УДК 004.89;65.012.22

Куцик П. О.
kutsykpetro@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5795-9704
Researcher ID: G-9204-2019
д.е.н., проф., Заслужений діяч науки і техніки України,
ректор, професор кафедри обліку, контролю, аналізу та оподаткування,
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

Ковтун О. І.
okovtunsr@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2380-520X
к.е.н., проф., професор кафедри економіки,
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів

АРХІТЕКТУРА, ЛОГІКА ТА МЕХАНІЗМ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОАКТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ (ПСУ) ПІДПРИЄМСТВОМ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА (ЦД)

Анотація. *Запропоновано модель архітектури та розглянуто функціонал, логіку та механізм роботи інноваційної системи управління підприємством на основі його цифрового віртуального профілю, так званого цифрового двійника підприємства (ЦДП). Технологія ЦД передбачає створення та утилітарне використання динамічної та синхронізованої віртуальної копії оригінального підприємства в режимі реального часу за різними показниками. Ця віртуальна цифрова копія та вбудована в неї технологія забезпечують постійне та динамічне оновлення найповнішого масиву внутрішніх операційних та зовнішніх даних про підприємство, його бізнес та критичні фактори, що на них впливають. Представлена архітектура проактивної системи управління (ПСУ) підприємства передбачає тісну інтеграцію та взаємодію ЦДП з «ГЗ» та штучною нейронною мережею (ШНМ) у рамках певної синергетичної моделі «ЦДП + ГЗ + ШНМ». Такий підхід до організації процесу обґрунтування управлінських та бізнес-рішень дозволяє вирішувати проблеми ефективного управління підприємством, враховуючи його цілі та функції, структуру бізнесу та стратегічний потенціал, усі зовнішні та внутрішні зв'язки, фактори успіху та ризики. Необхідність застосування нових підходів до організації управління підприємством на основі великих даних та інструментів для їх структурування, систематизації, контекстуалізації, нормалізації, аналітичної обробки та контекстного узагальнення, включаючи використання технологій ЦДП , ГЗ та ШНМ, зумовлена тим, що в умовах ДХ, які є умовами ведення бізнесу в сучасному світі, аналітика та управління складними багатофункціональними бізнес-системами, зокрема такими, як підприємство, повинні в першу чергу зосереджуватися на виявленні ймовірних ризиків та їх меж, а також на забезпеченні гнучкості та готовності цих бізнес-систем (підприємств) до раптових можливих збурень у бізнес-середовищі ДХ. Запропонована авторами синергетична архітектура ПСУ забезпечує системний підхід до вирішення проблеми ефективності та узгодженості управління підприємством, його бізнес-напрямками та складовими бізнес-процесами відповідно до змін ситуації у зовнішньому бізнес- та макросередовищі навколо цього підприємства. Це забезпечується інтеграцією функціональних та технологічних можливостей ЦДП, ГЗ та ШНМ щодо: а) моніторингу, збору, накопичення, аналізу та контекстного узагальнення великих масивів найбільш необхідної для вирішення управлінських завдань різноманітної інформації про підприємство, як складний об'єкт управління та суб'єкт господарювання, та про середовище його функціонування; б) моделювання різних сценаріїв розвитку подій у бізнес- та макросередовищі підприємства; в) моделювання реакції менеджменту на них (ці сценарії) з боку*

© Куцик П. О., Ковтун О. І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

підприємства шляхом «програвання» різних варіантів управлінських, як стратегічних, так і тактико-операційних, рішень на різних рівнях управління підприємством, та оцінки наслідків цих рішень для конкретного бізнесу зокрема та підприємства в цілому, без реальної (ділової, фінансової чи матеріальної) шкоди для підприємства від невдалих або неоптимальних рішень чи дій; г) виявлення потенційних загроз, оцінка їхніх ризиків та, зрештою, розробка рекомендацій щодо ефективних альтернативних управлінських рішень, які допоможуть мінімізувати ці ризики та постійно підтримувати ключові показники ефективності підприємства (КПЕ) в оптимально прийнятних межах впродовж тривалого періоду часу.

Ключові слова: проактивна система управління підприємством (ПСУП), цифровий двійник підприємства (ЦДП), штучні нейронні мережі (ШНМ), граф знань (ГЗ), керований даними бізнес-менеджмент, архітектура синергетичної системи проактивного управління підприємством.

Kutsyk Petro
kutsykpetro@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5795-9704
Researcher ID: G-9204-2019
Doctor of Economics, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine,
Rector, Professor of the Department of Accounting, Control, Analysis and Taxation,
Lviv University of Trade and Economics, Lviv

Kovtun Oleh
okovtunsr@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2380-520X
PhD, Professor, Professor of the Department of Economics,
Lviv University of Trade and Economics, Lviv

ARCHITECTURE, LOGIC AND MECHANISM OF FUNCTIONING OF A PROACTIVE MANAGEMENT SYSTEM (PMS) OF AN ENTERPRISE BASED ON A DIGITAL TWIN (DT)

Abstract. *An architecture model is proposed and the functionality, logic and mechanism of operation of an innovative enterprise management system based on its digital virtual profile, the so-called digital twin of the enterprise (EDT), are considered. DT technology involves the creation and utilitarian use of a dynamic and synchronized virtual copy of the original enterprise in real time according to various metrics. This virtual digital copy and the technology embedded in it provide permanent and dynamic updating of the most comprehensive array of internal operational and external data about the enterprise, its business and critical factors influencing them. The presented architecture of the proactive management system (PMS) of the enterprise involves close integration and interaction of the EDT with the "knowledge graph" (KG) and the artificial neural network (ANN) within a certain synergistic model "EDT + KG + ANN". Such an approach to organizing the process of substantiating management and business decisions allows solving the problems of effective enterprise management, taking into account its goals and functions, business structure and strategic potential, all external and internal relationships, success factors and risks. The need to apply new approaches to enterprise management organization based on big data and tools for their structuring, systematization, contextualization, normalization and analytical processing, including the use of EDT, KG and ANN technologies, is due to the fact that in the conditions of the DCh, which are the conditions of doing business in the modern world, analytics and management of complex multifunctional business systems, in particular such as an enterprise, should primarily focus on identifying probable risks and their limits, as well as on ensuring the flexibility and readiness of these business systems (enterprises) to sudden possible disturbances in the DCh business environment. The synergistic architecture of the PSU proposed by the authors provides a systematic approach to solving the problem of efficiency and consistency of enterprise management, its business areas and component*

business processes in accordance with changes in the situation in the external business and macro environment around this enterprise. This is ensured by the integration of functional and technological capabilities of the EDT, the KG and the ANN regarding: a) monitoring, collection, accumulation and analysis of large arrays of the most necessary for solving management tasks of various aspects of information about the enterprise, as a complex object of management and a business entity, and about the environment of its functioning; b) modeling of various scenarios of the development of events in the business and macro environment of the enterprise; c) simulation of the management reaction to them (these scenarios) from the side of the enterprise by "playing" various options for management, both strategic and tactical-operational, decisions at different levels of enterprise management, and assessing the consequences of these decisions for a particular business in particular and the enterprise as a whole, without real (business, financial or material) damage to the enterprise from unsuccessful or suboptimal decisions or actions; d) identifying potential threats, assessing their risks, and ultimately generating recommendations for effective alternative management solutions that will help minimize these risks and permanently maintain the enterprise's KPIs within optimal acceptable limits for a long period of time.

Keywords: proactive enterprise management system (PEMS), enterprise digital twin (EDT), artificial neural networks (ANN), knowledge graph (KG), data-driven business management, architecture of a synergistic proactive enterprise management system.

JEL Classification: C53, D21, G14, L23, M15, O33
DOI: https://doi.org/10.32782/2522-1256-2026-50-12

Постановка проблеми. Ключовою проблемою, а відтак важливим завданням для менеджменту в умовах невизначеності, різноманітних ймовірних ризиків та збурень, що є ознаками детермінованого хаосу, є пристосування систем управління підприємствами до ефективного ведення бізнесу в цих умовах. Власне стрімкий розвиток різноманітних цифрових інструментів, інтегрованих із штучним інтелектом (ШІ), які можна утилітарно застосовувати (і які, до речі, вже почали успішно застосовуватися) для ефективного та швидкого вирішення певних (як рутинних, так і унікальних) завдань, у тому числі й для покращення керування різноманітними (як простими, так і складними) об'єктами, структурами й процесами, може допомогти вирішити цю проблему. Одним із напрямів застосування таких інструментів є впровадження на підприємствах керованого даними ("data-driven management" – DDM) бізнес-менеджменту, який насамперед орієнтований на передбачення загроз із різних джерел, мінімізацію чи навіть уникнення обумовлених ними ризиків та гнучкість у забезпеченні конкурентної переваги в бізнесі в сучасній економіці, яка все більше і більше набуває ознак економіки детермінованого хаосу (ДХ). В свою чергу, ця об'єктивно обумовлена високими рівнями невизначеності, різноманітних збурень та нестабільності сучасної економіки, трансформація підходів до менеджменту потребує запровадження відповідних організаційно-технологічних інновацій в систему управління бізнесом. І основою такої інноваційної системи бізнес-менеджменту, що використовує можливості сучасних технологій із ШІ, як на наш погляд, може і має стати, а фактично вже стають технології цифрових двійників підприємств – ЦДП ("enterprises digital twins" – EDT), які фактично є комплексними ШІ-сервісами і про які йшла мова в нашій попередній публікації з даної проблематики [1].

Потреба та необхідність в застосуванні нових, базованих на великих даних та інструментах їх опрацювання, у т. ч. технології ЦДП, підходів до організації управління підприємством обумовлені тим, що в умовах ДХ, якими є умови ведення бізнесу в сучасному світі, аналітика і менеджмент складних багатофункціональних бізнес-систем, зокрема таких як підприємство, мають насамперед фокусуватися на визначенні ймовірних ризиків та їх меж, а також на забезпеченні гнучкості та готовності цих бізнес-систем (підприємств) до раптових можливих збурень в бізнес-середовищі ДХ. А забезпечити цей фокус технологічно і функціонально здатні саме ЦДП. І позитивна роль та отримання значного ефекту від застосування цифрових двійників в практиці управління реальними фізичними об'єктами сьогодні вже є безза-

перечним фактом, що підтверджено практикою успішного бізнесу (на основі оцінки доходу, отриманого від програмних платформ та пов'язаних із ними послуг, що використовуються для створення та запуску цифрових двійників активу, процесу чи системи в реальному часі, які дозволяють моделювати, контролювати та підвищувати їх ефективність) як глобальних компаній, таких як General Electric Company, IBM Corporation, Siemens AG, Dassault Systemes SE, PTC Inc [2], так і вітчизняних, таких як компанія ДТЕК Нафтогаз [3], компанія ДТЕК Київські регіональні мережі [4], агрохолдинг «НУБІЛОН» [5], компанія "Interpipe" [6] та інші вітчизняні компанії, які працюють в різних галузях економіки і секторах бізнесу.

Відповідно до аналітичного звіту про глобальний ринок ЦД «Аналіз розміру та частки ринку цифрових двійників (ЦД) – тенденції зростання та прогноз (2026-2031)» від "Mordor Iintelligence" [2] глобальний ринок цифрових двійників у 2025 році оцінювався у $36.19 млрд та прогнозовано зросте у 2026 році до $46.2 млрд, а до 2031-го року до $228,46 млрд. із середньорічним темпом зростання 35.95% впродовж прогнозного періоду з 2026 по 2031 рік. Серед позитивних трендів в межах глобальної економіки слід виділити розвиток промислових платформ Інтернету речей та ширше впровадження периферійного штучного інтелекту (ШІ). А найбільшою сферою застосування ЦД у форматі «розумних фабрик» ("Smart Factory" – максимально цифровізованих виробничих підприємств, які використовують інтернет речей (IoT), штучний інтелект (ШІ) та повну автоматизацію для обміну даними в реальному режимі часу, забезпечуючи таким чином максимальну гнучкість, економію ресурсів та безперервне саморегулювання виробничих процесів без потреби участі людини) та розвинутій інфраструктурі "промислового Інтернету речей" ("Industrial Internet of Things"/ IIoT-системи об'єднаних комп'ютерних мереж і підключених до них промислових (виробничих) об'єктів із вбудованими датчиками і програмним забезпеченням для збору та обміну даними, з можливістю віддаленого контролю і управління виробництвом в автоматизованому режимі, без участі людини, які охоплюють інтелектуальні датчики, хмарні платформи та засоби аналітики) стало виробництво (в 2025 році на виробництво припадало 35.1% ринку усіх ЦД), кероване ШІ. При цьому найпотужніше зростання застосування ЦД демонструє нафтогазова промисловість. В регіональному аспекті лідерство застосування ЦД демонструє США та Канада, при цьому слід відзначити, що такі країни, як Китай, Індія та Японія, скорочують існуючий розрив завдяки державному фінансуванню програм масштабної цифровізації [2].

Загалом дані за 2025–2026 роки свідчать, що впровадження ЦД на підприємствах різних галузей забезпечувало їм відповідно: у виробництві – скорочення циклів розробки нових продуктів завдяки тестуванню різноманітних конфігурацій цих продуктів у віртуальному середовищі, без необхідності витрат на створення їх фізичних зразків; в обслуговуванні: – зменшення незапланованих простоїв обладнання завдяки предиктивній діагностиці; в логістиці – підвищення точності прогнозів попиту, скорочення надлишкових складських запасів та зниження транспортних витрат; в будівництві – зменшення енергоспоживання будівель і скорочення операційних витрат; покращення екологічних показників продукції та бізнес-процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню різних аспектів технології цифрових двійників і зокрема її застосування для вдосконалення систем і процесів управління різноманітними процесами та об'єктами, зокрема такими як підприємства, присвячено вже багато наукових праць як зарубіжних [7–13], так і вітчизняних авторів [14–16]. В зазначених та інших працях автори розглядають як загальні концептуальні рамки, так і конкретні застосування ЦД. Зокрема, в публікаціях мова йде про утилітарне використання ЦД в контексті передбачення збоїв обладнання; покращення ефективності виробництва та логістики, тестування впливу змін без реального ризику втрат для фізичної системи; прийняття оперативних рішень в реальному часі завдяки перманентному двонаправленому зв'язку між фізичним та віртуальним об'єктами управління.

Однак питання детальної архітектури, принципів та механізмів функціонування комплексних ШІ-систем, в структурі яких інтегровані та злагоджено взаємодіють технології ЦДП, «Графа Знань» (ГЗ), »Штучних Нейронних Мереж» (ШНМ), Великих Даних (Big Data), Глибокого Навчання (Deep Learning), Машинного Навчання (Machine Learning), Інтелекту-

ального Аналізу Даних (Data Mining) та інші сучасні ІТ, дотичні до обґрунтування рішень управління, все ще перебуває якщо вже не на початковій стадії, то на стадії експериментування (про що свідчить опитування, проведене консалтинговою компанією МакКінсі влітку 2025 року, звіт за матеріалами якого був опублікований в листопаді 2025 року [17, с. 1–30]. І лише незначна частина наукових робіт, в межах певних тематичних розвідок, досліджує ці питання комплексно, пояснюючи формат (архітектоніку – структурно-функціональну побудову таких систем менеджменту, що визначає, як взаємопов'язані між собою їх елементи, як розподілені між ними функції та як проходять інформаційні й управлінські потоки), інформаційні потоки, принципи та механізм функціонування систем управління, які повністю забезпечені та керовані ШІ-технологіями. І особливо актуальними зазначені аспекти та напрямки дослідження стосовно утилітарного застосування ЦДП в практиці управління підприємствами постають у світлі того, що сьогодні підприємства активно шукають досвіду та практичних рекомендацій в питаннях інтеграції ЦД, технологій управління даними та управління ефективністю в свої системи менеджменту.

Постановка завдання. Метою цієї розвідки, яка є продовженням попередньої публікації із даної проблематики в межах дослідження питань, що стосуються комплексного, системного утилітарного застосування різноманітних ІТ-інструментів нового покоління для покращення системи та процесу управління підприємством та підвищення на цій основі ефективності його бізнесу в умовах економіки ДХ, є дослідження та опис функціоналу, логіки зв'язків, інформаційних потоків, принципів та механізмів роботи ПСУ підприємством, сформованої на основі синергетичної архітектури «ЦДП+ГЗ+ШНМ» .

Виклад основного матеріалу дослідження. В контексті сутності феномену та технології сучасного ЦДП [18], архітектури ПСУ підприємством, яка передбачає інтеграцію технологій ЦДП з ГЗ та ШНМ, що ми розглянули в нашій попередній статті [1], представлена нами архітектоніка ПСУ на основі технології ЦДП, який інтегровано із ГЗ та певною локальною ШНМ має містити такі інформаційно-технологічні рівні: фізичний (реальний) рівень (внутрікорпоративні системи даних (ERP, CRM, HRM та інші), Інтернет речей, зовнішні джерела даних, у т. ч. різні хмарні системи тощо); рівень збору та інтеграції даних (забір, очищення та контекстуалізація даних у режимі реального часу); рівень цифрового двійника для моделювання (багатодоменні (багатовимірні) моделі, механізми моделювання). На цьому рівні здійснюється комплексне, системне відображення суб'єктів бізнесу у віртуальній моделі; рівень застосування технологій ШІ та здійснення аналітики. На цьому рівні застосовується машинне (глибинне) навчання та прогнозна аналітика для моделювання різних сценаріїв розвитку подій, прийнятих рішень управління та їх наслідків для бізнесу у вигляді виникнення можливих ризиків; рівень оптимізації (безперервної). На цьому рівні ШНМ зокрема виявляють неефективність ЦДП або його ризики в бізнесі, а відтак пропонує покращення та забезпечується прийняття рішень управління. Це рівень додатків візуалізації (панелі інструментів, інтерфейси підтримки рішень для менеджерів, зокрема для фахівців з управління ризиками) [1].

Для інтеграції різнорідних джерел різних даних (наприклад, фінансових систем, кадрових записів, журналів операційних технологій тощо) в єдину, високоточну віртуальну модель застосовується семантичний рівень даних, із використанням технології "Knowledge Graph" – KG (Граф Знань – ГЗ). ГЗ забезпечує встановлення змістовних зв'язків між різнорідними даними, які надають ШІ необхідний контекст, зокрема для аналізу системних ризиків. Тобто графи знань забезпечують ШІ бізнес-контекстом, допомагаючи робити обґрунтовані рішення та розумну інтеграцію даних [19; 20].

Таким чином для ЦДП технологія ГЗ дозволяє поєднувати інформацію на його різних рівнях та забезпечувати контекстно-залежне мислення, прийняття рішень та автоматизацію. І в запропонованій моделі архітектури ПСУ ГЗ виконує роль «мозку» ЦДП, забезпечуючи структуру, семантичне розуміння того, як усі елементи підприємства (дані, процеси, люди, активи тощо) пов'язані між собою, контекст та аналітичні дані, щоб зробити симуляції, прогнозування та автоматизацію ефективнішими.

Тут необхідно зробити декілька пояснень щодо зв'язку між ГЗ-структурованою інформаційною базою, та ШНМ-обчислювальним інструментом, який може або використовувати

дані з ГЗ, або допомагати у його створенні та аналізі. Ці три технології – ЦДП, ГЗ та ШНМ тісно пов'язані і працюють разом у так званих «високоінтелектуальних системах управління», де кожна виконує свою унікальну функцію. Вони взаємодіють у структурі, що можна описати як «Модель-Дані-Інтелект», таким чином:

✓ ГЗ – це скелет та контекст (даних). Його функція – структурувати, інтегрувати та зберігати знання про підприємство. ГЗ є основою, що робить симуляції ЦДП змістовними, а висновки ШНМ – логічними. Він визначає *«що є що»* (вузли (ноди)), і як вони пов'язані між собою (це показують ребра). В ЦДП ГЗ служить як єдине джерело істини, інтегруючи інформацію з різних систем (ERP, SCADA, CRM, ERM). Він створює семантично збагачену модель ЦДП.

✓ ЦДП – це симулятор та тестовий майданчик (модель). Його функція – моделювання та симулювання динамічної поведінки підприємства в реальному часі. ЦДП використовує структуру знань, надану ГЗ, як свою базову конфігурацію. Дані, зібрані з різних джерел, постійно оновлюють динамічний стан вузлів і ребер у ГЗ. Для ШНМ ЦДП генерує великі масиви синтетичних, але реалістичних даних (результати симуляцій), які можуть бути використані для навчання ШНМ. Це дозволяє тренувати алгоритми на сценаріях, які ще не відбулися у дійсності (кризові ситуації або хаотичні збурення тощо).

✓ ШНМ – це аналітик та прогнозист (інтелект). Його функція – витягувати патерни, прогнозувати, оптимізувати та приймати рішення. ШНМ бере дані з реального світу та результати симуляцій з ЦДП, а також використовує структуровану інформацію з ГЗ для кращого розуміння контексту. В цій системі ШНМ відіграє таку роль: а) для ЦДП ШНМ розробляє предиктивні моделі (наприклад, прогноз попиту) і вбудовує їх у двійник, роблячи його інтелектуальним симулятором; б) для ГЗ спеціальні графові нейронні мережі (ГНМ/GNN) можуть аналізувати структуру ГЗ, щоб автоматично знаходити пропущені зв'язки або несподівані взаємозалежності, тим самим покращуючи та доповнюючи сам ГЗ.

В системі «ЦДП+ГЗ+ШНМ» інформація циркулює в такому циклі: ГЗ надає структуру і семантику для віртуальної моделі ЦДП. Для реалізації застосовують графові бази даних, зокрема до прикладу, такі як Neo4j, GraphDB Enterprise by Ontotext, AWS Neptune, TigerGraph, ArangoDB, NebulaGraph, Dgraph, PuppyGraph та інші; ЦДП моделює динаміку і збирає оперативні дані; ШНМ аналізує ці дані (реальні та симульовані) і контекст ГЗ для прогнозування та оптимізації. Рішення від ШНМ передаються назад у ЦДП для перевірки або безпосередньо в систему управління для виконання.

Це створює інтелектуальний, самонавчальний цикл управління підприємством. А відтак в контексті формування ефективної проактивної системи управління підприємством в умовах економіки ДХ найкраще вести мову саме про таку – "ЦДП+ГЗ+ШНМ", систему її забезпечування. Нижче, на рис. 1, ми пропонуємо таку її архітектоніку, а рис. 2 пояснює інформаційно-функціональний взаємозв'язок компонент цієї системи.

За посиланням https://share.gemini.google/cUUMFYeoPLaX представлена анімаційна візуалізація архітектури та функціоналу ПСУ підприємством, яка була змодельована за допомогою ШІ (Gemini Canvas) на основі заданих авторами характеристик, зокрема в рис. 1 та 2 і табл. 1.

Ця архітектура демонструє: 1) три ключові ядра (ЦДП, ГЗ, ШНМ) у середньому рівні, які взаємодіють для здійснення інтелектуального аналізу, моделювання сценаріїв та прогнозування; 2) потік даних від фізичного підприємства вгору до «цифрового двійника» і «графа знань»; 3) потік рішень від «проактивної системи» (керівного резулюючого вузла, який відповідає за генерацію та активацію коригувальних рішень управління) вниз для фізичного втручання; 4) синергетичний цикл: ЦДП надає динаміку, ГЗ – контекст, а ШНМ – прогноз, що забезпечує здатність до проактивного управління підприємством. А верхній (керівний, аналітико-генеруючий) блок в цій архітектурі ПСУ відповідає за когнітивну оцінку та прийняття кінцевого рішення.

Види та логіка напрямків потоків інформації в нашій моделі такі (їх ілюструє таблиця 1).

1) ЗБІР ТА НАКОПИЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ про підприємство та його бізнес-середовище: фізичне підприємство (ФП) → ЦДП (дані в реальному часі); ФП → ГЗ (Історичні/Контекстуальні дані);

2) ОБРОБКА («Між інтелектуальними блоками»): ЦДП →ШНМ (Стани ЦДП для

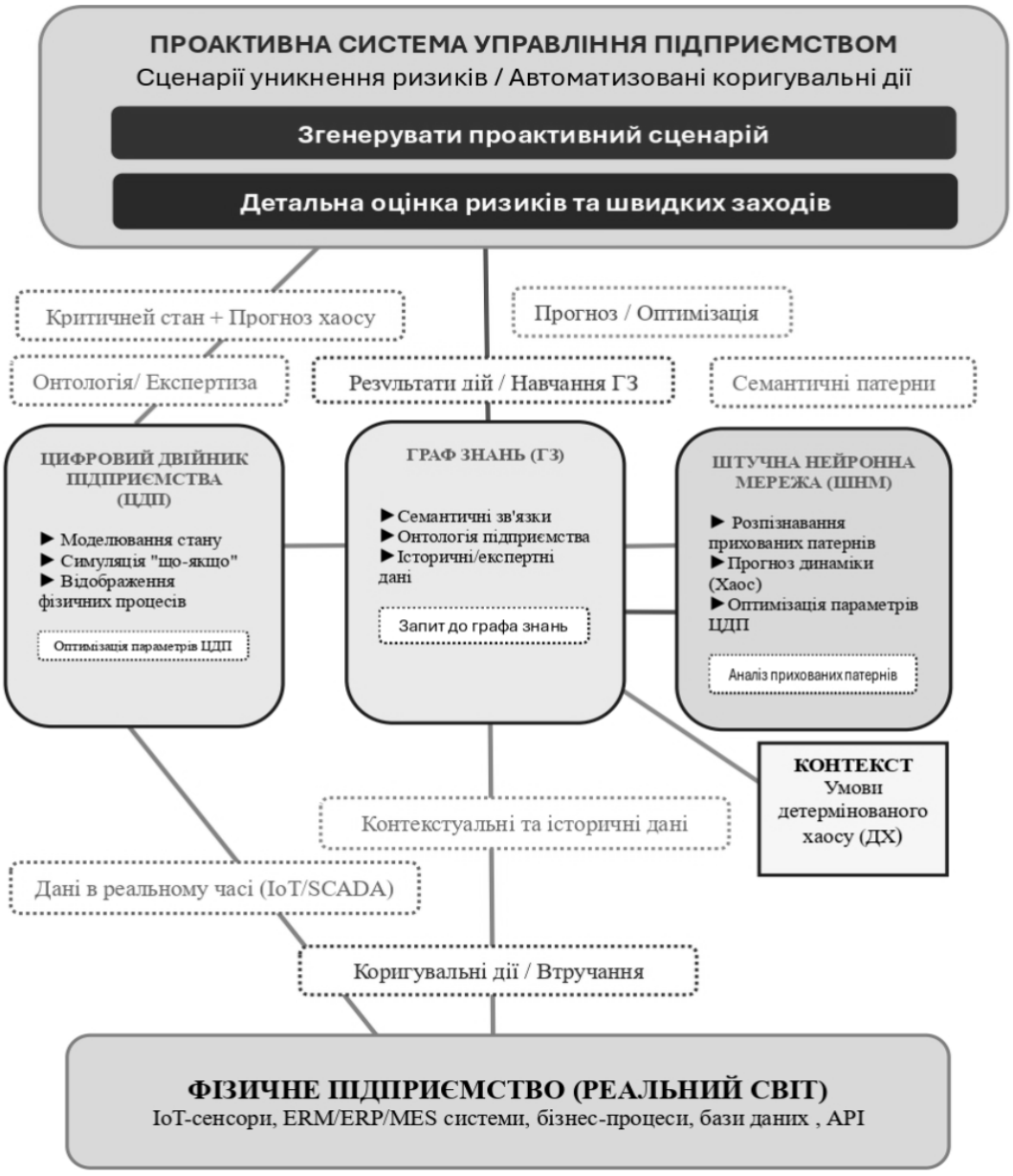

Рис. 1. Архітектура СУ підприємством на основі інтеграції ЦДП, ГЗ та ШНМ

Джерело: сформовано авторами

Функціонально-інформаційна взаємодія
компонент системи «ЦДП+ГЗ+ШНМ» (синергетичний ефект)

1. **ЦДП отримує дані в реальному часі** від фізичного підприємства та **контекст** (онтологію, експертні правила) від ГЗ.
2. **ШНМ** використовує **симуляційні стани ЦДП** та **семантичні патерни ГЗ** для навчання і прогнозування наступного стану системи в умовах хаосу.
3. **ШНМ повертає** ЦДП **оптимізовані параметри / прогнози**, які дозволяють ЦД точно моделювати поведінку в нелінійних режимах.
4. **Керівний блок проактивної система управління** (на основі результатів ЦДП та прогнозу ШНМ) формує **коригувальні дії** до того, як критична подія настане.
5. **Зворотний зв'язок:** результати проактивних дій зберігаються в ГЗ, збагачуючи його семантичну базу для подальшого навчання ШНМ.

Рис. 2. Функціонально-інформаційна взаємодія компонент системи «ЦДП+ГЗ+ШНМ»

Джерело: сформовано авторами

Таблиця 1

Розташування станів та потоків інформації в архітектурі «ЦДП+ГЗ+ ШНМ»

Стан/Потік інформації	Розташування на схемі	Напрямок руху	Роль у системі
Семантичні патерни	Лінія, що з'єднує **ГЗ** з **ШНМ**	**ГЗ → ШНМ**	**Навчання ШНМ.** Це високоякісні, структуровані знання, отримані з історичних даних ГЗ, які допомагають ШНМ розпізнавати неочевидні причинно-наслідкові зв'язки
Онтологія/ Експертиза	Лінія, що з'єднує **ГЗ** з **ЦДП**	**ГЗ →ЦДП**	**Контекстуалізація моделі** ЦДП. Забезпечує ЦДП експертними правилами та структурою знань для точного моделювання
Прогноз/ Оптимізація	Лінія, що з'єднує **ШНМ** з **ЦДП**	**ШНМ → ЦДП**	**Вхідні дані для ЦДП.** ШНМ надає ЦДП прогнози поведінки системи (особливо в умовах хаосу) та оптимальні параметри для симуляції
Критичний стан + Прогноз хаосу	Лінія, що з'єднує **ЦДП** з КБ **«Проактивної системи управління»** – КБ**ПСУ** (верхній блок)	**ЦДП →** КБ **ПСУ**	**Інформаційна основа для прийняття рішень.** Це вихідний результат моделювання, який виявляє, де і коли система вийде за допустимі межі.
Коригувальні дії / Втручання	Лінія, що з'єднує КБ**ПСУ** (верхній блок) з **«Фізичним підприємством» (ФП)** (нижній блок).	КБ **ПСУ → ФП**	**Виконавча функція.** Це кінцевий результат роботи системи – фізичне або програмне втручання в реальний світ.
Результати дій / Навчання ГЗ	Лінія (петля зворотного зв'язку), що з'єднує КБ**ПСУ** (верхній блок) з **ГЗ**.	КБ **ПСУ →ГЗ**	**Зворотний зв'язок та самонавчання.** Фіксація факту, чи була виконана дія успішною, для збагачення історичної/ експертної бази ГЗ.

Джерело: сформовано авторами

прогнозування); ГЗ →ШНМ (Семантичні патерни для навчання); ГЗ →ЦДП (Онтологія/Експертиза для моделі);

3) РЕЗУЛЬТУЮЧА («Від інтелекту до дії»): ШНМ → ЦДП (Прогноз/Оптимізація параметрів); ЦДП → «Проактивна система управління» (її керівний блок) – КБПСУ (Критичний стан + Прогноз Хаосу);

4) ВИХІДНА («Дія та зворотний зв'язок»): КБПСУ →ФП (Коригувальні дії / Втручання); КБПСУ →ГЗ (Результати дій / Навчання ГЗ – це зворотний зв'язок).

Усі ці елементи відображені на схемі як мітки до стрілок, що вказують напрямок руху обробленої інформації, прогнозів або коригувальних дій.

У верхньому блоці «ПСУ» (керівному, резулюючому блоці) ми заклали: а) функціонал можливості «генерації проактивного сценарію», який можна використовувати для того, щоб запропонувати реалістичні, обґрунтовані дії у відповідь на гіпотетичну кризу; б) функцію «детальної оцінки ризиків та швидких заходів», яка імітує здатність системи миттєво оцінювати критичний стан (отриманий від ЦДП/ШНМ) і генерувати конкретні інструкції для оперативного персоналу, що є наступним логічним кроком після генерації загального сценарію. Цей функціонал реалізований за допомогою EMR-системи, яка є підсистемою підтримки прийняття рішень, що швидко аналізує складну ситуацію та видає оцінку ризиків і конкретні, негайні кроки щодо їх мінімізації чи уникнення.

У блоці «граф знань» (ГЗ) передбачене поле вводу та функціонал «запит до графа», який імітує функцію семантичного пошуку, де ШІ генерує онтологічні зв'язки для заданого запиту (наприклад, «логістика»), що є ключовим для контекстуалізації даних у ГЗ.

В блоці «ЦДП» передбачена функція, відповідно до якої система («ЦДП+ГЗ+ШНМ») використовує знання та алгоритми ШІ для визначення найкращих вхідних параметрів для запуску складної симуляції «що-якщо», що дозволяє ЦДП працювати ефективніше.

Також у блоці ШНМ передбачена функція «аналізу прихованих патернів». Ця функція дозволяє ввести будь-який рядок із «сирими» даними сенсорів і ШІ, виконуючи роль прогностичного аналітика, ідентифікувати неочевидний патерн та надавати високорівневий прогноз для ЦДП. Це ідеально симулює роль ШНМ у виявленні хаотичних або прихованих зв'язків у великих обсягах даних.

Отже, наша архітектура має (передбачає) такі інтелектуальні вузли, що працюють на базі ШІ: 1) проактивна система (резулюючий керівний вузол): генерація кризових сценаріїв і детальна оцінка ризиків; 2) граф знань: семантичний пошук та визначення онтологічних зв'язків. У синергетичній архітектурі (ЦДП + ГЗ + ШНМ) ГЗ є сховищем «структурованої мудрості» і його функціонування критично залежить від ШІ для трьох основних процесів: «наповнення», «валідації/збагачення» та «використання»; 3) ЦДП: оптимізація вхідних параметрів для симуляцій.

Ключовими інструментами ШІ, які необхідні для ефективного функціонування ЦДП у моделі проактивного управління, є:

а) ШНМ та "Deep Learning", які є основним джерелом вхідної інформації «Прогноз/Оптимізація» для ЦДП. ШНМ обробляє величезні масиви даних (зокрема, з ГЗ і з реального світу) для виявлення складних, нелінійних зв'язків і прогнозування наступного стану системи в умовах хаосу. ЦДП отримує від ШНМ скориговані параметри та ймовірнісні прогнози, що робить його моделювання точнішим, ніж просте фізичне моделювання;

б) «Машинне навчання» для калібрування (ML for Calibration): використання алгоритмів для постійної корекції та калібрування математичних моделей ЦДП відповідно до реальних даних, що надходять від фізичного підприємства. Це забезпечує точність відображення реальності;

в) «Навчання з підкріпленням» (Reinforcement Learning – RL): для симуляції «що-якщо» сценаріїв всередині ЦДП. Агенти RL можуть багаторазово «програвати» різні стратегії управління в моделі ЦДП, щоб знайти оптимальну «Коригувальну дію / Втручання» до того, як вона буде застосована на реальному підприємстві в реальній ситуації. RL допомагає ЦДП швидко генерувати та оцінювати найбільш ефективні рішення для передачі КБ ПСУ;

г) «виявлення аномалій у реальному часі» (Anomaly Detection): алгоритми кластеризації та класифікації (часто на базі ML) безперервно аналізують вхідні дані з різних джерел, що живлять ЦДП. Ці інструменти ШІ швидко ідентифікують відхилення, які вказують на потенційний «Критичний стан», дозволяючи ЦДП сконцентрувати моделювання на проблемній зоні. Таким чином, якщо ГЗ використовує ШІ для розуміння (Knowledge), то ЦДП використовує ШІ для прогнозування та симуляції (Prediction & Simulation).

ШНМ: інтерпретація складних даних, аналіз та прогноз прихованих патернів хаосу. У контексті синергетичної архітектури (ЦДП+ГЗ+ШНМ) ШНМ є центральним прогностичним і оптимізаційним двигуном. Її функціонування забезпечується такими основними інструментами ШІ:

а) модель «глибокого навчання» – Deep Learning Models, яка є основою ШНМ. Використовуються моделі, такі як «рекурентні нейронні мережі» (RNN) або «трансформери», що спеціалізуються на обробці часових рядів (динамічні дані від ЦДП) та виявленні прихованих патернів у складних, нелінійних системах. Вони забезпечують генерування «Прогнозу хаосу» та «Прогнозу/Оптимізації» для ЦДП;

б) «графові нейронні мережі» (Graph Neural Networks – GNNs). Хоча GNNs нами вказані як інструмент ГЗ для збагачення знань, вони є критичними і для ШНМ. Вони дозволяють ШНМ безпосередньо використовувати «Семантичні патерни» з ГЗ, об'єднуючи бізнес-логіку з прогнозуванням. GNNs перетворюють структурну інформацію ГЗ у векторні представлення, які можуть бути інтегровані в глибокі моделі для більш обґрунтованого прогнозування;

в) великі мовні моделі (Large Language Models – LLMs), які використовуються для когнітивної функції – інтерпретації результатів. Вони перетворюють чисельні прогнози та виявлені патерни (які є складними для розуміння людиною) у зрозумілі звіти та рекомендації, що є частиною функціоналу КБ «ПСУ» підприємством. Вони забезпечують людськоорієнтований інтерфейс для «Критичного Стану» та «Коригувальних дій»;

г) «ансамблеві методи» (Ensemble Methods), які здійснюють об'єднання прогнозів кількох різних моделей (наприклад, RNN, LSTM, Transformer) для отримання більш стійкого та надійного кінцевого прогнозу. Це особливо важливо в умовах детермінованого хаосу (*ДХ*).

Вони підвищують надійність «Прогнозу/Оптимізації», що передається до ЦДП.

Таким чином, ШНМ використовує ці інструменти, щоб перетворити дані ЦДП та знання ГЗ на конкретні прогностичні та рекомендаційні висновки.

Якщо говорити про власне КБ ПСУ (верхній рівень) нашої моделі, то його робота забезпечується такими інструментами ШІ, як:

а) «LLMs/генеративний ШІ». LLMs є центральним інструментом КБ ПСУ. Вони отримують на вході чисельні дані про «Критичний стан + прогноз хаосу» від ЦДП/ШНМ і «Семантичні патерни» від ГЗ та здійснюють інтерпретацію цієї складної інформації, оцінку ризиків, генерацію людино-орієнтованих, реалістичних «Коригувальних дій / Втручань» та формування альтернативних «сценаріїв уникнення ризиків». Це перетворює прогноз на конкретний план дій;

б) «системи на основі правил та логічного виведення» (Rule-Based Systems & Reasoning). Хоча LLMs забезпечують гнучкість, ПСУ потребує жорстких запобіжників. Використовуються класичні системи ШІ, які застосовують експертні правила (наприклад, з ERM, які зберігаються в ГЗ) для фільтрації та верифікації рішень, згенерованих LLMs. Їх завдання – гарантувати, що «Коригувальні дії» не порушують законодавчих норм, стандартів безпеки або встановлених корпоративних політик;

в) «агентні системи та планування» (Agent Systems & Planning), так звані ШІ-агенти, використовуються для розбиття високорівневої «Коригувальної дії» на послідовність конкретних, атомарних кроків, які можуть бути виконані через API ERP/CRM (нижній рівень). Їх завдання полягає в автоматизації виконання рішення. Наприклад, якщо LLM вирішив «змінити пріоритет виробництва», агент планування знайде і виконає відповідні команди в ERP;

г) алгоритми МН «аналізу зворотного зв'язку» (Feedback Analysis ML). Алгоритми МН (наприклад, класифікатори) аналізують вплив виконаних «Коригувальних дій» на фізичне підприємство з метою оцінки успішності дії для формування якісного «Результату дій / навчання ГЗ» (зворотний зв'язок), таким чином замикаючи цикл самонавчання системи.

Отже, як бачимо, в представленій нами моделі ГЗ відповідає за структуровані знання, ЦДП – за точне моделювання, ШНМ – за прогноз хаосу, а верхній блок ПСУ (керівний, резулюючий) відповідає за когнітивну оцінку та прийняття кінцевого рішення.

Крім того, враховуючи чутливість рішень управління до правдивості даних, архітектура СУ проактивного змісту на основі ЦДП має застосовувати ще й технологію блокчейн для забезпечення незмінного походження даних та аудиту, для забезпечення довіри до результатів роботи цієї системи. Також, оскільки багато функцій, зокрема щодо прогнозування, наприклад, кредитного ризику, операційних збоїв чи порушень відповідності тощо повністю залежать від якості та своєчасності цих інтегрованих даних, запропонована нами система «ЦДП+ ГЗ+ШНМ» має містити методологію безперервної оцінки якості даних та підтвердження моделі, щоб гарантувати, що ЦД на основі ШІ є надійним інструментом для обґрунтування прийняття стратегічних рішень, зокрема щодо ризиків у режимі реального часу, тим самим дозволяючи підприємству краще орієнтуватися в мінливому бізнес-середовищі ДХ [1].

Також слід відзначити, що інформація про зовнішнє бізнес-середовище та його контекст інтегрується в систему через спеціалізовані потоки, які переважно «живлять» ГЗ і, опосередковано, інші модулі. Деталізація того, *куди, як і звідки* надходить ця зовнішня інформація, є такою.

Насамперед куди йде: основний інтегратор зовнішнього контексту – це ГЗ. Він слугує фільтром і сховищем зовнішніх даних, перетворюючи сиру інформацію (новини, регуляторні зміни тощо) на «Семантичні патерни» та «Онтологію/Експертизу» для подальшого використання; ШНМ отримує контекст опосередковано через ГЗ, щоб її «Прогноз хаосу» враховував зовнішні чинники (наприклад, прогноз зміни цін на сировину через геополітичну напругу); ЦДП отримує високоузагальнені параметри з ГЗ/ШНМ (наприклад, очікувані проблеми в ланцюгу постачання), щоб його симуляції «*що-якщо*» були реалістичними.

Те, звідки надходить інформація (джерела), ілюструє табл. 2.

Ці джерела можна умовно в нашій схемі розмістити на рівні «фізичне підприємство», але вони представляють його зовнішній сегмент.

Процес інтеграції зовнішнього контексту повністю залежить від ШІ-інструментів (сер-

вісів), що обслуговують ГЗ. В табл. 3 ми наводимо перелік сервісів (інструментів), методи інтеграції інформації, які вони застосовують, та напрями потоку зовнішньої інформації з подальшим її призначенням.

Як бачимо, зовнішнє бізнес-середовище (його контекст) надходить у систему переважно через ГЗ, який використовує передові методи NLP та LLMs, щоб перетворити хаотичну, сиру зовнішню інформацію на структуровану, придатну для моделювання та прогнозування мудрість.

І наостанок нашої розвідки слід звернути увагу на те, що без обробки «великих даних» (Big Data) та «добування даних» (Data Mining) вся ця інтелектуальна архітектура «ЦДП+ГЗ+ШНМ» просто не зможе функціонувати. Ці технології, або як їх ще називають – ШІ-інструменти чи ШІ-сервіси, є не окремими функціональними блоками, а базовою інфраструктурою та методологією, яка забезпечує життєдіяльність усіх ключових інтелектуальних модулів, системи проактивного управління підприємством. В представленій нами архітектурі вони є крос-функціональними сервісами, які забезпечують накопичення, зберігання та первинну обробку інформації, яка необхідна для роботи ГЗ, ЦДП та ШНМ. Вони розташовані на інфраструктурному рівні між «фізичним підприємством» (джерело сирих даних) та основними інтелектуальними модулями.

В табл. 4 ми вказали на роль та розташування “Big Data Infrastructure”. Фактично “Big Data” – це «технологічний стек» для зберігання, обробки та управління надвеликими обсягами різноманітних даних (структурованих, неструктурованих, потокових) з високою швидкістю.

Роль та методи “Data Mining” описані в табл. 5. “Data Mining” – це методологія

Таблиця 2

Джерела зовнішньої інформації про бізнес-середовище підприємства

Джерело	Тип інформації	Приклади
Системи CRM	Дані про ринок та клієнтів	Зміни попиту, відгуки клієнтів, активність конкурентів
Системи ERM	Нормативно-правові та регуляторні дані	Нові санкції, податкові зміни, екологічні норми
Веб-скрейпінг та агрегатори на кшталт You Control. Новин	Неструктуровані світові події	Геополітичні конфлікти, тарифні війни, економічні прогнози, природні катаклізми, що впливають на бізнес
Ринкові дані	Фінансові та біржові індикатори	Ціни на сировину, курси валют, ставки фрахту.
Звітність партнерів/ постачальників	Контекст ланцюга постачання	Звіти про затримки, фінансова стійкість ключових постачальників

Джерело: сформовано авторами

Таблиця 3

Інструменти ШІ, які застосовуються для інтеграції інформації з зовнішніх джерел в ГЗ

Інструмент ШІ	Метод інтеграції	Ключовий потік
Обробка природної мови (NLP/NLU)	Витягування змісту та зв’язків. NLP-моделі (часто на базі LLMs) сканують зовнішні неструктуровані тексти (новини, звіти) і виділяють ключові сутності (наприклад, «компанія А», «країна Y», «рішення Z») та їхні взаємозв’язки.	Неструктуровані дані → ГЗ (формування семантичних патернів)
Сентимент-аналіз (Sentiment Analysis)	Оцінка тону. Використовується для кількісної оцінки зовнішніх подій (наприклад, падіння довіри до валюти, негативні настрої щодо постачальника).	Зовнішній контекст → ГЗ (присвоєння ваг зв’язкам)
Навчання з підкріпленням (RL)	Оптимізація регуляторних правил. RL може динамічно оновлювати внутрішню **«Онтологію/ Експертизу»** в ГЗ, якщо зовнішні правила (наприклад, митні тарифи) швидко змінюються.	Регуляторні дані → ГЗ (оновлення онтології)

Джерело: сформовано авторами

та набір алгоритмів, які застосовуються до "Big Data" для виявлення прихованих, невідомих раніше патернів, кореляцій та аномалій.

Як бачимо, ШІ-сервіси "BD" та "DM" функціонують як фундамент архітектури ПСУ на основі інтеграції «ЦДП+ГЗ+ШНМ», де: "BD" надає інформаційну "сировину" (масштабне, швидке, різноманітне сховище); "DM" надає інструменти для розвідки (виявлення прихованих патернів); ЦДП, ГЗ, ШНМ використовують ці патерни та масиви для прогнозування, моделювання та проактивного управління.

Узагальнюючи та враховуючи зроблені нами уточнення та роз'яснення, ПСУ підприємством на основі синергетичної архітектури «ЦДП+ГЗ+ШНМ» можна представити в розширено-деталізованому вигляді (рис. 3).

А за посиланням https://share.gemini.google/nih52JlAKv3L представлена анімаційна візуалізація деталізованої архітектури та функціоналу ПСУ підприємством, яка була змодельована за допомогою ШІ (Gemini Canvas) на основі заданих авторами параметрів, у тому числі в рисунку 3 і таблицях 1–5.

Пояснення до потоків інформації (зміст і напрямки руху): 1) Сирі вхідні дані: («ФІЗИЧНЕ ПІДПРИЄМСТВО» → «ІНФРАСТРУКТУРА ДАНИХ»). Сирі дані з IoT-сенсорів, операційних систем (ERP, MES) та зовнішніх джерел; 2а) Потокові дані ЦДП: («ІНФРАСТРУКТУРА ДАНИХ» → ЦДП). Очищені та нормалізовані потокові дані

Таблиця 4

Роль та розташування "Big Data Infrastructure"

Вимір Big Data	Джерело даних	Використання в архітектурі ПСУ
Обсяг	Терабайти та петабайти даних IoT-сенсорів, транзакцій ERP/CRM, архівних звітів, зовнішнього веб-скрейпінгу тощо	**Розташування:** підтримує всі блоки. **Роль:** надання масиву даних для навчання ШНМ, побудови ГЗ та моделювання ЦДП
Швидкість	Постійний потік даних із SCADA-систем, IoT-сенсорів та біржових котирувань тощо	**Розташування:** живить ЦДП. **Роль:** Забезпечення ЦДП **«Даними в реальному часі»** для миттєвої корекції моделі та оперативного виявлення **«Критичного стану»**
Різноманітність	Структуровані дані (ERP), напівструктуровані дані, неструктуровані (тексти, новини, відгуки) тощо	**Розташування:** живить ГЗ. **Роль:** надання різнорідного контексту для побудови **«Онтології/Експертизи»** та виявлення **«Семантичних патернів»**

Джерело: сформовано авторами

Таблиця 5

Роль та методи "Data Mining" в архітектурі ПСУ на основі синергії «ЦДП+ГЗ+ШНМ»

Техніка Data Mining	Модуль-користувач	Функція в моделі
Кластеризація та сегментація	ГЗ, ШНМ	Виявлення груп схожих інцидентів, сегментів клієнтів або патернів збоїв, що покращує формування **«Семантичних патернів»**
Виявлення асоціативних правил	ГЗ, ПСУ	Знаходження кореляцій типу «Якщо відбувається А і В, то у 75% випадків відбувається С». Це формує частину **«Онтології/Експертизи»** для прийняття рішень
Виявлення аномалій (Anomaly Detection)	ЦДП	Фільтрація вхідних даних у реальному режимі часу для швидкої ідентифікації незвичайних подій, що можуть вказувати на **«Критичний Стан»** або потребу у **«Прогнозі хаосу»**
Побудова регресійних та класифікаційних моделей	ШНМ	Первинна обробка даних та вибір оптимальних ознак, які будуть використані для навчання глибоких нейронних мереж, що генерують **«Прогноз/Оптимізацію»**

Джерело: сформовано авторами

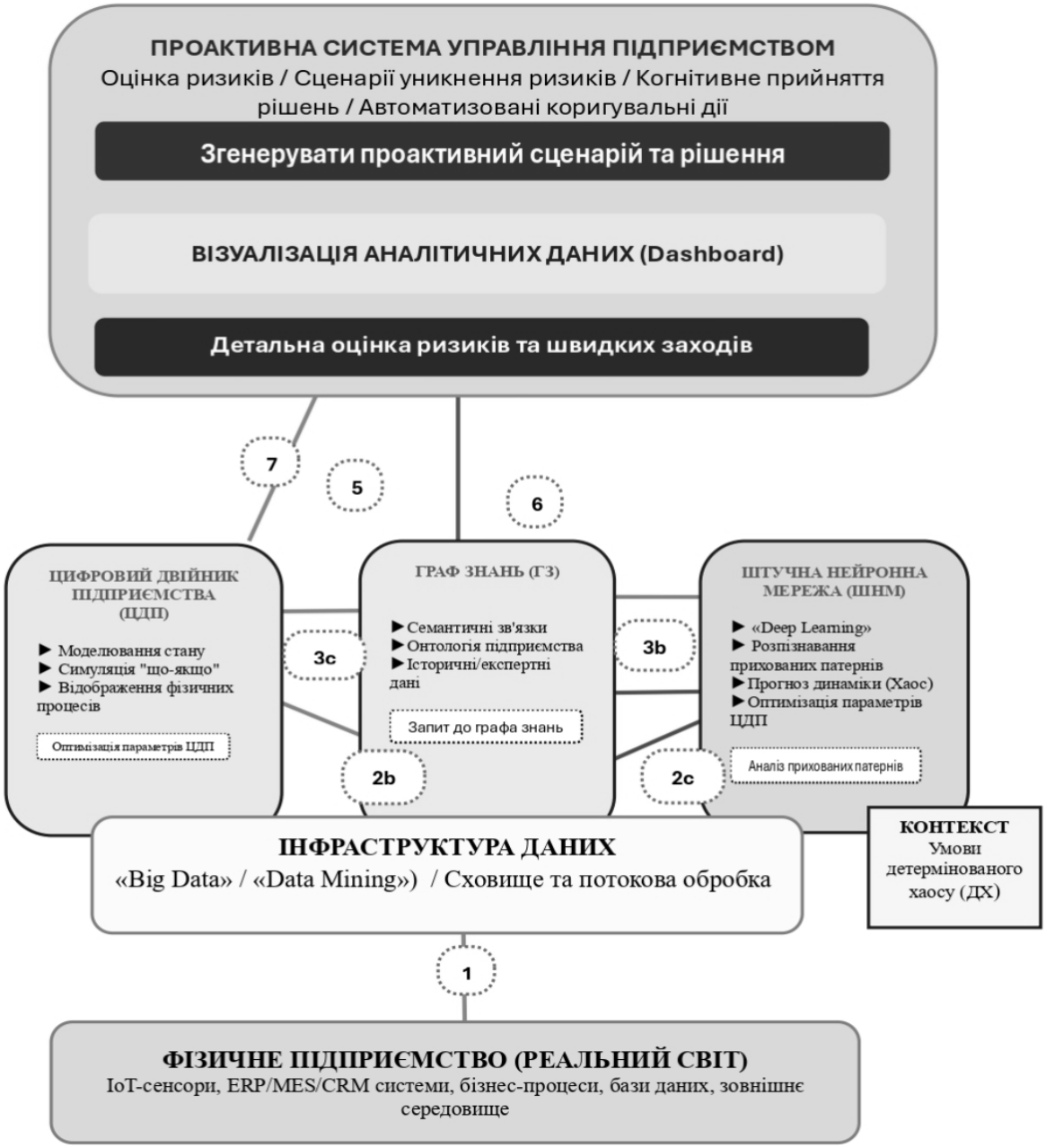

Рис. 3. Архітектура системи управління підприємством на основі інтеграції ЦДП, ГЗ та ШНМ (розширена деталізована модель)

Джерело: сформовано авторами

(Real-time) для підтримки актуального стану ЦД; 2b) Дані для ГЗ: («ІНФРАСТРУКТУРА ДАНИХ» → ГЗ). Історичні дані та результати екстракції патернів (“Data Mining”) для збагачення онтології; 2c) «Навчальні дані ШНМ»: («ІНФРАСТРУКТУРА ДАНИХ» → ШНМ). Великі набори даних (“Big Dat”) для навчання та перенавчання моделей «глибокого навчання» (“Deep Learning”); 3a) Відхилення ЦДП: (ЦДП → ШНМ). Поточні стани ЦДП та виявлені аномалії/відхилення від нормальних параметрів для прогнозування; 3b) Семантичний контекст: (ГЗ → ШНМ). Семантичні зв’язки, експертні знання та контекстні патерни, необхідні ШНМ для якісної інтерпретації даних; 3c) Онтологія ГЗ: (ГЗ → ЦДП). Структуровані знання та експертиза для налаштування симуляційних моделей ЦДП; 4a) Прогноз/Оптимізація: (ШНМ → ЦДП). Результати прогнозування динаміки та оптимізаційні параметри для запуску симуляції «що-якщо» в ЦДП; 5) Результуюча інформація: (ЦДП → КБ“ПСУ”). Звіт про критичний стан системи, результати симуля-

ції гіпотетичних сценаріїв та прогноз розвитку «хаосу»; 6) Коригувальні дії: (КБ «ПСУ» → «ФП»). Сформовані рішення управління (наприклад, перерозподіл ресурсів) для втручання в реальні процеси; 7) Зворотний зв'язок (навчання): (КБ «ПСУ» → ГЗ). Результати та ефективність виконаних коригувальних дій для постійного оновлення та збагачення ГЗ.

Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Синергетична модель «ЦДП+ГЗ+ШНМ» закладена в основу архітектури проактивної динамічної системи генерації та обґрунтування ефективних управлінських та бізнес-рішень на підприємствах.

Розглянута архітектура ПСУ здатна забезпечити високоточні та якісні моделювання, прогнозування та аналітику на основі інтеграції технологій ЦДП, ГЗ та ШНМ, які, своєю чергою, передбачають застосування певних алгоритмів ШІ для глибокого сценарного аналізу та прогнозування. В такій архітектурі закладений технологічний потенціал сучасних обчислювальних систем та інструментів для вирішення завдань, пов'язаних із: а) оптимізацією використання обмежених ресурсів, у т. ч. для забезпечення зменшення операційних витрат; б) оцінюванням економічного ефекту від тих чи інших рішень та дій, зокрема від впровадження тих чи інших інновацій ще до їх реалізації, обґрунтування прийняття або відмови від прийняття таких рішень; в) визначенням, оцінюванням та врахуванням ризиків від тих чи інших подій та управлінських рішень для їх мінімізації або уникнення.

Такий підхід до організації управління дозволятиме: приймати адекватні, дієві та ефективні рішення в реальному режимі часу на основі висновків, отриманих із даних від цифрового відображення діяльності підприємства та моделювання різних сценаріїв розвитку подій в бізнес-середовищі за допомогою технологій ШІ; забезпечувати операційну ефективність завдяки оптимізації та автоматизації; оперативно реагувати на зміни та краще задовольняти клієнтів завдяки якісним і точним маркетинговим прогнозам; максимально мінімізувати ризики для бізнесу, ефективно використовувати ресурси та економити кошти реального підприємства. А завдяки потенційній здатності виявляти та прораховувати всі можливі ризики під час віртуального моделювання різного розвитку подій в бізнес-середовищі за допомогою ЦД в поєднанні із функціоналом ГЗ та ШНМ менеджмент підприємства зможе ухвалювати узгоджені, безпечні та високоефективні не тільки тактично-оперативні, але й стратегічні рішення управління.

І у підсумку зазначимо, що хоча не тільки окремі ШІ-сервіси (ШІ-агенти), але тим більше потужні комплексні та всеохоплюючі ШІ-системи, такі як ЦДП (в синергетичній архітектурі «ЦДП+ГЗ+ШНМ») на сьогоднішній день лише починають активно впроваджувати та застосовувати в своєму функціоналі підприємницькі організації з метою покращення своєї керованості та підвищення ефективності, результативності та конкурентоспроможності, однак з огляду на їх величезний потенціал щодо швидкості, точності і якості вирішення різноманітних завдань, про які ми говорили в нашій розвідці, перед ними, цими технологіями, розгортається велика перспектива.

Конфлікт інтересів: Куцик П. О. займає посаду ректора університету, який є засновником журналу. Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався уповноваженим редактором, який не перебував у підпорядкуванні автора та не мав конфлікту інтересів. Автор не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Куцик П. О., Ковтун О. І. Організація проактивних системи та процесу управління підприємством та його бізнес-ризиками на основі синергетичної моделі «ЦДП+ГЗ+ШІ». *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2026. Вип. 3 (24). С. 96–102. https://doi.org/10.32782/dees.24-14

2. Digital twin (DT) market size & share analysis – growth trends and forecast (2026–2031). *Mordor Intelligence.* Page last updated on: July 31, 2026. URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-twin-market

3. «Побачити» родовище газу – як цифровий двійник допомагає ДТЕК краще управляти видобутком. *BusinessViews.* 01 листопада 2023. URL: https://businessviews.com.ua/ua/digital-transformation/id/dtek-cifrovij-dvijnik-2389/.

4. ДТЕК Київські регіональні електромережі повністю оцифрував мережі Київщини. *ДТЕК Київські регіональні електромережі.* 10.07.2025. URL: https://www.dtek-krem.com.ua/ua/news/dtek-kijivski-regionalni-elektromerezhi-povnistyu-ocifruvav-merezhi-kijivshchini

5. Інвестиції в цифровий двійник елеваторів окупилися менш ніж за рік. *НІБУЛОН.* 22.10.2025. URL: https://www.nibulon.com/investytsii-v-tsyfrovyj-dvijnyk-elevatoriv-okupylysia-mensh-nizh-za-rik/

6. INTERPIPE впровадив проєкт цифрової трансформації виробництва разом з IT-enterprise. *IT-enterprise.* URL: https://www.it.ua/cases/article/interpipes-digital-transformation-of-manufacturing

7. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital Twins. In: Complex Systems Engineering: Theory and Practice. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. P.p. 175–200. DOI: https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200

8. Riss U. V., Maus H., Javaid S., Jilek C. Digital Twins of an Organization for Enterprise Modeling. In: Grabis, J., Bork, D. (eds) The Practice of Enterprise Modeling. PoEM 2020. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2020. Vol. 400. Springer, Cham. P.p. 25–40. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63479-7_3

9. Edrisi F. et al. EA Blueprint: An Architectural Pattern for Resilient Digital Twin of the Organization. In: Adler R., et al. Dependable Computing – EDCC 2021 Workshops. EDCC 2021. *Communications in Computer and Information Science*. 2021. Vol. 1462. Springer, Cham. P.p. 120–131. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-86507-8_12

10. Falk Freese, André Ludwig. A conceptual framework for supply chain digital twins – development and evaluation. *International Journal of Logistics Research and Applications.* 2024. № 6. Pp. 676-698. DOI: https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2324895

11. Ihimoyan M. K., Ibokette A. I., Olumide F. O., Ijiga O. M., Ajayi A. A. The Role of AI-Enabled Digital Twins in Managing Financial Data Risks for Small-Scale Business Projects in the United States. *International Journal of Scientific Research and Modern Technology.* 2024, 3 (6), pp. 12–40. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14598498

12. Kulkarni V., Clark T., Barn B. S. (eds). Digital Twins for Simulation-Based Decision-Making. Publisher: Springer, 2025. 412 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89654-5

13. Kannan Ramasamy Digital Twins in Financial Services: From Simulation to Real-time Optimization. *Linkedin.* 2025. URL: https://www.linkedin.com/pulse/digital-twins-financial-services-from-simulation-ramasamy-phd--ezjac

14. Семененко Ю. С. Моделювання цифрових двійників бізнес-процесів як інструмент управління ефективністю компанії. *Наукові записки НУ «Острозька академія». Серія «Економіка» : науковий журнал.* Острог: Вид-во НаУОА, 2025. № 38 (66). С. 99–106. DOI: http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38(66)-99-106

15. Слободянюк О., Капустян І., Стрижак К. Цифрові двійники в інформаційній системі підтримки управлінських рішень. *Наукові перспективи. Серія «Економіка».* 2025. № 10 (64). С. 610-620. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-10(64)-610-620

16. Шевчук І. Б., Депутат Б. Я. Цифрові двійники у проєктному менеджменті: концепція та практичні застосування. *БІЗНЕСІНФОРМ.* 2025. № 10. С. 190–203. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2025-10-190-203

17. McKinsey & Company The state of AI in 2025: Agents, innovation, and transformation. 2025. 30 p. URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai?hl=uk

18. Enterprise Digital Twin. Eero Hosiaisluoma. 03-08.2025. URL: https://hosiaisluoma.fi/design/enterprise-digital-twin/

19. Головський В. Ф., Оксанич І. М., Гречанінов В. Ф. та ін. Модель мультиагентної системи побудови графа знань. *Математичні машини і системи*. 2026. № 2. С. 79–91. DOI: https://doi.org/10.34121/1028-9763-2026-2-79-91

20. Chang Su, Yong Han, Xin Tang, Qi Jiang, Tao Wang, Qingchen He. Knowledge-based digital twin system: Using a knowlege-driven approach for manufacturing process modeling. *Computers in Industry.* Volumes 159–160, August 2024. Page 104101. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104101

REFERENCES

1. Kutsyk, P. O. and Kovtun, O. I. (2026), Orhanizatsiia proaktyvnykh systemy ta protsesu upravlinnia pidpryiemstvom ta yoho biznes-ryzykamy na osnovi synerhetychnoi modeli "TsDP+HZ+ShI" [Organization of proactive systems and processes for managing an enterprise and its business risks based on the "DTP+HC+AI" synergetic model]. *Tsyfrova ekonomika ta ekonomichna bezpeka*, vol. 3 (24), pp. 96–102. DOI: https://doi.org/10.32782/dees.24-14

2. Digital twin (DT) market size & share analysis – growth trends and forecast (2026–2031). *Mordor Intelligence*. Page last updated on: July 31, 2026. Available at: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-twin-market

3. "Pobachyty" rodovyshche hazu – yak tsyfrovyi dviinyk dopomahaie DTEK krashche upravliaty vydobutkom ["Seeing" a gas field – how a digital twin helps DTEK better manage extraction]. *BusinessViews*. Available at: https://businessviews.com.ua/ua/digital-transformation/id/dtek-cifrovij-dvijnik-2389/.

4. DTEK Kyivski rehionalni elektromerezhi povnistiu otsyfruvav merezhi Kyivshchyny [DTEK Kyiv Regional Grids has fully digitized the networks of the Kyiv region]. *DTEK Kyivski rehionalni elektromerezhi*. Available at: https://www.dtek-krem.com.ua/ua/news/dtek-kijivski-regionalni-elektromerezhi-povnistyu-ocifruvav-merezhi-kijivshchini

5. Investytsii v tsyfrovyi dviinyk elevatoriv okupylysia mensh nizh za rik. *NIBULON*. Available at: https://www.nibulon.com/investytsii-v-tsyfrovyj-dvijnyk-elevatoriv-okupylysia-mensh-nizh-za-rik/

6. INTERPIPE vprovadyv proiekt tsyfrovoi transformatsii vyrobnytstva razom z IT-enterprise. *IT-enterprise*. Available at: https://www.it.ua/cases/article/interpipes-digital-transformation-of-manufacturing

7. Grieves M. (2019), Virtually Intelligent Product Systems: Digital Twins, In: Complex Systems Engineering: Theory and Practice, American Institute of Aeronautics and Astronautics, p.p. 175–200. DOI: https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200

8. Riss, U. V., Maus H., Javaid S. and Jilek C. (2020), Digital Twins of an Organization for Enterprise Modeling, In: Grabis, J., Bork, D. (eds) *The Practice of Enterprise Modeling. PoEM 2020*, Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 400, Springer, Cham, p.p. 25–40. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63479-7_3

9. Edrisi F. et al. (2021), EA Blueprint: An Architectural Pattern for Resilient Digital Twin of the Organization, In: Adler R., et al. *Dependable Computing – EDCC 2021 Workshops. EDCC 2021*, Communications in Computer and Information Science, vol. 1462, Springer, Cham, p.p. 120–131. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-86507-8_12

10. Falk Freese and André Ludwig (2024), A conceptual framework for supply chain digital twins – development and evaluation, *International Journal of Logistics Research and Applications*, no. 6, p. 676–698. DOI: https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2324895

11. Ihimoyan, M. K., Ibokette, A. I., Olumide, F. O., Ijiga, O. M. and Ajayi, A. A. (2024), The Role of AI-Enabled Digital Twins in Managing Financial Data Risks for Small-Scale Business Projects in the United States, *International Journal of Scientific Research and Modern Technology*, vol. 3 (6), pp. 12–40. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14598498

12. Kulkarni V., Clark T. and Barn, B. S. (eds) (2025), Digital Twins for Simulation-Based Decision-Making, Springer, 412 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89654-5

13. Kannan Ramasamy Digital Twins in Financial Services: From Simulation to Real-time Optimization. *Linkedin*. 2025. Available at: https://www.linkedin.com/pulse/digital-twins-financial-services-from-simulation-ramasamy-phd--ezjac

14. Semenenko, Yu. S. (2025), Modeliuvannia tsyfrovykh dviinykiv biznes-protsesiv yak instrument upravlinnia efektyvnistiu kompanii [Modeling digital twins of business processes as a tool for managing company performance]. *Naukovi zapysky NU "Ostrozhska akademiia". Seriia "Ekonomika" : naukovyi zhurnal*, no. 38 (66), pp. 99–106. DOI: http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38(66)-99-106

15. Slobodianiuk O., Kapustian I. and Stryzhak K. (2025), Tsyfrovi dviinyky v informatsiinii systemi pidtrymky upravlinskykh rishen [Digital Twins in a Management Decision Support Information System]. *Naukovi perspektyvy. Seriia "Ekonomika"*, no. 10 (64), pp. 610–620. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-10(64)-610-620

16. Shevchuk, I. B. and Deputat, B. Ya. (2025), Tsyfrovi dviinyky u proiektnomu menedzhmenti: konceptsiia ta praktychni zastosuvannia [Digital Twins in Project Management: Concept and Practical Applications]. *Biznes Inform*, no. 10, pp. 190–203. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2025-10-190-203

17. McKinsey & Company (2025) The state of AI in 2025: Agents, innovation, and transformation, 30 p. Available at:https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai?hl=uk

18. Enterprise Digital Twin. *Eero Hosiaisluoma.* Available at: https://hosiaisluoma.fi/design/enterprise-digital-twin/

19. Holovskyi, V. F., Oksanych, I. M., Hrechaninov, V. F. ta in. (2026), Model multyahatentnoi systemy pobudovy hrafa znan [Multi-agent system model for knowledge graph construction]. *Matematychni mashyny i systemy*, no. 2, pp. 79–91. DOI: https://doi.org/10.34121/1028-9763-2026-2-79-91

20. Chang Su, Yong Han, Xin Tang, Qi Jiang, Tao Wang and Qingchen He (2024), Knowledge-based digital twin system: Using a knowlege-driven approach for manufacturing process modeling. *Computers in Industry*, vol. 159–160, August, p. 104101. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104101

Дата надходження статті: 29.08.2026
Дата прийняття статті до публікації: 27.09.2026
Дата публікації статті: 09.11.2026