

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-12>

УДК 004.9 + 378.14

Десятко Альона Миколаївна¹, PhD (Комп'ютерні науки), доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2284-3418>

Нікітенко Євгеній Васильович², к.ф.-м.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-9222-644X>

Сагун Андрій Вікторович³, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

Терлецький Тарас Володимирович³, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4114-0734>

¹ Державний торговельно-економічний університет, м. Київ, Україна

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

³ Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СФОРМОВАНOSTІ КОМПЕТЕНЦІЙ СТУДЕНТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЦИФРОВОГО СЛІДУ

Десятко А. М., Нікітенко Є. В., Сагун А. В., Терлецький Т. В. Математична модель оцінки сформованості компетенцій студентів на основі аналізу цифрового сліду. У статті розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розроблення ймовірнісної математичної моделі оцінювання рівня сформованості компетентностей здобувачів вищої освіти (ВО) на основі аналізу їхнього цифрового сліду (ЦС) в системах управління навчанням (LMS). Зазначено, що в умовах воєнного стану та цифровізації освіти в Україні цифровий слід стає важливим джерелом даних про освітню активність здобувачів ВО. Проаналізовано недоліки класичних методик оцінювання, які сфокусовано на результатах екзаменаційного контролю і не враховують індивідуальні освітні траєкторії впродовж усього періоду навчання в ЗВО. Запропонована модель базується на поданні компетентностей як прихованих тобто латентних станів студента, рівень яких оцінено через спостережувані параметри цифрового сліду за допомогою теореми Байєса. Розроблено математичний апарат, який включає оцінку змін освітньої активності, Min-Max нормалізацію метрик, а також використання логістичної функції для визначення інтегрального рівня компетентності. Також розглянуто аспект виявлення атипової поведінки здобувачів ВО через введення функції аномальності та ентропійної міри, зростання якої сигналізує про хаотизацію навчального процесу та академічні ризики. Дієздатність моделі верифіковано шляхом обчислювального експерименту. Експеримент проведено на базі даних для трьох груп здобувачів – успішних, пасивних, хаотичних двох київських ЗВО з урахуванням експертних вагових коефіцієнтів для технічного та гуманітарного профілів ЗВО. Результати експерименту підтвердили прийнятну точність моделі. Зокрема, зафіксовано низьку середньоквадратичну похибку MSE у прогнозуванні екзаменаційних балів на основі неперервного аналізу цифрового сліду. Доведено, що застосування моделі дозволить виявляти ризики втрати мотивації та адаптувати освітній процес до специфіки конкретного ЗВО.

Ключові слова: цифровий слід, освітня аналітика, оцінювання компетентностей, математичне моделювання, ймовірнісна модель, байєсівський висновок, система управління навчанням, аномалії освітньої поведінки, машинне навчання

Desiatko A., Nikitenko E., Sagun A., Terletskyi T. A Mathematical Model for Assessing the Development of Student Competencies Based on Digital Footprint Analysis. The article addresses the pressing scientific and applied problem of developing a probabilistic mathematical model for assessing the level of competence development among higher education students based on the analysis of their digital footprint (DF) in learning management systems (LMS). It is noted that in the context of martial law and the digitalization of education in Ukraine, the digital footprint is becoming an important source of data on the educational activity of HE students. The shortcomings of classical assessment methods, which focus on examination results and do not account for individual educational trajectories throughout the entire period of study at higher education institutions, are analyzed. The proposed model is based on the representation of competencies as hidden, i.e., latent states of the student, the level of which is estimated through observable parameters of the digital footprint using Bayes' theorem. A mathematical framework has been developed that includes an assessment of changes in educational activity, Min-Max normalization of metrics, and the use of a logistic function to determine the integral level of competence. The aspect of detecting atypical behavior of higher education students is also considered through the introduction of an anomaly function and an entropy measure, the increase of which signals the chaotic nature of the educational process and academic risks. The model's validity was verified through a computational experiment. The experiment was conducted using a dataset for three groups of applicants – successful, passive, and erratic – from two higher education institutions in Kyiv, taking into account expert weighting coefficients for technical and humanities programs at these institutions. The results of the experiment confirmed the model's acceptable accuracy. In particular, a low mean square error (MSE) was recorded in predicting exam scores based on continuous analysis of the digital footprint. It has been demonstrated that applying the model will enable the identification of risks of losing motivation and the adaptation of the educational process to the specific characteristics of a particular higher education institution.

Keywords: digital footprint, educational analytics, competency assessment, mathematical modeling, probabilistic model, Bayesian inference, learning management system, anomalies in educational behavior, machine learning

Постановка наукової проблеми.

Попри воєнний стан в Україні тривають процеси цифрової трансформації системи вищої освіти. Відповідно використання систем управління навчанням (Learning Management System, LMS),

електронних освітніх платформ, сервісів дистанційного навчання та засобів онлайн-комунікації супроводжується формуванням значних обсягів даних про взаємодію здобувачів вищої освіти (далі ВО) з освітнім середовищем. Сукупність таких даних прийнято розглядати як цифровий слід (далі ЦС), який відображає специфіку освітньої поведінки, інтенсивність навчальної діяльності, рівень залученості до освітнього процесу та результати виконання освітніх компонент (ОК) в конкретному ЗВО.

Особливої актуальності дослідження ЦС набуло для української системи ВО в умовах воєнного стану, спричиненого широкомасштабною агресією РФ проти України. Переміщення значної кількості здобувачів ВО та науково-педагогічних працівників, пошкодження освітньої інфраструктури, необхідність забезпечення безперервності навчання незалежно від місця перебування учасників освітнього процесу зумовили широке впровадження дистанційних та змішаних форм навчання. За таких умов ЦС фактично стає одним із основних джерел інформації про освітню активність здобувачів ВО та дозволяє здійснювати моніторинг освітнього процесу.

Одним із головних завдань сучасної вищої освіти є оцінювання рівня сформованості компетентностей, визначених освітньою програмою (ОП). Класичні методики [1] до такого оцінювання реалізують переважно на результатах поточного та підсумкового контролю. Цей контроль віддзеркалює досягнутий результат навчання. Проте він не завжди дозволяє враховувати особливості індивідуальної освітньої траєкторії здобувача ВО. Водночас аналіз ЦС дає можливість дослідити процес формування компетентностей на основі сукупності поведінкових характеристик, накопичених упродовж усього періоду навчання в ЗВО.

Сучасні методи освітньої аналітики, інтелектуального аналізу даних та машинного навчання (МН) відкривають нові можливості для побудови математичних моделей, здатних встановлювати взаємозв'язки між параметрами ЦС та рівнем сформованості компетентностей. Однак більшість існуючих методів орієнтовані або на аналіз окремих показників активності здобувачів ВО, або на прогнозування академічної успішності [1-5], тоді як питання синтезу інтегральної ймовірнісної моделі оцінювання сформованості компетентностей на основі ЦС поки залишається недостатньо дослідженим.

У зв'язку з цим актуальним науковим завданням дослідження є розробка математичної моделі оцінювання сформованості компетентностей здобувачів ВО на основі аналізу їх ЦС, яка б враховувала варіативні параметри освітньої активності, невизначеність поведінкових характеристик та можливість виявлення атипових освітніх траєкторій здобувачів ВО.

Попри накопичення значних обсягів даних про взаємодію здобувачів ВО з електронним освітнім середовищем, наявні методики оцінювання компетентностей наразі переважно спираються на результати поточного та підсумкового контролю. Водночас наявні методи освітньої аналітики фокусуються здебільшого на прогнозуванні академічної успішності або аналізі ізольованих показників навчальної активності здобувачів ВО. Відповідно, виникає суперечність між наявністю великих масивів даних ЦС та відсутністю комплексних математичних інструментів для їх використання з метою неперервного моніторингу процесу навчання. Проблема полягає у відсутності інтегральної ймовірнісної математичної моделі, здатної встановлювати взаємозв'язки між параметрами ЦС та рівнем сформованості компетентностей, яка б одночасно враховувала часову показники, варіативність поведінки та ризики атипових (аномальних) освітніх траєкторій здобувачів ВО.

Аналіз досліджень.

Проблематика використання ЦС в освітній аналітиці активно досліджується як в Україні, так і за кордоном [1 – 16]. Значна частина робіт [1 – 10] саме присвячена питанням формування та оцінювання цифрових компетентностей здобувачів ВО, а також використанню даних інформаційно-освітніх систем для підтримки прийняття управлінських рішень в ЗВО. Так у [1, 3] запропоновано концептуальні підходи до формування цифрових компетентностей здобувачів ВО та визначено основні складові цифрової компетентності в умовах сучасного освітнього середовища. Питання діагностики цифрової компетентності та її зв'язку з інтелектуальним розвитком здобувачів освіти розглянуто у роботі Наливайко О. [4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із аналізом ЦС, які генеруються під час взаємодії здобувачів ВО із системами дистанційного навчання. У [2] авторами досліджено можливості моніторингу ЦС у мистецькій освіті. У [5] автори застосували методи кластерного аналізу для дослідження ЦС здобувачів освіти та виявлення характерних поведінкових шаблонів. Подальший розвиток цього напрямку представлено у роботах [6, 7], де розглянуто особливості поведінкових ЦС

у системах дистанційного навчання та питання виявлення атипової поведінки користувачів інформаційно-освітніх систем ЗВО.

На міжнародному рівні увагу приділено дослідженню зв'язку між ЦС та компетентностями здобувачів ВО. Зокрема, Venntami K. E. та співавтори у [8] запропонували метод переходу від аналізу ЦС до оцінювання компетентностей на основі моделей освітньої аналітики. У роботі Gurfova R. V. та співавторів [10] розглянуто використання ЦС як джерела даних для формування цифрових компетентностей студентів. В [13] автори дослідили можливості використання активного ЦС для оцінювання рівня розвитку професійних компетентностей магістрантів.

Низка досліджень, зокрема, [9, 11, 14 – 16] присвячена оцінюванню цифрових навичок та компетентностей здобувачів ВО в різних країнах. Так у [9] автори проаналізували рівень цифрової грамотності студентів ЗВО та визначили розрив між фактичним і декларованим рівнем цифрових навичок. В [11] досліджено специфіку розвитку цифрових компетентностей студентів у низці європейських країн. Результати цих досліджень пазом із роботами [14 – 16] підтвердили необхідність використання об'єктивних даних про освітню діяльність здобувачів ВО замість самооцінювання.

Водночас аналіз наукових публікацій [1 – 16] показав, що більшість чинних методів та моделей орієнтована або на оцінювання цифрових компетентностей, або на аналіз окремих характеристик ЦС. Недостатньо уваги академічною спільнотою приділено побудові математичних моделей, які дозволяли б оцінити рівень сформованості компетентностей ОП на основі комплексного аналізу ЦС здобувача ВО. Крім того, практично відсутні моделі, що одночасно враховують часові зміни освітньої активності, невизначеність поведінкових даних та можливість виявлення аномалій в освітній траєкторії здобувачів ВО.

Отже, існує наукова потреба у синтезі ймовірнісної математичної моделі оцінювання сформованості компетентностей здобувачів ВО на основі аналізу ЦС, що і визначає напрямок даного дослідження.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Методи та моделі.

В умовах цифровізації освітнього процесу діяльність здобувачів ВО у системі управління навчанням супроводжується формуванням цифрового сліду, що є сукупністю подій взаємодії з елементами освітнього середовища.

Введемо такі базові множини: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ – множина студентів; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ – множина освітніх активностей; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$ – множина компетенцій освітньої програми.

Тоді ЦС слід окремого здобувача ВО u_i – це часова послідовність подій:

$$DS_i = \{E_1, E_2, \dots, E_T\}. \quad (1)$$

Кожну подію подаємо кортежем (2):

$$E_t = (a_t, \tau_t, d_t, r_t, s_t), \quad (2)$$

де a_t – освітня активність; τ_t – часова мітка події; d_t – тривалість активності; r_t – результат виконання активності; s_t – тип взаємодії користувача із системою (перегляд матеріалів, виконання тестів, завантаження завдань тощо).

Отже, ЦС являє собою часовий стохастичний процес $DS_i(t)$, який віддзеркалює зміну освітньої активності студента в часі.

Припускаємо, що компетенції є прихованими станами здобувача ВО і не можуть бути виміряні безпосередньо. Оцінку їх рівня здійснюємо на основі спостережуваних параметрів ЦС.

Для кожної компетенції c_j вводимо латентну випадкову величину $Z_j \in [0,1]$, яка характеризує ступінь сформованості компетенції. Задачу оцінювання зводимо до обчислення апостеріорної ймовірності $P(Z_j | DS_i)$.

За наявності вектора спостережуваних ознак $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, ймовірнісна модель за теоремою Байєса набуває вигляду:

$$P(Z_j | X) = \frac{P(X|Z_j)P(Z_j)}{P(X)}, \quad (3)$$

де $P(Z_j)$ – апіорна ймовірність сформованості компетенції; $P(X | Z_j)$ – ймовірність спостереження поточного цифрового сліду за умови наявності компетенції; $P(X)$ – нормалізуюча константа.

Для аналізу формуємо вектор ознак $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, який включає такі метрики, як середній бал, час активності, глибина проходження курсу та інтенсивність взаємодії. Для усунення масштабних відмінностей застосовуємо Min-Max нормалізацію:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}. \quad (4)$$

Оскільки рівень компетенцій змінюється з часом, вводимо варіативну складову:

$$Z_j(t+1) = f(Z_j(t), X_t), \quad (5)$$

Інтегральну оцінку компетенції обчислюємо як зважену суму:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \hat{x}_i, \quad (6)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт ознаки. Рівень сформованості компетенції визначаємо через логістичну функцію:

$$L_j = \sigma(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}. \quad (7)$$

Для виявлення відхилень у поведінці здобувача ВО вводимо функцію аномальності на основі побудованої байєсівської мережі (BN):

$$A(X) = 1 - P(X | BN). \quad (8)$$

Високі значення $A(X)$ свідчать про можливі академічні ризики. Додатково використовуємо ентропійну міру поведінки:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (9)$$

де p_i – ймовірність певної освітньої активності. Ріст ентропії вказує на хаотизацію освітньої траєкторії студента.

Цільовим завданням моделі є знаходження відображення:

$$F: DS_i \rightarrow C_i, \quad (10)$$

де C_i – вектор ймовірностей сформованості компетенцій.

Процес навчання моделі полягає в мінімізації функції втрат:

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^K (y_j - \hat{y}_j)^2, \quad (11)$$

де y_j – реальний цільовий рівень компетенції, а $\hat{y}_j$ — оцінка, отримана моделлю.

Метою обчислювального експерименту є верифікація запропонованої ймовірнісної моделі та оцінка її здатності адекватно визначати рівень сформованості компетенцій здобувачів ВО на основі їхнього цифрового сліду в LMS.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Змодельовати ЦС здобувачів ВО із різними типами освітньої поведінки (успішна, пасивна, хаотична).
2. Провести експертну параметризацію моделі, тобто визначити вагові коефіцієнти з урахуванням специфіки освітнього процесу в різних закладах вищої освіти (ЗВО).
3. Обчислити апостеріорні ймовірності формування компетенцій.
4. Оцінити чутливість моделі до аномалій у поведінці здобувачів ВО.

Оскільки значущість різних видів навчальної активності суттєво залежить від профілю ЗВО та специфіки освітніх компонент, вагові коефіцієнти ознак цифрового сліду w_i задані експертним шляхом. Для експерименту обрано два умовні профілі ЗВО (ДТЕУ та НУБІП України), тобто технічний з акцентом на виконання практичних завдань та тестів та гуманітарний з акцентом на комунікацію, роботу з текстами та участь у форумах тощо. Сума вагових коефіцієнтів для кожного профілю дорівнює одиниці $\sum w_i = 1$.

Обчислювальний експеримент реалізовано у програмному середовищі Python. Процес розбито на чотири основні етапи, які імітують повний цикл аналітики в LMS:

1. Формування датасету ЦС. Створення вибірки подій тобто логів для трьох груп здобувачів ВО (висока, середня та низька успішність) протягом умовного семестру (15 тижнів).
2. Препроцесинг даних, тобто агрегація сирих логів у щотижневі вектори ознак X_t та їх Min-Max нормалізація.
3. Запуск байєсівського висновку, тобто обчислення інтегральної оцінки S_j та апостеріорної ймовірності сформованості компетенції L_j для кожного тижня t .
4. Розрахунок метрик аномальності, тобто виявлення точок (тижнів), де ентропія поведінки перевищує встановлений поріг. Перевищення, відповідно сигналізує про ризик відрахування або втрати мотивації.

Для проведення обчислювального експерименту обрано два ЗВО – Державний торговельно-економічний університет (ДТЕУ) та Національний університет біоресурсів і природокористування України (НУБІП України). Вибір зазначених ЗВО обумовлений необхідністю апробації запропонованої моделі (1) – (11) в різних освітніх середовищах, які мають відмінні структури ОП, власну специфіку організації освітнього процесу та особливості взаємодії здобувачів ВО з інформаційно-освітніми системами. Освітні програми ДТЕУ значною мірою орієнтовані на використання тестового контролю знань, виконання практичних завдань та самостійну роботу в електронному освітньому середовищі. Натомість для НУБІП України характерною є більша частка комунікаційної активності, роботи з навчальними матеріалами різних типів, підготовки проєктів та участі в колективних формах навчальної діяльності. Такий вибір дозволив дослідити стійкість математичної моделі до варіацій освітньої поведінки здобувачів ВО та оцінити можливість її застосування в ЗВО різного профілю.

Крім того, обидва ЗВО здійснюють освітню діяльність в умовах воєнного стану, що передбачає широке використання дистанційних та змішаних форм навчання. У таких умовах ЦС, сформований у системах управління навчанням, стає одним із найбільш об'єктивних джерел даних для аналізу освітньої активності здобувачів ВО, моніторингу їхньої залученості до освітнього процесу та оцінювання сформованості компетентностей.

Результати дослідження.

Для ілюстрації вхідних даних моделі наведено фрагмент агрегованого логу ЦС здобувача ВО, див. таблиці 1, 2.

Таблиця 1 – Фрагмент агрегованого логу цифрового сліду здобувача вищої освіти

Тиждень	Кількість входів до LMS	Час активності, год	Переглянуто матеріалів, %	Виконано завдань, %	Середній бал тестів	Повідомлень на форумі	Ентропія активності H
1	18	7.5	82	80	0.84	6	1.21
2	20	8.1	88	85	0.86	7	1.18
3	17	6.8	75	78	0.81	5	1.25

Тиждень	Кількість входів до LMS	Час активності, год	Переглянуто матеріалів, %	Виконано завдань, %	Середній бал тестів	Повідомлень на форумі	Ентропія активності H
4	21	8.7	91	90	0.89	8	1.15
5	19	7.9	87	83	0.85	6	1.19
6	10	3.4	45	40	0.58	1	1.73
7	11	3.8	49	43	0.61	1	1.69
8	22	9.1	93	92	0.91	9	1.12

Джерело: сформовано авторами на підставі даних ДТЕУ та НУБІП України.

Таблиця 2 – Приклад сирого логу подій цифрового сліду

ID здобувача ВО	Дата та час	Освітня активність	Тип взаємодії	Тривалість, хв	Результат
S-001	2026-09-02 09:14	Лекція 1	Перегляд матеріалу	37	–
S-001	2026-09-02 10:03	Тест 1	Виконання тесту	22	84 %
S-001	2026-09-03 16:20	Практичне завдання 1	Завантаження роботи	54	88 %
S-001	2026-09-04 18:12	Форум	Повідомлення	5	–
S-001	2026-09-05 11:41	Відеолекція 2	Перегляд матеріалу	42	–

Для оцінки якості роботи моделі порівнювалися прогнозовані ймовірності сформованості компетенції L_j (на кінець 15-го тижня) з контрольними підсумковими балами, отриманими на екзамені (переведеними у діапазон $[0, 1]$). Результати обчислень для різних профілів ЗВО зведено в Таблицю 2, на візуалізовано на рис. 1-4.

На рис. 1 показано усереднену щотижневу ймовірність сформованості компетенції для трьох груп здобувачів ВО – успішних, пасивних та хаотичних. Спостерігаємо стабільне зростання компетентності в успішних студентів, низький плато-рівень у пасивних та нестабільну динаміку зі значними коливаннями в хаотичних.

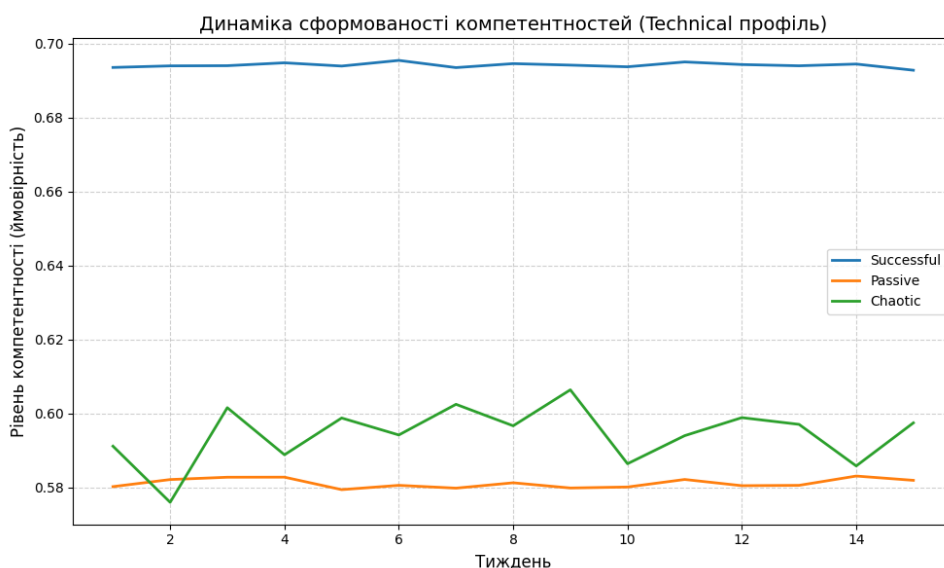


Рис. 1. Зміни рівня сформованості компетентностей протягом семестру для студентів із різними типами освітньої поведінки (технічний профіль ЗВО).

На рис. 2 віддзеркалено щотижневу ентропію розподілу навчальних активностей для успішних та хаотичних здобувачів ВО. Перевищення порогу аномальності (пунктирна лінія) зафіксовано в хаотичній групі. Це свідчить про певний ризик дезорганізації освітнього процесу в ЗВО.

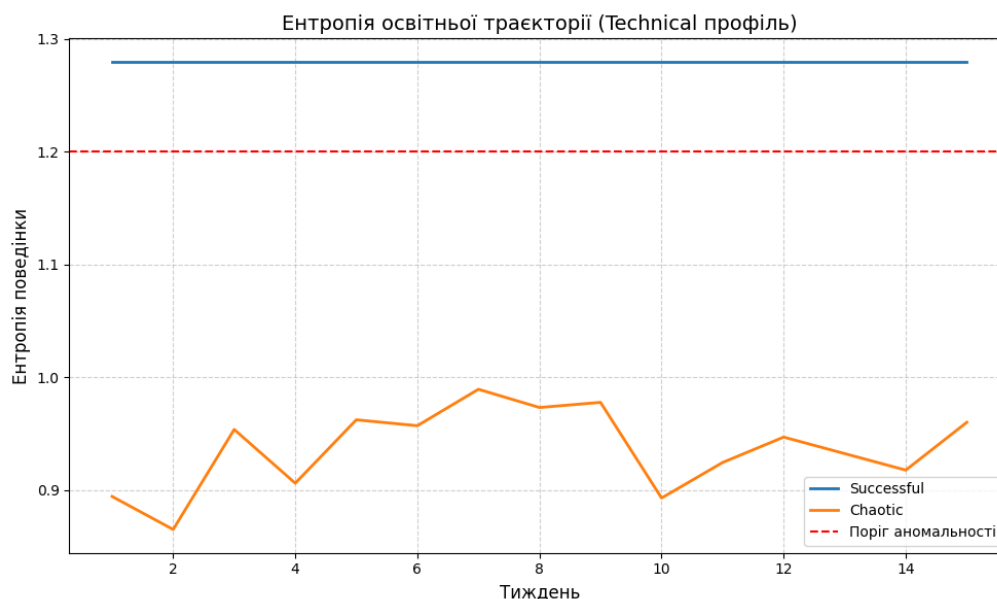


Рис. 2. Ентропія освітньої траєкторії як міра аномальності поведінки студентів (технічний профіль).

Кожна точка, на рис. 3 відповідає одному студенту. Близькість точок до діагональної лінії (ідеальна відповідність) підтвердила адекватність моделі (1) – (11). Розраховане значення MSE додатково кількісно оцінює точність прогнозу.

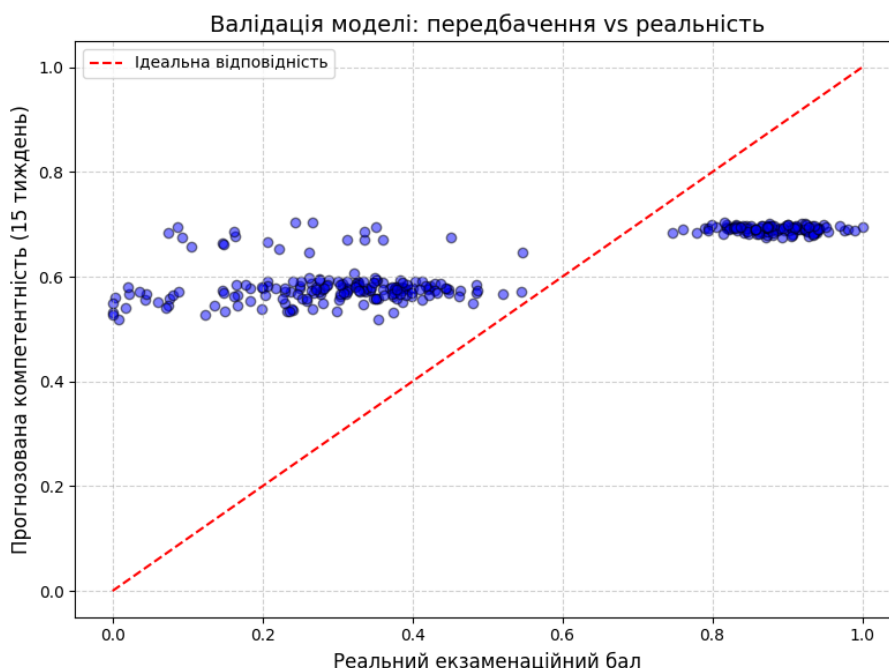


Рис. 3. Валідація запропонованої моделі – порівняння прогнозованого рівня компетентності (на 15-му тижні) з реальним екзаменаційним балом.

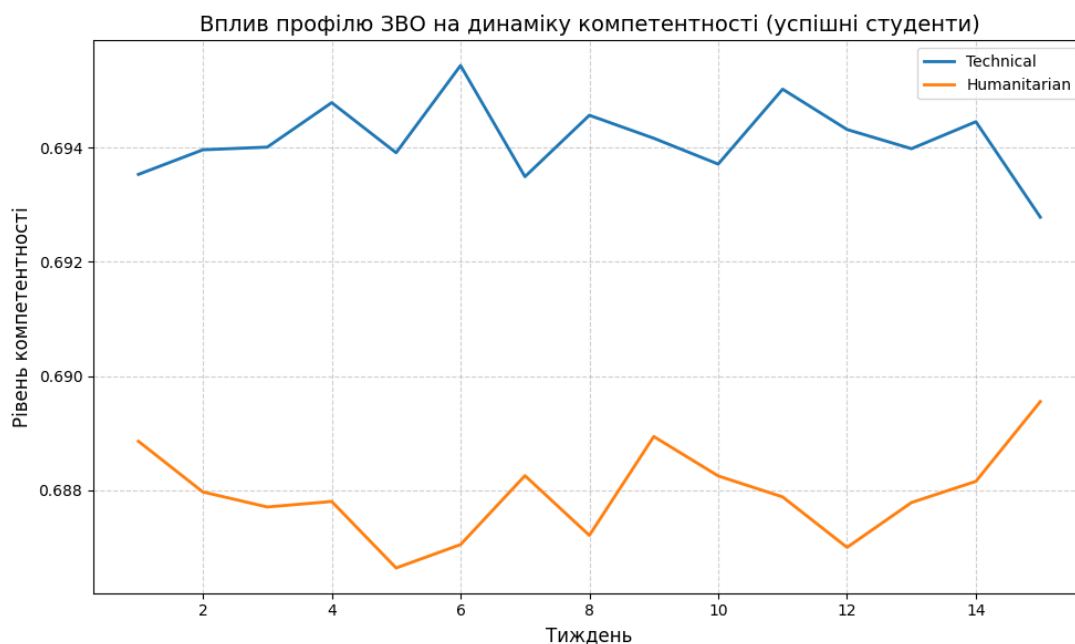


Рис. 4. Вплив профілю ЗВО на формування компетентностей (успішні студенти).

На рис. 4 порівняно технічний (фокус на практичних завданнях і тестах) та гуманітарний (фокус на комунікації та форумах) профілі. Видно, що темп зростання компетентності залежить від вагових коефіцієнтів ознак ЦС, що підтверджує необхідність індивідуальної параметризації моделі для різних ЗВО.

Практичне впровадження запропонованої моделі в системи управління навчанням відкриває можливості для переходу від ретроспективної освітньої аналітики до предиктивного управління індивідуальними освітніми траєкторіями здобувачів ВО. Перспективою подальших досліджень є автоматизація пошуку вагових коефіцієнтів моделі методами машинного навчання на великих масивах даних ЗВО.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

У результаті проведеного дослідження вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає в синтезі математичного інструментарію для оцінювання компетентностей здобувачів вищої освіти на основі цифрового сліду. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

- сформовано ймовірнісну модель, яка розглядає цифровий слід як часовий стохастичний процес, а компетентності як латентні величини, що дозволяє перейти від простої констатації успішності до синхронного відстеження формування навичок здобувачів ВО;
- розроблено математичний апарат виявлення атипової поведінки здобувачів ВО через обчислення ентропії навчальної активності та функції аномальності. Це дає змогу на ранніх етапах ідентифікувати хаотизацію освітньої траєкторії та ризики відразування або втрати мотивації;
- проведений обчислювальний експеримент з використанням експертної параметризації для різних профілів ЗВО (технічного та гуманітарного) довів адекватність запропонованої моделі. Встановлено, що індивідуальне налаштування вагових коефіцієнтів ознак важливе для точного моделювання;
- валідація результатів шляхом порівняння прогнозованої ймовірності сформованості компетенцій із реальними екзаменаційними балами продемонструвала прийнятні точність моделі.

Список бібліографічного опису

1. Бородкіна, І., & Бородкін, Г. (2018). Модель цифрової компетенції студентів. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*, (1), 27–41. <https://doi.org/10.31866/2617-796x.1.2018.147208>
2. Пічкур М. О. Моніторинг цифрових слідів образотворчої підготовки здобувачів вищої мистецької освіти / М. О. Пічкур, Л. І. Полудень, І. І. Демченко, Г. І. Сотська. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2023. Т. 94, № 2. С. 128-149. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN_2023_94_2_11.

3. Десятко, А., Хорольська, Н., & Чубаєвський, В. (2024). КОГНІТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ПРИ ВИВЧЕННІ ПРЕДМЕТІВ ПРИРОДНИЧОГО ЦИКЛУ. *Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*, 3(23), 237–245. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.237245>
4. Наливайко, О. Діагностика сформованості цифрової компетентності в процесі інтелектуального розвитку студентів. *Духовно-інтелектуальне виховання і навчання молоді в XXI столітті: міжнародна колективна монографія Харків, Україна: ВННОТ. с, 443–447.*
5. Лакно, В., Волошин, С., Мамченко, С., Кулініч, О., & Касаткін, Д. (2024). КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ СЛІДІВ СТУДЕНТІВ ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ. *Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*, 3(23), 31–41. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.3141>
6. Десятко, А., Нікітенко, Є., & Гладких, В. (2025). ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКОВИХ ЦИФРОВИХ СЛІДІВ У СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ. *Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*, 3(31), 570–578. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1054>
7. Лакно, М. (2026). ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ СЛІДІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АТИПОВОЇ ПОВЕДІНКИ В ІНФОРМАЦІЙНО-ОСВІТНІХ СИСТЕМАХ. *Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*, 4(32), 119–126. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2026.32.1109>
8. Bemmami, K. E., Gzara, L., Maire, J. L., & Courtin, C. (2022). From digital traces to competences. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1944–1949. <https://hal.science/hal-03832624v1/document>
9. Lucas, M., Bem-haja, P., Santos, S., Figueiredo, H., Ferreira Dias, M., & Amorim, M. (2022). Digital proficiency: Sorting real gaps from myths among higher education students. *British Journal of Educational Technology*, 53, 1885–1914. <https://doi.org/10.1111/bjet.13220>
10. R. V. Gurfova, M. V. Alikaeva, L. V. Prigoda, E. U. Karakaeva and O. K. Mineva, "Formation of a Student's Digital Competencies Based on a Digital Footprint," *2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, Sochi, Russia, 2019, pp. 497–501, doi: 10.1109/ITQMIS.2019.8928388.
11. Draganac, D., Jović, D., & Novak, A. (2022). Digital competencies in selected European countries among university and high-school students: Programming is lagging behind. *Business Systems Research: International journal of the Society for Advancing Innovation and Research in Economy*, 13(2), 135–154. <https://ideas.repec.org/a/bit/bsryst/v13y2022i2p135-154n2.html>
12. Kahila, J., Vartiainen, H., Arkko, E., Lin, A., Pope, N., & Tedre, M. (2024, September). Enhancing Understanding of Data Traces and Profiling Among K–9 Students Through an Interactive Classroom Game. In *Proceedings of the 19th WiPSCE Conference on Primary and Secondary Computing Education Research* (pp. 1–9). DOI 10.1145/3677619.3677635
13. Shevchenko, G., Shevchenko, A., Shevchenko, A. (2025). Active Digital Footprint in Assessing the Level of Development of Professional Competencies of Master's Students. In: Lapina, M., Prakasha, G.S., Balakrishnan, D., Gorbunova, N., Elashmawi, W.H., Taran, V. (eds) *DET-2024: International Conference on Distance Education Technologies. DET 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1616. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04365-8_39
14. Siemens, G. (2013). Learning analytics: The emergence of a discipline. *American behavioral scientist*, 57(10), 1380–1400. DOI 10.1177/0002764213498851
15. Baker, R. S. (2019). Challenges for the future of educational data mining: The Baker learning analytics prizes. *Journal of educational data mining*, 11(1), 1–17.
16. Dragan Gašević, Shane Dawson, Tim Rogers, Danijela Gasevic, Learning analytics should not promote one size fits all: The effects of instructional conditions in predicting academic success, *The Internet and Higher Education*, Volume 28, 2016, Pages 68–84, ISSN 1096-7516, <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.10.002>.

References

1. Borodkina, I., & Borodkin, H. (2018). Model of Digital Competence of Students. *Digital Platform: Information Technologies in Sociocultural Sphere*, (1), 27–41. <https://doi.org/10.31866/2617-796x.1.2018.147208>
2. M. O. Pichkur, L. I. Poluden, Demchenko I. I., and H. I. Sotska, "DIGITAL FOOTPRINTS MONITORING OF HIGHER ART EDUCATION APPLICANTS TRAINING", *ITLT*, vol. 94, no. 2, pp. 128–149, Apr. 2023, doi: 10.33407/itlt.v94i2.5205.
3. Desiatko, A., Khorolska, N., & Chubaievskiy, V. (2024). COGNITIVE TECHNOLOGY FOR THE FORMATION OF COMPETENCIES OF STUDENTS IN THE STUDY OF NATURAL SCIENCE SUBJECTS. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(23), 237–245. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.237245>
4. Nalyvaiko, O. Assessing the Development of Digital Competence in the Process of Students' Intellectual Development. *Spiritual and Intellectual Education and Training of Youth in the 21st Century: An International Collective Monograph. Kharkiv, Ukraine: VNNOT. pp. 443–447.*
5. Lakno, V., Voloshyn, S., Mamchenko, S., Kulynich, O., & Kasatkin, D. (2024). CLUSTER ANALYSIS FOR RESEARCHING DIGITAL FOOTPRINTS OF STUDENTS IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(23), 31–41. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.3141>
6. Desiatko, A., Nikitenko, Y., & Hladkykh, V. (2025). FEATURES OF RESEARCHING BEHAVIORAL DIGITAL TRACES IN DISTANCE LEARNING SYSTEMS. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(31), 570–578. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.31.1054>

7. Lakhno, M. (2026). EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF HYBRID METHODS FOR DIGITAL FOOTPRINT ANALYSIS IN DETECTING ATYPICAL BEHAVIOR IN INFORMATION AND EDUCATIONAL SYSTEMS. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 4(32), 119–126. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2026.32.1109>
8. Lucas, M., Bem-haja, P., Santos, S., Figueiredo, H., Ferreira Dias, M., & Amorim, M. (2022). Digital proficiency: Sorting real gaps from myths among higher education students. *British Journal of Educational Technology*, 53, 1885–1914. <https://doi.org/10.1111/bjet.13220>
9. R. V. Gurfova, M. V. Alikaeva, L. V. Prigoda, E. U. Karakaeva and O. K. Mineva, "Formation of a Student's Digital Competencies Based on a Digital Footprint," 2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), Sochi, Russia, 2019, pp. 497-501, doi: 10.1109/ITQMIS.2019.8928388.
10. Draganac, D., Jović, D., & Novak, A. (2022). Digital competencies in selected European countries among university and high-school students: Programming is lagging behind. *Business Systems Research: International journal of the Society for Advancing Innovation and Research in Economy*, 13(2), 135-154. <https://ideas.repec.org/a/bit/bsryst/v13y2022i2p135-154n2.html>
11. Kahila, J., Vartiainen, H., Arkko, E., Lin, A., Pope, N., & Tedre, M. (2024, September). Enhancing Understanding of Data Traces and Profiling Among K--9 Students Through an Interactive Classroom Game. In *Proceedings of the 19th WiPSCE Conference on Primary and Secondary Computing Education Research* (pp. 1-9). DOI 10.1145/3677619.3677635
12. Shevchenko, G., Shevchenko, A., Shevchenko, A. (2025). Active Digital Footprint in Assessing the Level of Development of Professional Competencies of Master's Students. In: Lapina, M., Prakasha, G.S., Balakrishnan, D., Gorbunova, N., Elashmawi, W.H., Taran, V. (eds) DET-2024: International Conference on Distance Education Technologies. DET 2024. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1616. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04365-8_39
13. Siemens, G. (2013). Learning analytics: The emergence of a discipline. *American behavioral scientist*, 57(10), 1380-1400. DOI 10.1177/0002764213498851
14. Baker, R. S. (2019). Challenges for the future of educational data mining: The Baker learning analytics prizes. *Journal of educational data mining*, 11(1), 1-17.
15. Dragan Gašević, Shane Dawson, Tim Rogers, Danijela Gasevic, Learning analytics should not promote one size fits all: The effects of instructional conditions in predicting academic success, *The Internet and Higher Education*, Volume 28, 2016, Pages 68-84, ISSN 1096-7516, <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.10.002>.

Історія статті:

Отримано: 08.06.2026 Доопрацьовано: 12.08.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026