УДК 005.21:004.94
DOI: https://doi.org/10.32782/2415-3583/42.1

Базик О.В.
здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9678-6420

Гринько Т.В.
доктор економічних наук, професор,
завідувач кафедри менеджменту та туристичного бізнесу
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7882-4523

МУЛЬТИГРАФОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ У СИСТЕМІ ЦИФРОВОГО УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМНИЦЬКОЮ СТРУКТУРОЮ

Статтю присвячено проблемі переходу підприємницьких структур від фрагментарної цифровізації окремих функцій до інтегрованого цифрового управлінського контуру. Метою дослідження є розроблення формалізованого інструментарію оцінювання міжфункціональних наслідків управлінських рішень до їх реалізації на основі системи цифрових двійників підприємства. Цифровий двійник трактовано не як технологічну копію активу, а як управлінський контур, що поєднує дані, аналітику та прийняття рішень. Виокремлено п'ять типів цифрових двійників і вісім типів зв'язків між елементами системи управління. Формалізовано мультиграфову модель MG = {V, E, L, W, T}, у якій зв'язки розрізняються за типами, ваговими коефіцієнтами та часовими шарами, і визначено її місце в семирівневій архітектурі цифрового управління. Обчислювальний механізм моделі показано на сценарії «затримка постачання».

Ключові слова: *цифровий двійник, мультиграф, модель управління, підприємницька структура, цифрова трансформація, ваговий коефіцієнт, сценарне моделювання.*

Постановка проблеми. Цифрова трансформація підприємницьких структур здебільшого розгортається фрагментарно: облік, логістика, продажі, виробниче планування автоматизуються послідовно й незалежно один від одного. Підприємство накопичує значний обсяг цифрових даних та інструментів, однак управлінські рішення й далі ухвалюються в межах окремих функціональних контурів. Натомість практично кожне суттєве рішення є міжфункціональним: зміна в логістичному процесі позначається на витратах, якості обслуговування клієнтів, завантаженні персоналу та можливостях масштабування діяльності. Виникає розрив між функціональною організацією цифрових інструментів і міжфункціональною природою управлінських наслідків.

Подолання цього розриву потребує формалізованого подання взаємозв'язків між цифровими двійниками, бізнес-процесами, ресурсами, витратами, клієнтами, ризиками та результатами діяльності. Природа зв'язків, сила впливу та їхня зміна в часі визначають наслідки управлінської події за межами контуру її виникнення. Без такого інструментарію цифрові двійники лишаються ізольованими інформаційними моделями. Нестабільний попит, ресурсні обмеження, розриви ланцюгів постачання та безпекові ризики скорочують горизонт планування й підвищують ціну помилкових рішень. Тому оцінювання наслідків рішення до його реалізації стає чинником стійкості підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція цифрового двійника, започаткована М. Грівзом і Дж. Вікерсом як засіб пом'якшення емерджентної поведінки складних систем [9], пройшла шлях від інженерної ідеї до самостійного дослідницького напряму. В. Кріцінгер, М. Карнер, Г. Траар, Й. Хеньєс і В. Зін розмежували цифрову модель, цифрову тінь і власне цифровий двійник за критерієм автоматизованості інформаційного обміну [13]. Ф. Тао, Ц. Ці, Л. Ван і А. Ні розглянули співвідношення цифрових двійників із кіберфізичними системами [19], а Ф. Тао, Х. Чжан, А. Лю і А. Ні систематизували застосування цифрових двійників у промисловості [20]; поєднання двійників із великими даними розглянуто Ц. Ці та Ф. Тао [17].

Систематичні огляди Б. Баррічеллі, Е. Казірагі та Д. Фольї [6], А. Фуллера, З. Фана, К. Дея і К. Барлоу [8], Д. Джонса, К. Снайдера, А. Нассехі, Дж. Йона і Б. Хікса [11], К. Семераро, М. Лезоше, Е. Панетто та М. Дассісті [18] фіксують спільну рису домінуючого підходу: цифровий двійник трактується виробничо-технологічно – як відображення окремого активу чи технологічної системи, тоді як управлінський вимір лишається похідним. Окремий напрям формують дослідження онтологій і знаннєвих структур Е. Карабулут, С. Ф. Пілледжі, П. Грота і В. Дегелер [12], де наголошено на значенні формалізації зв'язків між даними, процесами та моделями. У теорії складних мереж Ф. Баттістон, В. Нікозія та В. Латора розробили апарат багатошарових (мультиплексних) мереж, що допускають кілька різнотипних зв'язків між однією парою вузлів [7], однак його застосування до задач

© Базик О.В., Гринько Т.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

управління підприємницькими структурами лишається епізодичним.

В українському науковому дискурсі цифрова трансформація підприємницьких структур досліджується переважно в контексті бізнес-екосистем – Л. Благодир [1], впливу цифровізації на діяльність підприємства – Р. Бугріменко та П. Смірнова [2], передумов трансформації бізнес-процесів – В. Л. Булат, Р. О. Миколенко та О. О. Дима [3], алгоритмів розвитку бізнес-структур у мінливому середовищі – Т. В. Гринько та С. С. Дулєпов [4]. Практичну площину представляють кейси цифровізації елеваторної інфраструктури: перезавантаження процесів кількісно-якісного обліку [10; 15] і проєкт цифрового двійника елеваторів, який окупився менш ніж за рік [14; 16], що підтверджує економічний ефект таких рішень.

Порівняння цих напрямів виявляє асиметрію: інженерні дослідження мають розвинений формальний апарат, але слабко пов'язані з прийняттям рішень; управлінські дослідження стратегій і бізнес-моделей рідко пропонують формалізацію, придатну для обчислень. Запропонована модель поєднує ці напрями, підпорядковуючи апарат багатошарових мереж логіці управлінських контурів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Поза увагою дослідників лишаються два взаємопов'язані питання. По-перше, цифровий двійник розглядається переважно на рівні окремого активу чи процесу, тоді як його потенціал як інструмента управління підприємницькою структурою в цілому – з охопленням операційного, фінансово-економічного, організаційного, ринкового та стратегічного контурів – розкрито недостатньо. По-друге, відсутня формалізація взаємозв'язків між системою цифрових двійників, бізнес-процесами та об'єктами управління, яка розрізняла б типи зв'язків, їхню силу та часову динаміку, – саме вона є передумовою переходу від описового використання двійників до аналітичного оцінювання наслідків управлінських рішень.

Метою статті є розроблення формалізованого інструментарію, який дає змогу оцінювати міжфункціональні наслідки управлінських рішень до їх реалізації на основі системи цифрових двійників підприємства. Досягнення мети передбачає: управлінське трактування цифрового двійника та типологію двійників у контурах управління; формалізацію мультиграфової структури зв'язків, що розрізняє їх типи, силу та часову динаміку; визначення її місця в архітектурі інтегрованої моделі цифрового управління; демонстрацію аналітичних можливостей запропонованого інструментарію на числовому прикладі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вихідною позицією є управлінське, а не технологічне трактування цифрового двійника: це не візуалізаційна копія об'єкта, а цифровий управлінський контур, який поєднує фактичні дані, цифрову репрезентацію бізнес-процесів, аналітику, сценарне моделювання та прийняття рішень. Таке трактування узгоджується з розумінням двійника як формалізованого представлення активу, процесу або системи, що інтегрує дані, моделі, зв'язки, часові параметри й аналітичні механізми для підтримки рішень [6; 12; 19], однак переносить акцент з відображення об'єкта на замикання управлінського циклу.

Практичним підґрунтям такого трактування є досвід підприємств, які використовують цифрові платформи та двійники для підвищення точності обліку і контролю операційних процесів. Зокрема, впровадження цифрового двійника елеваторної інфраструктури агрокомпанії NIBULON на платформі IT-Enterprise забезпечило перезавантаження процесів кількісно-якісного обліку [10; 15] і швидку окупність інвестицій [14; 16]. Показово, що управлінський ефект досягнуто завдяки інтеграції даних і цифровому відображенню процесів, а не окремому технологічному рішенню, – що аргументує трактування двійника як контуру, а не копії.

Підприємницька структура є багаторівневою соціально-економічною системою взаємозалежних операційних, фінансово-економічних, організаційних, ринкових і стратегічних параметрів. Тому інтегрована модель цифрового управління спирається на систему взаємопов'язаних двійників, кожен з яких відображає окремий управлінський контур. Їх поєднання дає змогу зіставляти операційні зміни з фінансовими наслідками, організаційними можливостями, ринковими умовами та стратегічними цілями (табл. 1).

Типологія розширює виробничо-технологічне трактування двійника до комплексного управління підприємницькою структурою: об'єктом моделювання стає управлінський контур. Вона також визначає вимоги до даних, адже кожен контур формує власні типи даних і підтримує окремий клас рішень. Охоплення всіх контурів одним універсальним двійником спричиняє надмірне спрощення або втрату керованості моделі.

Таблиця 1 – Типи цифрових двійників у системі управління підприємницькою структурою

Тип цифрового двійника	Об'єкт моделювання	Управлінське призначення
Операційний	Бізнес-процеси, виробництво, логістика, запаси, сервісні операції	Виявлення «вузьких місць», координація ресурсів і процесів, підвищення операційної ефективності
Фінансово-економічний	Доходи, витрати, грошові потоки, маржинальність, фінансові результати	Контроль витрат, побудова фінансових сценаріїв, оцінювання впливу рішень на результати
Організаційний	Організаційна структура, персонал, компетенції, комунікації	Виявлення управлінських дисбалансів, дублювання функцій, дефіциту компетенцій
Ринковий	Клієнти, попит, конкуренти, канали збуту, поведінка споживачів	Прогнозування попиту, аналіз клієнтської поведінки, адаптація цінової та збутової політики
Стратегічний	Бізнес-модель, стратегічні цілі, інвестиційні рішення, масштабування	Порівняння сценаріїв розвитку, обґрунтування інвестиційних і трансформаційних рішень

Джерело: авторська розробка

Водночас цінність системи двійників визначається не повнотою кожного з них, а щільністю зв'язків між ними, і їх поєднання потребує формального апарату, здатного відобразити багаторівневі, паралельні та взаємозворотні зв'язки. Ключова властивість цих зв'язків у тому, що між однією парою елементів одночасно існує кілька залежностей різної природи: логістичний процес пов'язаний із витратами водночас операційно і фінансово, а цифрова платформа є джерелом даних, інструментом інтеграції та чинником продуктивності рішень. Простий граф, що допускає лише одне ребро між парою вузлів, не передає цієї багатошаровості – необхідною є мультиграфова структура.

Від поширених графових подань підприємства структура відрізняється принципово. Процесні схеми кодують послідовність операцій, графи знань – семантику даних [12]; в обох випадках ребро несе один тип відношення. У пропонованій моделі кожне ребро одночасно кодує тип, силу та часову динаміку зв'язку, а між парою вузлів допускається кілька ребер різних типів, що споріднює структуру з апаратом багатошарових мереж [7]. Формально модель подається так:

$$MG = \{V, E, L, W, T\} \quad (1)$$

де V – множина вузлів (цифрові двійники, бізнес-процеси, ресурси, витрати, клієнти, партнери, ризики, результати діяльності); E – множина ребер, що відображають вплив одного елемента на інший; L – множина типів зв'язків; W – множина вагових коефіцієнтів, які характеризують силу впливу і можуть визначатися на основі кількісних показників, експертного оцінювання або статистичного аналізу; T – множина часових шарів, що фіксують зміну станів вузлів і ваг зв'язків у часі.

Множина вагових коефіцієнтів W перетворює модель з описової на пріоритезаційну. Ваги нормуються в діапазоні [0; 1], де 0 відповідає відсутності впливу, а 1 – максимально сильному впливу в межах прийнятої шкали. Економічний зміст ваги – ступінь трансмісії збурення: вага показує, яка частка нормованої зміни стану вузла-джерела передається вузлу-приймачу, що узгоджується з підходом мережевої економіки до аналізу поширення шоків виробничими та міжфірмовими зв'язками [5]. Операціоналізація залежить від наявних даних: за достатнього обсягу статистики вага оцінюється як нормований коефіцієнт трансмісії, за браку даних – як формалізована експертна оцінка того самого ступеня на шкалі [0; 1], що уточнюється через механізм зворотного зв'язку моделі. Кореляційні показники слугують допоміжною характеристикою тісноти зв'язку, але не ототожнюються з мірою причинного впливу. Вага не є ймовірністю, еластичністю чи мірою статистичної значущості – це уніфікована безрозмірна міра сили впливу.

Уніфікована шкала свідомо відокремлює силу зв'язку від його природи: якісна відмінність зберігається в множині L і використовується під час змістовної інтерпретації результатів, тоді як W забезпечує кількісну порівнянність різнотипних залежностей між контурами управління. Саме порівнянність робить високе значення ваги формальною підставою для першочергового контролю відповідної залежності – незалежно від того, операційна вона, фінансова чи ризикова. Множина часових шарів T надає моделі динамічного характеру: у різні періоди змінюються не лише значення показників у вузлах, а й сила зв'язків, структура ризиків і пріоритетність окремих контурів управління. Порівняння шарів t_0 і t_1 дає змогу відстежувати тенденції, а зіставлення фактичного шару зі сценарними – оцінювати альтернативні управлінські рішення до їх реалізації.

Множина типів зв'язків L відіграє особливу роль: вона не дозволяє звести всі взаємодії до одного типу причинності. Перелік типів зв'язків і приклади їх прояву наведено в табл. 2.

Структурування моделі за трьома шарами – рівнем цифрових двійників, рівнем бізнес-процесів та рівнем об'єктів управління – дає змогу аналізувати підприємницьку структуру як багаторівневу систему, не змішуючи різні управлінські контури. Верхній шар відображає аналітико-управлінські контури, середній – операційну діяльність, нижній – ресурси, витрати, клієнтів, ризики та результати, на які зрештою спрямований управлінський вплив. Вузли різних шарів можуть бути пов'язані кількома різнотипними зв'язками одночасно, що і зумовлює мультиграфовий характер структури. Візуалізацію мультиграфової моделі подано на рис. 1. У сценарному аналізі зв'язки інтерпретуються відповідно до напряму трансмісії впливу від вузла-джерела до вузла-приймача; з міркувань читабельності напрям більшості ребер графічно не позначено, тоді як стрілками показано контури зворотного зв'язку, а на рисунку відображено підмножину вузлів і п'ять із восьми типів зв'язків, релевантних для аналізованого далі сценарію (повний перелік типів – у табл. 2).

Мультиграфова модель не є самодостатньою конструкцією: її аналітична цінність реалізується лише в межах ширшої архітектури інтегрованого цифрового управління, в якій кожен рівень виконує окрему функцію (рис. 2). Перші два рівні формують фактичну

Таблиця 2 – Типи зв'язків у мультиграфовій моделі цифрового управління підприємницькою структурою

Тип зв'язку	Приклад прояву в системі управління
Інформаційний	Передавання даних із CRM-системи до ринкового цифрового двійника
Операційний	Вплив процесу закупівель на рівень запасів і строки виконання замовлень
Фінансовий	Вплив логістичних затримок на витрати та маржинальність
Організаційний	Залежність якості сервісу від завантаження персоналу й розподілу відповідальності
Технологічний	Інтеграція ERP-системи з операційним і фінансово-економічним цифровими двійниками
Ринковий	Вплив зміни попиту на продажі, запаси та виробниче планування
Ризиковий	Вплив ризику затримки постачання на виробництво, витрати й рівень сервісу
Стратегічний	Вплив рішення про автоматизацію складу на масштабування бізнес-моделі

Джерело: авторська розробка

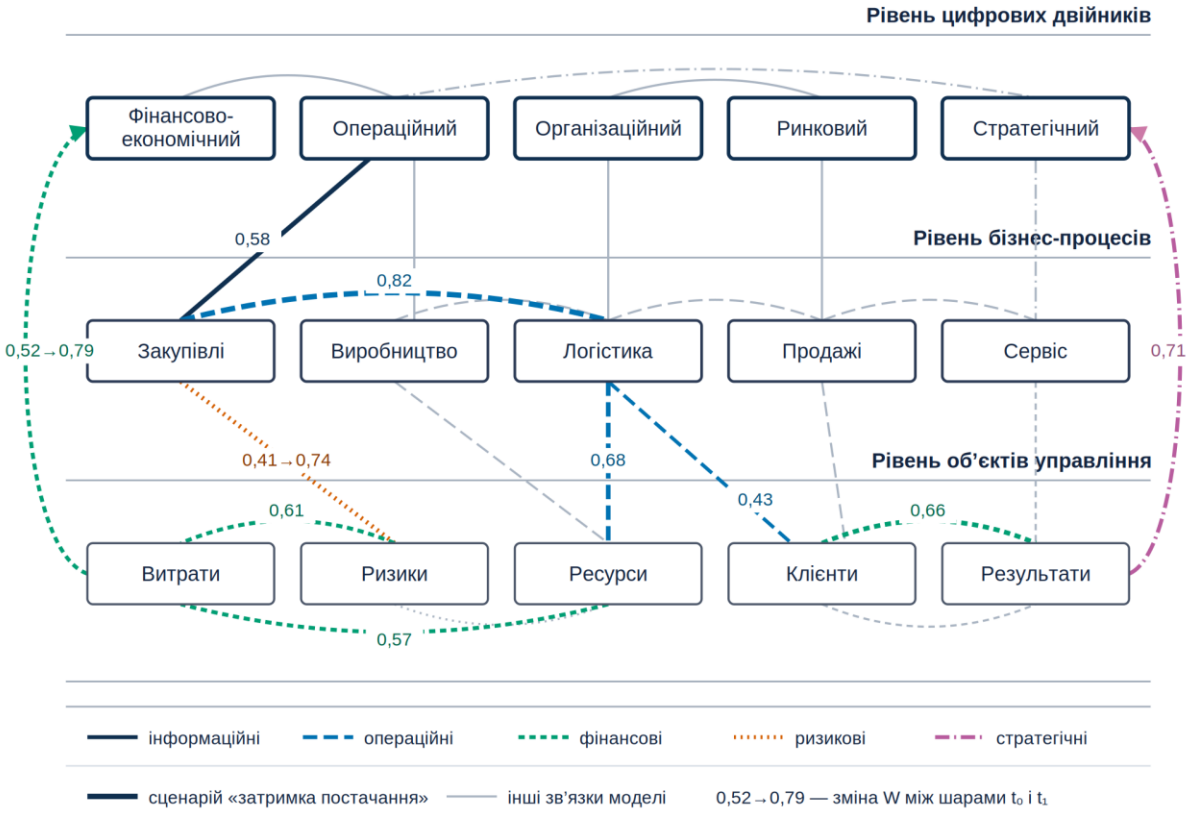


Рисунок 1 – Мультиграфова модель інтеграції цифрових двійників у бізнес-процеси підприємницької структури (сценарій «затримка постачання»)

Примітка: числа біля ребер – вагові коефіцієнти W; позначення виду 0,41 → 0,74 відповідає зміні ваги між часовими шарами t_0 і t_1; сірим показано зв'язки моделі поза межами розглянутого сценарію

Джерело: авторська розробка

базу моделювання (збирання, очищення та інтеграція даних із внутрішніх і зовнішніх джерел), третій утворює система з п'яти цифрових двійників (табл. 1). Четвертий рівень – мультиграфове моделювання за формулою (1) – перетворює систему двійників з описової на аналітичну, оскільки саме тут фіксуються типи, сила та динаміка взаємозв'язків. П'ятий реалізує сценарне моделювання, прогнозування та аналіз чутливості; шостий транслює результати в рішення щодо процесів, ресурсів, ризиків і стратегії; сьомий – механізм зворотного зв'язку – повертає дані про наслідки реалізованих рішень до системи, забезпечуючи оновлення двійників і моделі та адаптивний характер управління.

Архітектура має дві визначальні властивості: практичну спрямованість і адаптивність. Шостий рівень підпорядковує попередні рівні підвищенню якості управлінських рішень; сьомий забезпечує постійне уточнення моделі на основі нових даних. Ефективність залежить від якості даних і взаємодії інформаційних систем: без інтеграційного рівня двійник відображає лише частину управлінської реальності.

Аналітичні можливості моделі продемонструємо на сценарії «затримка постачання» (рис. 1). Управлінська подія – зростання ризику зриву поставок – фіксується як зміна ваги ризикового зв'язку між вузлами «Закупівлі» та «Ризики» з 0,41 у шарі t_0 (стан до настання події) до 0,74 у шарі t_1 (після її фіксації). Вагові коефіцієнти ребер сценарію наведено в табл. 3; їхні значення умовні та слугують демонстрації обчислювального механізму, тоді як у практичному застосуванні джерелом ваг є статистичний аналіз даних підприємства або формалізоване експертне оцінювання.

Сукупний вплив управлінської події на довільний вузол v у часовому шарі t оцінюється ненормованим індексом сукупного впливу:

$$I(v,t) = \sum_{p \in P(v)} \prod_{e \in p} w_e(t) \qquad (2)$$

де P(v) – множина простих шляхів від вузла-джерела події до вузла v у межах сценарію; we(t) – вага ребра e у шарі t. Згортка (2) передбачає адитивність внесків окремих каналів і застосовна до ациклічних фрагментів графа; імовірнісної інтерпретації величині I(v, t) не надається.

Вибір такої математичної форми обґрунтовується так. Мультиплікативність уздовж шляху відповідає послідовній трансмісії збурення: кожне ребро передає наступному вузлу частку нормованої зміни, тому композиція передач є добутком ваг; оскільки всі ваги належать діапазону [0; 1], внесок шляху монотонно не зростає з його довжиною, що узгоджується з інтуїцією загасання опосередкованого впливу. Адитивність за шляхами відповідає трактуванню шляхів як окремих каналів, внески яких у першому наближенні не дублюються. Індекс залишено ненормованим свідомо: він призначений для порівняння значень, обчислених за однією шкалою ваг у межах одного сценарію – між

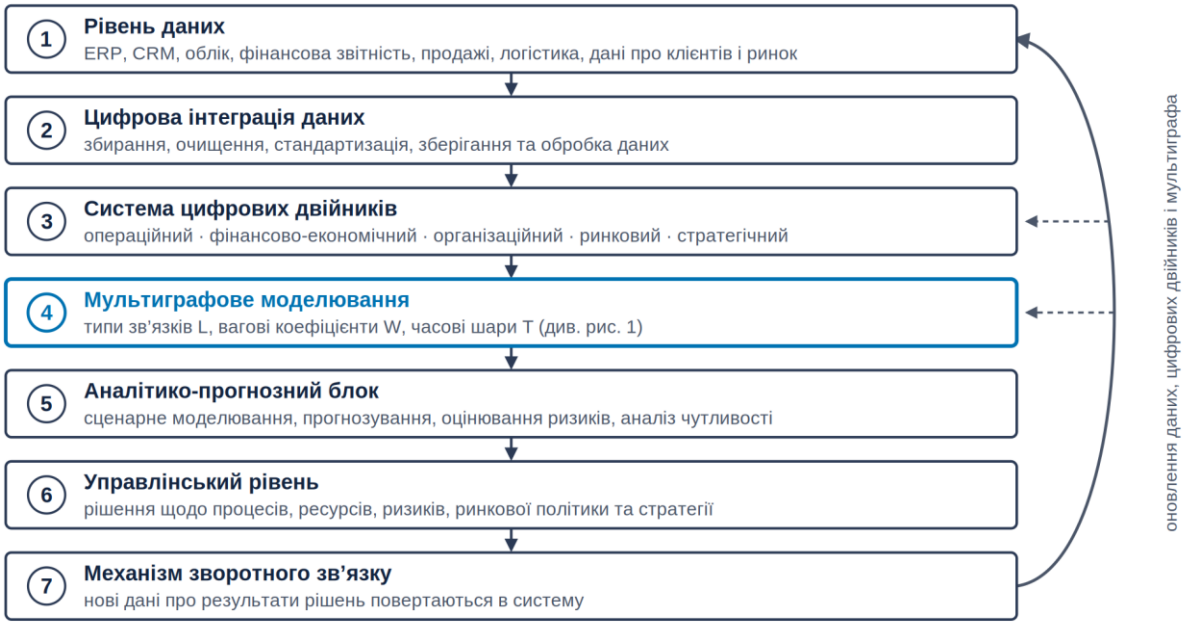


Рисунок 2 – Архітектура інтегрованої моделі цифрового управління підприємницькою структурою на основі цифрових двійників

Джерело: авторська розробка

Таблиця 3 – Вагові коефіцієнти зв'язків сценарію «затримка постачання»

Пара вузлів	Тип зв'язку	$W(t_0)$	$W(t_1)$
Операційний двійник – Закупівлі	інформаційний	0,58	0,58
Закупівлі – Ризики	ризиковий	0,41	0,74
Закупівлі – Логістика	операційний	0,82	0,82
Логістика – Ресурси	операційний	0,68	0,68
Ризики – Витрати	фінансовий	0,61	0,61
Ресурси – Витрати	фінансовий	0,57	0,57
Логістика – Клієнти	операційний	0,43	0,43
Клієнти – Результати	фінансовий	0,66	0,66
Витрати – Фінансово-економічний двійник	фінансовий (зворотний зв'язок)	0,52	0,79
Результати – Стратегічний двійник	стратегічний (зворотний зв'язок)	0,71	0,71

Джерело: авторська розробка

часовими шарами та між вузлами; відносні порівняння інваріантні до мультиплікативного масштабування, а абсолютне значення не має ймовірнісної чи часткової інтерпретації. Взаємодія між шляхами та ймовірність реалізації окремого шляху не моделюються: індекс є детермінованою мірою потенціалу трансмісії, а не очікуваним значенням; урахування кореляції каналів і стохастичних часових шарів становить напрям подальшого розвитку моделі.

У змістовних термінах W = 0,74 для зв'язку «Закупівлі – Ризики» означає, що збурення стану закупівель транслюється у зміну рівня ризику постачання на 74 % своєї нормованої величини. Для вузла «Витрати» у шарі t_0 індекс становить $I(\text{Витрати}, t_0) = 0{,}41 \times 0{,}61 + 0{,}82 \times 0{,}68 \times 0{,}57 = 0{,}250 + 0{,}318 = 0{,}568$, де перший доданок відповідає ризиковому каналу (Закупівлі – Ризики – Витрати), а другий – операційному (Закупівлі – Логістика – Ресурси – Витрати). У шарі t_1 той самий індекс дорівнює $I(\text{Витрати}, t_1) = 0{,}74 \times 0{,}61 + 0{,}318 = 0{,}451 + 0{,}318 = 0{,}769$; абсолютний приріст індексу становить $\Delta I = 0{,}769 - 0{,}568 = 0{,}201$. Отже, зростання ваги єдиного ризикового зв'язку підвищує сукупний вплив на вузол «Витрати» на 35,4 %, причому ризиковий канал, другорядний у шарі t_0 (44 % впливу), у шарі t_1 стає домінуючим (59 %).

Клієнтський ланцюг (Закупівлі – Логістика – Клієнти – Результати) зберігає незмінну оцінку впливу $0{,}82 \times 0{,}43 \times 0{,}66 = 0{,}233$, тобто безпосередня загроза для результатів через канал обслуговування клієнтів поки не зросла. Підвищення ваги зворотного зв'язку «Витрати – фінансово-економічний двійник» з 0,52 до 0,79 задано як окремий параметр сценарію, що відображає управлінську реакцію на зростання навантаження, а не як наслідок зміни ризикової ваги: згортка (2) описує поширення впливу, але не оновлення ваг. У термінах моделі це означає зростання пріоритету фінансового контуру як головного каналу реагування. Управлінська інтерпретація є прямою: першочерговими діями мають бути перегляд умов і резервування постачання та посилення контролю витрат, тоді як заходи у сфері клієнтського сервісу лишаються в режимі моніторингу. Отже, модель дає змогу не лише зафіксувати зростання

ризику, а й кількісно розподілити управлінську увагу між контурами до настання фактичних втрат; практичну релевантність такого інструментарію ілюструє досвід упровадження цифрових двійників елеваторної інфраструктури [14; 16].

Межі застосовності прикладу випливають з описаних вище властивостей згортки (2); для щільно пов'язаних фрагментів графа доцільними є ітеративні процедури з нормуванням. Ілюстративні значення ваг у практичному впровадженні підлягають заміні статистичними або формалізованими експертними оцінками (шкаловані парні порівняння з перевіркою узгодженості). Чутливість підсумкових індексів до окремих ваг показує, які зв'язки потребують найточнішого вимірювання і, відповідно, першочергової інтеграції даних. Сценарій затримки постачання – лише один із класу задач, які модель підтримує без зміни конфігурації. Аналогічно оцінюються наслідки автоматизації окремого процесу (зміна ваг операційних і фінансових зв'язків відповідного вузла), коливань попиту (ринкові зв'язки вузлів «Продажі» та «Клієнти»), перерозподілу ресурсів або масштабування діяльності (стратегічні зв'язки з вузлом «Результати»). Логіка є однаковою: управлінська подія локалізується як зміна ваг обмеженої кількості ребер, після чого модель показує, до яких вузлів і через які канали ця зміна дійде, а порівняння часових шарів фіксує масштаб її поширення.

Висновки. Дослідження обґрунтувало інструментарій переходу підприємницьких структур від фрагментарної цифровізації до інтегрованого цифрового управлінського контуру. Цифровий двійник запропоновано трактувати як управлінський контур, що замикає цикл від даних до рішень, а систему управління – будувати на п'яти взаємопов'язаних цифрових двійниках: операційному, фінансово-економічному, організаційному, ринковому та стратегічному.

Запропоновано мультиграфову модель взаємозв'язків у системі цифрового управління підприємницькою структурою, яка, на відміну від наявних графових подань, розрізняє типи зв'язків, їхні вагові коефіцієнти та часові шари, що дає змогу оцінювати міжфункціональні наслідки управлінських рішень до їх реалізації. Числовий приклад сценарію «затримка постачання» продемонстрував працездатність моделі: зміна ваги ризикового зв'язку з 0,41 до 0,74 транслюється у зростання ненормованого індексу сукупного впливу на вузол «Витрати» на 35,4 % ($\Delta I = 0{,}201$), а окремо задане підвищення ваги зворотного фінансового зв'язку відображає зміну пріоритетності реагування на користь фінансового контуру.

Визначено місце мультиграфового моделювання в семирівневій архітектурі інтегрованої моделі цифрового управління: четвертий рівень перетворює систему цифрових двійників з описової на аналітичну, а механізм зворотного зв'язку забезпечує оновлення ваг і часових шарів, надаючи управлінню адаптивного характеру.

Отримані результати розвивають методичні положення щодо побудови мультиграфової структури цифрового управління підприємницькою структурою в частині формалізації типів, вагових коефіцієнтів і часової динаміки зв'язків. Перспективи подальших досліджень пов'язані з економічним обґрунтуванням впровадження цифрових двійників, зокрема з оцінюванням інвестицій, дисконтованих грошових потоків і строку окупності відповідних проєктів, а також з емпіричною верифікацією вагових коефіцієнтів моделі на даних діючих підприємств.

Список використаних джерел:

1. Благодир Л. Цифрові бізнес-екосистеми як специфічна форма координації господарської діяльності в умовах цифрової економіки. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 46. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-46-55

2. Бугріменко Р., Смірнова П. Вплив розвитку цифрової трансформації на діяльність підприємства. *Економіка та суспільство.* 2024. Вип. 59. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-29

3. Булат В. Л., Миколенко Р. О., Дима О. О. Цифрова трансформація бізнес-процесів: особливості та передумови виникнення. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*. 2025. № 3. С. 4–10. DOI: https://doi.org/10.31673/2415-8089.2025.030110

4. Гринько Т., Дулєпов С. Теоретичні основи формування алгоритму розвитку бізнес-структур в умовах мінливого підприємницького середовища. *Економіка та суспільство.* 2025. Вип. 77. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-77-62

5. Acemoglu D., Carvalho V. M., Ozdaglar A., Tahbaz-Salehi A. The network origins of aggregate fluctuations. *Econometrica.* 2012. Vol. 80, № 5. P. 1977–2016. DOI: https://doi.org/10.3982/ECTA9623

6. Barricelli B. R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 167653–167671. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499

7. Battiston F., Nicosia V., Latora V. Structural measures for multiplex networks. *Physical Review E*. 2014. Vol. 89, № 3. Art. 032804. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032804

8. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham : Springer, 2017. P. 85–113. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

10. IT-Enterprise. Digital grain elevator: NIBULON agricultural company reboots quantitative and qualitative accounting processes with IT-Enterprise platform. 2025. URL: https://www.it.ua/en/news/cifrovij-elevator-na-platformi-it-enterprise-agrokompanija-nibulon-perezavantazhila-procesi-kilkisno-jakisnogo-obliku

11. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29. P. 36–52. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002

12. Karabulut E., Pileggi S. F., Groth P., Degeler V. Ontologies in digital twins: A systematic literature review. *Future Generation Computer Systems.* 2024. Vol. 153. P. 442–456. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013

13. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine.* 2018. Vol. 51, № 11. P. 1016–1022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

14. Latifundist.com. NIBULON's digital twin project pays off in less than a year. 2025. URL: https://latifundist.com/en/novosti/68641-nibulon-okupiv-investitsiyi-u-tsifrovogo-dvijnika-elevatoriv-menshe-nizh-za-rik

15. NIBULON. NIBULON overhauls quantitative and qualitative accounting processes on the IT-Enterprise platform. 2025. URL: https://www.nibulon.com/en/nibulon-overhauls-quantitative-and-qualitative-accounting-processes-on-the-it-enterprise-platform/

16. NIBULON. Investments in the elevator digital twin paid off in less than a year. 2025. URL: https://www.nibulon.com/en/investments-in-the-elevator-digital-twin-paid-off-in-less-than-a-year/

17. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access.* 2018. Vol. 6. P. 3585–3593. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265

18. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry.* 2021. Vol. 130. Art. 103469. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469

19. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering.* 2019. Vol. 5, № 4. P. 653–661. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014

20. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, № 4. P. 2405–2415. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186

References:

1. Blahodyr, L. (2022). Tsyfrovi biznes-ekosystemy yak spetsyfichna forma koordynatsii hospodarskoi diialnosti v umovakh tsyfrovoi ekonomiky [Digital business ecosystems as a specific form of coordination of economic activity in the digital economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 46. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-46-55 (in Ukrainian)

2. Buhrimenko, R., & Smirnova, P. (2024). Vplyv rozvytku tsyfrovoi transformatsii na diialnist pidpryiemstva [The impact of digital transformation development on enterprise activity]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 59. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-29 (in Ukrainian)

3. Bulat, V. L., Mykolenko, R. O., & Dyma, O. O. (2025). Tsyfrova transformatsiia biznes-protsesiv: osoblyvosti ta peredumovy vynyknennia [Digital transformation of business processes: features and prerequisites]. *Ekonomika. Menedzhment. Biznes*, no. 3, pp. 4–10. DOI: https://doi.org/10.31673/2415-8089.2025.030110 (in Ukrainian)

4. Grynko, T., & Duliepov, S. (2025). Teoretychni osnovy formuvannia alhorytmu rozvytku biznes-struktur v umovakh minlyvoho pidpryiemnytskoho seredovyshcha [Theoretical foundations of forming a business structures development algorithm in a changing entrepreneurial environment]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 77. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-77-62 (in Ukrainian)

5. Acemoglu, D., Carvalho, V. M., Ozdaglar, A., & Tahbaz-Salehi, A. (2012). The network origins of aggregate fluctuations. *Econometrica*, vol. 80, no. 5, pp. 1977–2016. DOI: https://doi.org/10.3982/ECTA9623

6. Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 167653–167671. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499

7. Battiston, F., Nicosia, V., & Latora, V. (2014). Structural measures for multiplex networks. *Physical Review E*, vol. 89, no. 3, art. 032804. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032804

8. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

9. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, pp. 85–113. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

10. IT-Enterprise (2025). Digital grain elevator: NIBULON agricultural company reboots quantitative and qualitative accounting processes with IT-Enterprise platform. Available at: https://www.it.ua/en/news/cifrovij-elevator-na-platformi-it-enterprise-agrokompanija-nibulon-perezavantazhila-procesi-kilkisno-jakisnogo-obliku

11. Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 29, pp. 36–52. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002

12. Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., & Degeler, V. (2024). Ontologies in digital twins: A systematic literature review. *Future Generation Computer Systems*, vol. 153, pp. 442–456. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013

13. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

14. Latifundist.com (2025). NIBULON's digital twin project pays off in less than a year. Available at: https://latifundist.com/en/novosti/68641-nibulon-okupiv-investitsiyi-u-tsifrovogo-dvijnika-elevatoriv-menshe-nizh-za-rik

15. NIBULON (2025). NIBULON overhauls quantitative and qualitative accounting processes on the IT-Enterprise platform. Available at: https://www.nibulon.com/en/nibulon-overhauls-quantitative-and-qualitative-accounting-processes-on-the-it-enterprise-platform/

16. NIBULON (2025). Investments in the elevator digital twin paid off in less than a year. Available at: https://www.nibulon.com/en/investments-in-the-elevator-digital-twin-paid-off-in-less-than-a-year/

17. Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585–3593. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265

18. Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, vol. 130, art. 103469. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469

19. Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 653–661. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014

20. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415. DOI: https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186

Bazyk Oleksandr, Grynko Tetiana
Oles Honchar Dnipro National University

MULTIGRAPH MODELLING OF INTERRELATIONS IN THE DIGITAL MANAGEMENT SYSTEM OF AN ENTREPRENEURIAL STRUCTURE

The article addresses the transition of entrepreneurial structures from the fragmented digitalisation of individual functions to an integrated digital management loop. The relevance of the topic follows from a persistent asymmetry: enterprises accumulate a considerable volume of digital data and tools, while managerial decisions are still taken within isolated functional circuits, although virtually every significant decision generates cross-functional consequences. The purpose of the study is to develop a formalised toolkit for assessing the cross-functional consequences of managerial decisions prior to their implementation on the basis of an enterprise digital twin system. The methodological basis combines a systems approach to the enterprise as a multilevel socio-economic system, typological analysis, the formal apparatus of multilayer networks, formalisation and scenario modelling with a numerical illustration. It is shown that a digital twin should be treated not as a technological replica of a single asset, but as a management loop combining factual data, a digital representation of business processes, analytics, scenario modelling and decision-making. Five types of digital twins are distinguished – operational, financial-economic, organisational, market and strategic – and eight types of links between the elements of the management system. The multigraph model MG = {V, E, L, W, T} is formalised, in which links differ by type, weight coefficient and time layer, and its place in the seven-level architecture of the integrated digital management model is defined. An aggregate influence index is proposed that convolves the weights of the paths from the source node of a managerial event to the receiving node. A numerical example of the supply delay scenario demonstrates the mechanism for assessing cross-functional consequences: an increase in the weight of the risk link from 0.41 to 0.74 translates into a 35.4 % increase in the unnormalised aggregate influence index of the Costs node, while the risk channel turns from secondary into dominant. The practical value of the results lies in the possibility of using the model as the analytical core of decision support systems, which allows managerial attention to be distributed between functional circuits before actual losses occur.

Keywords: *digital twin, multigraph, management model, entrepreneurial structure, digital transformation, weight coefficient, scenario modelling.*

JEL classification: C63, D85, M15, M21, O33

Дата надходження статті: 31.08.2026
Дата прийняття статті до публікації: 25.09.2026
Дата публікації статті: 29.10.2026