

Гужва В.М.

кандидат економічних наук, доцент,
Київський національний економічний університет
імені Вадима Гетьмана
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0379-1480>

Huzhva Volodymyr

Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ПРОЦЕСІВ В АКАДЕМІЧНИХ УСТАНОВАХ

DIGITAL TWINS OF PROCESSES IN ACADEMIC INSTITUTIONS

В статті досліджується потенціал цифрових двійників (ЦД) в академічних установах з акцентом на їх ролі у вдосконаленні навчальних процесів, наукових досліджень та управлінні ресурсами. Розглянуто історію розвитку технології ЦД, їх класифікацію за призначенням, рівнем інтеграції та технологічною основою. Проаналізовано сучасні програмні платформи для створення ЦД, зокрема для бізнес-процесів та агентно-орієнтованого моделювання. Практичні кейси демонструють застосування ЦД для оптимізації процесів працевлаштування студентів, моделювання соціальних мереж та виробничих систем. Результати підкреслюють здатність ЦД персоналізувати навчання, підвищувати ефективність досліджень через симуляцію складних систем, оптимізувати використання ресурсів шляхом моніторингу інфраструктури. Визначено виклики впровадження, зокрема потребу в міждисциплінарних підходах та стандартизації. Перспективи розвитку включають масштабування ЦД для екосистем, інтеграцію з штучним інтелектом та автономними системами. Стаття підкреслює трансформаційний вплив технології на академічний сектор в контексті глобальної конкурентоспроможності.

Ключові слова: цифрові двійники, академічні установи, моделювання, навчальні процеси, наукові дослідження, програмні платформи, бізнес-процеси, агентно-орієнтоване моделювання.

This article explores the transformative potential of digital twins (DT) in enhancing educational processes, scientific research, and resource management within academic settings. Digital twins, which are virtual replicas of physical systems or processes, offer innovative solutions for modeling educational environments, optimizing research projects, and managing infrastructure. The study delves into the historical evolution of DT technology, from early modeling concepts in the mid-20th century to contemporary applications in various sectors, including industry, healthcare, and smart cities. The author classifies digital twins based on their purpose, level of integration, and technological foundation, highlighting their flexibility and applicability across different domains. The article emphasizes the role of DT in personalizing learning experiences, simulating complex systems, and optimizing resource usage through real-time monitoring. Practical case studies demonstrate the implementation of DT in educational processes, such as optimizing student employment services and modeling social networks. The research also examines current software platforms for creating digital twins, focusing on business process modeling and agent-based simulation tools. Platforms like Bizagi Modeler, ARIS, and NetLogo are analyzed for their capabilities in simulating and optimizing processes. The findings underscore the significance of digital twins in improving educational outcomes, facilitating collaborative research, and enhancing the efficiency of academic operations. Challenges in implementing digital twins, such as the need for interdisciplinary approaches and standardization, are discussed, along with future directions for research. The article concludes that digital twins represent a promising avenue for transforming education and research, emphasizing their potential to drive innovation and competitiveness in the academic sector.

Keywords: digital twins, academic institutions, modeling, educational processes, scientific research, resource management, technology, innovation, personalization, software platforms, business processes, agent-based modeling.

Постановка проблеми. Академічні установи стикаються з безліччю викликів, пов'язаних із забезпеченням ефективного навчання, проведенням досліджень та управлінням ресурсами. В умовах швидко змінюваного світу, де технології

постійно вдосконалюються, цифрові двійники пропонують нові можливості для покращення навчального процесу та наукової діяльності. Вони дозволяють реалізувати інноваційні підходи до моделювання навчальних середовищ, оптимізації

дослідницьких проєктів та управління інфраструктурою. Актуальність цієї теми зростає в умовах глобалізації освіти та науки, коли важливо бути конкурентоспроможними на міжнародному рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія цифрових двійників (ЦД) стає потужним інструментом для трансформації освіти, особливо в академічних установах. Останнім часом вони стали предметом досліджень багатьох закордонних і вітчизняних науковців. Так, Дж. Лей та ін. в статті [1] стверджують, що технологія цифрових двійників може покращити якість викладання, навчання та управління ресурсами у вищій освіті. П. Махешварі та Д.М. Фулвані [2] пропонують на рівні кафедр застосовувати цифрові двійники, що використовують байєсівські мережі, для підтримки процесів прийняття рішень на основі даних. М. Максимович та Н. Давидович [3] акцентують увагу на тому, що впровадження нових технологій дає змогу вищим навчальним закладам змінити свої освітні, наукові та бізнес-моделі. Цифровий двійник як одна з найперспективніших нових технологій на даний момент має здатність надавати студентам інженерних спеціальностей можливості навчання, які виходять за межі аудиторій. Сваті В. Чанд у своїй роботі [4] звертає увагу на те, що цифрові двійники надають цінну інформацію та інформацію на основі даних для підтримки прийняття рішень. Застосування цифрових двійників не обмежується конкретними галузями чи секторами. Вони мають універсальне застосування в таких сферах, як виробництво, охорона здоров'я, транспорт, розумні міста, управління енергією тощо. Академічний світ також не залишився байдужим до прогресу в цій технології, і зусилля тривають у напрямку розробки цифрових двійників для різних аспектів освіти, включаючи підтримку викладання, досліджень та адміністративних процесів. Оскільки технологія продовжує розвиватися, ймовірно, з'являтимуться нові та інноваційні програми, які трансформують різні аспекти викладання, навчання, досліджень та адміністрування в академічній сфері. У цьому дослідженні зроблена спроба об'єднати роботи, проведені в області застосування технології цифрових двійників для навчання. Існуючі дослідження були проведені з метою аналізу прогресу та виявлення перспектив наближення цифрових вчителів до вчителів-людей. У статті Кранті Аданкі та Лінди Коррін [5] йде мова про те, що концепція цифрового двійника, цифрової копії фізичного об'єкта або процесу, є відносно новою для контексту вищої освіти. Збільшення застосування технології ЦД у багатьох галузях спонукало до більш широкого вивчення їх можливостей ДТ в освіті, а також до розгляду проблем їх впровадження. В цій публікації також обговорюються майбутні напрямки і області, де необхідні додаткові дослідження для

повного вивчення потенціалу ЦД для вищої освіти. В.Ф. Мартінс та ін. [6] для ефективного впровадження цифрових двійників в освітньому контексті пропонують трирівневу програмну архітектуру, що включає рівень збору даних, ще один рівень для обробки та аналізу та останній рівень для візуалізації та взаємодії. У роботі представлено кейс для технічного навчання в компанії-постачальнику енергії. У дослідженні Н.А. Фашалі та ін. [7] запропонована модель цифрового двійника для сталого управління активами розумного університету разом із його технологічними вимогами та позитивним впливом на університетський кампус. В статті Е. Муки та Г. Марінової [8] розглядається технологія цифрових двійників як перспективне рішення для надання віртуальних представлень фізичних об'єктів і середовищ, що дозволяє здійснювати моніторинг пристроїв IoT в режимі реального часу для оптимізації різних аспектів університетського кампусу. Запропонована модель позиціонується як один з найбільш економічно вигідних методів, доступних для автоматизації, перетворюючи звичайний лекційний зал в розумний і ефективний. К. Еріксон та ін. [9] у своїй публікації підкреслюють, що технологія цифрових двійників має потенціал для впровадження цифрових лабораторій у вищу освіту, але вимагає багато-профільної експертизи та ретельного дизайну, щоб зосередитися на мотивації та навчанні студентів. У статті Дж. Девіда та ін. [10] пропонується використання цифрових двійників як інструменту для навчання студентів на системах, заснованих на виробництві, та обґрунтовується пропозиція шляхом впровадження теорій навчання в рамках педагогічного цифрового двійника. Крім того, у статті досліджується, як ситуаційна обізнаність може бути корисною в такому середовищі та її внесок у загальний досвід навчання.

Мета статті. Метою цієї статті є дослідити потенціал цифрових двійників у академічних установах, виявити їх переваги та виклики, пов'язані з їх впровадженням. Стаття також має на меті представити практичні кейси використання цифрових двійників у навчанні та наукових дослідженнях, проаналізувати їх вплив на якість освіти та досліджень, а також окреслити перспективи подальшого розвитку цієї технології в академічному середовищі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Історія цифрових двійників починається з концепції моделювання, яка була використана в інженерії та науці в середині ХХ століття. Перші спроби створення цифрових моделей були пов'язані з комп'ютерним моделюванням фізичних систем. Концепція «цифрового двійника» (англ. digital twin) була вперше формалізована Майклом Грівзом (Michael Grieves) у 2002 році під час його досліджень у сфері управління життєвим циклом

продукту [11]. Еволюцію технології цифрових двійників подано в табл. 1.

В основу створення та функціонування цифрових двійників покладено ряд ключових принципів: 1) *збір даних* – цифрові двійники використовують дані з реального світу, отримані за допомогою сенсорів, пристроїв IoT та інших джерел. Ці дані можуть включати параметри температури, тиску, швидкості та інші показники; 2) *моделювання* – на основі зібраних даних створюється віртуальна модель, яка відображає

характеристики фізичного об'єкта або процесу. Це може включати геометрію, фізичні властивості та поведінку системи; 3) *аналіз та симуляція* – цифрові двійники дозволяють проводити аналіз сценаріїв та симуляції, що допомагає прогнозувати поведінку системи в різних умовах і приймати обґрунтовані рішення; 4) *зворотний зв'язок* – взаємодія між реальним і віртуальним світом забезпечує постійний обмін даними, що дозволяє вдосконалювати моделі на основі нових даних і результатів.

Таблиця 1

Історія появи та еволюція терміну

№ п.п.	Назва етапу	Часовий період	Характеристика
1	Походження	1960–1990-ті рр.	Концепція цифрових двійників має корені в ранніх технологіях моделювання. Наприклад, NASA у 1960-х використовувала фізичні «двійники» космічних апаратів (наприклад, для місії Apollo) для діагностики та симуляцій. Це були матеріальні копії, але ідея відображення реальних систем у контрольованому середовищі стала основою [11]. У 1980–1990-х роках розвиток CAD (комп'ютерного проектування) дозволив створювати цифрові моделі об'єктів, хоча вони були статичними та не інтегрували реальні дані.
2	Народження терміну	2002 р.	Термін «цифровий двійник» (digital twin) ввів доктор Майкл Грівс у 2002 році в контексті управління життєвим циклом продукту (PLM) – було запропоновано концепцію віртуального відображення фізичного об'єкта, яке супроводжує його від створення до утилізації [12].
3	Технологічні передумови	2010-ті рр.	Стрімкий розвиток інтернету речей (IoT), хмарних обчислень та аналітики даних у 2010-х роках зробив цифрові двійники життєздатними. IoT-датчики почали передавати дані в реальному часі, а хмарні платформи забезпечили їх обробку. Це дозволило створювати динамічні моделі, що «живуть» паралельно з фізичними об'єктами [13].
4	Комерційне впровадження	2012–2016 рр.	Компанії, такі як General Electric (GE), стали піонерами промислового застосування цифрових двійників. GE інтегрувала їх у стратегію «Промислового інтернету» для моніторингу та оптимізації роботи турбін, літаків та іншого обладнання [14].
5	Еволюція функціоналу	2017 – 2020 рр.	Початкові цифрові двійники були простими 3D-моделями, але з часом вони перетворилися на комплексні системи з: а) реальним часом: синхронізація даних через IoT; б) предиктивною аналітикою: використання ШІ та машинного навчання для прогнозування поломок чи оптимізації процесів; в) інтеграцією з іншими технологіями: VR/AR для візуалізації, блокчейн для безпеки даних [15].
6	Сучасні застосування	2021 – 2024 рр.	Цифрові двійники активно використовуються в: а) промисловості: оптимізація виробництва, «розумні» фабрики; б) авіації та авто: тестування конструкцій, моніторинг стану літаків/авто; в) медицині: віртуальні моделі органів для персоналізованого лікування; г) містах: «розумні міста» для управління інфраструктурою [16].
7	Майбутні тренди	З 2025 р.	1) Масштабування: цифрові двійники цілих екосистем або планет (наприклад, кліматичні моделі). 2) Автономність: інтеграція з автономними системами (наприклад, безпілотники). 3) Етика та стандартизація: розробка норм використання даних і безпеки [17].

Джерело: складено автором на основі [11–17]

Цифрові двійники можна класифікувати за наступними критеріями:

а) *за призначенням*:

– двійники продуктів – використовуються для моделювання та оптимізації характеристик конкретних товарів;

– двійники процесів – служать для аналізу та вдосконалення бізнес-процесів або виробничих ліній;

– двійники систем – включають моделі складних систем, таких як мережі енергопостачання або транспортні системи.

б) *за рівнем інтеграції*:

– статичні двійники – моделі, які не оновлюються в реальному часі та використовуються для одноразового аналізу;

– динамічні двійники – постійно оновлюються завдяки потоковим даним і можуть адаптуватися до змін у реальному світі.

в) *за технологічною основою*:

– фізичні двійники – моделі, що повністю відтворюють фізичні властивості об'єкта;

– віртуальні двійники – використовують дані для створення абстрактних моделей, які можуть не мати фізичного еквіваленту.

Перераховані різновиди цифрових двійників демонструють їх гнучкість і універсальність, що робить їх корисними в різних галузях, включаючи академічні установи. В академічних установах цифрові двійники можуть бути застосовані для:

1) *моделювання навчальних процесів* – ЦД дозволяють академічним установам створювати віртуальні моделі навчальних процесів, що дає змогу: а) персоналізація навчання: використовуючи дані про успіхи та потреби студентів, можна створити індивідуалізовані навчальні траєкторії, адаптуючи зміст і темп навчання; б) симуляція навчальних середовищ: віртуальні моделі класних кімнат, лабораторій або навчальних курсів дозволяють проводити експерименти з різними методами викладання, оцінюючи їх ефективність; в) аналіз результатів: завдяки збору даних про участь студентів, їх успішність та взаємодію в навчальному процесі, цифрові двійники допомагають викладачам аналізувати результати навчання та вносити необхідні зміни;

2) *підтримки наукових досліджень* – ЦД відіграють важливу роль у наукових дослідженнях, забезпечуючи: а) моделювання складних систем: дослідники можуть створювати точні моделі складних фізичних, біологічних або соціальних систем, що дозволяє проводити експерименти без ризику в реальному світі; б) прогнозування результатів: використання цифрових двійників для симуляції різних сценаріїв дає змогу науковцям прогнозувати результати досліджень, що особливо корисно

в медицині та екології; в) співпраця та обмін даними: цифрові двійники можуть слугувати платформою для колективної роботи, де дослідники з різних установ можуть ділитися даними та результатами, що сприяє міждисциплінарним дослідженням.

3) *управління інфраструктурою та ресурсами* – ЦД також використовуються для ефективного управління інфраструктурою і ресурсами в академічних установах, зокрема: а) моніторинг стану об'єктів: за допомогою цифрових двійників можна в режимі реального часу відстежувати стан будівель, лабораторій та інших об'єктів інфраструктури, що дозволяє своєчасно виявляти проблеми і проводити обслуговування; б) оптимізація використання ресурсів: моделі допомагають аналізувати споживання енергії, води та інших ресурсів, що дозволяє розробити стратегії їх оптимізації та збереження; в) планування розвитку: віртуальні моделі можуть бути використані для планування нових будівель або модернізації існуючих об'єктів, оцінюючи їх вплив на навчальний процес і дослідження.

Таким чином, використання цифрових двійників в академічних установах створює нові можливості для вдосконалення навчальних процесів, підтримки наукових досліджень та управління ресурсами, що робить ці технології важливими для сучасної освіти і науки.

На сьогодні існує багато інструментів для створення цифрових двійників. До переліку таких інструментів можуть бути віднесені:

1) *програмні платформи для моделювання та симуляції бізнес-процесів*;

2) *програмні платформи для агентно-орієнтованого моделювання соціально-економічних процесів та систем*.

В табл. 2 наведено результати порівняльного аналізу поширених платформ для моделювання бізнес-процесів.

На основі даних, наведених в табл. 2, можна зробити наступні висновки стосовно ключових критеріїв вибору: 1) *для оцінки вартості процесів* – ARIS, Celonis, QPR ProcessAnalyzer; 2) *для імітації складних процесів* – Simul8, Siemens Tecnomatix; 3) *для інтеграції з BI-системами* – Appian, Microsoft Power Automate.

Ці інструменти допомагають моделювати, аналізувати та оптимізувати бізнес-процеси, що особливо важливо для цифрової трансформації підприємств та організацій.

Іншою технологією, яка може бути використана для створення цифрових двійників процесів в академічних установах, є агентно-орієнтоване моделювання. В табл. 3 на основі джерел [32–37] наведено результати порівняльного аналізу програмних платформ для агентно-орієнтованого моделювання.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз платформ для моделювання бізнес-процесів

№ п.п.	Назва програмного продукту	Стислий опис	Особливості
1	Bizagi Modeler [18]	Інструмент для створення BPMN-діаграм з підтримкою симуляції процесів	1) Моделювання часу, вартості та ресурсів; 2) Аналіз «вузьких місць» та оцінка ефективності процесів; 3) Інтеграція з Bizagi Automation для автоматизації процесів
2	ARIS [19]	Платформа для управління бізнес-процесами з фокусом на оптимізацію	1) Розрахунок вартості процесів (наприклад, метод ABC – Activity-Based Costing); 2) Симуляція сценаріїв для оцінки впливу змін на продуктивність та витрати. 3) Детальна аналітика та звіти.
3	Appian [20]	Low-code платформа для автоматизації бізнес-процесів.	1) Імітація процесів для аналізу часу, витрат і ресурсів; 2) Вбудовані інструменти для оцінки ROI (Return on Investment); 3) Можливість тестувати різні варіанти оптимізації.
4	Signavio [21]	Хмарне рішення для моделювання та аналізу процесів.	1) Симуляція варіантів процесів з оцінкою фінансових та часових показників; 2) Інтеграція з SAP-системами для аналізу реальних даних; 3) Heatmaps для візуалізації ефективності.
5	Siemens Tecnomatix Plant Simulation [22]	Спеціалізований інструмент для моделювання виробничих та логістичних процесів	1) Оптимізація витрат на матеріали, обладнання та персонал; 2) 3D-імітація для аналізу продуктивності.
6	Simul8 [23]	Програмне забезпечення для дискретного імітаційного моделювання.	1) Розрахунок вартості процесів на основі часу, ресурсів і простоїв; 2) Візуалізація потоків і аналіз ефективності в реальному часі.
7	IBM Blueworks Live [24]	Хмарний інструмент для спільної роботи над моделюванням процесів.	1) Симуляція процесів з оцінкою витрат і часу; 2) Інтеграція з AI-інструментами для прогнозування результатів.
8	Pega Platform [25]	Low-code платформа для автоматизації складних бізнес-процесів.	1) AI-підтримка для прогнозування вартості та ефективності процесів; 2) Динамічна симуляція з урахуванням змінних умов.
9	Bonita BPM [26]	Відкрита платформа для моделювання та автоматизації процесів	1) Симуляція різних сценаріїв для оцінки часу та ресурсів; 2) Можливість розширення через REST API.
10	QPR Process Analyzer [27]	Інструмент для аналізу процесів на основі даних (Process Mining).	1) Визначення вартості процесів за допомогою аналітики; 2) Порівняння ідеальних та реальних сценаріїв.
11	Celonis [28]	Лідер у сфері Process Mining	1) Аналіз вартості процесів на основі реальних даних; 2) Симуляція оптимізаційних сценаріїв з прогнозуванням економії.
12	Visual Paradigm [29]	Інструмент для моделювання процесів з підтримкою BPMN.	1) Симуляція для оцінки часу та витрат; 2) Генерація звітів у форматі SWOT-аналізу.
13	Microsoft Power Automate + Visio [30]	Комбінація інструментів для візуалізації та автоматизації	1) Імітація процесів через інтеграцію з Visio (вимагає додаткових плагінів); 2) Оцінка вартості через Power BI
14	ProcessMaker [31]	Low-code платформа для моделювання та автоматизації	1) Оцінка вартості процесів через вбудовані шаблони; 2) Тестування сценаріїв до реалізації.

Джерело: складено автором на основі [18–31]

Наведені в таблиці дані дозволяють зробити такі висновки щодо використання агентно-орієнтованих платформ для створення цифрових двійників процесів:

а) для навчання/простих моделей – NetLogo;
б) для академічних досліджень – Repast, GAMA (GIS) або SeSAM (якщо потрібен візуальний дизайн);

Таблиця 3

Агентно-орієнтовані платформи для моделювання соціально-економічних процесів та їх порівняльний аналіз

№ з/п	Назва	Мова програмування	Основне призначення	Переваги	Недоліки	Приклади застосування
1	NetLogo [32]	Власна мова (на основі Logo)	Освіта, дослідження, невеликі моделі	1) Легка у вивченні, інтуїтивний інтерфейс; 2) Суттєві візуалізаційні можливості; 3) Велика спільнота та бібліотека моделей (наприклад, SugarScape для моделювання розподілу ресурсів).	Обмежена масштабованість для складних систем	Моделі поведінки споживачів, поширення соціальних явищ
2	Repast Simphony [33]	Java, .NET	Академічні та промислові дослідження	1) Висока продуктивність і масштабованість; 2) Підтримка розподілених обчислень.	Складність налаштування, вимагає знання Java	Симуляція ринків праці, міського розвитку
3	GAMA [34]	GAML (спеціалізована мова).	Просторове моделювання (GIS-інтеграція).	1) Потужні інструменти для роботи з геодами; 2) Підтримка складних багаторівневих моделей.	Середня крива навчання	Моделювання землекористування, евакуації під час стихійних лих
4	Mesa [35]	Python	Гнучке моделювання для дослідників-програмістів	1) Інтеграція з Python-бібліотеками (наприклад, Pandas, Matplotlib); 2) Можливість створювати веб-інтерфейси.	Вимагає знання Python	Аналіз соціальної нерівності, моделі сегрегації (наприклад, модель Шелінга).
5	AnyLogic [36]	Java	Комерційне моделювання (ABM, системна динаміка, дискретні події).	1) Висока масштабованість; 2) Добре підходить для промислових завдань.	Вартість ліцензії, складність для новачків	Оптимізація ланцюгів поставок, вплив політик на економіку
6	SeSAM (Software Engineering for Simulation of Agent Systems) [37]	Візуальне моделювання (UML-діаграми), підтримка Python/Java для розширених сценаріїв.	Моделювання складних систем з акцентом на візуальний дизайн агентів та їх взаємодій.	1) Візуальний інтерфейс: Не вимагає глибоких знань програмування. 2) Модульність: Легке створення шаблонів агентів і сценаріїв поведінки; 3) Генерація коду: Можливість експортувати модель у Java/Python для подальшого розширення.	1) Обмежена гнучкість для складних алгоритмів порівняно з текстовими платформами; 2) Менша продуктивність для великомасштабних симуляцій	Моделювання соціальних мереж, організаційної динаміки, ринкових стратегій

Джерело: складено автором на основі [32–37]

в) для гнучкості та Python – Mesa;
 г) для створення цифрових моделей промислового використання – AnyLogic;
 д) для візуального проектування без глибокого програмування – SeSAM.

Практичні кейси. Наведені нижче ілюстрації демонструють використання описаних вище програмних платформ для створення цифрових двійників процесів в академічних установах. Рис. 1 ілюструє цифрову модель бізнес-процесу обробки запитів студентів до відділу працевлаштування університету з приводу пошуку варіантів працевлаштування та місць для проходження практики і стажування (з результатами оцінки

тривалості шляхом комп'ютерної симуляції). Для побудови моделі бізнес-процесу використано програмну платформу Bizagi Modeler.

На наступних рисунках наведені приклади побудови цифрових двійників процесів та їх симуляції для навчальних цілей в академічних установах з використанням платформ для агентно-орієнтованого моделювання. Так, на рис. 2 та 3 представлені за допомогою платформи NetLogo результати побудови цифрових двійників процесів для Minority Game (моделі колективної поведінки агентів в ідеалізований ситуації, де їм доводиться конкурувати за допомогою адаптації за обмежений ресурс)

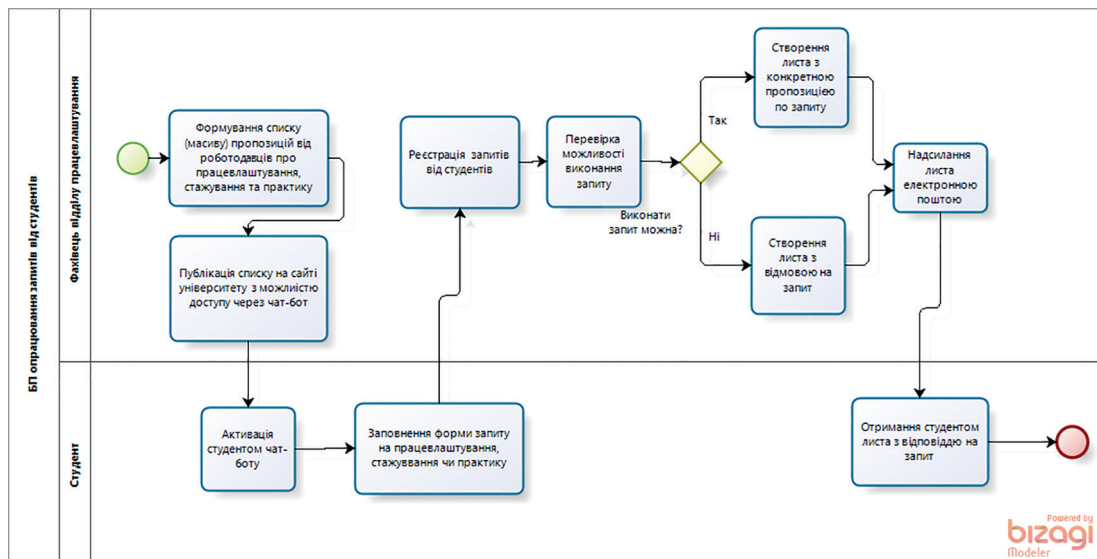


Рис. 1. Приклад цифрової моделі бізнес-процесу

Джерело: розроблено автором

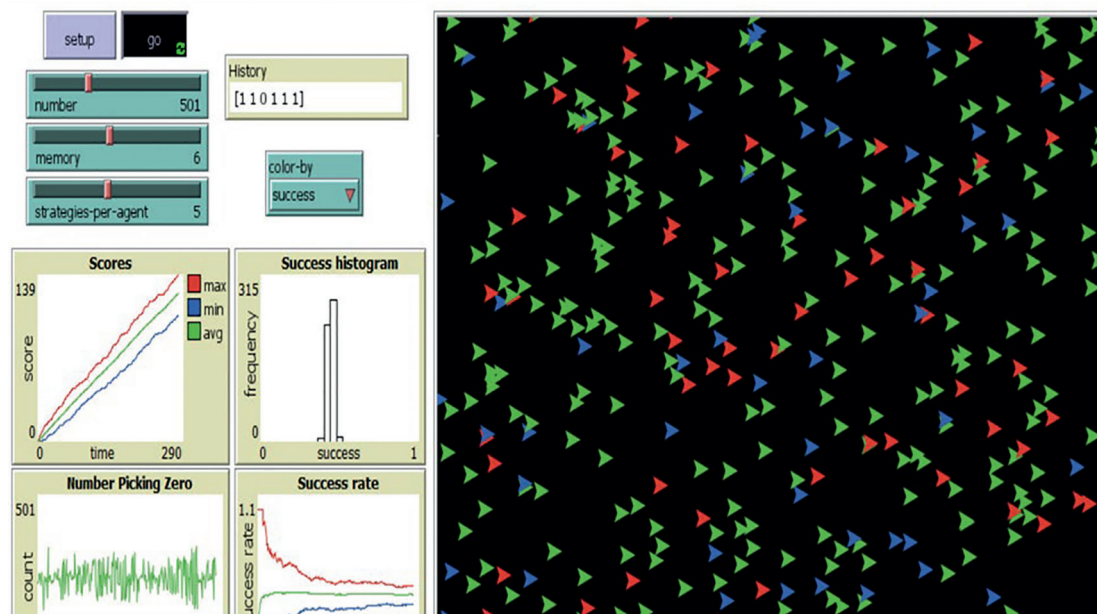


Рис. 2. Цифрова модель Minority Game

Джерело: [32]

та Team Assembly (моделі мереж співпраці, що ілюструє, як поведінка окремих людей при складанні невеликих команд для короткострокових проектів може з часом породити різноманітні великомасштабні мережеві структури), відповідно.

Цифровий двійник виробничого процесу, створеного за допомогою агентно-орієнтованої платформи SeSAM, наведений на рис. 4, а–б.

Висновки. У статті досліджено потенціал цифрових двійників (ЦД) в академічних установах.

Висновки свідчать про їх значущий вплив на навчальні процеси й наукові дослідження. ЦД сприяють персоналізації навчання, адаптуючи контент до потреб студентів, та дозволяють моделювати складні системи, прогнозуючи результати без ризику. Вони оптимізують використання ресурсів через моніторинг інфраструктури. Подальші перспективи досліджень включають вивчення нових методів впровадження ЦД, розробку міждисциплінарних підходів та аналіз їхнього впливу на якість освіти

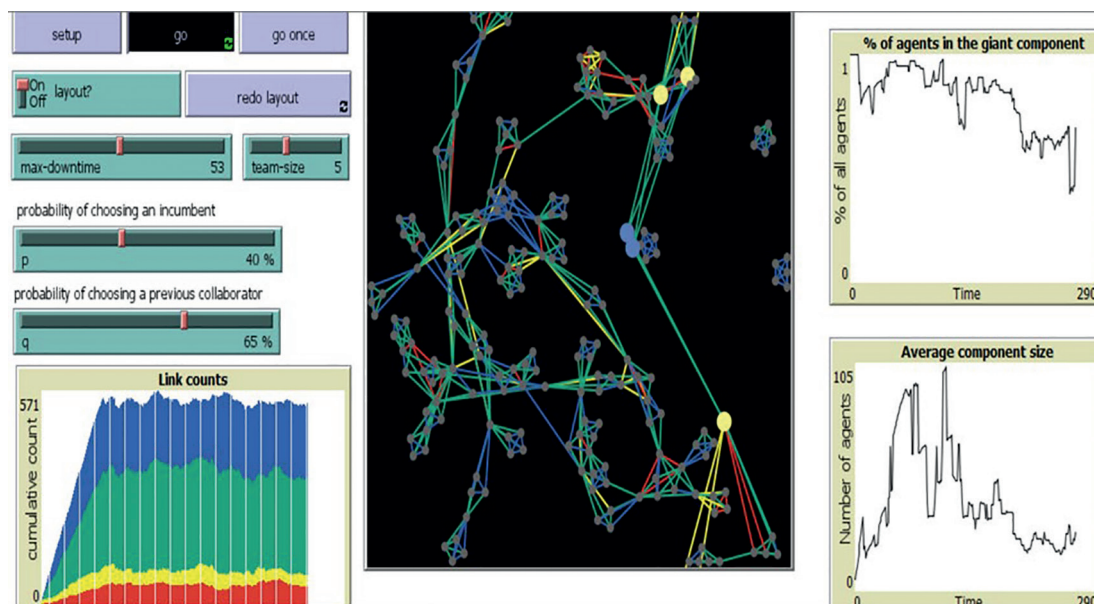


Рис. 3. Цифрова модель Team Assembly

Джерело: [32]

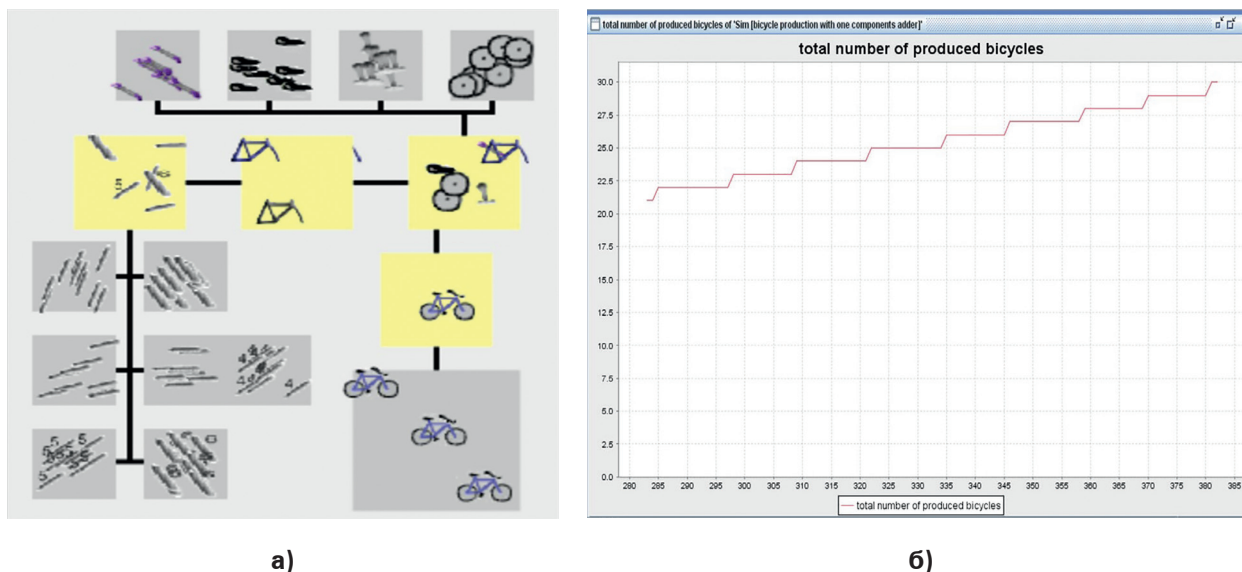


Рис. 4. Цифрова модель виробничого процесу

а) фрагмент симуляції агентно-орієнтованої моделі лінії з виробництва велосипедів

б) звіт про результати симуляції агентно-орієнтованої моделі лінії з виробництва велосипедів

Джерело: розроблено автором

Список використаних джерел:

1. Lei J., Song J.-Q., & Wang J.-Y. (2024). Digital Twins Empower Higher Education. *Journal of General Education and Humanities*, vol. 3(3), 273–286.
2. Maheshwari P., & Fulwani D.M. (2022). Digital Twin of an Enterprise – A case of the Department of an Academic Institute. PoEM Workshops. Available at: https://ceur-ws.org/Vol-3298/paper_DTE_4080.pdf
3. Maksimovic M., & Davidovic N. (2022). The role of Digital Twin technology in transforming engineering education. *Proceedings TIE 2022*. – pp. 264–270. DOI: <https://doi.org/10.46793/tie22.264m>
4. Swati V. Chande. An Exploratory view of Application of Digital Twin Technology in Education. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering* – Volume 13, No.2, March–April 2024. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2024/031322024>
5. Kranthi Addanki, Linda Corrin. Unveiling the potential of Digital Twin technology for Higher Education. ASCILITE Publications – 2023. DOI: <https://doi.org/10.14742/apubs.2023.635>
6. Martins V., Bachmann J., Cardoso A., & Silveira I. (2024). A three-tiered architectural model for Digital Twins in Education. In *Anais do VI Workshop em Modelagem e Simulacao de Sistemas Intensivos em Software*, (pp. 68–77). Porto Alegre: SBC. doi:10.5753/mssis.2024.3777
7. N. A. Fashal, G. A. Elkhayat and S. A. Elmorsy, “Review and Proposed Digital Twin Model for Sustainable Smart University Asset Management”, 2023 IEEE Afro-Mediterranean Conference on Artificial Intelligence (AMCAI), Hammamet, Tunisia, 2023, pp. 1–8. DOI: 10.1109/AMCAI59331.2023.10431490
8. E. Muka and G. Marinova, “Digital Twins to Monitor IoT Devices for Green Transformation of University Campus”, 2024 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom), Graz, Austria, 2024, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CoBCom62281.2024.10631264>
9. Eriksson, Kristina & Alsaleh, Abdikarim & Behzad Far, Shervin & Stjern, David. (2022). Applying Digital Twin Technology in Higher Education: An Automation Line Case Study. 10.3233/ATDE220165
10. David J., Lobov A., & Lanz M. (2018). Learning Experiences Involving Digital Twins. IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3681–3686. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591460>
11. Woodling C. H. (1973). Apollo experience report – Simulation of manned space flight for crew training (Technical Note TN D-7112). NASA. Available at: <https://www.nasa.gov/history/alsj/tnD7112Simulators.html>
12. Grieves M. (2016). Origins of the digital twin concept. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
13. Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., & Wang L. (2010). Modeling, simulation, information technology and processing roadmap.
14. Evans P. C., & Annunziata M. (2012). Industrial internet: Pushing the boundaries of minds and machines. Available at: <https://www.ge.com/news/sites/default/files/5901.pdf>
15. Cinar Z. M., Nuhu A. A., Zeeshan Q. & Korhan O. (2020). Digital twins for Industry 4.0: A review. In F. Calisir & O. Korhan (Eds.), *Industrial engineering in the digital disruption era (GJCIE 2019)*. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-42416-9_18
16. Yaqoob I., Salah K., Khan L. U., Jayaraman R., Al-Fuqaha A., & Omar M. (2023). Digital twins for smart cities: Benefits, enabling technologies, applications, and challenges. In 2023 IEEE Future Networks World Forum (FNWF) (pp. 1–6). Baltimore, MD, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/FNWF58287.2023.10520349>
17. Feng J., Tang H., Zhou S., Cai Y., & Zhang J. (2025). Cognitive digital twins of the natural environment: Framework and application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 139(Part B), 109587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109587>
18. Bizagi. (2025). Bizagi Modeler. Available at: <https://www.bizagi.com/en/platform/modeler>
19. Software AG. (2025). Crack the code to success with process intelligence. Available at: <https://aris.com/>
20. Appian. (2025). AI-powered process automation. Available at: <https://appian.com/products/platform/overview>
21. SAP. (2025). Business process transformation. Available at: <https://www.sap.com/products/business-transformation-management/solutions>
22. Siemens. (2025). Tecnomatix plant simulation. Available at: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/plant-simulation-software>
23. Simul8 Corporation. (2025). Simul8 decisions on desktop or in a browser. Available at: <https://simul8.com>
24. IBM. (2025). Master process management and modeling with IBM Blueworks Live. Available at: <https://www.ibm.com/products/blueworkslive>
25. Pegasystems Inc. (2025). Unleash enterprise agility with the Pega Platform. Available at: <https://pega.com/products/platform>
26. Bonitasoft. (2025). Get limitless extensibility with Bonita, the process automation platform that doesn't lock you in. Available at: <https://www.bonitasoft.com>
27. QPR Software. (2025). Unleash the power of data-driven business processes. Available at: <https://qpr.com/process-mining/qpr-processanalyzer>

- 28.Celonis. (2025). When processes work, AI works. Available at: <https://www.celonis.com>
- 29.Visual Paradigm. (2025). How to develop As-Is and To-Be business process? Available at: <https://www.visual-paradigm.com/tutorials/as-is-to-be-business-process.jsp>
- 30.Microsoft. (2025). Design flows with Microsoft Visio. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/power-automate/visio-flows>
- 31.ProcessMaker. (2025). AI-powered business process automation made easy. Available at: <https://www.processmaker.com>
- 32.Wilensky, U. (2025). Getting started with NetLogo. Available at: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo>
- 33.Repast Development Team. (2025). Repast Symphony. Available at: https://repast.github.io/repast_symphony.htm
- 34.GAMA Platform. (2025). GAMA Platform. Available at: <https://gama-platform.org>
- 35.Project Mesa Team. (2025). Mesa: Agent-based modeling in Python. Available at: <https://mesa.readthedocs.io/latest>
- 36.AnyLogic. (2025). AnyLogic simulation software. Available at: <https://www.anylogic.com>
- 37.Klugl F., Herrler R., & Fehler M. (2006). SeSAm: Implementation of agent-based simulation using visual programming. In Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS '06) (pp. 1439–1440). Association for Computing Machinery. DOI: <https://doi.org/10.1145/1160633.1160904>