

ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОАКТИВНИХ СИСТЕМИ ТА ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ ТА ЙОГО БІЗНЕС-РИЗИКАМИ НА ОСНОВІ СИНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ «ЦДП+ГЗ+ШНМ»

ORGANIZATION OF PROACTIVE SYSTEMS AND PROCESS OF MANAGEMENT OF AN ENTERPRISE AND ITS BUSINESS RISKS ON THE BASIS OF THE SYNERGETIC MODEL "EDT+KG+ANN"

Запропоновано комплексну систему управління підприємством та його бізнес-ризиками на основі інтеграції цифрового двійника (ЦДП) та штучного інтелекту (ШІ) в межах синергетичної моделі "ЦДП+Граф Знань (ГЗ)+Штучна нейронна мережа (ШНМ)". Віртуальний профіль підприємства в реальному часі динамічно оновлює масив внутрішніх операційних та зовнішніх даних за допомогою сучасних інформаційних систем. Демонструється, як інтеграція ЦДП з ГЗ та локальними ШНМ в єдиній архітектурі дозволяє генерувати й обґрунтовувати оптимізаційні рішення для досягнення тактичних і стратегічних цілей: від мінімізації витрат до підвищення конкурентоспроможності. Симуляція різних сценаріїв ризиків у моделі допомагає визначити дії для пом'якшення їхнього впливу, мінімізувати синергетичний ризик та підтримувати КРІ підприємства в оптимальних межах в умовах детермінованого хаосу.

Ключові слова: цифровий двійник підприємства (ЦДП), генеративний штучний інтелект (ГШІ), штучні нейронні мережі (ШНМ), граф знань (ГЗ), керований даними бізнес-менеджмент, проактивне управління підприємством, архітектура синергетичної системи проактивного управління підприємством.

The relevance of introducing organizational and technological innovations based on modern IT into business management is driven by the high uncertainty and instability of today's globalized economy of deterministic chaos. An innovative management system utilizing AI can be built upon the Enterprise Digital Twin (EDT) as a comprehensive AI service. It is assumed that the virtual copy of the enterprise, namely its digital profile within the framework of the architecture of the synergistic model "EDT+KG+ANN" is systematically, permanently, systemically and dynamically updated to form an exhaustive array of necessary internal operational and external data in real time using appropriate information systems and interfaces. It is argued that the EDT in combination with the functionality of AI tools within the framework of the synergistic architecture "EDT+KG+ANN" is able to significantly, if not radically, increase the capabilities and improve the ability to model, simulate business situations and the consequences of making business and management decisions by management, and primarily to manage risks, avoid them or minimize them. The new generation EDT, integrated with KG and ANN, as a comprehensive AI tool (AI service), actually provides the opportunity to track and record the dynamic interaction and nonlinear dependencies between various business processes and risk factors for an enterprise in its current or potential business in the context of a certain state and dynamics of both its immediate business environment and the general macroenvironment in conditions of deterministic chaos. It is demonstrated how enterprise management systems built on the use of DTs, integrated with KGs and local ANNs in a single common architecture, generate (determine) and justify the best enterprise parameters and action options to achieve the tactical and strategic goals outlined by them: from minimizing risks and reducing costs to optimizing business operations and increasing efficiency and competitiveness. By running various risk scenarios in this model, it is possible to determine the optimal sequence of actions to mitigate the impact of these risks, in order to ultimately minimize the overall systemic synergistic risk and maintain "key performance indicators" (KPIs) for a real enterprise in conditions of deterministic chaos within the desired (optimal) limits.

Key words: digital twin of the enterprise (EDT), generative artificial intelligence (GAI), artificial neural networks (ANN), knowledge graph (KG), data-driven business management, proactive enterprise management, architecture of a synergistic system of proactive enterprise management.

УДК 004.89; 65.012.22

DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.24-14>

Куцук П.О.¹

д.е.н., професор,
професор кафедри обліку, контролю,
аналізу та оподаткування,
Львівський торговельно-економічний
університет

Ковтун О.І.²

к.е.н., професор,
професор кафедри економіки,
Львівський торговельно-економічний
університет

Kutsyk Petro

Lviv University of Trade and Economics

Kovtun Oleh

Lviv University of Trade and Economics

Постановка проблеми. В умовах інтенсивної цифровізації майже всіх сфер життя відбувається стрімкий розвиток різноманітних цифрових інструментів які інтегровані із штучним інтелектом (ШІ) та які можна утилітарно застосовувати (і які до речі вже почали успішно застосовуватися) для ефективного та швидкого вирішення різноманітних (як рутинних, так і унікальних) завдань, у тому числі й для покращення керування різноманітними (як простими, так і складними) об'єктами, структурами й процесами. Одним із напрямів застосування таких інструментів є забезпечення переходу

підприємницьких організацій (підприємств) від інтуїтивного до керованого даними ("data-driven management" – DDM) бізнес-менеджменту, який насамперед орієнтований на передбачення загроз із різних джерел, мінімізацію чи навіть уникнення їх ризиків для бізнесу, а відтак і на забезпечення конкурентної переваги в бізнесі в сучасній мінливій глобалізованій економіці детермінованого хаосу. В свою чергу цей, обумовлений високим рівнем невизначеності та нестабільності сучасної глобалізованої економіки детермінованого хаосу, перехід потребує запровадження відповідних

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5795-9704>

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2380-520X>

організаційно-технологічних інновацій в систему управління бізнесом. І основою такої інноваційної системи бізнес-менеджменту, яка використовує можливості сучасних технологій із ШІ, як на наш погляд, може і має стати, а фактично вже стає так званий цифровий двійник підприємства – ЦДП ("enterprise digital twins" – EDT), який фактично є комплексним ШІ-сервісом.

Позитивна роль і отримання значного ефекту від застосування цифрових двійників в практиці управління реальними фізичними об'єктами сьогодні вже є беззаперечним фактом. Свіжим наочним прикладом цього може слугувати використання ЦД агрохолдингом ТОВ «Нубілон» [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню потенціалу застосування технології цифрових двійників в практиці управління як окремими фізичними активами та процесами, так і цілими організаціями, у тому числі підприємствами (підприємствами) сьогодні присвячено багато наукових праць зарубіжних вчених: M. Grieves [2], Riss U.V., Maus H., Javaid S. & Jilek C. [3], Edrisi F. et al. [4], Falk Freese, André Ludwig [5], Ihimoyan M. K., Ibokette A. I., Olumide F. O., Ijiga O. M., Ajayi A. A. [6], Kulkarni V., Clark T., Barn B.S. [7], так і вітчизняних авторів: Семененко Ю. С. [8], Слободянюк О., Капустян І. та Стрижак К. [9]. У 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 двонаправленому зв'язку між фізичним та віртуальним об'єктами управління.

Однак питання архітектури та принципів функціонування ЦД підприємницьких організацій як комплексних ШІ-систем в безпосередній інтеграції із такими технологіями як «Графи Знань» та «Штучні Нейронні Мережі» (ШНМ), "Big Data", "Deep Learning", "Machine Learning", "Data Mining" та іншими все ще перебуває якщо вже не на початковій стадії, то на стадії експериментування (про що свідчить опитування проведене консалтинговою компанією МакКінсі проведеною влітку 2025 року, звіт за матеріалами якого була опублікований 5 листопада 2025 року [10, с. 1–30]. І лише незначна частина наукових робіт, в межах певних тематичних розвідок, досліджує ці питання.

Беручи це до уваги, у статті нами буде представлено погляд на ЦДП як на метафрейм вичерпної інформації про підприємство, вміст якого постійно оновлюється, і який інтегровано із певною локальною ШНМ, яка охоплює і задіює різні інструменти ШІ, які власне й допомагають використовувати такий оцифрований багаторівневий

чи багаторівневий профіль підприємства (у вигляді певного роду багатопланової морфологічної матриці Цвіккі) для сценарного прогнозування і прогнозової аналітики розвитку бізнес-середовища і подій в ньому, для виявлення, аналізу та оцінки можливих ризиків, і, що головне, для генерації стратегічних альтернатив рішень та дій щодо уникнення або мінімізації цих ризиків, та обґрунтування конкретних як стратегічних, так і тактичних рішень управління щодо ключових питань функціонування та розвитку підприємства в умовах детермінованого хаосу (ДХ). Налагодження ефективних системи і процесу управління підприємствами в умовах ДХ та перетворення їх на стійкі, але гнучкі, ефективні та конкурентоспроможні підприємницькі структури, технологічно та організаційно допоможуть їх ЦД, інтегровані із можливостями ШІ в рамках систем проактивного управління на основі синергії архітектури «ЦДП+Граф Знань+ШНМ».

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування концептуальної архітектури і принципів функціонування комплексної синергетичної системи проактивного управління підприємством та його бізнес-ризиками на основі інтеграції цифрового двійника підприємства (ЦДП), графа знань (ГЗ) та штучної нейронної мережі (ШНМ) в умовах детермінованого хаосу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Насамперед зазначимо, що феномен «цифровий двійник» (ЦД) є організаційно-технологічною інновацією, яка була згенерована в контексті можливостей, що створила та надала нам 4-та, інформаційна чи як її ще називають – цифрова НТР. Ця інновація має колосальний потенціал для покращення рівня та якості контролю з боку менеджменту, над об'єктами, як умовно-простими (активами), так і складними, комплементарними (в структурному і функціональному значенні), над процесами (технологічними, виробничими, бізнесовими, операційними) та діяльністю. ЦД здатні підвищити рівні адекватності, ефективності та точності управління своїми реальними (фізичними) об'єктами як в оперативному, так і стратегічному контексті. Особливої уваги в цьому плані заслуговують ЦД таких складних об'єктів-систем як підприємницькі організації (коротко – підприємства), які є відкритими соціально-економічними системами, що інтегрують в своїй (різноаспектній) структурі різні підрозділи та складові (організаційні, процедурні, функціональні, процесні та операційні підрозділи), та в свою чергу, є інтегрованими багатьма зв'язками (зокрема як партнерськими, такі і конкурентними) в динамічно-мінливе глобалізоване конкурентне зовнішнє бізнес-середовище ДХ, з великою кількістю в ньому як наявних (існуючих), так і потенційних, при цьому й навіть не очікуваних, можли-

востей та загроз для їх успішної господарської діяльності.

Свіжим наочним прикладом успішного застосування ЦДП в практиці організації успішного вітчизняного бізнесу та ефективної системи його управління є, вже згадуваний на початку нашої розвідки, один із найбільших операторів зернового ринку України агрохолдинг ТОВ «Нібулон» [1].

Початково цифрові двійники підприємств – ЦДП (“Enterprise digital twins” – EDT) застосовувалися для забезпечення більш адекватного, якісного та швидкого виконання певних монотонних, технічних дій та вирішення шаблонних, стандартних завдань, які стосуються оперативного управління на цих реальних підприємствах і т. ч. підвищення його ефективності.

ЦДП нового покоління – це динамічний, перманентно оновлюваний, цифровий дублікат, у вигляді системи максимально вичерпного переліку показників-індикаторів, так званих метрик, про стан і розвиток в реальному режимі часу всіх об’єктів, активів, процесів та взаємодій на підприємстві і підприємства, тобто взаємодій як у його внутрішньому середовищі, його внутрішній структурі, так і з його зовнішнім оточенням (як безпосереднім бізнес-оточенням, яке формується з конкурентів, партнерів, постачальників, клієнтів, споживачів та інших контрагентів в його бізнесі, так і з загальним макросередовищем з огляду технологічного, економічного, соціального, екологічного, регуляторного та іншого типу впливу цього середовища детермінованого хаосу на підприємство), взаємопов’язаних між собою та об’єднаних із певними алгоритмами їх (цих показників) цільового опрацювання (які своєю чергою реалізуються за допомогою різних інструментів ШІ, зокрема такими як “Big Data”, “Deep Learning”, “Machine Learning”, “Data Mining” та інших) в архітектурі певної локальної проактивної синергетичної системи «ЦДП+Граф Знань+ШНМ», яка також інтегрована і в глобальну інформаційну мережу з належним рівнем забезпечення власної кібербезпеки.

А власне сам ЦДП, як динамічний (активний) інформаційний профайл підприємства, можна представити у вигляді метафрейма з гіперсилками (покликаннями) на оцифровані бізнес-одиниці (“Strategic Business Unit” – SBU), які деталізують та конкретизують головний метафрейм ЦДП [11, с. 22]. Цей метафрейм ЦДП бажано доповнити цифровим профілем так званих «стратегічних зон господарювання» підприємства – СЗГ, тобто галузево-ринкових сегментів зовнішнього середовища, в яких підприємство в особі його стратегічних господарських центрів (СГЦ), провадить чи планує провадити свій бізнес в майбутньому, і, власне, в контексті яких має проводитися сценарне моделювання ситуацій та розвитку подій, виявлення та оцінка, передбачуваних за

допомогою ШІ-алгоритмів, ризиків і, на сам кінець, генерація альтернативних та пропонування оптимальних управлінських рішень щодо уникнення чи мінімізації цих ризиків. Своєю чергою цей метафрейм ЦДП (потракуємо його як активне дерево знань про підприємство включно з інформацією про його KPI “Key Performance Indicators” – вимірювані фінансові та нефінансові метрики, які допомагають компаніям і співробітникам оцінити прогрес у досягненні стратегічних цілей, відстежувати продуктивність та ухвалювати рішення, що базуються на даних) та про зв’язки і взаємодію із партнерами і контрагентами в його зовнішньому бізнес-середовищі) має бути інтегрований з певною локальною ШНМ, яка охоплює різні інструменти ШІ, які власне й допомагають використовувати такий оцифрований багаторівневий чи багаторівневий профіль підприємства (у вигляді свого роду багатопланової морфологічної матриці Цвікі [12, с. 105]) для сценарного прогнозування і прогнозної аналітики розвитку бізнес-середовища і подій в ньому, виявлення, аналізу та оцінки можливих ризиків, і, що головне, для генерації стратегічних альтернатив рішень та дій щодо уникнення або мінімізації цих ризиків, та обґрунтування конкретних як стратегічних, так і тактичних рішень управління щодо ключових питань функціонування та розвитку підприємства в умовах детермінованого хаосу. Мається на увазі, що інструменти ШІ, які застосовуються в межах локальної ШНМ здатні здійснювати як прогнозування майбутніх тенденцій в бізнесі (бізнес-середовищі) на основі взаємозв’язків у графах знань (наприклад, прогнози падіння попиту та відтоку клієнтів, збоїв в ланцюжку поставок сировини чи комплектуючих, фінансових та інших ризиків тощо), так і моделювання, контекстуалізацію і оптимізацію самих цифрових двійників, їх поведінки, у відповідності до цих прогнозів, а також проводити симуляції для перевірки сценаріїв «що, якщо» як для підприємства в цілому і його окремих СГЦ, так і для окремих бізнес-процесів на підприємстві (їх оцифрованих результатів), а відтак пропонувати оптимальні параметри для діяльності та розвитку реального підприємства на основі змодельованого ЦД, оптимального для відповідного сценарію розвитку подій.

У контексті побудови ефективної системи проактивного та прескриптивного управління підприємством, такий ЦДП можна використовувати насамперед в режимі безпечного та безризикованого симулятора для моделювання та тестування можливих альтернативних ситуацій та сценаріїв розвитку подій [13] як в безпосередньому галузево-ринковому бізнес-середовищі підприємства, так і в макро- (економічному, технологічному, політичному, соціальному, екологічному, регуляторному та інших) середовищі навколо нього за принципом «що, якщо?» – це принцип мислення,

що використовує гіпотетичні запитання для дослідження потенційних наслідків певних подій, ідей або дій. Він дозволяє мислити креативно та аналітично, ставлячи собі запитання: «що, якщо (щось станеться)?», щоб уявити різні сценарії та їхні результати. Такий підхід може бути застосований в рамках моделі ЦД при плануванні, прийнятті рішень та вирішенні проблем розвитку для реального підприємства цього ЦД в умовах ДХ. Зокрема, наприклад, він дозволяє моделювати і оцінювати вплив на реальне підприємство появи нових технологій, зміни смаків споживачів, появи нових конкурентів чи товарів-субститутів, регуляторних змін, певних геополітичних подій та прояву різного типу ризик-факторів.

Пропонована нами архітектура ЦДП, який інтегровано із ГЗ та певною локальною ШНМ, яка має вигляд і структуру багатошарового прецептрона Розенблата [14, с. 86, 99], абстрактно може бути структурована на такі рівні:

- фізичний (реальний) рівень – внутрікорпоративні системи даних (ERP, CRM, HRM та інші), Інтернет речей, зовнішні джерела даних, у тому числі різні хмарні системи тощо;

- рівень збору та інтеграції даних – забір, очищення та контекстуалізація даних (тобто співвіднесення інформації з її оточенням або ситуацією для кращого розуміння та належної оцінки чи інтерпретації значення цієї інформації). Контекстуалізація допомагає перетворити сирі дані на корисну інформацію, надаючи їм сенс у конкретному контексті, наприклад, у межах конкретної ситуації) у режимі реального часу);

- рівень цифрового двійника для моделювання (багатодоменні моделі, механізми моделювання – на цьому рівні (в цьому шарі) здійснюється відображення суб'єктів бізнесу (підприємств та їх окремих бізнес-одиниць), бізнес-процесів, ланцюгів поставок та ІТ-систем у віртуальній моделі;

- рівень застосування технологій ШІ та здійснення аналітики – на цьому рівні застосовуються машинне 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 (в цьому шарі) ШНМ виявляє 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).

Основними проблемами в цій моделі (ЦДП+ШНМ) є інтеграція різномірних джерел даних в єдину, високоточну віртуальну модель. Для вирішення цієї проблеми застосовується семантичний рівень даних, з використанням технології

"Knowledge Graph" – KG (*Граф знань* – ГЗ), для встановлення змістовних зв'язків між різномірними даними, які надають ШІ необхідний контекст, зокрема для аналізу системних ризиків. Графи знань забезпечують ШІ бізнес-контекстом, допомагаючи робити обґрунтовані рішення та розумну інтеграцію даних. Можна сказати, що «граф знань» виступає в ролі «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. Він поєднує інформацію на різних рівнях ЦДП та забезпечує контекстно-залежне мислення, прийняття рішень та автоматизацію [15].

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, яку 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 (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». Його функція – моделювання та симулювання динамічної поведінки підприємства в реальному часі. ЦДП використовує структуру знань, надану ГЗ, як свою базову конфігурацію. Дані, зібрані 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 реальному світі (кризові ситуації, хаотичні збурення чи збої);

- ✓ ШНМ – це «аналітик та прогнозіст (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.

У 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 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 ДХ найкраще вести мову саме про таку – «ЦДП+ГЗ+ШНМ» систему її забезпечування. Види та логіку потоків інформації в цій моделі ілюструє сформована нами табл. 1.

У представленій нами моделі ГЗ відповідає за структуровані знання, ЦДП – за точне моделювання, ШНМ – за прогноз хаосу, а ПСУ відповідає за когнітивну оцінку та прийняття кінцевого рішення.

Крім того, враховуючи чутливість рішень управління до правдивості даних, архітектура ЦДП має включати ще й технологію блокчейн для забезпечення незмінного походження даних та аудиту, для забезпечення довіри до результатів роботи ЦДП. Також 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.

Слід відмітити, що у нашій синергетичній архітектурі, інформація про зовнішнє бізнес-середовище та його контекст інтегрується в систему через спеціалізовані потоки, які переважно «живлять» ГЗ і, опосередковано, інші модулі. Про деталізацію того, куди, як і звідки надходить ця зовнішня інформація мова йтиме у наступному дослідженні.

Висновки. ЦДП – динамічні віртуальні моделі, які відображають послідовність операцій, взаємозалежності, критичні точки та потенційні ризики, що виникають під час діяльності підприємницької організації як відкритої системи інтегрованої в певне бізнес-середовище ДХ. Вони інтегрують дані про підприємство, як відкрити систему, з ERP-, CRM-, HRM- та ERM-систем, інших операційних систем підприємства (SCM; MES тощо), хмарних сервісів та платформ (наприклад, YouControl), інших зовнішніх джерел, а також потужні інструменти аналітики, які використовують ШІ та машинне навчання (зокрема різноманітні інструменти BI із підтримкою ШІ) для сценарного прогнозування та оптимізації внутрішньої та зовнішньої взаємодії його (підприємства) організаційних та функціональних підсистем та елементів.

Синергетичні моделі «ЦДП+ГЗ+ШНМ» є потужним інноваційним механізмом перетворення систем менеджменту підприємницьких організацій на проактивну динамічну модель генерації та обґрунтування ефективних управлінських та бізнес-рішень. Обґрунтування раціональних рішень та дій на основі і при допомозі ЦДП відбувається шляхом використання максимально вичерпних великих масивів реальних даних як про саме підприємство, і його бізнес-процеси, так і про його

Таблиця 1

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

Стан/Потік інформації	Напрямок руху	Роль у системі
Семантичні патерни	ГЗ → ШНМ	Навчання ШНМ – це високоякісні, структуровані знання, отримані з історичних даних ГЗ, які допомагають ШНМ розпізнавати неочевидні причинно-наслідкові зв'язки
Онтологія/ Експертиза	ГЗ → ЦДП	Контекстуалізація моделі ЦДП – забезпечує ЦДП експертними правилами та структурою знань для точного моделювання
Прогноз /Оптимізація	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	ЦДП → ПСУ	Інформаційна основа для прийняття рішень – це вихідний результат моделювання, який виявляє, де і коли система вийде за допустимі межі
Коригувальні дії / Втручання	ПСУ → ФП	Виконавча функція – це кінцевий результат роботи системи – фізичне або програмне втручання в реальний світ
Результати дій / Навчання ГЗ	ПСУ → ГЗ	Зворотний зв'язок та самонавчання – фіксація факту, чи була виконана дія успішною, для збагачення історичної/експертної бази ГЗ

Джерело: сформовано авторами

бізнес-середовище. А впровадження ЦДП дозволяє отримувати вимірний (оцінювати) економічний ефект від прийняття альтернативних бізнес-та управлінських рішень, оскільки технологія в їх основі (яка ґрунтується на методах і алгоритмах ШІ) в контексті архітектури синергетичної системи «ЦДП+ГЗ+ШНМ» дозволяє проводити сценарне прогнозування та оцінювати наслідки різних варіантів управлінських та бізнес-рішень ще до їх практичної реалізації. При цьому цифрове відображення діяльності підприємства в режимі реального часу на основі даних дозволяє "програвати" в віртуальному середовищі різноманітні альтернативні варіанти рішень та дій за різних сценаріїв розвитку бізнес-середовища, процесів та подій в ньому без настання реальних (де-факто) негативних наслідків для реального підприємства від невдалих варіантів рішень і дій, та, у підсумку, визначати найбільш ефективні рішення щодо ключових питань функціонування та розвитку цього підприємства.

У наступних наших публікаціях ми детальніше розберемо принципи та механізм функціонування системи проактивного управління підприємством на основі синергетичної архітектури «ЦДП+ГЗ+ШНМ», яка передбачатиме зокрема функціонали та опції для оцінки та відображення фактичного та гіпотетичного (за різних сценаріїв «що якщо?» розвитку подій в бізнес-середовищі) рівнів KPI підприємства.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. НУБІЛОН. URL: <https://www.nibulon.com/investysii-v-tsyfrovyj-dvijnyk-elevatoriv-okupylysia-mensh-nizh-za-rik/>
2. Grieves, M. (2019). Virtually Intelligent Product Systems: Digital Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, pp. 175–200. DOI: <https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200>
3. Riss U.V., Maus H., Javaid S., 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., pp. 25–40. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63479-7_3
4. 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
5. Falk Freese, André Ludwig. A conceptual framework for supply chain digital twins – development and evaluation (2024). *International Journal of Logistics Research and Applications*, № 6, pp. 676–698. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2324895>
6. Ihimoyan, M. K., Ibokette, A. I., Olumide, F. O., Ijiga, O. M., & 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*, 3 (6), pp.12–40. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14598498>

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

8. 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](http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38(66)-99-106)

9. 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](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-10(64)-610-620)

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

11. Ковтун, О. І. (2013). Когнітивний підхід до визначення змісту, представлення та формування стратегії сучасних підприємств. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (3 (9), С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.12253>

12. Zwicky F. (1969) *Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach*. Toronto: The Macmillan Company, 276 p.

13. Matta A., Lugaresi G. (2024). An Introduction to Digital Twins. *Winter Simulation Conference (WSC)*, Orlando, FL, USA, 2024, pp. 1281–1295. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC63780.2024.10838793>

14. Frank Rosenblatt (1962). *Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*. Spartan Books, 648 p. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015039846566&seq=1>

15. Eero Hosiaislouma (2025). *Enterprise Digital Twin*. URL: <https://hosiaislouma.fi/design/enterprise-digital-twin/>

REFERENCES:

1. NUBILON. Available at: <https://www.nibulon.com/investysii-v-tsyfrovyj-dvijnyk-elevatoriv-okupylysia-mensh-nizh-za-rik/>
2. Grieves, M. (2019). Virtually Intelligent Product Systems: Digital Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, pp. 175–200. DOI: <https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200>
3. Riss U.V., Maus H., Javaid S., 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., pp. 25–40. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63479-7_3
4. 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., pp. 120–131. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-86507-8_12

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

6. Ihimoyan, M. K., Ibokette, A. I., Olumide, F. O., Ijiga, O. M., & 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*, 3 (6), pp. 12–40. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14598498>

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

8. Semenenko Yu. S. (2025). Modeliuvannia tsyfrovyykh dviinykh biznes-protsesiv yak instrument upravlinnia efektyvnistiu kompanii [Modeling digital twins of business processes as a tool for managing company efficiency]. *Naukovi zapysky NU "Ostrozka akademiia". Serii "Ekonomika" – Scientific notes of the National University "Ostroh Academy". Series "Economics": Scientific Journal*. Ostroh: Publishing house of the NaUOA. № 38 (66). p.p. 99–106. DOI: [http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38\(66\)-99-106](http://doi.org/10.25264/2311-5149-2025-38(66)-99-106)

9. Slobodianiuk O., Kapustian I., Stryzhak K. (2025). Tsyfrovii dviinyky v informatsiinii systemi pidtrymky

upravlinskykh rishen [Digital twins in the information system for supporting management decisions]. *Naukovi perspektyvy. Serii "Ekonomika" – Scientific perspectives. Series "Economy"*. № 10 (64), pp. 610–620. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-10\(64\)-610-620](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-10(64)-610-620)

10. 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>

11. Kovtun, O. I. (2013). Kohnityvnyi pidkhid do vyznachennia zmistu, predstavlennia ta formuvannia stratehii suchasnykh pidpriemstv [Cognitive approach to defining the contents, presentation, and formation of modern enterprise strategy]. *Tekhnolohichnyi audyt ta rezervy vyrobnytstva – Technology Audit and Production Reserves*, 1(3(9)), pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.12253>

12. Zwicky F. (1969) *Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach*. Toronto: The Macmillan Company, 276 p.

13. Matta A., Lugaresi G. (2024). An Introduction to Digital Twins. *Winter Simulation Conference (WSC)*, Orlando, FL, USA, 2024, pp. 1281–1295. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC63780.2024.10838793>

14. Frank Rosenblatt (1962). *Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*. Spartan Books, 648 p. Available at: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015039846566&seq=1>

15. Eero Hosiaisluma (2025). *Enterprise Digital Twin*. Available at: <https://hosiaisluma.fi/design/enterprise-digital-twin/>

Дата надходження статті: 18.06.2026

Дата прийняття статті до публікації: 20.07.2026

Дата публікації статті: 23.07.2026