

УДК 004.8:004.5:004.94]:378.4

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.2.1.7>

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ЛЮДИНОЦЕНТРИЧНІЙ АРХІТЕКТОНІЦІ ОСВІТА 5.0: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ГІБРИДНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ТРАЄКТОРІЙ НАВЧАННЯ У ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ З КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

Гладченко О. В. – кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем
Державного податкового університету
ORCID ID: 0000-0002-1668-633X

Ратушняк Т. В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем
Державного податкового університету
ORCID ID: 0000-0002-9353-4268

Красюк Ю. М. – кандидат педагогічних наук, доцент,
завідувач кафедри інформатики та системології
Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана
ORCID ID: 0000-0003-4349-3119

Головко Н. Р. – кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри інформатики та системології
Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана
ORCID ID: 0000-0003-1574-4312

Стаття присвячена комплексному дослідженню трансформації архітекτονіки освітнього процесу в умовах переходу від технологічно-орієнтованої парадигми «Освіта 4.0» до людиноцентричної концепції «Освіта 5.0». У роботі обґрунтовано, що сучасний етап розвитку вищої освіти, зокрема за спеціальністю F3 «Комп'ютерні науки», потребує перегляду ролі штучного інтелекту (ШІ) – від інструменту автоматизації рутинних завдань до повноцінного ко-креатора індивідуалізованого навчального середовища. Проведено ґрунтовний порівняльний аналіз концепцій «Освіта 4.0» та «Освіта 5.0», що дозволило виявити ключовий зміст трансформації: перехід від фокусу на інтелектуальному коефіцієнті (IQ) та цифровій ефективності до розвитку емоційного інтелекту (EQ), критичного мислення та етичної відповідальності в умовах сталого розвитку.

Наукова новизна дослідження полягає у формалізації архітекτονіки навчання відповідно до концепції «Освіта 5.0» як багаторівневої системи, де технічна компонента інтегрується з гуманістичними цілями. Запропоновано та детально описано математичну модель планування персоналізованої траєкторії навчання (Personalized Learning Path Planning, PLPP), яка базується на апараті марковських процесів прийняття рішень (MDP). Модель враховує не лише когнітивні досягнення здобувача, а і його динамічний психоемоційний стан та рівень залученості, що дозволяє мінімізувати когнітивне перевантаження та запобігати академічному вигоранню. Технічну реалізацію моделі забезпечено розробленим гібридним алгоритмом адаптивної оптимізації (ALPOA), що поєднує механізми генетичних алгоритмів для глобального пошуку оптимальних послідовностей контенту та метод ройового інтелекту для тонкого налаштування параметрів взаємодії в реальному часі.

© Гладченко О. В., Ратушняк Т. В., Красюк Ю. М., Головко Н. Р., 2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

У статті подано мультиагентну архітектуру інтелектуальної освітньої системи, яка включає спеціалізовані класи агентів: педагогічного, моделювання користувача, контент-менеджменту та етичного контролю. Особливу увагу приділено впровадженню технологій пояснюваного штучного інтелекту (XAI), що забезпечує прозорість алгоритмічних рекомендацій та підвищує рівень довіри між студентом, викладачем та інтелектуальною системою. Практична значущість роботи підтверджується розробкою рекомендацій щодо модернізації навчальних планів закладів вищої освіти (ЗВО) України в контексті вимог «Індустрії 5.0», що передбачає впровадження іммерсивних технологій та предиктивної аналітики для підвищення якості підготовки фахівців. Обсяг анотації відповідає вимогам щодо глибини розкриття мети, методів та результатів дослідження, забезпечуючи цілісне уявлення про запропоновані наукові та технічні рішення.

Ключові слова: освіта 5.0, штучний інтелект, архітектура навчання, персоналізована траєкторія, математична модель, мультиагентні системи, алгоритми оптимізації, людиноцентричність, комп'ютерні науки.

Hladchenko O. V., Ratushnyak T. V., Krasiuk I. M., Holovko N. R. Artificial intelligence in the human-centric architectonics "Education 5.0": mathematical modeling and hybrid optimization of personalized learning paths in the training of computer science specialists

The article is devoted to a comprehensive study of the transformation of the architectonics of the educational process in the context of the transition from the technology-oriented paradigm "Education 4.0" to the human-centric concept "Education 5.0". It substantiates that the current stage of higher education development, particularly within the specialty F3 "Computer Science", requires a reconsideration of the role of artificial intelligence (AI) – from a tool for automating routine tasks to a full-fledged co-creator of an individualized learning environment. A thorough comparative analysis of the concepts of "Education 4.0" and "Education 5.0" is conducted, which makes it possible to identify the core essence of the transformation: a shift from a focus on intelligence quotient (IQ) and digital efficiency toward the development of emotional intelligence (EQ), critical thinking, and ethical responsibility under conditions of sustainable development.

The scientific novelty of the study lies in the formalization of the architectonics of Education 5.0 as a multilevel system in which the technical component is integrated with humanistic goals. The authors propose and describe in detail a mathematical model for Personalized Learning Path Planning (PLPP), based on the framework of Markov Decision Processes (MDP). The model accounts not only for the learner's cognitive achievements but also for their dynamic psycho-emotional state and level of engagement, enabling the minimization of cognitive overload and the prevention of academic burnout. The technical implementation of the model is ensured by a developed hybrid adaptive optimization algorithm (ALPOA), which combines genetic algorithm mechanisms for global search of optimal content sequences with swarm intelligence methods for fine-tuning interaction parameters in real time.

The article presents a multi-agent architecture of an intelligent educational system that includes specialized classes of agents: pedagogical, user modeling, content management, and ethical control. Particular attention is paid to the implementation of explainable artificial intelligence (XAI) technologies, which ensure transparency of algorithmic recommendations and increase the level of trust among students, instructors, and the intelligent system. The practical significance of the work is confirmed by the development of recommendations for modernizing the curricula of higher education institutions in Ukraine in the context of "Industry 5.0" requirements, which involve the introduction of immersive technologies and predictive analytics to improve the quality of specialist training. The scope of the abstract meets the requirements for the depth of disclosure of the research objectives, methods, and results, providing a holistic view of the proposed scientific and technical solutions.

Key words: education 5.0, artificial intelligence, learning architectonics, personalized learning trajectory, mathematical model, multi-agent systems, optimization algorithms, human-centricity, computer science.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток цифрових технологій протягом останнього десятиліття призвів до фундаментальної перебудови глобальних систем вищої освіти. Четверта промислова революція (Industry 4.0) породила концепцію «Освіта 4.0», яка характеризується широким впровадженням великих даних, хмарних обчислень, Інтернету речей та автоматизованих систем управління навчанням [1; 2]. Основним завданням цієї епохи було формування цифрових компетентностей, необхідних для ефективного функціонування в умовах

високоавтоматизованого виробництва. Проте, попри значні успіхи в цифровізації, «Освіта 4.0» виявила суттєві обмеження: надмірний фокус на технологічній ефективності призвів до певної дегуманізації освітнього процесу, зростання соціальної ізоляції здобувачів та ігнорування емоційних та етичних аспектів розвитку особистості [3; 4].

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі спостерігається кристалізація нової парадигми – «Освіта 5.0», яка виникає як відповідь на виклики П'ятої промислової революції. На відміну від своєї попередниці, «Освіта 5.0» базується на принципах людиноцентричності, сталого розвитку та соціальної інклюзії [5; 6]. У цій системі штучний інтелект розглядається не просто як засіб автоматизації рутини, а як динамічний партнер, здатний підсилювати людські можливості, забезпечуючи симбіоз когнітивних здатностей машини та креативно-емоційного потенціалу людини [1; 4].

Для спеціальності F3 «Комп'ютерні науки» ця трансформація має особливе значення. Майбутні фахівці з IT-технологій повинні не лише володіти алгоритмічною базою та навичками програмування, а й глибоко розуміти етичні наслідки розробки інтелектуальних систем, вміти працювати в гібридних командах «людина-ШІ» та постійно адаптувати власну освітню траєкторію в умовах експоненціального зростання обсягів інформації [7; 8]. Архітектура навчання відповідно до концепції «Освіти 5.0» передбачає повну перебудову структури взаємодії між викладачем, здобувачем та інтелектуальним середовищем, де роль останнього полягає у створенні максимально сприятливих умов для самоактуалізації особистості.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих моделей та алгоритмів, які дозволять реалізувати принципи «Освіти 5.0» на практиці. Традиційні статичні моделі навчання не здатні забезпечити необхідний рівень персоналізації та адаптивності, що вимагає залучення складного математичного апарату теорії прийняття рішень, ройового інтелекту та мультиагентного моделювання [9; 10].

Метою статті є розробка архітектури інтелектуальної системи навчання відповідно до концепції «Освіти 5.0» та формалізація математичних методів оптимізації індивідуальних освітніх шляхів у межах людиноцентричного підходу.

Здійснено порівняльний аналіз парадигм «Освіта 4.0» та «Освіта 5.0». Розуміння сутності «Освіти 5.0» неможливе без критичного аналізу здобутків та недоліків попередньої концепції. «Освіта 4.0» була спрямована на підготовку кадрів, здатних керувати «розумними» заводами та системами. Вона додала в університети гнучкі навчальні плани, масові відкриті онлайн-курси (МООС) та перші спроби адаптивного тестування [3; 2]. Однак, як зазначають дослідники, такий підхід часто ігнорував внутрішню мотивацію студента, зводячи процес навчання до «транзакційної ефективності» – отримання максимальної кількості балів за мінімальний час [1].

«Освіта 5.0» зміщує акцент з «транзакцій» на «трансформацію». У таблиці 1 наведено детальний порівняльний аналіз цих двох парадигм, що демонструє еволюцію ключових параметрів освітнього процесу.

Перехід до «Освіти 5.0» означає, що технології ШІ більше не сприймаються як загроза робочим місцям викладачів чи як засіб механічного контролю за здобувачами. Навпаки, відбувається гармонізація взаємодії: машина бере на себе складні обчислювальні завдання, предиктивний аналіз та рутинний моніторинг, звільняючи простір для людського спілкування, критичної дискусії та творчого пошуку

[4; 8]. В контексті спеціальності F3 це означає, що навчальний процес має бути спрямований не лише на вивчення мов програмування, а й на опанування методологій розробки людино-орієнтованих систем, що враховують психологію користувача та етичні рамки застосування технологій.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика парадигм «Освіта 4.0» та «Освіта 5.0»

Критерій порівняння	Освіта 4.0	Освіта 5.0
Домінуюча ідеологія	Технологічний детермінізм, автоматизація	Людиноцентризм, сталий розвиток, добробут
Мета навчання	Формування Hard Skills, цифрова грамотність, IQ	Розвиток Soft Skills, емпатія, етика, EQ
Роль студента	Користувач цифрових сервісів, об'єкт аналізу	Співтворець знань, активний суб'єкт траєкторії
Роль викладача	Фасилітатор, оператор навчальних платформ	Ментор, коуч, етичний орієнтир
Штучний інтелект	Інструмент обробки даних та тестування	Ко-креатор, еволюційний партнер
Освітнє середовище	Віртуальні класи, хмарні LMS	Гібридні екосистеми, імерсивні простори
Підхід до оцінювання	Стандартизовані тести, Learning Analytics	Комплексна оцінка компетентностей, рефлексія
Соціальний аспект	Цифрова диференціація, конкуренція	Соціальна інклюзія, колективна інтелектуальність

Джерело: складено авторами на основі опрацьованих джерел [1; 3; 6]

Важливим аспектом концепції «Освіти 5.0» є подолання «цифрового розриву» та забезпечення рівного доступу до якісних ресурсів. Використання адаптивних платформ дозволяє згладжувати нерівність стартових можливостей здобувачів, пропонуючи кожному індивідуальну швидкість та глибину занурення в матеріал [3; 6]. Таким чином, архітектоніка навчання відповідно до концепції «Освіти 5.0» стає інструментом соціальної справедливості та інклюзії.

Зосередимо увагу на ролі штучного інтелекту в трансформації архітектоніки навчання. У парадигмі «Освіти 5.0» архітектоніка навчання визначається як динамічна конфігурація взаємозв'язків між суб'єктами (здобувач, викладач, адміністратор) та інтелектуальними об'єктами (контент, алгоритми, середовище). Штучний інтелект виступає фундаментальним компонентом цієї структури, виконуючи ряд трансформаційних функцій [11].

Першою ключовою функцією є глибока персоналізація, яка на відміну від простої диференціації, де здобувачі поділяються на групи за успішністю, ШІ в «Освіті 5.0» дозволяє будувати унікальну траєкторію для кожного здобувача. Це досягається шляхом безперервного аналізу цифрового сліду, що включає не лише результати тестів, а й швидкість читання тексту, час розв'язування задач, частоту звернень за допомогою та навіть аналіз настрою через природну мову або міміку під час вебінарів [8; 12].

Другою функцією є предиктивний супровід, бо інтелектуальні системи здатні виявляти закономірності, що передують академічним труднощам. Наприклад, аналіз патернів поведінки може попередити викладача про те, що здобувач перебуває

в зоні ризику відрахування за кілька тижнів до того, як це стане очевидним за оцінками. Предиктивна аналітика в Україні вже показує потенціал зниження ризиків відрахування на 15 % [13].

Третя функція – це ко-креація контенту, тобто сучасні генеративні моделі (GenAI) дозволяють викладачам створювати інтерактивні навчальні матеріали, симуляції та кейси в реальному часі, адаптуючи їх під поточні запити аудиторії. Це перетворює статичний підручник на живий організм, що еволюціонує разом зі знаннями в галузі комп'ютерних наук [8].

Проте інтеграція ІІІ в архітектоніку навчання відповідно до концепції «Освіти 5.0» вимагає розв'язування проблеми «чорної скриньки». Студенти та педагоги повинні не просто отримувати рекомендації від алгоритмів, а розуміти логіку їх формування. Саме тому концепція XAI (Explainable AI – пояснюваний ІІІ) стає невіддільною частиною освітніх платформ майбутнього [14; 15]. Це дозволяє уникнути бездумного слідування вказівкам машини та сприяє розвитку критичного мислення здобувачів.

Змодельємо математично персоналізовану траєкторію навчання (PLPP). Для переходу від філософських концепцій до технічної реалізації навчання відповідно до концепції «Освіти 5.0» необхідно формалізувати процес навчання як математичну задачу. Найбільш адекватним апаратом для опису динамічної адаптації є теорія марковських процесів прийняття рішень (Markov Decision Processes, MDP) [16].

Задача планування персоналізованої траєкторії (PLPP) полягає у знаходженні такої послідовності навчальних дій, яка б привела здобувача до цільового стану (володіння компетентностями) з максимальною ефективністю та мінімальним психологічним дискомфортом.

Формально модель PLPP можна подати кортежем $(S, K, T, R, \gamma \arg \max)$ – оператор, що вказує на пошук такої стратегії π , яка забезпечує найвищий можливий результат;

E_π – математичне сподівання (очікуване значення) кумулятивної винагороди за умови дотримання стратегії π .

$\sum_{t=1}^T$ – сума винагород на всіх кроках навчання від початкового моменту до завершення курсу (крок T);

γ^{t-1} – часовий коефіцієнт дисконтування, який дозволяє системі зважати на довгострокову перспективу навчання, а не лише на миттєві успіхи;

$\mathcal{R}(s_t, k_{t+1})$ – скалярна функція винагороди, яка перетворює абстрактні освітні цілі (успішність, залученість, комфорт) в обчислювальні сигнали, оцінюючи якість дії k_{t+1} у поточному стані студента s_t [16].

Для обчислення стану студента s_t в реальному часі використовуються методи мультимодального аналізу. Наприклад, показник залученості (Engagement Score) можна розрахувати на основі активності в системі:

$$ES = \frac{T_{active}}{T_{total}} * 100$$

де T_{active} – час, проведений за активним розв'язуванням завдань, а T_{total} – загальний час перебування в системі [10].

Наукова новизна такого підходу полягає у включенні «афективного контуру» в математичну модель. Це дозволяє алгоритму «розуміти», коли здобувач втомлений або втратив мотивацію, і замість чергової складної задачі запропонувати

перерву або змінити формат подачі матеріалу на легший (наприклад, перегляд відео замість читання документації). Така гнучкість є фундаментом людиноцентричної архітектури навчання в «Освіті 5.0».

Дослідимо гібридний алгоритм адаптивної оптимізації (ALPOA). Оскільки задача планування оптимальної траєкторії в широкому просторі станів та дій є NP-складною, використання класичних методів пошуку є неефективним [9]. Для розв'язання цієї проблеми розроблено гібридний алгоритм Adaptive Learning Path Optimization Algorithm (ALPOA), що поєднує можливості генетичних алгоритмів (GA) та методу ройового інтелекту (Particle Swarm Optimization, PSO) [10].

Генетична компонента (GA) відповідає за глобальний пошук та генерацію різноманітних варіантів навчальних шляхів. Це дозволяє системі «експериментувати» з різними послідовностями тем, знаходячи нетривіальні, але ефективні комбінації для конкретних профілів здобувачів. Основні етапи GA включають: кодування навчального шляху у вигляді хромосоми; операції кросінговеру для обміну успішними фрагментами траєкторій між «особинами» популяції; мутацію для запобігання передчасної збіжності до локального оптимуму.

Компонента ройового інтелекту (PSO) використовується для локального уточнення параметрів взаємодії (темп подачі, складність питань, інтенсивність зворотного зв'язку). Кожен здобувач у віртуальному просторі параметрів розглядається як частинка, що має свою позицію та швидкість. Частинки коригують свій рух, орієнтуючись на свій найкращий результат (pbest) та найкращий результат групи (gbest) [10; 17].

Поєднання цих методів у межах ALPOA забезпечує: високу точність прогнозування оптимального шляху (до 97 % за результатами експериментальних досліджень) [10]; здатність до самонавчання системи, тобто чим більше здобувачів проходять через платформу, тим точнішими стають рекомендації; адаптивність до довгострокових послідовностей: на відміну від простих рекурентних мереж, ALPOA краще обробляє тривалі освітні цикли (семестри, курси) [12].

Застосування алгоритму ALPOA у навчанні майбутніх фахівців зі спеціальності F3 «Комп'ютерні науки» дозволяє автоматизувати процес підбору додаткових матеріалів для тих, хто випереджає графік, та пропонувати адаптивні «коригувальні» модулі для тих, хто постає перед труднощами в опануванні складних абстрактних концепцій, таких як архітектура розподілених систем або теорія складності алгоритмів.

Стосовно мультиагентної архітектури інтелектуальної освітньої системи, то для повної реалізації архітектури навчання відповідно до «Освіті 5.0» необхідна програмна структура, що забезпечує автономність та взаємодію багатьох інтелектуальних компонентів. Найбільш ефективним підходом тут є мультиагентні системи (Multi-Agent Systems, MAS) [18; 19]. Запропонована архітектура базується на концепції I5arc (Industry 5.0 collaboration architecture), яка була адаптована для освітнього середовища та передбачає наявність спеціалізованих агентів, що працюють у єдиному семантичному просторі [20].

Сформуємо структуру мультиагентної системи з п'яти компонент, а саме:

1. Агент моделювання користувача (User Modeling Agent) – це ядро системи, яке створює та оновлює «цифрового двійника» здобувача, тобто агент збирає дані про успішність, стиль навчання (візуальний, аудіальний, кінестетичний), рівень тривожності та поточні цілі, разом з тим, агент використовує методи машинного навчання (C5.0, Naive Bayes, Backpropagation) для класифікації здобувача та прогнозування його реакцій на різні типи контенту [21].

2. Педагогічний агент (Pedagogical Agent), який виконує роль віртуального тьютора, тобто він обирає стратегію навчання на основі даних від агента моделювання, наприклад, якщо здобувач демонструє високу впевненість, агент може обрати стратегію «проблемного навчання», а якщо рівень стресу зростає – перейти до покрокових інструкцій [21].

3. Агент контенту (Material Agent), який управляє базою знань, що подана у вигляді онтологічного графа. Отже, агент відповідає за пошук найбільш релевантних об'єктів (відео, статті, лабораторні роботи), що відповідають поточному кроку траєкторії та вподобанням здобувача [21; 22].

4. Агент етичного моніторингу та пояснення (Ethics & XAI Agent) – це унікальний компонент парадигми «Освіта 5.0», який перевіряє, чи не є рекомендації системи упередженими, та готує пояснення для здобувача та викладача, наприклад: «Я рекомендую вам цей додатковий модуль з дискретної математики, оскільки ваш поточний час розв'язування задач з теорії графів на 20 % перевищує середній показник, що вказує на прогалину в базових концепціях» [14; 15].

5. Агент координатор (Coordinator Agent), який забезпечує синхронізацію між усіма агентами та зовнішніми системами (LMS університету, електронні бібліотеки) [18].

Взаємодія агентів здійснюється через спеціальну мову комунікації (Plant-specific Communication Language, PCL, у промисловому контексті або її освітній аналог), що базується на семантичних стандартах RDF та OWL [20]. Це дозволяє системі бути інтероперабельною та легко масштабуватися.

Перевага мультиагентної архітектури полягає у її стійкості та гнучкості. Вихід з ладу одного агента не призводить до зупинки всієї системи, а додавання нових функцій (наприклад, модуля VR-симуляції) вимагає лише створення нового спеціалізованого агента без переписування всього ядра платформи [18].

Стосовно інтеграції мультимодальних даних та великих мовних моделей, то сучасний стан розвитку технологій, зокрема поява потужних великих мовних моделей (LLM), таких як GPT-4, відкриває нові горизонти для «Освіти 5.0». У системі F3 «Комп'ютерні науки» LLM можуть використовуватися не лише для генерації відповідей, а як складні аналітичні інструменти в межах адаптивної архітектури [12].

Запропонована нами модель передбачає інтеграцію LLM на етапі аналізу «довгих послідовностей» поведінкових даних. Замість того щоб аналізувати лише останню оцінку, система використовує трансформерну архітектуру (Self-attention mechanisms) для виявлення глибинних кореляцій між різними видами діяльності здобувача протягом усього терміну навчання [12].

Мультимодальна фузія даних включає обробку: текстових даних (есе, відповіді на форумах, програмний код); фізіологічних сигналів (пульс, рух очей – за наявності відповідних пристроїв або вебкамер); візуальних даних (міміка під час виконання складних завдань); соціальних взаємодій (активність у групових проєктах).

Використання генеративно-змагальних мереж (GAN) у цьому контексті дозволяє створювати «синтетичні сценарії навчання», які допомагають здобувачам відпрацьовувати навички у безпечному, але максимально наближеному до реальності віртуальному середовищі [12]. Це особливо актуально для вивчення кібербезпеки або адміністрування складних мереж, де помилка в реальній системі може бути критичною.

Така глибока інтеграція даних дозволяє досягти точності персоналізованих рекомендацій на рівні 92 %, що значно перевищує показники традиційних систем, які базуються лише на статичних тестах [12; 23].

Впровадження концепції «Освіта 5.0» в Україні має свої специфічні особливості, зумовлені як законодавчою базою, так і поточними викликами соціально-економічного характеру. Закон України «Про освіту» закріплює право здобувачів на індивідуальну освітню траєкторію, що створює необхідне правове поле для впровадження інтелектуальних адаптивних систем [24].

Дослідження показують, що українські ЗВО вже демонструють значний прогрес у цифровізації, проте основна увага досі приділялася адміністративним процесам. Впровадження ІІІ дозволяє підвищити ефективність адміністрування на 40 %, проте справжній прорив очікується саме у сфері персоналізації навчання [13]. Для успішної реалізації стратегії «Освіта 5.0: Український вектор» пропонується трирівнева модель розгортання:

1. Рівень інфраструктури та даних, тобто створення національних репозиторіїв освітнього контенту з семантичною розміткою, при цьому важливим фактором тут є забезпечення кібербезпеки та захисту персональних даних здобувачів, що є особливо актуальним в умовах гібридних загроз [25].

2. Рівень інтелектуальних платформ, тобто розробка та впровадження вітчизняних адаптивних LMS, що інтегрують алгоритми типу ALPOA та мультиагентні архітектури. Важливо орієнтуватися на хмарні рішення, які забезпечують доступність освіти з будь-якої точки світу, що критично для внутрішньо переміщених здобувачів та тих, хто перебуває за кордоном [8].

3. Рівень людського потенціалу, при якому ключовим чинником успіху є мотивація самих викладачів та їхня готовність до безперервного навчання, бо викладач у системі «Освіта 5.0» має стати «архітектором освітнього досвіду», який використовує ІІІ для підсилення власного менторського впливу [8].

Особливе місце у підготовці фахівців за спеціальністю F3 посідає використання іммерсивних технологій та віртуальних лабораторій. Наприклад, досвід Пекінського університету та інших провідних закладів світу показує, що віртуальна симуляція складних ІТ-інфраструктур дозволяє значно скоротити час на формування практичних навичок при збереженні високої якості знань [2; 8]. В Україні такі проекти вже починають реалізовуватися в провідних технічних університетах. Так, в Державному податковому університеті запроваджено освітню програму «Технології цифрового дизайну» [26], яка готує фахівців, здатних здійснювати проєктування інтерфейсів; виконувати прототипування складних цифрових продуктів; створювати сучасні програмні продукти з якістю відповідно до Стандарту ISO/IEC 25010; реалізовувати цифрові проєкти, в яких естетична привабливість поєднується з високою продуктивністю та якісною архітектурою, реалізованою через математичні та програмні засоби комп'ютерної графіки; розробляти інтерактивні віртуальні середовища; створювати контент для цифрових середовищ.

В контексті даного дослідження важливими є питання етичних аспектів та сталого розвитку у системі «Освіта 5.0». Саме етична відповідальність є одним із найважливіших стовпів «Освіта 5.0», бо масштабне використання ІІІ в навчанні породжує ризики «алгоритмічної упередженості», коли система може ненавмисно дискримінувати певну групу студентів на основі накопичених даних [5; 11]. Для комп'ютерних наук це не просто теоретичне питання, а практичне завдання проєктування справедливих систем.

«Освіта 5.0» вимагає впровадження концепції «Людина-в-контурі» (Human-in-the-loop), в рамках якої зазначено, що остаточне рішення щодо освітньої траєкторії або оцінки завжди залишається за людиною (здобувачем або викладачем), а ІІІ надає лише обґрунтовані рекомендації [20; 27]. Такий підхід забезпечує агентність

здобувача – його спроможність самостійно керувати власним розвитком, не стаючи заручником алгоритмів.

Крім того, концепція «Освіта 5.0» тісно пов'язана з Цілями сталого розвитку ООН (SDGs). Використання ШІ сприяє забезпеченню якісної освіти (ЦСР 4), гендерної рівності (ЦСР 5) та зменшенню нерівності (ЦСР 10) шляхом надання адаптивної підтримки вразливим категоріям населення [6]. Для IT-галузі це означає перехід до «зеленого програмування» та створення технологій, що служать суспільному благу, а не лише комерційній ефективності.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє констатувати, що перехід до парадигми «Освіта 5.0» є закономірним етапом еволюції вищої школи, який вимагає докорінної зміни архітектури навчання. Штучний інтелект у цій системі трансформується з інструменту автоматизації в інтелектуальне середовище, що забезпечує симбіоз людського та машинного інтелекту.

Основними науковими результатами роботи є: обґрунтування людиноцентричної архітектури навчання, яка базується на пріоритеті емоційного інтелекту та етичної відповідальності, що критично важливо для підготовки фахівців зі спеціальності F3 «Комп'ютерні науки»; розробка математичної моделі PLPP на основі марковських процесів прийняття рішень, яка інтегрує когнітивні та афективні параметри стану студента, дозволяючи будувати по-справжньому адаптивні траєкторії; формалізація гібридного алгоритму ALPOA, що поєднує методи GA та PSO для ефективного розв'язування NP-складної задачі оптимізації освітнього шляху; проектування мультиагентної структури інтелектуальної системи, що забезпечує гнучкість, прозорість (XAI) та етичний контроль за використанням ШІ в освіті.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці методів інтеграції великих мовних моделей з графами знань для створення автоматизованих систем генерації пояснень у реальному часі, а також у вивченні впливу іммерсивних середовищ на розвиток soft skills у майбутніх IT-фахівців. Впровадження запропонованих моделей у практику українських ЗВО дозволить не лише підвищити академічну успішність здобувачів, а й забезпечити підготовку конкурентоспроможних фахівців, здатних до творчої та етичної праці в умовах П'ятої промислової революції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Chinchorkar S., Jadhav J. Commentary: Transforming Education 4.0 to Education 5.0: sustainable education. *Journal of Research in Innovative Teaching & Learning* | Emerald Publishing 22 aug. 2024. Vol. 17, No. 2. URL: <https://www.emerald.com/jrit/article/17/2/408/1226675/Commentary-Transforming-Education-4-0-to-Education>
2. Kin M. The Transition from Higher Education 4.0 to 5.0: Connotations, Requirements, and Challenges. *The Asia Pacific School of Business*. 2026. URL: https://www.apsb.edu.au/news_events/1635.html
3. Education 5.0: what is, examples and main trends. *Smowltech*. URL: <https://smowl.net/en/blog/education-5-0-what-is-examples-main-trends/>
4. Islam M.T., Sepanloo K., Woo S., Woo S.H., Son Y.-J. A Review of the Industry 4.0 to 5.0 Transition: Exploring the Intersection, Challenges, and Opportunities of Technology and Human–Machine Collaboration. *Machines*. Vol. 13, Is. 4. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/4/267>
5. Education 5.0: Artificial Intelligence and the Next Wave of Learning / Ivorgba E. A., Tripathi L., Pandey P., Aman I. London: Infinity publications LLC. 2025. 186 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/396627203_EDUCATION_50_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE_AND_THE_NEXT_WAVE_OF_LEARNING_Published_in_United_Kingdom

6. Next-Gen Quality Learning: How Can AI Technologies Shape Education 4.0 and 5.0 towards the SDGs from Multiple Stakeholders' Perspective? London Metropolitan University London Met Repository London Met Repository. URL: <https://repository.londonmet.ac.uk/10321/3/Accepted%20Version.pdf>
7. Gaitantzi A., Kazanidis I. The Role of Artificial Intelligence in Computer Science Education: A Systematic Review with a Focus on Database Instruction. *Applied Sciences*. 2025. № 15, 3960. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/7/3960>
8. Kryshchanovych S., Bekh Y., Stadnichenko O., Shevchenko Z., Maikher V. Education 5.0: The development of the Ukrainian educational system in the conditions of artificial intelligence. *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2024. Vol. 8, No. 6: P. 549–558. URL: <https://learning-gate.com/index.php/2576-8484/article/download/2119/806/3475>
9. Personalized Learning Path Problem Variations: Computational Complexity and AI Approaches. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10722910>
10. Subhalakshmi R.T., Geetha S., Dhanabal S., Balakrishnan M. ALPOA: Adaptive Learning Path Optimization Algorithm for Personalized E-Learning Experiences. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESN)*. 2025. Vol. 11, No. 1. P. 756–764. URL: <https://ijcesen.com/index.php/ijcesen/article/download/910/540/3432>
11. Kamalov F., Calonge D. S., Gurrib I. New Era of Artificial Intelligence in Education: Towards a Sustainable Multifaceted Revolution. *Sustainability*. 2023. № 15, 12451. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12451>
12. Yang Q., Liang C. A Second-Classroom Personalized Learning Path Recommendation System Based on Large Language Model Technology. *Applied Sciences*. 2025. № 15, 7655. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/14/7655>
13. Specialty recommendation system algorithm of actions. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Specialty-recommendation-system-algorithm-of-actions_fig2_360897538
14. Rovzanec J. M., Novalija I. et al. Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications. *Computer Science. Engineering*. 2022. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/087ebdd2529399cca8394bf285dd92c6400ce33c>
15. Swamy V. A Human-Centric Approach to Explainable AI for Personalized Education. *Stanford university*. 2025. 275 p. URL: <https://scale.stanford.edu/ai/repository/human-centric-approach-explainable-ai-personalized-education>
16. Personalized Learning Path Planning through Goal-Driven Learner State Modeling. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/html/2510.13215v1>
17. Lu L., Chen X., Li Y. Research on Personalized Learning Path Optimization Strategy Assisted by Artificial Intelligence. *Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing*. 2025. 127b. P. 561–577. URL: <https://combinatorialpress.com/article/jcmcc/Volume%20127/127b/research-on-personalized-learning-path-optimization-strategy-assisted-by-artificial-intelligence.pdf>
18. Erba T. A Multi-Agent Architecture for An Intelligent Web-Based Educational System. 2023. 201 p. URL: https://repository.stcloudstate.edu/csit_etds/43/
19. Serce F. C. A multi-agent adaptive learning system for distance education. *Semantic Scholar*. 2008. 123 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-MULTI-AGENT-ADAPTIVE-LEARNING-SYSTEM-FOR-DISTANCE-Ser%20C3%A7e-Alpaslan/bef6e4c4541d2aca91d0de0f1c9cf09def02eedc>
20. Tóth A., Nagy L., Kennedy R., Bohuš B., Abonyi J., Ruppert T. The human-centric Industry 5.0 collaboration architecture. *MethodsX*. 2023. № 11, 102260. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10300249/>
21. Boticario J. G., Gaudio E. A multiagent architecture for a web-based adaptive educational system. *ResearchGate*. URL: https://www.researchgate.net/publication/2458360_A_Multiagent_Architecture_for_a_Web-Based_Adaptive_Educational_System

22. Ma Y., Wang L., Zhang J., Liu F., Jiang Q. A Personalized Learning Path Recommendation Method Incorporating Multi-Algorithm. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Personalized-Learning-Path-Recommendation-Method-Ma-Wang/7faa7e402b15597d5a28ed25f6dfb49aad28908f>
23. Li X., Zhang B. Personalized Learning Path Recommendation Algorithm for English Listening Learning. *Electrical Systems*. 2024. № 20-6s, Vol. 20. P. 2188–2199. URL: <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/3133>
24. Стрельбицька С. М. Індивідуальна освітня траєкторія професійного розвитку здобувачів освіти в умовах магістратури. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова*. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи. 2022. № 86. С. 204–209. URL: <https://chasopys.ps.npu.kiev.ua/archive/86/40.pdf>
25. Vasylyuk-Zaitseva S., Kosenyuk H., Tanasiichuk I., Boyko J. Application of Artificial Intelligence in Ukrainian Education of the Future. *FuturityEducation*. № 3 (3). P. 79–107. URL: <https://futurity-education.com/index.php/fed/article/view/213>
26. Гладченко О., Ратушняк Т., Омельчук А., Ніжегородцев В., Вишемірська Я., Беспарточна О. Формування інформаційної культури майбутніх фахівців цифрового дизайну (освітньо-професійна програма «Технології цифрового дизайну»). *Теорія і практика управління соціальними системами*. Харків. 2023. № 4. С. 85–103. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-7782.2023.4.08>
27. Zhang L. Multi-Agent Systems for IEP Development. CIDDL. 2024. URL: <https://ciddl.org/multi-agent-systems-for-iep-development/>

REFERENCES:

1. Chinchorkar, S., & Jadhav, J. (2024) Commentary: Transforming Education 4.0 to Education 5.0: sustainable education. *Journal of Research in Innovative Teaching & Learning* 17(2), 408–413. Retrieved from <https://www.emerald.com/jrit/article/17/2/408/1226675/Commentary-Transforming-Education-4-0-to-Education> [in English]
2. Kin, M., (2026) The Transition from Higher Education 4.0 to 5.0: Connotations, Requirements, and Challenges. *apsb.edu.eu* Retrieved from https://www.apsb.edu.eu/news_events/1635.html [in English]
3. Education 5.0: what is, examples and main trends. *smowl.net*. Retrieved from <https://smowl.net/en/blog/education-5-0-what-is-examples-main-trends/> [in English]
4. Islam, M. T., Sepanloo, K., Woo, S., Woo, S. H., & Son, Y. J. (2025). A review of the industry 4.0 to 5.0 transition: exploring the intersection, challenges, and opportunities of technology and human-machine collaboration. *Machines*, 13(4), 267. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-1702/13/4/267> [in English]
5. Ivorgba E. A., Tripathi L., Pandey P., & Aman I. (2025). Education 5.0: Artificial Intelligence and the Next Wave of Learning. London: Infinity publications LLC. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/396627203_EDUCATION_50_ARTIFICIAL_INTELLIGENCE_AND_THE_NEXT_WAVE_OF_LEARNING_Published_in_United_Kingdom [in English]
6. Samadhiya, A., Kumar, A., Mulat-Weldemeskel, E., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., & Yadav, S. (2025). Next-gen quality learning: How can AI technologies shape education 4.0 and 5.0 towards the SDGs from multiple stakeholders' perspective?. *The TQM Journal*. Retrieved from <https://repository.londonmet.ac.uk/10321/3/Accepted%20Version.pdf> [in English]
7. Gaitantzi, A., & Kazanidis, I. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Computer Science Education: A Systematic Review with a Focus on Database Instruction. *Applied Sciences*, 15(7), 3960. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/7/3960> [in English]
8. Kryshchanovych, S., Bekh, Y., Stadnichenko, O., Shevchenko, Z., & Maikher, V. (2024). Education 5.0: The development of the Ukrainian educational system in the conditions of artificial intelligence. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8(6),

549–558. Retrieved from <https://learning-gate.com/index.php/2576-8484/article/download/2119/806/3475> [in English]

9. Mochocki, S. A., Reith, M. G., Borghetti, B. J., Peterson, G. L., Jasper, J. D., & Merkle, L. D. (2024). Personalized learning path problem variations: computational complexity and AI approaches. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/10722910> [in English]

10. Subhalakshmi, R. T., Geetha, S., Dhanabal, S., & Balakrishnan, M. (2025). ALPOA: Adaptive learning path optimization algorithm for personalized e-learning experiences. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN)*, 11(1), 756–764. Retrieved from <https://ijcesen.com/index.php/ijcesen/article/download/910/540/3432> [in English]

11. Kamalov, F., Santandreu Calonge, D., & Gurrib, I. (2023). New era of artificial intelligence in education: Towards a sustainable multifaceted revolution. *Sustainability*, 15(16), 12451. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12451> [in English]

12. Yang, Q., & Liang, C. (2025). A second-classroom personalized learning path recommendation system based on large language model technology. *Applied Sciences*, 15(14), 7655. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/14/7655> [in English]

13. Specialty recommendation system algorithm of actions. *researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Specialty-recommendation-system-algorithm-of-actions_fig2_360897538 [in English]

14. Rožanec, J. M., Novalija, I., Zajec, P., Kenda, K., Tavakoli Ghinani, H., Suh, S., ... & Soldatos, J. (2023). Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications. *International journal of production research*, 61(20), 6847–6872. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/087ebdd2529399cca8394bf285dd92c6400ce33c>

15. Swamy, V. (2025). A Human-Centric Approach to Explainable AI for Personalized Education. *arXiv e-prints*, arXiv-2505. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2505.22541> [in English]

16. Lim, J. J. Y., He, Y., Yu, J., Cong, X., Zhang-Li, D., Liu, Z., ... & Xu, B. (2025). Personalized Learning Path Planning with Goal-Driven Learner State Modeling. *arXiv preprint arXiv:2510.13215*. Retrieved from <https://arxiv.org/html/2510.13215v1> [in English]

17. Lu L, Chen X., & Li Y. (2025) Research on Personalized Learning Path Optimization Strategy Assisted by Artificial Intelligence. *Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing*, 127b, 561–577. Retrieved from <https://combinatorialpress.com/article/jcmcc/Volume%20127/127b/research-on-personalized-learning-path-optimization-strategy-assisted-by-artificial-intelligence.pdf> [in English]

18. Erba, T. (2023). A multi-agent architecture for an intelligent web-based educational system. repository.stcloudstate.edu. Retrieved from https://repository.stcloudstate.edu/csit_etds/43/ [in English]

19. Serçe, F. C. (2008). A multi-agent adaptive learning system for distance education. *semanticscholar.org*. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/A-MULTI-AGENT-ADAPTIVE-LEARNING-SYSTEM-FOR-DISTANCE-Ser%C3%A7e-Alpaslan/bef6e4c4541d2aca91d0de0f1c9cf09def02eedc> [in English]

20. Tóth, A., Nagy, L., Kennedy, R., Bohuš, B., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2023). The human-centric Industry 5.0 collaboration architecture. *MethodsX*, 11, 102260. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10300249/> [in English]

21. Boticario, J. G., & Gaudioso, E. (2000). A multiagent architecture for a web-based adaptive educational system. *researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/2458360_A_Multiagent_Architecture_for_a_Web-Based_Adaptive_Educational_System [in English]

22. Ma, Y., Wang, L., Zhang, J., Liu, F., & Jiang, Q. (2023). A personalized learning path recommendation method incorporating multi-algorithm. *Applied Sciences*, 13(10), 5946. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Personalized-Learning-Path-Recommendation-Method-Ma-Wang/7faa7e402b15597d5a28ed25f6dfb49aad28908f> [in English]
23. Li X., & Zhang B. (2024) Personalized Learning Path Recommendation Algorithm for English Listening Learning. *Electrical Systems*, 20–6s, 2188–2199. Retrieved from <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/3133> [in English]
24. Strelbytska, S. M. (2022). Indyvidualna osvithnia traiektoriia profesiinoho rozvytku zdobuvachiv osvity v umovakh mahistratury [Individual educational trajectory of professional development of students in master's programs]. *Scientific journal of the National Polytechnic University named after M. P. Dragomanov. Series 5. Pedagogical Sciences: Realities and Prospects*, (86), 204–209. Retrieved from <https://chasopys.ps.npu.kiev.ua/archive/86/40.pdf> [in Ukrainian]
25. Vasylyuk-Zaitseva, S., Kosenyuk, H., Tanasiichuk, I., & Boyko, J. (2023). Application of artificial intelligence in Ukrainian education of the future. *Futurity Education*, 3(3), 79–107. Retrieved from <https://futurity-education.com/index.php/fed/article/view/213> [in English]
26. Hladchenko, O., Ratushnyak, T., Omelchuk, A., Nizhehorodtsev, V., Vyshemirska, Y., & Bespartochna, O. (2023). Formuvannia informatsiinoi kultury maibutnikh fakhivtsiv tsyfrovoho dyzainu (osvitno-profesiina prohrama "Tekhnolohii tsyfrovoho dyzainu") [Formation of information culture of future digital design specialists (educational and professional program «Digital Design Technologies»)]. *Theory and practice of social systems management*, (4), 85–103. Retrieved from <https://doi.org/10.20998/2078-7782.2023.4.08> [in Ukrainian]
27. Zhang, L. (2024) Multi-Agent Systems for IEP Development. CIDDL. ciddl.org. Retrieved from <https://ciddl.org/multi-agent-systems-for-iep-development/> [in English]

Дата першого надходження статті до видання: 14.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.05.2026