Palacios, H. Quintero, Luis Omar Peña Ortega, Angela Lopez Sanchez, E. Ortiz, José Escamilla, S. Hosseini (2022). Impact of digital technologies upon teaching and learning in higher education in Latin America: an outlook on the reach, barriers, and bottlenecks. *Education and Information Technologies: Official Journal of the IFIP technical committee on Education*, Volume 28, Issue 2, pp. 2291–2360. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11214-1>
9. El Hadji Yaya Koné (2024). Human and Technology Mediation for Effective Blended Learning in Digital Higher Education. *International Journal of Learning and Teaching*, Volume 10, Issue 3. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijlt.10.3.341-347>
10. T. Arndt, A. Guercio (2020). Blockchain-Based Transcripts for Mobile Higher-Education. *International Journal of Information and Education Technology*, Volume 10, Issue 2, pp. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijiet.2020.10.2.1344>
11. Ira Sood, H. Pirkkalainen, A. Camilleri (2020). Can Blockchain Technology Facilitate the Unbundling of Higher Education. *International Conference on Computer Supported Education*, pp. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.5220/0009339202280235>
12. Zhenxing Ge, Ying Hu (2020). Application Research of the New Mode of «Blockchain + Higher Education». *Proceedings*, pp. 425–430. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51431-0_61
13. P. Bhaskar, Chandan Kumar Tiwari, A. Joshi (2020). Blockchain in education management: present and future applications. *Interactive Technology and Smart Education*, Volume 18, Issue 1, pp. 1–17. Published: 19 May 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/itse-07-2020-0102>
14. Anggy Giri Prawiyogi, Q. Aini, N. Santoso, Ninda Lutfiani, Hega Lutfilah Juniar (2021). Blockchain Education Concept 4.0: Student-Centered iLearning Blockchain Framework. *JTP – Jurnal Teknologi Pendidikan*, Volume 23, Issue 2, pp. 129–145. DOI: <https://doi.org/10.21009/jtp.v23i2.20978>
15. Raúl Jaime Maestre, Javier Bermejo Higuera, Nadia Gámez Gómez, Juan-Ramón Bermejo Higuera, Juan-Antonio Sicilia Montalvo, Lara Orcos Palma (2022). The application of blockchain algorithms to the management of education certificates. *Evolutionary Intelligence*, Volume 16, Issue 6, pp. 1967–1984. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12065-022-00812-0>
16. Mustafizul Haque, V. V. Kumar, Preeti Singh, Adheer A. Goyal, Kamal Upreti, Ankit Verma (2023). A systematic meta-analysis of blockchain technology for educational sector and its advancements towards education 4.0. *Education and Information Technologies: Official Journal of the IFIP technical committee on Education*, Volume 28, Issue 10, pp. 13841–13867. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11744-2>
17. Satvik Satvik, B. K. Naik, R. Dwivedi, Adilson Carlos Yoshikuni (2025). Modelling the blockchain technology adoption barriers in the Indian education management system. *Journal of Modelling in Management*. DOI: <https://doi.org/10.1108/jm2-10-2024-0331>
18. Sibanda Sithandekile (2025). Opportunities and Challenges of Blockchain Technology in Education: A Systematic Review. *International journal of research and innovation in applied science*, Volume X, Issue II, pp. 492–499. DOI: <https://doi.org/10.51584/ijrias.2025.10020044>
19. Saaty, T. L. (2005). Analytic hierarchy process. In B. Everitt & D. Howell (Eds.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science* (Vol. 1). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a4a002>



Дата надходження статті: 01.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 28.11.2025