

АТАМАНИЮК ОЛЕКСІЙ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0002-9038-9691>

e-mail: atamaniuk@pzks.fpm.kpi.ua

СУЛЕМА ЄВГЕНІЯ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0001-7871-9806>

e-mail: sulema@pzks.fpm.kpi.ua

МУЛЬТИАГЕНТНИЙ ТА ОНТОЛОГІЧНИЙ ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

У статті розглядаються мультиагентний та онтологічний підходи до проєктування цифрових двійників складних систем. Метою роботи є розроблення критеріїв вибору підходу для моделювання складної системи для подальшої реалізації цифрового двійника на основі порівняльного аналізу. У результаті дослідження запропоновано перелік ключових характеристик складної системи для обрання найбільш доцільного підходу для проєктування цифрового двійника.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, цифровий двійник, складна система, мультиагентна система, онтологія, проєктування цифрових двійників.

OLEKSI ATAMANIUK, YEVGENIYA SULEMA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

MULTI-AGENT AND ONTOLOGICAL APPROACHES FOR DESIGNING DIGITAL TWINS OF COMPLEX SYSTEMS

This paper presents a comparative analysis of multi-agent and ontological approaches for designing digital twins of complex systems. As digital twins increasingly serve as critical components in cyber-physical environments, selecting the appropriate modeling approach becomes essential for ensuring system adaptability, semantic consistency, and real-time responsiveness.

The research includes the complex system classification by the coupling level between the components, high-coupled and low-coupled systems. It highlights the distinctive characteristics of each approach and type, with multi-agent systems offering autonomy and behavioral flexibility for the highly coupled systems, while ontological models provide formalized knowledge representation and logical inference capabilities for low-coupled systems. The study identifies key challenges that arise from the structural and functional differences between these paradigms, particularly when applied to dynamic systems requiring both interpretability and reactivity. A hybrid design methodology is proposed to leverage the strengths of both approaches, enabling digital twins to operate in real-time environments while preserving semantic clarity and consistency.

The results demonstrate that combining decentralized behavior with a structured knowledge layer offers a scalable and semantically robust foundation for digital twin development. This research contributes to the development of more intelligent, modular, and interoperable digital twin architectures suited for complex and evolving systems. Also, the next steps of the improvement for both design approach were proposed.

Keywords: software engineering, digital twin, complex system, multi-agent system, ontology, digital twin design.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій цифрові двійники (Digital Twins, DT) набувають все більшого значення як для виробничих підприємств, так і для побутового життя. Технологія цифрових двійників стала ключовим інструментом у забезпеченні ефективного управління складними об'єктами та процесами. Цифровий двійник являє собою цифрове відображення певного фізичного двійника – фізичного об'єкта або системи – шляхом програмної реалізації моделей цього фізичного двійника [1]. Залежно від рівня цифрового двійника, кіберфізична система може постійно оновлюватися на основі реальних даних, що дозволяє здійснювати моделювання, проводити аналіз і оптимізацію на всіх етапах життєвого циклу об'єкта. Попри всю потужність технології та велику кількість переваг існує ряд складнощів, пов'язаних із моделюванням та подальшою реалізацією цифрових двійників для комплексних систем. У сучасні системи – фізичні чи віртуальні, дедалі частіше впроваджуються нові програмні засоби та пристрої, що ускладнює процес моделювання та проєктування відповідних цифрових двійників.

Аналіз досліджень та публікацій

Створення цифрових двійників можливе як на основі отриманих даних про систему, що моделюється, так й на основі знань про реальну (фізичну) репрезентацію системи. Аналіз цих основних підходів до створення цифрових двійників [2] показує, що жоден з них не має явних переваг над іншим, а найкращий результат досягається при їх комбінації. Проте варто зауважити, що підхід на основі даних вимагає збору великої кількості інформації за допомогою сенсорів на існуючих об'єктах [3]. У випадку із складними системами, тобто такими, що мають велику кількість взаємопов'язаних компонентів, проєктування цифрового двійника краще починати із збору знань про поведінку та структуру системи [4]. Такий підхід дозволить доцільніше спроектувати архітектуру програмної системи, у тому числі і цифрового двійника, оскільки включає детальний аналіз та дослідження ключових особливостей для вибору найбільш доцільної моделі.

Одними з найпопулярніших підходів для проектування складних систем є мультиагентний та онтологічний.

У роботах [5-6] розглядається використання мультиагентних систем як інструменту для моделювання автономної поведінки компонентів. Таке застосування незалежних агентів є доцільним для кіберфізичних систем із високим ступенем розподіленості. Ключовим питанням при проектуванні мультиагентних систем є розроблення механізмів комунікації(взаємодії), адже саме вони дозволяють ефективно імітувати як індивідуальну, так і колективну поведінку складних систем. Одними з найпопулярніших сфер застосування мультиагентного підходу при проектуванні є логістичні, енергетичні та транспортні системи.

Водночас, у роботах [7-9] розглядається використання онтологій, тобто застосування формалізованого опису знань. Дослідження показують, що OWL-онтології забезпечують семантичну сумісність між компонентами цифрового двійника, тобто можливість будувати ієрархії на всіх рівнях, а також вони дозволяють підтримувати генерацію логічних висновків та перевіряти логічну цілісність. Особливо ефективним є застосування онтологічного підходу у сферах, де добре досліджені міжкомпонентні зв'язки та створені верифіковані бази знань. До таких систем належать технічні та медичні.

Таким чином, кожен із підходів має певні переваги та недоліки, проте відсутність чітко описаних критеріїв для вибору онтологічного чи мультиагентного підходу при проектуванні цифрового двійника складних систем затримує процес розроблення відповідного програмного забезпечення.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є порівняльний аналіз онтологічного та мультиагентного підходів до проектування цифрового двійника складної системи для визначення критеріїв підбору найбільш доцільного підходу для вирішення задачі проектування конкретної програмної системи за технологією цифрових двійників.

Виклад основного матеріалу

Складні системи є одними з найбільш різноманітних. У рамках цього дослідження розглядаються складні системи на основі зв'язку між їхніми компонентами: сильно (тісно) пов'язані та слабо пов'язані [10-11].

У тісно пов'язаній складній системі дані або стан одного компонента безпосередньо впливають на дані чи стан іншого. Такий зв'язок характерний для систем, де взаємодія та зв'язки між елементами є критичною складовою для забезпечення функціонування. Наприклад, у роботі механізму двигуна внутрішнього згоряння робота циліндрів і клапанів жорстко синхронізована. Стан одного компонента, наприклад, положення поршня, безпосередньо визначає, коли має спрацювати інший компонент – клапан. Подібний зв'язок також зустрічається у системах управління потоками в енергомережах, де зміна навантаження в одному сегменті миттєво впливає на параметри роботи інших сегментів. Відповідно характерними ознаками таких систем є високий рівень координації та синхронізації, що дозволяє досягати оптимальної продуктивності в інтегрованих процесах. Проте така структура одночасно створює проблеми, пов'язані зі складністю проектування та обробки даних, оскільки потрібно враховувати комплексні зв'язки між компонентами.

Слабко пов'язана складна система, навпаки, складається з компонентів із мінімальними залежностями. Взаємодія у такій системі відбувається через чітко визначені інтерфейси, що робить їх більш стійкими до помилок та масштабованими. Яскравий приклад такої системи – мережа Інтернет, де незалежні мережі взаємодіють за допомогою стандартних протоколів, як-от TCP/IP, забезпечуючи обмін даними без централізованого контролю. Інший приклад – сучасні логістичні/виробничі ланцюги, де різні вузли (виробники, дистриб'ютори, роздрібні продавці) взаємодіють асинхронно, адаптуючись до змін у попиту чи виробництві. Проте варто врахувати, що дані одного компонента частково впливають на інші, або ж вплив здійснюється опосередковано. Наприклад, у розподілених обчислювальних системах вузли часто працюють незалежно один від одного, обмінюючись інформацією через стандартизовані протоколи тільки тоді, коли це необхідно. У транспортних системах громадський транспорт може працювати автономно, взаємодіючи лише у певних точках, як-от вузли пересадок. Такий підхід забезпечує гнучкість і стійкість системи. Якщо один компонент виходить з ладу, його вплив на решту системи мінімізується. Проте слабка взаємодія може створювати проблеми з координацією і знижувати ефективність роботи системи в умовах, що вимагають високого рівня інтеграції.

Розглянемо докладніше особливості застосування мультиагентного та онтологічного підходів до проектування цифрових двійників тісно та слабо пов'язаних складних систем.

Характерним прикладом онтологічного підходу до проектування є багаторівнева онтологічна модель [1], представлена на рис. 1.

Ця модель є концептуальним інструментом, що дозволяє описати складні системи через їхні компоненти та взаємозв'язки. Основна ідея цієї моделі полягає в тому, щоб представити систему як композицію його складових частин, де кожен компонент характеризується різними мультимодальними параметрами, такими як візуальні характеристики, поведінкові ознаки, часові зміни тощо. Складові компоненти розміщуються на різних рівнях деталізації, що дає змогу краще відобразити їхні особливості та явно зазначити ієрархію у системі. Відповідно розрізняють два рівні моделі: макрорівень та мікрорівень.

Макрорівень багаторівневої онтологічної моделі описує систему як набір компонентів та їх взаємозв'язків, що включає різні об'єкти, процеси та явища. Цей рівень реалізується у вигляді графової структури, де вузли позначають сутності, а зв'язки між ними показують їх взаємозалежність. Такі моделі можуть бути реалізовані через графові бази даних, наприклад, Neo4j чи Amazon Neptune, що дають змогу

зберігати та управляти взаємозв'язками між компонентами системи. Мікрорівень, в свою чергу, містить детальні дані про кожен компонент, представлені різними модальностями. Для зберігання мультимодальних даних, таких як аудіо, відео чи зображення, може використовуватись будь-яка мультимодальна багатовимірна модель, а деталізація об'єкта(компонента системи) залежить від кількості модальностей у даних. Для деяких характеристик, таких як геометрична структура чи міцність, потрібна висока деталізація, тоді як для інших, наприклад, швидкості обертання, деталізація може бути менш значущою. Ця модель є легко масштабованою: кожен об'єкт на макрорівні може включати декілька структурних компонентів. У цьому випадку формується багаторівнева система з додатковими рівнями, що дозволяє забезпечити гнучкість у побудові моделей.

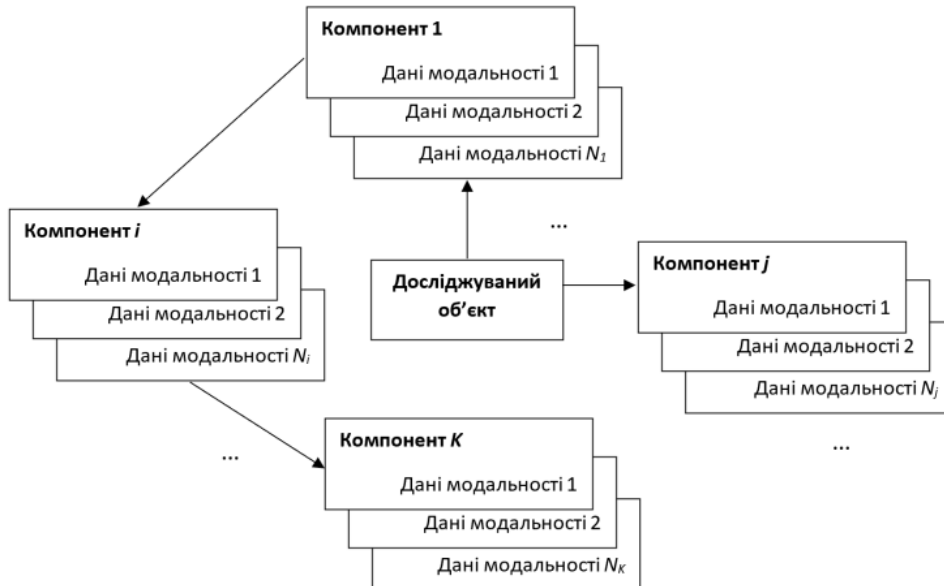


Рис. 1. Багаторівнева онтологічна модель досліджуваного об'єкта [1]

Багаторівнева онтологічна модель також є корисною в інформаційно-пошукових системах, оскільки дозволяє ефективно шукати об'єкти за характеристиками. Наприклад, за допомогою онтологічної моделі виробничого цеху можна знаходити всі верстати з двигунами певного розміру чи на певному паливі. Також моделі такого типу можуть бути побудовані як сховище зовнішніх індексів, що дозволяє шукати дані, зберігаючи їх у різних джерелах, таких як сховища даних мікрорівня, які можуть мати відмінну структури чи тип. Основне призначення багаторівневої онтологічної моделі полягає в описі структури об'єкта та детальному відображенні окремих компонентів цифрового двійника. Модель забезпечує семантичний опис та зв'язок між компонентами, що робить її ефективним інструментом для цифрових двійників і аналізу даних, але також варто враховувати її складність при високій деталізації. Саме тому модель є високоєфективною для систем із сильно пов'язаними компонентами, але не доцільною для застосування при слабкій зв'язаності.

Мультиагентна модель – це модель складної системи, що ґрунтується на використанні автономних програмних компонентів (агентів), які можуть взаємодіяти між собою і з середовищем (рис. 2). Кожен агент у такій моделі діє незалежно, має власні цілі, стратегії поведінки та може адаптуватися до змін у середовищі [12-17].

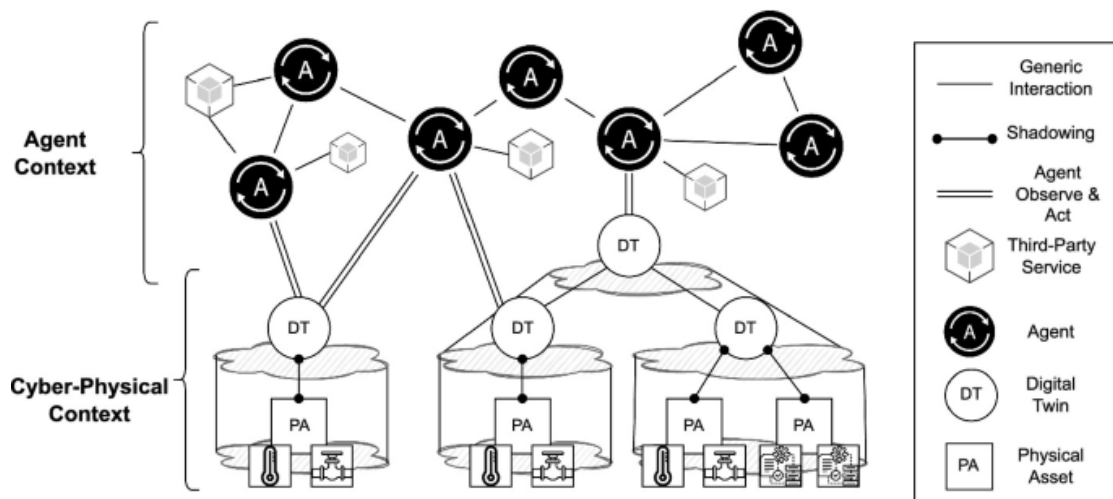


Рис. 2. Приклад мультиагентної моделі обчислень [12]

Агент – це базовий компонент системи, який самостійно приймає рішення, обмінюється інформацією з іншими агентами або зовнішнім середовищем та адаптує поведінку залежно від контексту. Така структура забезпечує високу стійкість і гнучкість, адже навіть у разі збоїв окремих агентів система може продовжувати функціонувати [12-14]. Крім того, взаємодія між агентами дозволяє координувати їхні дії для досягнення загальних цілей [15-16]. Також мультиагентні моделі відзначаються природною паралельністю, оскільки агенти працюють одночасно, виконуючи завдання незалежно один від одного [16]. Завдяки цьому мультиагентні системи є масштабованими та легко адаптуються до нових умов [17].

Мультиагентна модель цифрового двійника є одним із найбільш перспективних підходів для проектування складних фізичних і кіберфізичних систем у цифровому середовищі. Розділення задач між агентами значно спрощує роботу з цифровим двійником. Наприклад, у промислових системах окремі агенти можуть відповідати за різні елементи обладнання або процеси [12]. Завдяки модульності, модель легко адаптується до зміни вимог або додавання нових функціональних блоків, що дозволяє масштабувати систему без втрати продуктивності [13]. Попри свої значні переваги мультиагентна модель має свої недоліки. Нестача єдиних стандартів для розробки цифрових двійників з використанням моделі створює труднощі в інтеграції різних агентів [13, 17]. У свою чергу робота з великими обсягами даних для комплексних агентів вимагає значних обчислювальних потужностей [12]. Варто також згадати, що захист даних від кібератак та забезпечення конфіденційності є складним питанням для мультиагентної архітектури [14-15].

Розглянемо доцільність застосування мультиагентної моделі для комплексних систем із сильно та слабо пов'язаними компонентами. Сильно пов'язані компоненти вимагають високого рівня узгодженості даних і точності моделювання, особливо у реальному часі. Водночас така залежність ускладнює масштабування системи: додавання або зміна одного агента вимагає переробки залежностей між іншими. Крім того, збій в одному агенті може викликати «ефект доміно», впливаючи на всю систему. Це накладає додаткові вимоги до відмовостійкості й синхронізації даних між агентами. Слабо пов'язані системи легше масштабуються і мають високу гнучкість. Додавання нових агентів або зміна існуючих майже не впливає на загальну архітектуру. Крім того, автономність компонентів підвищує стійкість системи до збоїв.

Дослідивши детальніше кожен із підходів до проектування цифрових двійників складних систем, порівняємо їх за ключовими критеріями. Для аналізу пропонуються наступні критерії, які охоплюють поведінкові, логічні, структурні та інженерні характеристики моделей:

- автономність – опис здатності системи моделювати самостійність об'єктів, їхню реакцію на зміну середовища та ухвалення рішень без централізованого управління;
- семантичність – оцінка здатності моделі формально представляти знання про предметну галузь, проводити логічне виведення та виявляти неявні залежності;
- структура знань – описує спосіб організації, масштабування та повторного використання знань у системі;
- робота у реальному часі – оцінка здатності реагувати та адаптуватися до змін у фізичному середовищі з мінімальними затримками.

Результати порівняння за вказаними критеріями наведено у табл.1.

Таблиця 1

Порівняння мультиагентного та онтологічного підходів

Критерій	Підхід	
	Мультиагентний	Онтологічний
Автономність	Висока	Обмежена
Семантичність	Обмежена	Висока
Структура знань	Динамічна	Формалізована, ієрархічна
Робота у реальному часі	Висока відповідність	Потребує інтеграцій

Мультиагентні моделі створюються спеціально для моделювання децентралізованої поведінки об'єктів. Кожен агент ухвалює рішення на основі локальних даних, що є ідеальним для сценаріїв, де цифровий двійник імітує окремі дії елементів системи, та забезпечує високу автономність. Онтології в класичному вигляді не містять механізмів автономної поведінки, оскільки описують системи детально на кожному рівні. Завдяки такій деталізації та побудові на формальній логіці першого порядку, онтологічний підхід дає можливість досягти високого рівня семантичності. Така репрезентація знань дозволяє використовувати логічне виведення, дедуктивні правила та запити для перевірки цілісності знань, що є необхідним у критичних системах (наприклад, у медицині). Якщо розглядати структуру організації даних про компоненти системи, то онтологічний підхід забезпечує чітко визначену ієрархію класів, властивостей і зв'язків, що дозволяє ефективно організовувати великі обсяги знань. Натомість при мультиагентному підході структура знань реалізується часто імперативно та різниться між агентами, що ускладнює стандартизацію. У контексті обробки даних у реальному часі мультиагентні моделі демонструють перевагу завдяки прямій інтеграції з механізмами отримання даних, що забезпечує мінімальну затримку у реакції на зміни середовища. Натомість онтологічні моделі, для підтримки актуального стану знань, потребують повторних генерацій логічних висновків, що може призводити до затримок в оновленні моделі та втрати актуальності контексту в умовах

частих змін у складній системі.

Використовуючи отримані результати, розробники цифрового двійника складної системи можуть обрати підхід, відповідно до характеристик (критеріїв), які їм потрібно задовольнити. Якщо складна система має високий рівень залежності між компонентами найбільш доцільно буде обрати онтологічний підхід. Якщо ж система навпаки має більш незалежні компоненти, то краще годиться мультиагентний підхід. Доволі часто складні системи можуть мати різні ступені пов'язаності між компонентами на певному рівні, тому рекомендується комбінувати підходи, створюючи гібридні моделі. Такий підхід дозволить забезпечити спроектувати цифровий двійник детальніше та спростить подальше розроблення. Попри це, варто пам'ятати, що важливо правильно будувати комунікацію між агентами у складній системі та визначати механізми узгоджень дій між ними. Для онтологічного підходу варто брати до уваги складнощі при роботі у реальному часі із швидко оновлюваними даними та підбирати відповідну базову онтологію.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У цій статті проведено порівняльний аналіз онтологічного та мультиагентного підходів до проєктування цифрових двійників складних систем на основі наступних критеріїв: автономність, семантичність, структура знань, та робота у реальному часі.

Встановлено, що мультиагентний підхід є ефективним для динамічного управління поведінкою системи в режимі реального часу, тоді як онтологічний – для структуризації знань і логічного контролю. Відповідно до рівня пов'язаності компонентів у складній системі описано, що онтологічний підхід є більш доцільним для тісно пов'язаних, а мультиагентний – для слабо пов'язаних. Залежно від різноманіття зв'язків у складній системі, оптимальним варіантом є поєднання обох підходів у гібридних архітектурах.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розроблення методів роботи з комбінованими моделями, створення базових онтологій, що дозволять ефективно працювати із швидко оновлюваними даними. Також доцільно приділити увагу аналізу методів комунікації та синхронізації дій у мультиагентній моделі цифрового двійника складної системи.

Література

1. Сулема Є.С., Методи, моделі та засоби обробки мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf
2. Adamenko D., Kunnen S., Pluhnau R., Loibl A., Nagarajah A. Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 91. – P. 27–32. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.146>.
3. Dihan M. S., Akash A. I., Tasneem Z., Das P., Das S. K., Islam M. R., Islam M. M., Badal F. R., Ali M. F., Ahamed M. H., Abhi S. H., Sarker S. K., Hasan M. M. Digital Twin: Data Exploration, Architecture, Implementation and Future // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, № 5. – P. e26503. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503>.
4. Segovia M., Garcia-Alfaro J. Design, Modeling and Implementation of Digital Twins // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 14. – Article № 5396. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145396>.
5. Derigent W., Thomas A., Trentesaux D. Modelling Digital Twins as a recursive Multi-Agent Architecture // *IFAC-PapersOnLine*. – 2021. – Vol. 54, № 1. – P. 880–885. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.104>.
6. Pretel E., Navarro E., López-Jaquero V., Moya A., González P. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2022. – Vol. 13259. – P. 524–533. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06527-9_52.
7. Huang Y., Dhouib S., Medinacelli L. P., Malenfant J. Semantic Interoperability of Digital Twins: Ontology-Based Capability Checking in AAS Modeling Framework // *Proceedings of the 2023 IEEE 6th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. – 2023. – P. 1–8. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPS58381.2023.10128003>.
8. Karabulut E., Pileggi S. F., Groth P., Degeler V. Ontologies in Digital Twins: A Systematic Literature Review // *Future Generation Computer Systems*. – 2024. – Vol. 151. – P. 1–17. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013>.
9. Felicetti A., Niccolucci F. Artificial Intelligence and Ontologies for the Management of Heritage Digital Twins Data // *Data*. – 2025. – Vol. 10, № 1. – Article № 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/data10010001>.
10. Sulema Y., Dychka I., Sulema O. Multimodal Data Representation Models for Virtual, Remote, and Mixed Laboratories Development // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – Springer International Publishing, 2018. – P. 559–569. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95678-7_62.
11. Boyko N. Tools for Implementing the Models and Algorithms for Processing Multimodal Data // *Computer Science and Information Technology*. – 2023. – Vol. 11, № 1. – P. 1–10. – Horizon Research Publishing Co., Ltd. – DOI: <https://doi.org/10.13189/csit.2023.110101>.
12. Mariani S., Picone M., Ricci A. About Digital Twins, Agents, and Multiagent Systems: A Cross-Fertilisation Journey // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer International Publishing, 2022. – P. 114–129.

– DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20179-0_8.

13. Kalyani Y., Collier R. The Role of Multi-Agents in Digital Twin Implementation: Short Survey // *ACM Computing Surveys*. – 2024. – Vol. 57, № 3. – P. 1–15. – Association for Computing Machinery (ACM). – DOI: <https://doi.org/10.1145/3697350>.

14. Zhang K., Cao J., Zhang Y. Adaptive Digital Twin and Multiagent Deep Reinforcement Learning for Vehicular Edge Computing and Networks // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2022. – Vol. 18, № 2. – P. 1405–1413. – Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2021.3088407>.

15. Nie Q., Tang D., Zhu H., Sun H. A multi-agent and internet of things framework of digital twin for optimized manufacturing control // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2021. – Vol. 35, № 10–11. – P. 1205–1226. – Informa UK Limited. – DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192x.2021.2004619>.

16. Zheng X., Psarommatis F., Petrali P., Turrin C., Lu J., Kiritsis D. A Quality-Oriented Digital Twin Modelling Method for Manufacturing Processes Based on A Multi-Agent Architecture // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 51. – P. 309–315. – Elsevier BV. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.044>.

17. Clemen T., Ahmady-Moghaddam N., Lenfers U. A., Ocker F., Osterholz D., Ströbele J., Glake D. Multi-Agent Systems and Digital Twins for Smarter Cities // *Proceedings of the 2021 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. – 2021. – P. 45–55. – ACM. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3437959.3459254>.

References

1. Sulema Ye.S. Metody, modeli ta zasoby obrobky multimodal'nykh danykh tsyfrovyykh dvijnykh doslidzhuvanykh ob'iektiv [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf
2. Adamenko D., Kunnen S., Pluhau R., Loibl A., Nagarajah A. Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 91. – P. 27–32. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.146>.
3. Dihan M. S., Akash A. I., Tasneem Z., Das P., Das S. K., Islam M. R., Islam M. M., Badal F. R., Ali M. F., Ahamed M. H., Abhi S. H., Sarker S. K., Hasan M. M. Digital Twin: Data Exploration, Architecture, Implementation and Future // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, № 5. – P. e26503. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503>.
4. Segovia M., Garcia-Alfaro J. Design, Modeling and Implementation of Digital Twins // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 14. – Article № 5396. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145396>.
5. Derigent W., Thomas A., Trentesaux D. Modelling Digital Twins as a recursive Multi-Agent Architecture // *IFAC-PapersOnLine*. – 2021. – Vol. 54, № 1. – P. 880–885. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.104>.
6. Pretel E., Navarro E., López-Jaquero V., Moya A., González P. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2022. – Vol. 13259. – P. 524–533. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06527-9_52.
7. Huang Y., Dhoub S., Medinacelli L. P., Malenfant J. Semantic Interoperability of Digital Twins: Ontology-Based Capability Checking in AAS Modeling Framework // *Proceedings of the 2023 IEEE 6th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. – 2023. – P. 1–8. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPS58381.2023.10128003>.
8. Karabulut E., Pileggi S. F., Groth P., Degeler V. Ontologies in Digital Twins: A Systematic Literature Review // *Future Generation Computer Systems*. – 2024. – Vol. 151. – P. 1–17. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013>.
9. Felicetti A., Niccolucci F. Artificial Intelligence and Ontologies for the Management of Heritage Digital Twins Data // *Data*. – 2025. – Vol. 10, № 1. – Article № 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/data10010001>.
10. Sulema Y., Dychka I., Sulema O. Multimodal Data Representation Models for Virtual, Remote, and Mixed Laboratories Development // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – Springer International Publishing, 2018. – P. 559–569. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95678-7_62.
11. Boyko N. Tools for Implementing the Models and Algorithms for Processing Multimodal Data // *Computer Science and Information Technology*. – 2023. – Vol. 11, № 1. – P. 1–10. – Horizon Research Publishing Co., Ltd. – DOI: <https://doi.org/10.13189/csit.2023.110101>.
12. Mariani S., Picone M., Ricci A. About Digital Twins, Agents, and Multiagent Systems: A Cross-Fertilisation Journey // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer International Publishing, 2022. – P. 114–129. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20179-0_8.
13. Kalyani Y., Collier R. The Role of Multi-Agents in Digital Twin Implementation: Short Survey // *ACM Computing Surveys*. – 2024. – Vol. 57, № 3. – P. 1–15. – Association for Computing Machinery (ACM). – DOI: <https://doi.org/10.1145/3697350>.
14. Zhang K., Cao J., Zhang Y. Adaptive Digital Twin and Multiagent Deep Reinforcement Learning for Vehicular Edge Computing and Networks // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2022. – Vol. 18, № 2. – P. 1405–1413. – Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2021.3088407>.
15. Nie Q., Tang D., Zhu H., Sun H. A multi-agent and internet of things framework of digital twin for optimized manufacturing control // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2021. – Vol. 35, № 10–11. – P. 1205–1226. – Informa UK Limited. – DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192x.2021.2004619>.
16. Zheng X., Psarommatis F., Petrali P., Turrin C., Lu J., Kiritsis D. A Quality-Oriented Digital Twin Modelling Method for Manufacturing Processes Based on A Multi-Agent Architecture // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 51. – P. 309–315. – Elsevier BV. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.044>.
17. Clemen T., Ahmady-Moghaddam N., Lenfers U. A., Ocker F., Osterholz D., Ströbele J., Glake D. Multi-Agent Systems and Digital Twins for Smarter Cities // *Proceedings of the 2021 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. – 2021. – P. 45–55. – ACM. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3437959.3459254>.