

*Н. М. ШМАТКО, С. В. ЯКОВЕНКО***КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ DIGITAL TWIN ORGANIZATION З AI-МОДУЛЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ**

Пропонується концептуальна модель Digital Twin Organization (DTO) з інтегрованим модулем штучного інтелекту для прогнозування ефективності бізнес-процесів. Модель побудована як багаторівнева архітектура, що охоплює збір, інтеграцію та очищення даних у реальному часі, застосування алгоритмів машинного та глибокого навчання, симуляційне моделювання сценаріїв і формування управлінських рішень. У роботі уточнено сутність бізнес-процесу як динамічної системи, орієнтованої на створення цінності для клієнтів, адаптацію до змін зовнішнього середовища та інтеграцію сучасних технологічних рішень. Теоретичним підґрунтям дослідження є системний підхід до моделювання організацій, аналіз існуючих архітектур DTO та методів прогнозувальної аналітики у сфері BPM. Науковою новизною є чотирирівнева структура DTO (Data Ingestion, AI Processing, Simulation, Decision Support), яка доповнюється зворотним зв'язком, механізмами оцінки якості прогнозів (MAE, RMSE, R2) та інструментами пояснюваності результатів (SHAP, LIME). Окремо підкреслюється роль Predictive Process Analytics як підходу до переходу від реактивного моніторингу до проактивного управління, що забезпечує більш ефективне використання ресурсів та підвищує гнучкість організацій. Практична значущість моделі підтверджується умовним кейсом логістичної компанії, де інтеграція AI+DTO дозволила змоделювати оптимізацію маршрутів і прогнозування затримок. Водночас визначено обмеження: залежність від якості даних, потреба у галузевій адаптації та відсутність єдиних стандартів для інтеграції AI у DTO. Запропонована модель є масштабованою та сумісною з ERP-, CRM- і IoT-системами, що підвищує її релевантність для виробничого, логістичного й сервісного секторів. Робота формує теоретико-методологічне підґрунтя для подальших досліджень, зокрема у напрямі стандартизації архітектури TO, розробки галузевих методик емпіричної валідації, забезпечення прозорості та етичності застосування AI-рішень у BPM.

Ключові слова: Digital Twin Organization; штучний інтелект; прогнозування KPI; BPM; Predictive Process Analytics; симуляційне моделювання; управлінські рішення

*N. SHMATKO, S. YAKOVENKO***AI-ENHANCED DIGITAL TWIN ORGANIZATION: A CONCEPTUAL MODEL FOR PROACTIVE KPI FORECASTING IN BUSINESS PROCESS MANAGEMENT**

There have been proposed a conceptual model of the Digital Twin Organization (DTO) with an integrated artificial intelligence (AI) module for predicting the performance of business processes. The model is designed as a multi-layered architecture that includes realtime data ingestion and integration, the application of machine learning and deep learning algorithms, simulation-based scenario modeling, and decision support mechanisms. The paper specifies the nature of a business process as a dynamic system oriented toward creating customer value, adapting to changes in the external environment, and integrating advanced technological solutions to increase efficiency and flexibility. The theoretical foundation relies on a systems approach to organizational modeling, comparative analysis of DTO architectures, and systematization of predictive analytics methods in the domain of business process management (BPM). The scientific novelty lies in the proposed four-layer architecture (Data Ingestion, AI Processing, Simulation, Decision Support), enhanced with feedback loops, evaluation metrics of forecast accuracy (MAE, RMSE, R3), and explainability techniques such as SHAP and LIME. A particular focus is given to Predictive Process Analytics as an approach that enables the transition from reactive monitoring toward proactive management, thus improving resource utilization and organizational agility. The practical relevance is illustrated through a case study of a logistics company, where AI+DTO integration allowed to optimize delivery routes and predict delays. According to simulation results, the expected effect includes a reduction of fuel costs by around 12% and a decrease of average delivery time by 18%. At the same time, the study outlines several limitations, such as dependence on data quality, industry-specific adaptation, and the lack of standardized approaches for AI integration into DTO. The proposed model is scalable and compatible with ERP, CRM, and IoT infrastructures, making it applicable to manufacturing, logistics, and service sectors. In conclusion, the research forms a theoretical and methodological basis for further studies on DTO standardization, empirical validation, and the development of transparent and ethical AI-based decision support in BPM.

Keywords: Digital Twin Organization; artificial intelligence; KPI forecasting; BPM; Predictive Process Analytics; simulation modeling; decision-making

Вступ. Ефективне управління бізнес-процесами в умовах глобалізації, цифрової трансформації та високої конкуренції вимагає сучасних інструментів, що забезпечують гнучкість та адаптивність. Digital Twin Organization (DTO) - потужний механізм для моделювання бізнес-процесів у віртуальному середовищі та аналізу потенційних наслідків управлінських рішень [1]. Інтеграція штучного інтелекту (AI) у DTO відкриває можливості для прогнозування ключових показників ефективності (KPI) у реальному часі, що суттєво підвищує потенціал управління [2]. Суттєвою проблемою є відсутність чітких методологій прогнозування KPI у рамках DTO, що обмежує ефективне практичне застосування цих технологій [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичні підходи до бізнес-процесів (BPM), запропоновані М. Хаммером [4], акцентують на реінжинірингу бізнес-процесів; Дж. Гаррінгтон [5] і Т.

Давенпорт [6] підкреслювали системність, вимірюваність і логічну послідовність процесів; М. Портер [7] та Г. Йохансон [8] наголошували на створенні доданої цінності для клієнта.

Нещодавні дослідження, зокрема робота Ф. Форнарі, окреслили концепцію DTO як платформи для моніторингу та симуляцій бізнес-систем, однак без AI-прогнозування KPI [1]. К. Ліу та І. Девід провели систематичний огляд 22 досліджень, розробивши архітектурну модель DTO з AI, але зауважили відсутність узгодженої структури прогнозування KPI [2]. К. Мухамад підкреслив, що більшість сучасних рішень DTO орієнтовані на моніторинг, а не на проактивне прогнозування KPI бізнес-процесів [3]. Додатково А. Альфаро-Вікез провів огляд AI-DTO у виробництві, однак підходів саме до BPM-прогнозів виявлено вкрай мало [9].

Таким чином, існує суттєва наукова прогалина: відсутня чітка, систематизована модель інтеграції AI

у DTO для прогнозування KPI бізнес-процесів, що створює підґрунтя для дослідження.

Мета роботи. Метою статті є розробка концептуальної моделі Digital Twin Organization з інтегрованим AI-модулем прогнозування KPI бізнес-процесів, що універсалізує підхід для подальших практичних досліджень.

Постановка завдання. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд підходів до інтеграції DTO та AI у BPM.
2. Класифікувати існуючі архітектури AI-прогнозування у DTO.
3. Запропонувати концептуальну модель інтеграції AI в DTO для прогнозування KPI бізнес-процесів.

Методологічна основа дослідження ґрунтується на системному підході, що дає змогу розглядати бізнес-процеси в межах Digital Twin Organization як складні взаємопов'язані системи. Для визначення ключових напрямів інтеграції штучного інтелекту застосовано порівняльний аналіз сучасних архітектур DTO у поєднанні із систематизацією та класифікацією наявних моделей прогнозування KPI. Отримані результати лягли в основу розробки концептуальної моделі інтеграції AI у DTO, яка формує теоретичну базу для подальшої практичної імплементації.

Актуальність дослідження зумовлена потребою підприємств у проактивному управлінні бізнес-процесами, здатному забезпечити швидку адаптацію до змін у ринковому середовищі. Інтеграція AI у DTO відкриває можливості для прогнозування ефективності процесів, що дозволяє приймати інформовані рішення без значних ризиків, проте для практичної реалізації потрібна чітка теоретична база.

Результати дослідження. Концепція Digital Twin виникла у промисловості як метод створення цифрової копії фізичного об'єкта чи системи для моніторингу, симуляції та оптимізації його роботи. Уперше термін був чітко сформульований Майклом Грівзом (Michael Grieves) у контексті життєвого циклу продукту, де цифрова модель дозволяє відслідковувати зміни та прогнозувати результати ще до фактичної реалізації [12].

Digital Twin Organization (DTO) — це еволюційний розвиток концепції, який переносить її з рівня окремих об'єктів або процесів на рівень усієї організації. DTO можна визначити як динамічну цифрову репрезентацію всієї організаційної системи, яка постійно оновлюється на основі даних із реального часу та історичних джерел, з можливістю моделювання сценаріїв і оцінки наслідків управлінських рішень [1].

Ф. Форнарі у своєму дослідженні [1] пропонує розглядати DTO як платформу системної інтеграції, де цифрові моделі бізнес-процесів поєднуються з даними про зовнішнє середовище, внутрішні ресурси та ключові показники ефективності (KPI), оскільки бізнес-процес визначається як сукупність взаємопов'язаних і послідовних дій, спрямованих на досягнення визначеного результату через ефективне використання ресурсів, створення цінності для

клієнтів та забезпечення стратегічних цілей організації [13].

Таким чином, DTO можна розглядати як потужний інструмент організаційного управління, що базується на точному відтворенні стану підприємства і дозволяє досліджувати наслідки змін до їхнього впровадження у реальному середовищі. Проте, як підкреслюють Liu & David (2025) [2], питання стандартизації архітектури DTO та інтеграції прогнозних алгоритмів все ще залишаються відкритими, що створює простір для подальших теоретичних розробок.

Інтеграція штучного інтелекту (AI) у Digital Twin Organization (DTO) розширює можливості цієї концепції від пасивного відображення стану організації до активного інструменту прогнозування та підтримки рішень. Якщо класичний DTO здебільшого виконує функції моніторингу та моделювання, то AI-компоненти дозволяють:

- передбачати динаміку ключових показників ефективності (KPI),
- виявляти приховані закономірності у поведінці бізнес-процесів,
- автоматично пропонувати оптимальні управлінські дії.

К. Ліу та І. Девід (2025) у своєму систематичному огляді [2] проаналізували 22 наукові роботи, присвячені інтеграції AI в DTO, і запропонували архітектурну рамку, яка включає:

1. Data Ingestion Layer — збір та очищення даних із різних джерел у реальному часі.
2. AI Processing Layer — застосування алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання.
3. Simulation Layer — тестування сценаріїв та візуалізація прогнозів.
4. Decision Support Layer — формування рекомендацій для менеджменту.

Автори відзначають, що попри наявність таких підходів, не існує єдиного стандарту для інтеграції алгоритмів прогнозування KPI у DTO. Це ускладнює відтворюваність результатів і порівнянність моделей між різними організаціями.

К. Мухамад (2025) [3] у своїй роботі наголошує, що більшість наявних рішень DTO з AI орієнтовані на реактивний аналіз (моніторинг та звітність) і рідко використовуються для проактивного прогнозування KPI. Він пропонує розширити теоретичну модель DTO шляхом інтеграції Predictive Process Analytics — підходу, що поєднує процесний майнінг із прогнозними алгоритмами.

Дослідження Альфаро-Вікез (2025) [4] демонструє успішне впровадження AI+DTO у виробничому секторі, проте підкреслює дефіцит прикладів використання таких підходів у сфері управління бізнес-процесами (BPM). Автори зазначають, що у BPM-доміні часто відсутні формалізовані моделі даних, необхідні для якісного прогнозування.

Таким чином, аналіз наукових джерел показує, що інтеграція AI у DTO має високий потенціал для забезпечення проактивного управління бізнес-процесами, але вимагає:

- розробки уніфікованих архітектурних стандартів,
- створення методологічних основ для підключення прогнозних моделей KPI,
- адаптації концепції Predictive Process Analytics до специфіки DTO.

Концептуальна модель DTO з інтегрованим модулем прогнозування KPI базується на поєднанні трьох ключових елементів:

1. Архітектура цифрового двійника організації, що відображає реальні бізнес-процеси у вигляді віртуальної моделі.
2. AI-аналітика, яка включає алгоритми машинного навчання та обробки потокових даних для прогнозування ключових показників ефективності.
3. Механізми симуляцій та оптимізації, які дають змогу тестувати сценарії змін у процесах до їх впровадження.

Таке поєднання дозволяє перейти від реактивного моніторингу до проактивного управління процесами.

Модель передбачає чотири основні рівні:

- Рівень даних
- Аналітичний рівень
- Симуляційний рівень
- Рівень візуалізації та підтримки рішень (рис.1).

У наукових працях запропоновано кілька сценаріїв інтеграції AI та DTO [1], проте більшість із них зосереджені на виробничих або технічних процесах. З огляду на виявлені обмеження та сучасні виклики цифрової трансформації, ми пропонуємо концептуальну чотирирівневу модель інтеграції штучного інтелекту у Digital Twin Organization для прогнозування ключових показників ефективності бізнес-процесів, яка у межах BPM передбачає:

- Використовувати AI для прогнозування вузьких місць у бізнес-процесах.
- Реалізувати функцію своєчасного попередження про можливі збої або відхилення KPI.
- Застосовувати симуляції для оцінки впливу змін на загальну ефективність [10,11].

Переваги концептуальної моделі:

1. Прогнозування в реальному часі: можливість виявляти відхилення KPI до того, як вони критично вплинуть на бізнес.
2. Гнучкість: модель можна адаптувати до різних галузей і масштабів організації.
3. Обґрунтованість рішень: AI-прогнози підкріплюють управлінські дії аналітичними даними.
4. Модульність: можливість поступового впровадження окремих компонентів.

Запропонована концептуальна модель інтеграції штучного інтелекту у Digital Twin Organization (DTO) базується на чотирьох взаємопов'язаних рівнях, представлених на рисунку:

1. Рівень даних (Data Layer) — включає збір інформації з ERP-, CRM-, IoT-систем, журналів бізнес-процесів та зовнішніх джерел. На цьому рівні реалізуються процедури ETL/Streaming, очищення, агрегування та формування ознак (feature engineering).
2. AI-рівень (AI Processing Layer) — містить модулі побудови та навчання прогнозних моделей KPI з використанням методів машинного навчання (XGBoost, ансамблеві моделі) та глибокого навчання (LSTM, GNN). Передбачено автоматизовану оцінку якості моделей (MAE, RMSE, R²) та пояснюваність результатів (SHAP, LIME).
3. Симуляційний рівень (Simulation Layer) — відповідає за моделювання сценаріїв змін у бізнес-процесах та оцінку їхнього впливу на прогнозовані KPI.
4. Рівень підтримки рішень (Decision Support Layer) — забезпечує візуалізацію прогнозів, формування рекомендацій та реалізацію сценарного планування ("what-if" аналіз) для менеджменту.

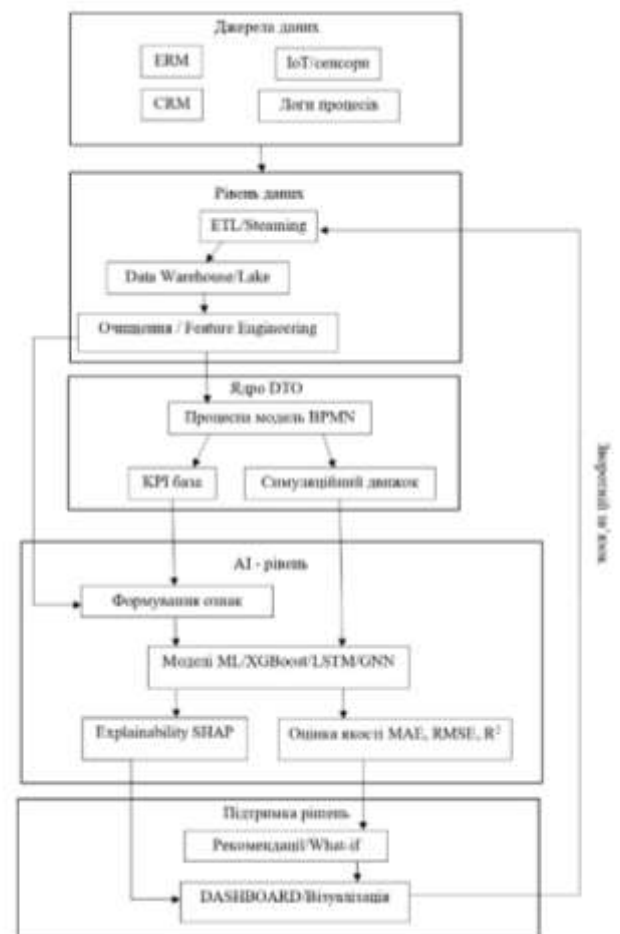


Рис. - Архітектура концептуальної моделі Digital Twin Organization з інтегрованим AI-модулем прогнозування KPI.

Модулі моделі функціонують у безперервному циклі зворотного зв'язку (feedback loop), що дає змогу постійно оновлювати дані, перенавчати моделі та підвищувати точність прогнозів.

Алгоритм роботи моделі передбачає:

1. Інтеграцію поточних та історичних даних з різних джерел у єдине сховище (Data Warehouse або Data Lake).
2. Автоматизовану обробку даних: очищення, виявлення аномалій, генерація додаткових ознак.
3. Навчання та валідацію моделей на основі актуальних даних.
4. Інтерактивне симулювання змін та прогнозування впливу на KPI.
5. Передачу результатів прогнозів та рекомендацій у систему підтримки прийняття рішень.

Запропонована модель усуває ключові недоліки, визначені у попередніх дослідженнях:

- Відсутність уніфікованої архітектури DTO з AI (Liu & David, 2025) — модель формалізує чотирирівневу структуру, придатну для масштабування [2].
- Обмеженість прогнозних можливостей (Muhammad, 2025) — впровадження Predictive Process Analytics дозволяє проактивно оцінювати зміни KPI [3].
- Фокус на виробничих процесах (Alfaro-Viquez, 2025) — модель адаптована до BPM-сфери та враховує специфіку сервісних і управлінських процесів [9].

Таким чином, розроблена теоретична модель інтеграції AI у Digital Twin Organization формалізує чотирирівневу архітектуру з чітко визначеними модулями та логікою обробки даних, усуває обмеження, виявлені у попередніх дослідженнях, та створює основу для впровадження проактивного управління бізнес-процесами у різних галузях.

Інтеграція AI у Digital Twin Organization здатна суттєво змінити підхід до управління бізнес-процесами у різних галузях. Зокрема:

- Виробництво — прогнозування часу відмови обладнання на основі сенсорних даних, моделювання впливу змін технологічних параметрів на обсяги випуску.
- Логістика та транспорт — проактивне коригування маршрутів доставки залежно від погодних умов та трафіку.
- Фінансовий сектор — динамічна оцінка кредитного ризику клієнтів у реальному часі з урахуванням транзакційної історії та макроекономічних показників.
- Охорона здоров'я — прогнозування навантаження на лікарні під час сезонних спалахів захворювань, оптимізація розподілу персоналу.
- Великі сервісні компанії — прогнозування пікових навантажень у контакт-центрах і автоматичне перепланування зміни персоналу.

Розглянуто умовний кейс логістичної компанії з мережею складів та автопарком вантажівок.

Проблема: неефективне планування маршрутів і часті затримки постачань, особливо у пікові сезони.

Впровадження AI+DTO:

- Рівень даних: моделюється збір GPS-даних із вантажівок, інформації про залишки на складах, замовлення клієнтів і прогнози погоди.
- AI-рівень: LSTM-моделі прогнозують затримки доставки та перевантаження складів, XGBoost оцінює оптимальний розподіл маршрутів.
- Симуляційний рівень: тестування сценаріїв «що-якщо» — зміна черговості відвантажень, залучення додаткових транспортних одиниць.
- Рівень підтримки рішень: автоматичне формування оптимізованого плану маршрутів та графіка відвантажень з інтеграцією у ERP.

Оцінка потенційного ефекту: за результатами симуляційного моделювання очікуваний вплив впровадження AI+DTO може становити:

- зменшення витрат на паливо приблизно на 12%;
- скорочення середнього часу доставки приблизно на 18%;
- зниження кількості запізнень у пікові періоди приблизно на 25%.

Наведені показники є результатом умовного симуляційного сценарію (змодельовані дані) і наведені як ілюстрація потенційного ефекту. Для емпіричної верифікації потрібні реальні логи і впровадження у промислових умовах.

Запропоновані напрями практичної реалізації та наведений приклад інтеграції AI у Digital Twin Organization демонструють значний потенціал цієї технології у підвищенні ефективності бізнес-процесів, зниженні операційних витрат та покращенні якості управлінських рішень, водночас формуючи методологічну основу для подальших теоретичних і прикладних досліджень у цій сфері.

Проте попри очевидні переваги, впровадження AI+DTO у BPM супроводжується низкою обмежень, які необхідно враховувати під час інтерпретації результатів. По-перше, розроблена концептуальна модель інтеграції AI у Digital Twin Organization ґрунтується переважно на аналізі вторинних джерел та теоретичних підходів, що обмежує її пряму валідацію в умовах реальних підприємств [14]. По-друге, враховані архітектурні рішення та алгоритмічні підходи відображають поточний стан розвитку технологій і можуть зазнати змін у зв'язку з появою нових методів чи стандартів [10]. Крім того, модель не враховує галузевої специфіки, що може вимагати адаптації під конкретні бізнес-середовища.

Впровадження AI-модулів у Digital Twin Organization вимагає дотримання стандартів захисту даних, зокрема GDPR та національних регуляторних норм. Необхідно забезпечити анонімізацію персональних та комерційно чутливих даних, мінімізувати упередження моделей і впроваджувати механізми аудиту та пояснюваності алгоритмів для підвищення довіри до прогнозів.

Висновки. У ході проведеного дослідження здійснено узагальнення та критичний аналіз сучасних підходів до побудови Digital Twin Organization (DTO)

та інтеграції штучного інтелекту (AI) для прогнозування ключових показників ефективності (KPI) бізнес-процесів. Результати аналізу літератури засвідчили відсутність цілісної методології, що поєднує функціонал цифрового двійника організації з прогнозною аналітикою у контексті управління бізнес-процесами, а також переважну зосередженість існуючих рішень на задачах моніторингу замість завдань випереджального управління.

У процесі дослідження було запропоновано концептуальну чотирирівневу модель інтеграції AI у DTO, що включає рівень даних, рівень AI-аналітики, симуляційний рівень та рівень підтримки управлінських рішень. Модель формалізує процес збору, обробки та аналізу даних, інтегрує методи Predictive Process Analytics та передбачає зворотний зв'язок для постійного вдосконалення точності прогнозів. Запропонований підхід усуває виявлені у попередніх роботах обмеження, забезпечуючи можливість уніфікованої реалізації алгоритмів прогнозування KPI у різних галузях.

Окреслені напрями практичного застосування та умовний приклад впровадження у логістичній компанії підтверджують потенціал запропонованої моделі щодо підвищення ефективності бізнес-процесів, зниження операційних витрат та скорочення часу виконання критичних операцій.

Отримані результати можуть слугувати теоретичною та методологічною основою для подальших досліджень, спрямованих на розробку стандартів інтеграції AI у DTO, підвищення масштабованості таких систем, забезпечення пояснюваності прогнозів та врахування етичних аспектів у процесі прийняття рішень.

Таким чином, розроблена модель інтеграції AI у Digital Twin Organization створює передумови для формування ефективних інструментів випереджального управління бізнес-процесами в умовах цифрової трансформації та зростання складності організаційних систем.

Список літератури

1. Fornari, F., et al. (2024). Digital twins of business processes: A research manifesto. Internet of Things. URL: https://www.researchgate.net/publication/384887079_Digital_Twins_of_Business_Processes_A_Research_Manifesto (дата звернення: 14.08.2025).
2. Liu, X., & David, I. (2025, June 6). AI simulation by digital twins: Systematic survey, reference framework, and mapping to a standardized architecture. Journal of Simulation and Modelling. URL: <https://xiaoranliu.com/files/AI-Simulation-Survey-2024.pdf> (дата звернення: 14.08.2025).
3. Muhammad, K., David, T., Nassisid, G., & Farus, T. (2024, June 24). Integrating generative AI with network digital twins for enhanced network operations. Synthical. URL: <https://synthical.com/article/Integrating-Generative-AI-with-Network-Digital-Twins-for-Enhanced-Network-Operations-4a8f6edc-e290-46c7-9d38-a471c58b31be> (дата звернення: 16.08.2025).
4. Hammer, M., & Champy, J. (1993). Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution. Harper Business.
5. Harrington, H. J. (1991). Business process improvement: The breakthrough strategy for total quality, productivity, and competitiveness. McGraw-Hill.
6. Davenport, T. H. (1993). Process innovation: Reengineering work through information technology. Harvard Business School Press.

7. Porter, M. E. (1985). Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance. Free Press.
8. Johansson, H. J., McHugh, P., Pendlebury, A. J., & Wheeler, W. A. (1993). Business process reengineering: Breakpoint strategies for market dominance. John Wiley & Sons.
9. Alfaro-Viquez, D., Zamora-Hernandez, M., Fernandez-Vega, M., Garcia-Rodriguez, J., & Azorin-Lopez, J. (2025). A comprehensive review of AI-based digital twin applications in manufacturing: Integration across operator, product, and process dimensions. Electronics, 14(4), 646. URL: <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/077d962d-3a9a-428f-9bc2-8e98baa51a2c/content> (дата звернення: 18.08.2025).
10. Negri, E., et al. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. Computers in Industry, 65(6), 1035–1045. URL: https://www.researchgate.net/publication/319888412_A_Review_of_the_Roles_of_Digital_Twin_in_CPS-based_Production_Systems (дата звернення: 18.08.2025).
11. Kritzing, W., et al. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022. URL: https://www.researchgate.net/publication/327491752_Digital_Twin_in_manufacturing_A_categorical_literature_review_and_classification (дата звернення: 16.08.2025).
12. Grieves, Michael. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication?utm_source (дата звернення: 16.08.2025).
13. Шматько Н.М., Яковенко С.В. Аналітичний огляд бізнес-процесів підприємства. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. 2025. №1 (36). С. 120–125. URL: https://www.econ.vernadskyjournals.in.ua/journals/2025/36_75_1/20.pdf (дата звернення: 16.08.2025).
14. Verenich, I., Dumas, M., La Rosa, M., & Maggi, F. M. (2019). Survey and cross-benchmark comparison of remaining time prediction methods in business process monitoring. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 10(4), 1–34. URL: https://www.researchgate.net/publication/334581217_Survey_and_Cross-benchmark_Comparison_of_Remaining_Time_Prediction_Methods_in_Business_Process_Monitoring (дата звернення: 18.08.2025).
15. Teinmaa, I., Dumas, M., La Rosa, M., & Maggi, F. M. (2019). Outcome-oriented predictive process monitoring: Review and benchmark. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 13(2), 17. URL: https://www.researchgate.net/publication/318652554_Outcome-Oriented_Predictive_Process_Monitoring_Review_and_Benchmark (дата звернення: 16.08.2025).

References (transliterated)

1. Fornari, F., et al. (2024). Digital twins of business processes: A research manifesto. URL: https://www.researchgate.net/publication/384887079_Digital_Twins_of_Business_Processes_A_Research_Manifesto (accessed 14.08.2025).
2. Liu, X., & David, I. (2025, June 6). AI simulation by digital twins: Systematic survey, reference framework, and mapping to a standardized architecture. Journal of Simulation and Modelling. URL: <https://xiaoranliu.com/files/AI-Simulation-Survey-2024.pdf> (accessed 14.08.2025).
3. Muhammad, K., David, T., Nassisid, G., & Farus, T. (2024, June 24). Integrating generative AI with network digital twins for enhanced network operations. Synthical. URL: <https://synthical.com/article/Integrating-Generative-AI-with-Network-Digital-Twins-for-Enhanced-Network-Operations-4a8f6edc-e290-46c7-9d38-a471c58b31be> (accessed 16.08.2025).
4. Hammer, M., & Champy, J. (1993). Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution. Harper Business.
5. Harrington, H. J. (1991). Business process improvement: The breakthrough strategy for total quality, productivity, and competitiveness. McGraw-Hill.
6. Davenport, T. H. (1993). Process innovation: Reengineering work through information technology. Harvard Business School Press.

7. Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press.
8. Johansson, H. J., McHugh, P., Pendlebury, A. J., & Wheeler, W. A. (1993). *Business process reengineering: Breakpoint strategies for market dominance*. John Wiley & Sons.
9. Alfaro-Viquez, D., Zamora-Hernandez, M., Fernandez-Vega, M., Garcia-Rodriguez, J., & Azorin-Lopez, J. (2025). A comprehensive review of AI-based digital twin applications in manufacturing: Integration across operator, product, and process dimensions. *Electronics*, 14(4), 646. URL: <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/077d962d-3a9a-428f-9bc2-8e98baa51a2c/content> (accessed 18.08.2025).
10. Negri, E., et al. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Computers in Industry*, 65(6), 1035–1045. URL: https://www.researchgate.net/publication/319888412_A_Review_of_the_Roles_of_Digital_Twin_in_CPS-based_Production_Systems (accessed 18.08.2025).
11. Kritzing, W., et al. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. URL: https://www.researchgate.net/publication/327491752_Digital_Twin_in_manufacturing_A_categorical_literature_review_and_classification (accessed 16.08.2025).
12. Grieves, Michael. (2015). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication?utm_source=utm_source (accessed 16.08.2025).
13. Shmatko N. M., Yakovenko S. V. *Analitichnyi ohliad biznes-protsesiv pidpriemstva [Analytical review of enterprise business processes]*. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Ekonomika i upravlinnia [Scientific Notes of Tavria National University named after V. I. Vernadsky. Series: Economics and Management]*. Kyiv, 2025, no. 1 (36), pp. 120–125. URL: https://www.econ.vernadskyjournals.in.ua/journals/2025/36_75_1/20.pdf (accessed 16.08.2025).
14. Verenich, I., Dumas, M., La Rosa, M., & Maggi, F. M. (2019). Survey and cross-benchmark comparison of remaining time prediction methods in business process monitoring. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 10(4), 1–34. URL: https://www.researchgate.net/publication/334581217_Survey_and_Cross-benchmark_Comparison_of_Remaining_Time_Prediction_Methods_in_Business_Process_Monitoring (accessed 18.08.2025).
15. Teinemaa, I., Dumas, M., La Rosa, M., & Maggi, F. M. (2019). Outcome-oriented predictive process monitoring: Review and benchmark. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 13(2), 17. URL: https://www.researchgate.net/publication/318652554_Outcome-Oriented_Predictive_Process_Monitoring_Review_and_Benchmark (accessed 16.08.2025).

Надійшла (received) 02.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Шматко Наталія Михайлівна (Shmatko Nataliia) – завідувач кафедри менеджменту, доктор економічних наук, професор Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-252X>; e-mail: Nataliia.Shmatko@khp.edu.ua

Яковенко Сергій Володимирович (Yakovenko Serhii) – аспірант кафедри менеджменту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1540-2698>; e-mail: Serhii.Yakovenko@emmb.khpi.edu.ua