

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕСОВИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 004

JEL Classification: O33, I23, C63, L86

DOI: 10.20535/2307-5651.33.2025.335922

Гужва В. М.кандидат економічних наук, доцент,
професор кафедри інформаційних систем в економіці

ORCID ID: 0000-0002-0379-1480

Київський національний економічний університет
імені Вадима Гетьмана**Huzhva Volodymyr**

Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman

МУЛЬТИАГЕНТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЦИФРОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ АКАДЕМІЧНИХ УСТАНОВ

MULTI-AGENT TECHNOLOGIES IN DIGITAL ECOSYSTEMS OF ACADEMIC INSTITUTIONS

У статті досліджено потенціал мультиагентних систем (МАС) як технологічної основи для побудови цифрових екосистем академічних установ. Проаналізовано виклики цифрової трансформації університетів: фрагментованість систем, складність процесів, індивідуалізація потреб користувачів, експоненціальне зростання обсягів даних, потреба в адаптивності та аналітиці в реальному часі. Показано, що традиційні ІТ-системи не здатні забезпечити емерджентність, автономність, масштабованість і динамічність. Обґрунтовано доцільність застосування МАС, що завдяки автономним агентам з вбудованими ШІ-модулями дозволяють інтегрувати розрізнені сервіси, адаптуватися до змін, автоматизувати рутинні процеси та забезпечувати персоналізацію освітнього й наукового середовища. Запропоновано архітектуру цифрової екосистеми з описом функцій агентів у ключових підсистемах ЗВО: освітній, науковій, адміністративній, інфраструктурній.

Ключові слова: мультиагентні системи, цифрова трансформація, цифрова екосистема, університет, штучний інтелект, адаптивне навчання, агентні технології, академічне середовище.

The article investigates the potential of multi-agent systems (MAS) as a technological foundation for building digital ecosystems in academic institutions. Contemporary universities and research institutes face significant challenges in the digital transformation process: fragmentation of information systems, increased complexity of educational, research, and administrative processes, exponential growth of structured and unstructured data, and rising expectations of stakeholders for personalized and adaptive digital services. Traditional monolithic or siloed systems are no longer capable of ensuring real-time integration, flexibility, autonomy, or emergent behavior required for modern academic environments. The paper substantiates the suitability of MAS as a key enabler of intelligent, scalable, and self-organizing digital ecosystems. Each agent in MAS operates autonomously, possesses its own goals and knowledge base, and communicates with other agents through standardized protocols. This architecture enables the dynamic adaptation of the system to new conditions, continuous learning from data, and distributed decision-making. The study presents a layered architecture for a university-wide MAS-based digital ecosystem, detailing infrastructure, data management, agent behavior, service APIs, and user interfaces. Examples of agents for tutoring, resource management, integration with legacy systems (LMS, ERP), and intelligent analytics are provided. The findings emphasize that MAS not only allow for automation of academic workflows but also support the creation of a unified, responsive, and knowledge-driven environment. In this setting, students receive personalized learning paths, researchers benefit from intelligent search and collaboration tools, and administrators gain predictive analytics for strategic decision-making. MAS-based ecosystems thus represent an evolutionary step toward the university of the future, where data, services, and users are seamlessly integrated in a living digital organism.

Keywords: multi-agent systems, digital transformation, academic digital ecosystem, university, artificial intelligence, adaptive learning, agent-based technologies, smart campus.

Постановка проблеми. Сучасні академічні установи (університети, науково-дослідні інститути) переживають глибоку цифрову трансформацію під впливом кількох факторів. По-перше, глобальна цифровізація

охоплює освіту та науку, змушуючи їх переходити у цифровий простір у всіх аспектах – від навчання й досліджень до адміністрування. По-друге, зростає складність академічних процесів: гнучкі освітні тра-

екторії, дистанційне та проєктне навчання, Big Data у дослідженнях, міжнародна співпраця та розширені адміністративні функції. Третім фактором є стрімке зростання обсягів даних – освітніх, наукових, адміністративних, що потребують ефективного збору, інтеграції та аналітики. Четвертий виклик – індивідуалізація потреб різних груп стейкхолдерів: студенти очікують персоналізованого навчання та підтримки; викладачі – інструментів планування та автоматизації; дослідники – аналітичних та колаборативних рішень; адміністрація – цілісної аналітики для стратегічних рішень.

Водночас університети часто користуються розрізненими інформаційними системами (LMS, ERP, CRIS тощо), що призводить до відсутності інтеграції, дублювання даних, складнощів обміну інформацією та зростання витрат. Додаткові проблеми – це потреба у швидкій адаптації до змін (нові курси, реформи, непередбачені ситуації) та посилення конкуренції за студентів, викладачів, фінансування.

Усі ці виклики демонструють, що традиційні підходи до цифровізації більше неефективні. Академічним установам необхідна нова парадигма – створення цілісної, інтелектуальної, динамічної та самоорганізованої цифрової екосистеми. Вона має інтегрувати сервіси, дані та користувачів, адаптуватись до змін, аналізувати дані та прогнозувати потреби. Ключовим технологічним механізмом для цього пропонуються мультиагентні системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літератури з окресленої проблематики свідчить про те, що цифрові екосистеми слід розглядати як модульні, масштабовані та сумісні середовища, адаптовані до чітких інституційних цілей. Вони покликані сприяти підвищенню ефективності, покращенню комунікації та підвищенню цифрової компетентності користувачів. У літературі висвітлюються різноманітні контексти впровадження – від академічних платформ, орієнтованих на управління, до соціотехнічних та клієнтоорієнтованих екосистем – і наголошується, що готовність системи, надійна інфраструктура та прихильність з боку керівництва є ключовими передумовами для ефективної інтеграції. Так, М.-П. Рохас та А. Чіаппе [1] зазначають, що цифрові екосистеми є набором взаємопов'язаних елементів, які забезпечують інтегрований і безперервний цифровий досвід. Тому дуже важливим є поглиблення розуміння цих екосистем та їх ключових елементів для створення таких систем. Робота Е.-Ель Хаджі та А. Азмані [2] зосереджена на моделюванні інтелектуальної цифрової екосистеми для освітньої та кар'єрної орієнтації студентів та молоді, які шукають свою першу роботу або перекваліфікацію. З цією метою авторами була використана парадигма мультиекспертної системи для агрегації різних експертиз, необхідних для якісного керівництва. Принцип мультиагентної системи був обраний для створення модульної та легко масштабованої екосистеми. Дійсно, агенти системи спілкуються один з одним, використовуючи мову FIPA-ACL, у спільному баченні, протягом усього процесу орієнтаційної допомоги для виконання таких завдань, як пропозиція секторів бізнесу, професій, навчання та навчальних шляхів. Дж. Рамос-Фільйо та ін. [3] розглянули імітаційну модель університету як ефективну екосистему в галузі освітніх знань. Була

запропонована інноваційна екосистема з точки зору потоку знань, розроблена концептуальна модель, а її імітація була реалізована в мультиагентному середовищі NetLogo. У статті С. Таранухи та М. Савельєвої [4] досліджено процес трансформації електронного інформаційно-освітнього середовища університету в клієнтоорієнтовану цифрову екосистему на основі використання технологій штучного інтелекту. Клієнтоорієнтована цифрова екосистема університету розглядається як сукупність базових і додаткових сервісів електронного інформаційно-освітнього середовища. Додаткові сервіси можуть бути реалізовані у вигляді сімейства ботів, які створюють індивідуальні завдання в рамках життєвих завдань різних груп клієнтів університету: абітурієнтів, студентів, співробітників. Як зазначають Дж.С. Арена та ін. [5], академічна цифрова екосистема визначається як взаємодія та інтеграція всіх факторів, що беруть участь у парадигмі функціонування закладу вищої освіти. Розглядаючи кінцевого користувача як основного бенефіціара та враховуючи велику кількість користувачів, які мають доступ до мобільних пристроїв, автори запропонували дослідницький проєкт, який, ймовірно, визначить бізнес-процеси, що будуть підтримуватися технологіями, спрямованими на оптимізацію часу та ресурсів. Передбачається, що хід реалізації проєкту повинен буде включати в себе запропоновану архітектуру і модель інтеграції, а також технічні деталі, необхідні для інтеграції більш ніж восьми платформ, розроблених на різних мовах та на різних операційних системах.

Формулювання цілей статті. Метою статті є обґрунтування доцільності використання мультиагентних систем як технологічної основи цифрових екосистем академічних установ та розробка концептуальної архітектури такої екосистеми з урахуванням потреб освітнього, наукового та адміністративного середовища.

Виклад основного матеріалу. Термін «екосистема» в інноваційному та цифровому контексті запозичено з біології, де його увів британський еколог Артур Тенслі у 1935 році [6]. Однак у цифровому контексті термін “digital ecosystem” почав активно використовуватися лише на початку 2000-х років у працях, пов'язаних із цифровими інфраструктурами, бізнесом і мережецентричними моделями. Ф. Нахіра, П. Діні та А. Ніколаї – це саме ті дослідники, які стали основоположниками концепції Digital Ecosystems у європейській політиці цифрового розвитку [7]. Також доцільно згадати і Джеймса Ф. Мура, який вперше представив концепцію “business ecosystem” як спільноти організацій (постачальників, дистриб'юторів, споживачів, конкурентів), що еволюціонують разом і створюють нові продукти та послуги [8]. Отже, поняття «цифрова екосистема» не має єдиного автора, а є результатом еволюції міждисциплінарного підходу, який поєднує ідеї біології, інформаційних технологій та економіки.

З точки зору сьогодення поняття «цифрова екосистема» слід розуміти як комплексну систему взаємопов'язаних цифрових технологій, платформ, сервісів, даних і користувачів, що взаємодіють між собою для досягнення спільних цілей. Це середовище функціонує за принципами екосистемної моделі: кожен елемент (користувач, сервіс, технологія) взаємодіє з іншими, створюючи цінність, забезпечуючи

обмін інформацією та підтримуючи розвиток системи в цілому.

В загальному випадку цифрову екосистему можна розглядати у таких контекстах: а) бізнес (Business Digital Ecosystems) – взаємодія компаній через платформи (наприклад, Amazon, Google); б) освіта (Digital Ecosystems in Education) – інтеграція LMS, даних, хмарних сервісів у ЗВО та в) урядування (Digital Government Ecosystems) – цифрові послуги, реєстри, хмарна інфраструктура.

Що ж стосується цифрової екосистеми академічної установи, то її слід розуміти як динамічну, самовідновлювану мережу взаємозалежних компонентів, що функціонує як єдиний організм для досягнення стратегічних цілей університету. На відміну від простих інформаційних систем, вона володіє властивостями живої системи.

До ключових компонентів екосистеми відносяться:

- 1) користувачі (учасники) – приклади в академічних установах: студенти, викладачі, науковці, адміністрація, аспіранти, партнери, абітурієнти, випускники;
- 2) цифрові сервіси – приклади в академічних установах: LMS (Moodle, Canvas), наукові портали, ERP-системи, електронні деканати, бібліотечні каталоги, чат-боти, системи відеоконференцій, платформи колаборації;
- 3) дані – приклади в академічних установах: навчальні записи, наукові публікації, фінансові звіти, дані про обладнання, електронні портфоліо, метрика досліджень, зворотній зв'язок та 4) технології – приклади в академічних установах: хмарні сховища, API, IoT (розумні аудиторії), AI/ML-інструменти, блокчейн (для атестатів), системи аналітики.

Основні відмінності між традиційними інформаційними системами та цифровими екосистемами наведені в табл. 1.

До ключових принципів функціонування цифрових екосистем в академічному середовищі слід віднести:

- 1) взаємозалежність (наприклад, дані з LMS автоматично оновлюють електронні залікові книжки; система моніторингу лабораторного обладнання пов'язана з календарем дослідників тощо);
- 2) самоорганізацію (наприклад, агент аналізує навантаження серверів і динамічно розподіляє потужності під час сесії);
- 3) емерджентність (наприклад, система генерує нові знання: прогнозує наукові тренди на основі публікацій, аналізує запити студентів для розробки нових курсів);
- та 4) еволюцію (наприклад, постійне вдосконалення: чат-бот навчається на питаннях студентів; алгоритми рекомендацій оновлюються на основі зворотного зв'язку).

Функціями екосистеми в університеті можуть бути:

- а) оптимізація процесів (автоматизація розкладу, розподілу аудиторій, аналітики успішності);
- б) персон-

алізація досвіду (студент отримує індивідуальний навчальний план; дослідник – рекомендації щодо грантів); в) синергія знань (інтеграція даних з LMS, наукових баз і адмінсистем для стратегічних рішень) та г) створення інноваційного середовища (платформи для крос-дисциплінарних проєктів, віртуальні лабораторії, інструменти колаборації).

Аргументами на користь вибору екосистемного підходу у порівнянні з платформенним до цифрової трансформації академічних установ може бути наступне: платформенний підхід базується на технічній основі (наприклад, LMS чи ERP), в той час як екосистема – це «живий організм», де користувачі, сервіси та дані коєволюціонують, і має власну «метаболію» (обмін даними → знання → рішення) та здатний до «самозцілення» (наприклад, автоматичне перемикавання на резервні сервери).

Підсумовуючи вище сказане, можна стверджувати, що цифрова екосистема академічної установи – це цифровий двійник університету, що трансформує розрізнені сервіси, дані та користувачів у єдиний інтелектуальний організм. Її мета – не автоматизація окремих задач, а створення середовища для синергії навчання, науки та управління, де кожен учасник отримує персоналізовану підтримку для досягнення спільних цілей. Це фундамент університету майбутнього, де технології стають «нервовою системою», а не лише інструментом.

Спроби створити цифрову екосистему на базі традиційних технологій зазнають невдачі через фундаментальну несумісність між статичними архітектурами й динамічними вимогами академічного середовища. Розглянемо чотири ключові вимоги та проблеми їх реалізації:

1. *Інтелектуальність (Intelligence)*. Потрібна, тому що: а) величезні обсяги даних вимагають передбачувальної аналітики (наприклад, прогнозування відтоку студентів, виявлення наукових трендів); б) персоналізація сервісів неможлива без ML-алгоритмів (адаптивні навчальні траєкторії, рекомендаційні системи). В цьому контексті до проблем традиційних систем слід віднести жорсткі правила та відсутність машинного навчання призводять до примітивних рішень (наприклад, розклад складається без врахування реального навантаження викладачів) та дані залишаються неосвоєним ресурсом через відсутність інструментів аналітики.

2. *Адаптивність (Adaptability)*. Потрібна, тому що: а) академічне середовище динамічно змінюється – нові курси, зміни у законодавстві, непередбачені події (наприклад, перехід на дистант); б) потреби користувачів еволюціонують (наприклад, вимоги до цифрових навичок викладачів). В таких випадках при викорис-

Таблиця 1

Відмінності між традиційними системами та цифровими екосистемами

№ з.п.	Критерій	Традиційні системи	Цифрова екосистема
1	Архітектура	Централізована, монолітна	Децентралізована, модульна (мікросервіси)
2	Взаємодія	Жорсткі зв'язки, обмежений обмін даними	Автономні компоненти взаємодіють через API
3	Адаптивність	Повільна реакція на зміни	Самоорганізація, динамічне масштабування
4	Інтеграція	«Силосні» рішення без єдиного інтерфейсу	Єдиний цифровий простір ("single window")

Джерело: складено автором

танні традиційних систем необхідна зміна конфігурації, що вимагає ручного втручання розробників (написати код, протестувати, запустити) та по суті системи стають застарілими до моменту оновлення.

3. *Автономність (Autonomy)*. Потрібна тому, що: а) централізоване управління тисячами процесів неефективне (наприклад, моніторинг усіх лабораторних приладів чи аудиторій) та б) необхідна швидка реакція на події (наприклад, автоматичне резервування обладнання при поломці). Проблема традиційних систем є те, що має місце залежність від адміністраторів/викладачів для виконання рутинних задач, викладачі витрачають в середньому 30% часу на адміністративну рутину та IT-відділи перевантажені запитами на налаштування систем.

4. *Взаємодія (Interaction & Interoperability)*. Потрібна тому, що: а) сервіси мають обмінюватися даними без участі людини (наприклад, система розкладу → календар студента → LMS → система моніторингу аудиторій) та б) вирішення складних завдань вимагає кооперації компонентів (наприклад, планування дослідження: пошук літератури + бронювання лабораторії + розрахунок бюджету). Проблема традиційних систем є наявність так званого «силосного ефекту» – дані замкнуті в окремих системах (ERP, LMS, наукові бази) та відсутність єдиних стандартів для комунікації (наприклад, різні API, формати даних).

Без цих чотирьох властивостей цифрова екосистема залишається мережею розрізнених інструментів, яка:

- не економить ресурси, а створює нові проблеми;
- не персоналізує сервіси, а нав'язує стандартизовані рішення;
- не трансформує університет, а лише автоматизує окремі процеси.

Саме тому виникає потреба в мультиагентних системах (MAC). MAC є сукупністю автономних програмних одиниць (агентів), які: а) мають власні цілі, ресурси та моделі поведінки; б) взаємодіють через стандартизовані протоколи та в) функціонують у спільному середовищі для досягнення глобальних задач, недоступних окремому агенту [9]. По суті MAC є єдиною технологією, що одночасно забезпечує: а) інтелект

через ML-моделі в агентах; б) адаптивність через динамічну зміну поведінки; в) автономність через децентралізоване управління та г) взаємодію через FIPA-протоколи переговорів.

MAC є оптимальним технологічним підґрунтям для цифрових академічних екосистем – така позиція ґрунтується на фундаментальній відповідності архітектури мультиагентних систем (MAC) вимогам «живої» цифрової екосистеми, а саме:

- 1) *Відповідність принципам екосистеми* (табл. 2).
- 2) *Ключові переваги MAC для академічного середовища*. До їх переліку слід віднести:
 - а) Подолання «силосного ефекту»:
 - Механізм: агенти-інтегратори (наприклад, Adapter Agents) з'єднують гетерогенні системи (LMS, ERP, наукові бази) через єдиний API;
 - Приклад: дані про публікації дослідника автоматично передаються з CRIS-системи до цифрового портфоліо в LMS.
 - б) Гнучкість та масштабованість:
 - Механізм: додавання нових агентів не вимагає зміни архітектури (наприклад, агент для роботи з IoT-датчиками в «розумних» аудиторіях).
 - Приклад: під час пандемії система швидко інтегрує агент моніторингу санстандартів.
 - в) Інтелект на всіх рівнях:
 - Механізм: кожен агент використовує спеціалізовані техніки ШІ:
 - Агент-планувальник – оптимізує розклад за критеріями (навантаження, енергоефективність).
 - Агент-аналітик – прогнозує успішність студентів на основі NLP-обробки зворотного зв'язку.
 - г) Відмовостійкість:
 - Механізм: вийти з ладу може окремий агент, але не вся система. Автоматичне перерозподілення задач (наприклад, якщо агент бронювання аудиторій «впаде», його функції тимчасово бере Coordinator Agent).
- 3) *Порівняння MAC з альтернативами* (табл. 3):
- 4) *Критичний аргумент: MAC – не утопія, а еволюційний крок*, оскільки:
 - існує можливість поступового впровадження – старт з пілотних агентів (наприклад, для автоматизації

Таблиця 2

Властивості екосистем та їх реалізація за допомогою MAC

№ з.п.	Властивість екосистеми	Як реалізує MAC
1	Децентралізація	Агенти автономні, не залежать від єдиного центру управління
2	Самоорганізація	Агенти координуються через переговори та кооперацію (наприклад, протокол Contract Net)
3	Емерджентність	Глобальна поведінка виникає з локальних взаємодій (наприклад, оптимізація розкладу)
4	Адаптивність	Агенти навчаються на даних (ML) та адаптують стратегії (наприклад, агент-тьютор).

Джерело: складено автором

Таблиця 3

Переваги мультиагентної технології

Технологія	Недоліки для екосистем	Чому MAC краще?
Монолітна архітектура	Неможливість швидкої адаптації, висока складність змін	Модульність, легке оновлення агентів
Мікросервіси	Відсутність «розумної» взаємодії, обмежена автономність	Агенти володіють ШІ та цілями, здатні до складних переговорів
Централізований ШІ	«Тісне горло» при обробці даних, ризик катастрофічних збоїв	Децентралізація, розподілене прийняття рішень

Джерело: складено автором

розкладу або чат-бот підтримки);

– можна використовувати фреймворки – інструменти типу JADE (Java Agent DEvelopment) або SPADE (Python) значно спрощують розробку;

– можна отримати економічний ефект – скорочення витрат на інтеграцію систем та ручну обробку даних покриває інвестиції в MAC за 2–3 роки.

Таким чином, мультиагентні системи – це не просто «одна з технологій», а єдиний підхід, що відтворює ключові принципи природних екосистем: автономність одиниць, інтелектуальну взаємодію, динамічну еволюцію. У контексті академічних установ MAC надають:

а) технічну можливість: побудувати масштабовану, інтелектуальну інфраструктуру;

б) економічну доцільність: зменшення операційних витрат через автоматизацію;

в) стратегічну перевагу: створення середовища інновацій, де дані перетворюються на дії без участі людини.

Практичний кейс. Архітектура цифрової екосистеми на базі MAC може бути побудована як сукупність шарів, що забезпечує модульність, масштабованість та безпеку (рис. 1). В табл. 4 описується призначення кожного шару з прикладами для академічного середовища.

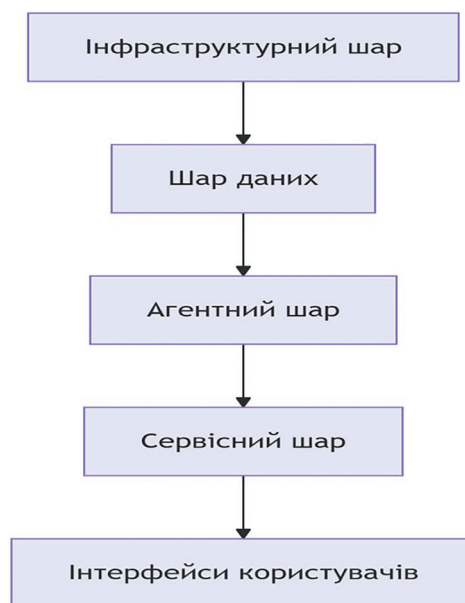


Рис. 1. Архітектури цифрової екосистеми на базі MAC

Джерело: розроблено автором

Таблиця 4

Опис архітектурних шарів цифрової екосистеми університету

Роль	Структура (Елементи)	Призначення	Приклад використання в ЗВО
1) Інфраструктурний шар (Infrastructure Layer)			
«Фізичне тіло» екосистеми	Хмарні сервери	Базова потужність для обчислень	AWS/Azure для розгортання агентів
	Мережа IoT	Підключення «розумних» пристроїв	Датчики в аудиторіях (наявність, CO ₂)
	Edge-пристрої	Локальна обробка даних для швидкої реакції	Raspberry Pi для моніторингу обладнання лабораторій
	Безпека	Firewall, VPN, системи шифрування	Захист наукових даних від витоку
2) Шар даних (Data Layer)			
«Кровообіг» екосистеми – централізоване сховище та управління даними	Структуровані	SQL-бази (PostgreSQL)	Дані студентів, розклад, фінанси
	Напівструктуровані	NoSQL (MongoDB)	Логи LMS, JSON-дані з IoT-датчиків
	Неструктуровані	Data Lakes (PowerBI)	Відеолекції, наукові статті, зворотній зв'язок
	Онтології	Графові бази (Neo4j)	Мережа понять: «Курс → Викладач → Література → Лабораторія»
3) Агентний шар (Agent Layer)			
«Мозок» системи. Автономні агенти взаємодіють для вирішення задач.	User Agents	Представляють інтереси користувачів	Агент студента: аналізує навчальне навантаження, шукає ресурси
	Service Agents	Виконують спеціалізовані сервіси	Агент-тьютор: генерує персоналізовані рекомендації
	Coordination Agents	Керують взаємодією агентів	Агент-диспетчер: вирішує конфлікти бронювань аудиторій
	Adapter Agents	Інтегрують зовнішні системи (ERP, LMS)	Агент-LMS: синхронізує оцінки з електронним деканатом
	Monitor Agents	Аналізують продуктивність системи	Агент безпеки: виявляє кібератаки в реальному часі
4) Сервісний шар (Service Layer)			
«М'язи» системи – API для доступу до функцій агентів	Освітні сервіси	`/education/timetable`	Студент переглядає розклад через мобільний додаток
	Наукові сервіси	`/research/equipment/status`	Дослідник перевіряє доступність спектрометра
	Адміністративні сервіси	`/admin/finance/report`	Декан генерує звіт про витрати за 5 хвилин
	Сервіси спільноти	`/community/events`	Студентський клуб публікує подію, яка з'являється в усіх календарях

Закінчення таблиці 4

5) Шар інтерфейсів користувачів (User Interface Layer)			
1	2	3	4
«Обличчя» екосистеми – персоналізований доступ для різних стейкхолдерів	Веб-портал	React/Angular + REST API	Студент → Навчальна панель; Викладач → Аналітика успішності
	Мобільний додаток	Flutter/React Native	Сповіщення про зміни розкладу, доступ до LMS у дорозі
	Голосові асистенти	NLP (Dialogflow, Rasa)	Наприклад, «Алісо, які мої сьогоднішні заняття»
	Інтерфейси AR/VR	Unity/Unreal Engine + WebXR	Віртуальні лабораторії для хімії, 3D-екскурсії кампусом для абітурієнтів
	Адмін-панелі	Dash/Tableau	Ректорат отримує предиктивну аналітику фінансів/відтоку студентів

Джерело: складено автором

Перевагами запропонованої шарової архітектури для університету можуть бути наступні:

1) **Масштабованість**: Додати новий сенсор? Підключити його до шару даних. Запустити нового агента? Інтегрувати в агентний шар;

2) **Безпека**: Кожен шар має власні захисти (наприклад, шифрування даних на 2-му шарі, аутентифікація на 5-му);

3) **Гнучкість**: Заміна технологій в одному шарі (наприклад, перехід з Vue на React у UI) не впливає на інші;

4) **Ефективність**: Агенти працюють з даними в реальному часі завдяки чіткій організації потоків.

Важливо зазначити, що така архітектура – «не універсальна «магія», а каркас, що може адаптуватися під потреби конкретного ЗВО: великий технічний університет може розгорнути власну хмару (шар 1), тоді як малий коледж використає публічні сервіси (AWS).

Нижче наведено приклади можливого застосування MAC в складі цифрової екосистеми університету.

1) **Інтеграція існуючих складових цифрової екосистеми через агентів-адаптерів**. Агенти-адаптери є «перехресними перекладачами» між MAC-екосистемою та успадкованими системами університету (наприклад, з LMS- чи ERP-системою) (рис. 2–3).

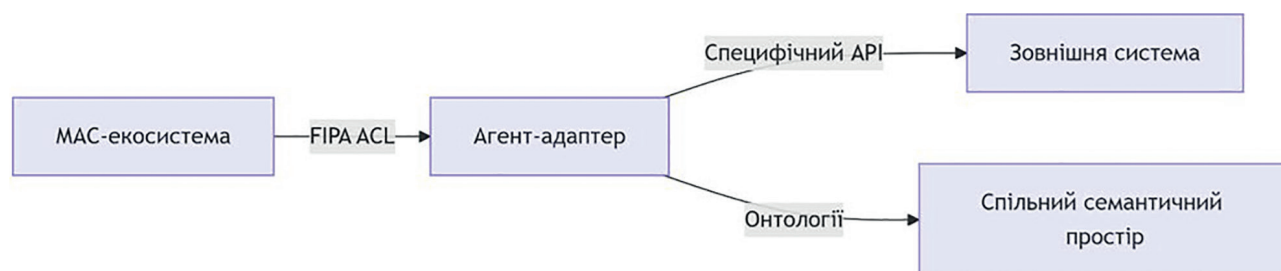


Рис. 2. Архітектура агента-адаптера

Джерело: розроблено автором

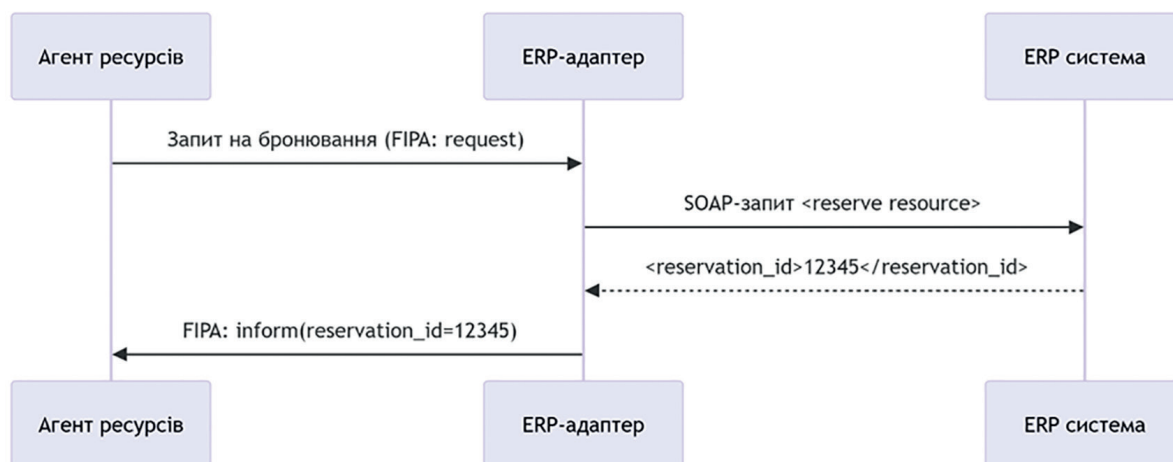


Рис. 3. Схема інтеграції з ERP

Джерело: розроблено автором

2) *Персоналізоване та адаптивне навчання.* Для вирішення таких завдань може бути застосований агент-тьютор (рис. 4).

3) *Пошук інформації, літератури та колабораторів.* Для цього може бути використаний пошуковий агент, схема роботи якого наведена на рис. 5.

4) *Інтелектуальне управління ресурсами.* Система моніторингу та управління ресурсами в реальному часі може бути реалізована за допомогою агента ресурсів (рис. 6).

Висновки. Мультиагентні системи демонструють високу ефективність як технологічна основа для створення цифрових екосистем в академічних установах. На відміну від традиційних ІТ-систем, МАС забезпечують автономність, адаптивність, інтеграцію та інтелектуальну взаємодію між компонентами освітнього, наукового та адміністративного середовища.

Запропонована архітектура цифрової екосистеми дозволяє гнучко поєднувати сервіси, дані та користувачів у єдине інформаційне середовище, що реагує на зміни в реальному часі. Використання агентів для тьюторства, моніторингу, інтеграції та управління ресурсами підтверджує практичну доцільність МАС для трансформації університетів у динамічні та персоналізовані цифрові простори.



Рис. 4. Архітектура агента-тьютора

Джерело: розроблено автором

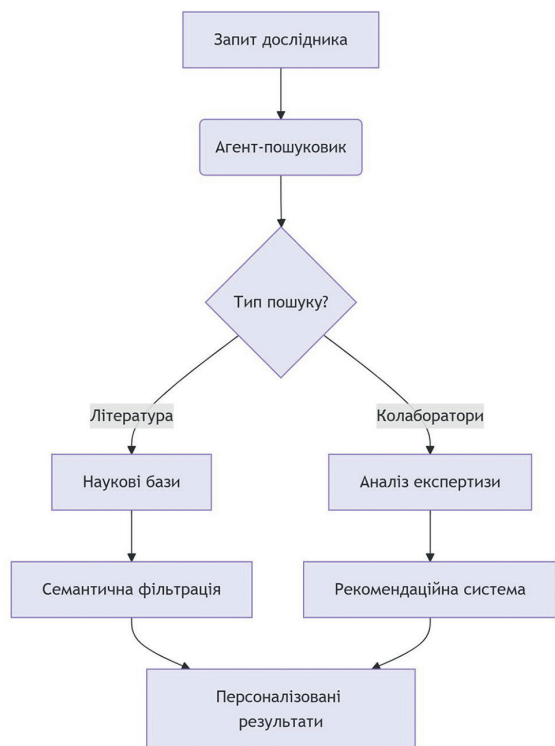


Рис. 5. Схема роботи наукового асистента – пошукового агента

Джерело: розроблено автором

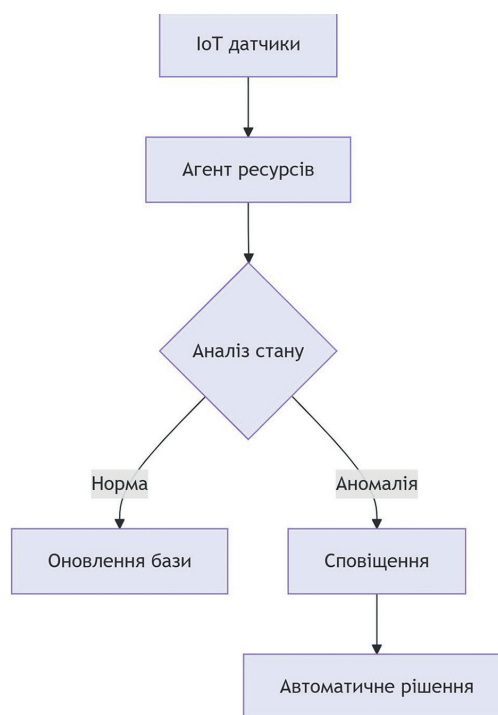


Рис. 6. Система моніторингу та управління ресурсами з використанням агенту ресурсів

Джерело: розроблено автором

Література:

1. Rojas M. P., Chiappe A. Artificial Intelligence and Digital Ecosystems in Education. *A Review. Tech Know Learn*, 2024, № 29, P. 2153–2170. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10758-024-09732-7>
2. Essaid El Haji, A. Azmani. Proposal of a Digital Ecosystem Based on Big Data and Artificial Intelligence to Support Educational and Vocational Guidance. *I.J. Modern Education and Computer Science*, 2020, № 4, P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2020.04.01>

3. J. Ramos-Filho, C. Lima, R. Costa, P. Figueiras, J. Sarraipa and R. Jardim-onçalves. Multi-agent based simulation of universities as an innovation ecosystem based on knowledge flows, *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Madeira, Portugal, 2017, P. 1480–1488. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280057>
4. Taranukh S., & Savelyeva, M. Transformation of the electronic information and educational environment of the university into a customer-oriented digital ecosystem. *Problems of Modern Education (Problemy Sovremennogo Obrazovaniya)*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31862/2218-8711-2024-2-228-237>
5. Arenas J. S., Pedraza, J. M., & Alarcón C. A. (2014). Ecosistema Digital académico: Hacia una comunidad digital soportada en TIC para las instituciones de educación superior. *I+D Revista de Investigaciones*, № 4(2), P. 6–14.
6. Tansley A. G.. The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *Ecology*, 1935. № 16(3), P. 284–307. DOI: <https://doi.org/10.2307/1930070>
7. F. Nachira P. Dini and A. Nicolai. A Network of Digital Business Ecosystems for Europe: Roots, Processes and Perspectives, 2011. URL: <http://www.digital-ecosystems.org/book/DBE-2007.pdf>
8. Moore James F. Predators and Prey: A New Ecology of Competition. *Harvard Business Review*, 1993, № 71(3), P. 75–86.
9. Гужва В. М. Мультиагентні системи: Навч. посібник. Київ : КНЕУ, 2014. –466с.

References:

1. Rojas M. P., Chiappe A. (2024). Artificial Intelligence and Digital Ecosystems In Education. *A Review. Tech Know Learn*, № 29, P. 2153–2170. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10758-024-09732-7>
2. Essaid El Haji, A. Azmani (2020). Proposal of a Digital Ecosystem Based on Big Data and Artificial Intelligence to Support Educational and Vocational Guidance. *I.J. Modern Education and Computer Science*, № 4, P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2020.04.01>
3. J. Ramos-Filho, C. Lima, R. Costa, P. Figueiras, J. Sarraipa and R. Jardim-onçalves. (2017) Multi-agent based simulation of universities as an innovation ecosystem based on knowledge flows, *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Madeira, Portugal, P. 1480–1488. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280057>
4. Taranukha S. & Savelyeva M. (2024). Transformation of the electronic information and educational environment of the university into a customer-oriented digital ecosystem. *Problems of Modern Education (Problemy Sovremennogo Obrazovaniya)*. DOI: <https://doi.org/10.31862/2218-8711-2024-2-228-237>
5. Arenas J. S., Pedraza J. M. & Alarcón C. A. (2014). Ecosistema Digital académico: Hacia una comunidad digital soportada en TIC para las instituciones de educación superior. *I+D Revista de Investigaciones*, № 4(2), P. 6–14.
6. Tansley, A. G. (1935). The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *Ecology*, № 16(3), P. 284–307. DOI: <https://doi.org/10.2307/1930070>
7. F. Nachira, P. Dini and A. Nicolai, “A Network of Digital Business Ecosystems for Europe: Roots, Processes and Perspectives,” 2011. Available at: <http://www.digital-ecosystems.org/book/DBE-2007.pdf>
8. Moore James F. (1993). Predators and Prey: A New Ecology of Competition. *Harvard Business Review*, № 71(3), P. 75–86.
9. Huzhva V. M. (2014). *Multiagentni systemy: navch. posibnyk* [Multi-Agent Systems: Textbook]. Kyiv: KNEU, 466 p.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025