

## ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ РЕСУРСНИХ І ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА УМОВ ДИНАМІЧНОЇ ПРОЄКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

*Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів у будівельних проєктах формується як багаторівнева інформаційно-аналітична система, що забезпечує безперервне відстеження, прогнозування та коригування параметрів проєктної динаміки в умовах змінного середовища. У сучасній практиці управління проєктами моніторинг виходить за межі фіксації фактичних показників і трансформується у комплексну систему предиктивної аналітики, інтегровану з цифровими платформами BIM, ERP та IoT. Така інтеграція забезпечує синхронізацію просторових моделей, ресурсних потоків і сенсорних даних, що надходять у режимі реального часу, створюючи єдине цифрове середовище управління.*

*У роботі розкрито концептуальні засади формування інструментарію цифрового моніторингу, який поєднує математичні моделі ресурсного виснаження, логарифмічні оцінки ефективності використання, інтегральні показники втрат продуктивності та стохастичні моделі ризику. Обґрунтовано доцільність застосування експоненційних, логарифмічних та інтегральних функцій для формалізації динаміки використання ресурсів і накопичення часових відхилень. Показано, що використання багатофакторних моделей дозволяє оцінювати не лише абсолютні зміни показників, а й їхню чутливість до зовнішніх і внутрішніх збурень.*

*Особливу увагу приділено функціонально-аналітичній взаємодії цифрових платформ. BIM розглядається як просторово-інформаційна основа моніторингу, ERP – як система ресурсної та фінансової координації, IoT – як сенсорний рівень, що забезпечує достовірність даних. Їх поєднання створює адаптивну архітектуру управління, здатну до реконфігурації залежно від зміни параметрів проєкту.*

*У межах дослідження систематизовано підходи до прогнозування відхилень на основі імовірнісних, стохастичних, симуляційних та нейромережових моделей. Застосування методів Монте-Карло, агентного моделювання та LSTM-архітектур дозволяє здійснювати сценарний аналіз, оцінювати ймовірність перевищення критичних порогів і формувати попереджувальні сигнали. Такий підхід трансформує моніторинг із реактивної функції у проактивний інструмент стратегічного управління.*

*Узагальнено, що ефективність цифрового моніторингу визначається структурною узгодженістю математичних моделей, програмних платформ і організаційних процедур. Інтеграція аналітичних механізмів у єдину координаційну систему забезпечує підвищення ресурсної збалансованості, мінімізацію часових втрат і підвищення стійкості проєктів до невизначеності.*

**Ключові слова:** *цифровий моніторинг, ресурсні параметри, часові відхилення, BIM, ERP, IoT, предиктивна аналітика, управління проектами.*

**Вступ.** Цифрова трансформація будівельної галузі зумовила зміну підходів до управління ресурсами та часовими параметрами проєктів. Якщо раніше контроль ґрунтувався переважно на періодичному звітуванні та ретроспективному аналізі, то сучасні умови динамічної проєктної взаємодії потребують безперервного моніторингу з можливістю оперативного прогнозування відхилень. У складних багатокомпонентних проєктах ресурсні та часові показники перебувають у стані постійної взаємозалежності, що формує нелінійну динаміку їх змін.

Цифровий інструментарій моніторингу виступає як сукупність технологічних, математичних та організаційних рішень, які забезпечують інтеграцію даних з різних джерел у єдине аналітичне середовище. Взаємодія BIM-моделей, ERP-платформ і IoT-сенсорів дозволяє синхронізувати планові та фактичні показники, формувати сценарії реагування та автоматизувати управлінські процедури.

В умовах динамічної взаємодії між учасниками проєкту виникає необхідність врахування часових лагів, ресурсних обмежень і факторів ризику. Застосування експоненційних і логарифмічних моделей дозволяє описати процеси виснаження ресурсів і зміну ефективності використання у часовому вимірі. Стохастичні та симуляційні підходи забезпечують оцінювання невизначеності та прогнозування накопичення відхилень.

**Актуальність дослідження** зумовлена зростанням складності будівельних проєктів, підвищенням вимог до точності планування та необхідністю мінімізації ризиків перевищення бюджету і строків реалізації. У сучасних умовах нестабільності ринку матеріальних ресурсів, коливань вартості та логістичних обмежень традиційні методи контролю не забезпечують достатнього рівня передбачуваності.

Цифрові системи моніторингу створюють можливість отримання достовірної інформації в реальному часі та формування прогнозних моделей розвитку подій. Водночас їх ефективність залежить від науково обґрунтованої інтеграції математичних моделей, інформаційних платформ і організаційних процедур. Недостатня узгодженість між цифровими інструментами може призводити до фрагментарності даних і втрати управлінської цілісності.

Тому розроблення структурованого інструментарію цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів є необхідною умовою підвищення адаптивності та стійкості будівельних проєктів в умовах динамічної проєктної взаємодії.

**Постановка проблеми.** У процесі реалізації будівельних проєктів ресурсні та часові параметри перебувають під впливом численних внутрішніх і зовнішніх факторів, що формують складну динамічну систему. Невідповідність між плановими й фактичними показниками, затримки постачання, перевантаження ресурсів або неузгодженість дій учасників призводять до накопичення відхилень, які можуть мати кумулятивний характер.

Проблема полягає у відсутності інтегрованого підходу до цифрового моніторингу, який поєднує сенсорні дані, аналітичні моделі та механізми прийняття рішень у єдиному координаційному контурі. Існуючі системи часто функціонують ізольовано, що ускладнює своєчасне виявлення критичних відхилень. Необхідним є формування інструментарію, здатного не лише фіксувати стан системи, а й прогнозувати її розвиток з урахуванням стохастичних і мультифакторних впливів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних дослідженнях значна увага приділяється інтеграції BIM, ERP та IoT для забезпечення цифрової координації проєктів. Розглядаються підходи до застосування методів Монте-Карло, стохастичного аналізу та нейромережових алгоритмів для прогнозування ризиків і часових відхилень. Окремі праці зосереджені на формуванні цифрових двійників та використанні сенсорних систем для оперативного контролю.

Разом із тим недостатньо досліджено питання системної інтеграції математичних моделей ресурсної динаміки з цифровими платформами моніторингу в умовах багаторівневої проєктної взаємодії. Потребує подальшого опрацювання формалізація взаємозалежностей між ресурсними показниками, часовими лагами та факторами ризику в єдиній аналітичній архітектурі.

**Метою цієї статті є** обґрунтування концептуальних і прикладних засад формування інструментарію цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів у будівельній проєктній взаємодії. Дослідження спрямоване на систематизацію математичних моделей оцінювання ефективності та відхилень, визначення функціональної ролі цифрових платформ та розроблення інтегрованого підходу до прогнозування ризиків і підвищення адаптивності управління.

**Виклад основної інформації.** Управління ресурсами та часовими обмеженнями в межах будівельного проєкту є не лише технічним завданням, а й складним інформаційним процесом, який вимагає постійного моніторингу, аналітичного реагування та адаптивного управління. Саме тому цифровий інструментарій моніторингу, як сукупність методів, технологій, програмних засобів і алгоритмів, що дозволяють фіксувати, аналізувати та прогнозувати параметри проєктної динаміки, набуває ключового значення в умовах сучасної диджиталізованої економіки. Цей інструментарій включає в себе не лише засоби фіксації інформації про наявні ресурси або використаний час, а й алгоритми їхньої обробки, візуалізації, сценарного аналізу та предиктивного управління.

На початкових етапах розвитку цифрових інструментів домінували моделі статичного контролю, які передбачали ручне введення параметрів у формалізовані таблиці чи графіки. Проте сучасні інструменти ґрунтуються на принципах динамічного моніторингу, коли дані надходять у систему в реальному часі за допомогою сенсорів, геолокаційних модулів, SCADA-систем, IoT-архітектур та інтегрованих BIM-моделей. У таких системах інформація про витрати матеріалів, навантаження на ресурси, зміни у графіку або відхилення від планових показників автоматично збирається, обробляється аналітичними модулями та надходить до користувача у вигляді візуальних індикаторів, дашбордів або сценарних попереджень [1].

Для формалізації динаміки ресурсного виснаження в таких умовах доцільно застосовувати експоненційні моделі, які враховують зниження доступного обсягу ресурсів у часі під впливом коефіцієнта використання. Узагальнена модель набуває вигляду:

$$f(t) = G \times e^{-B \times t}, \quad (1)$$

де  $f(t)$  – функція залишкового ресурсу в момент часу  $t$ ,  $G$  – початковий обсяг ресурсу,  $B$  – інтенсивність його споживання. Ця формула дозволяє формувати прогнозний профіль доступності ресурсу в залежності від рівня навантаження на систему та обраної стратегії розподілу. Її застосування є ключовим у плануванні

проектів із високою тривалістю або високим ризиком перевитрат, коли витрати ресурсів не є лінійними, а підпорядковуються законом зниження ефективності.

Інструментарій цифрового моніторингу ресурсів і часу в сучасному проєктованні середовищі набуває ієрархічної структури, де кожен рівень управління використовує специфічний набір засобів. На операційному рівні – це системи збору даних через сенсори, дрони, мобільні застосунки, сканери об'єктів і RFID-мітки. На тактичному рівні реалізуються інтеграційні рішення на основі ERP-систем, які дозволяють поєднувати дані з логістики, обліку матеріалів і фінансових витрат у єдиний потік. На стратегічному рівні застосовуються інструменти аналітичного аналізу та симуляційного прогнозування, серед яких використовуються платформи типу Oracle Primavera, Power BI, Autodesk Insight, Synchro 4D та інші. Така багаторівнева архітектура дозволяє не лише відслідковувати статус виконання задач, а й будувати предиктивні моделі, які виявляють ризики ще до їх фактичної появи [2].

З точки зору формального опису ефективності використання ресурсів у часовому вимірі, доцільно застосовувати логарифмічну модель, яка враховує приріст або втрату ефективності у залежності від збільшення навантаження у часі. Цей показник дозволяє кількісно порівнювати інтенсивність використання ресурсу у різних фазах проєкту та адаптувати розподіл ресурсного потенціалу відповідно до змін у графіку.

$$V = \frac{\ln(E+K)}{K}, \quad (2)$$

де  $V$  – коефіцієнт ефективності використання ресурсу,  $E$  – ресурсна база на початку аналізу,  $K$  – часовий інтервал реалізації певного процесу. Цей підхід особливо актуальний для проєктів, що характеризуються високою динамікою змін у ресурсній конфігурації, наприклад, коли з одного об'єкта оперативно перерозподіляються бригади або матеріали на інші ділянки. Логарифмічна інтерпретація дозволяє враховувати не лише абсолютні показники, а й приріст навантаження у нелінійних умовах [3].

Актуальною є і проблема оцінки втрат ефективності через затримки або неузгодженість між плановими і фактичними часовими графіками. У таких випадках для аналізу загального негативного ефекту від відхилень варто застосовувати інтегральну модель, яка описує через формулу 3, накопичене зниження продуктивності за весь інтервал виконання:

$$S = \int_0^T J \times c(t) dt, \quad (3)$$

де  $S$  – сумарна втрата ефективності,  $J$  – питома шкала втрат,  $c(t)$  – функція поточного рівня недоотриманої продуктивності або втрат часу у момент  $t$ . Ця формула дозволяє враховувати зміну темпів роботи, внутрішні простоя, втрати через повторні операції, затримки поставок та інші фактори, що не фіксуються в стандартному графіку, але критично впливають на загальний ресурсно-часовий баланс.

Таким чином, класифікація інструментів цифрового моніторингу не є лише технічним завданням – вона базується на теоретичних моделях оцінки продуктивності, ефективності, ресурсної динаміки та часової реактивності. Її реалізація потребує синергії між прикладними програмними рішеннями, формалізованими математичними підходами та організаційною структурою управління, здатною адаптуватися до зміни даних у реальному часі. Саме на цьому перетині формуються сучасні архітектури цифрового моніторингу, які

забезпечують проектну стійкість, ресурсну збалансованість і управлінську прозорість [4].

Представлений нижче рис. 1 демонструє ієрархію цифрового інструментарію моніторингу, що поєднує рівні збору даних, аналітичної обробки та математичного прогнозування. Вона ілюструє, як оперативні сенсорні технології, тактичні платформи управління та формалізовані моделі ефективності інтегруються у комплексну систему управління ресурсно-часовими обмеженнями.

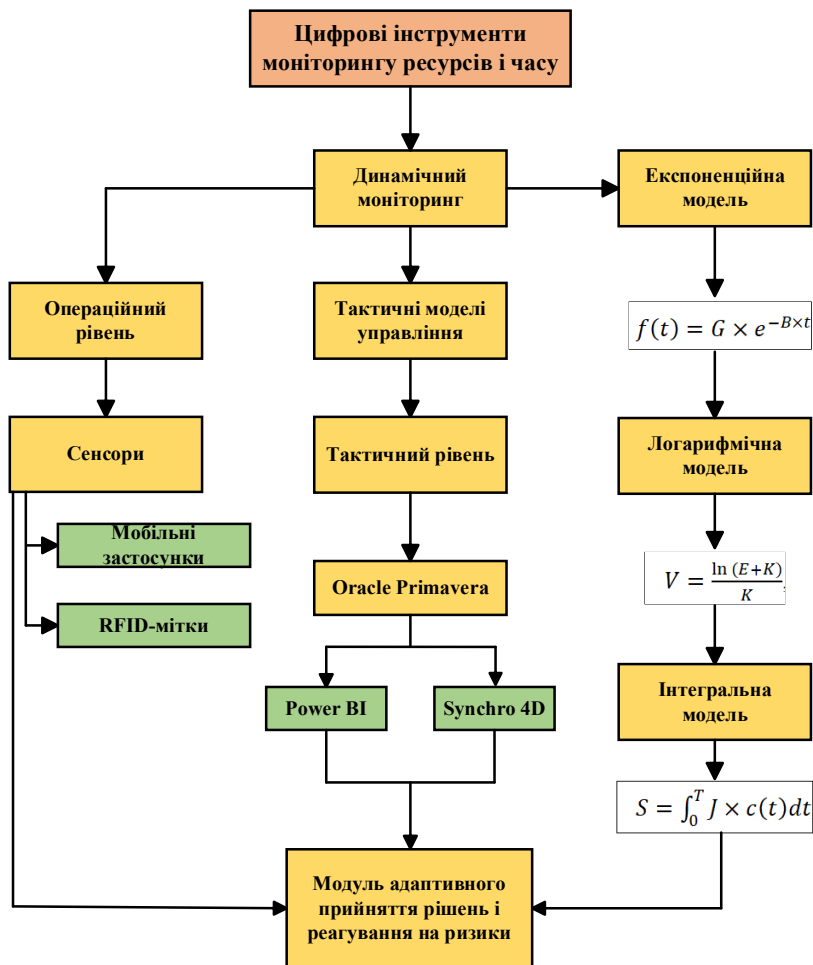


Рис. 1. Структурна модель цифрового моніторингу ресурсів і часу в будівельному проекті (розроблено автором на основі [4])

Щоб глибше зрозуміти, як саме реалізується ця багаторівнева система на практиці, розглянемо функціонально-аналітичну взаємодію основних цифрових платформ у межах проєктного моніторингу.

Функціонально-аналітична побудова цифрового моніторингу в сучасному будівельному середовищі є наслідком глибокої інтеграції інформаційних, облікових і сенсорних технологій, що охоплюють увесь цикл проєктної взаємодії – від передпроєктного планування до завершення будівництва і експлуатації об'єкта. У цій структурі ключову роль відіграє функціональне злиття трьох домінуючих класів інструментів: BIM як просторово-інформаційної основи, ERP як обліково-ресурсної архітектури та IoT як сенсорного шару, що пов'язує фізичну реальність із цифровими моделями. Ця тріада інструментів не є окремо функціонуючими блоками, а реалізує синергійну структуру з постійним обміном даними, де кожна зміна на одному рівні автоматично оновлює інші, забезпечуючи цілісність цифрового середовища управління.

Будівельний проєкт у динаміці проходить десятки циклів змін – від коригування креслень до неочікуваних логістичних перебоїв, змін у нормативному середовищі, раптових коливань цін і форс-мажорів. Саме в таких умовах моніторинг стає не фіксацією, а процесом передбачення і реактивної аналітики. Функціональність систем типу Autodesk BIM 360 або Trimble Quadri полягає не лише у візуалізації конструкцій, а й у можливості зчитувати з моделі часові кластери, накладати на них фактичні показники і прогнозувати потенційні конфлікти між виконавцями або графіками. Наприклад, якщо система виявляє, що етап армування запланований одночасно з електромонтажем у тій самій зоні, вона генерує попередження ще до моменту розгортання робіт. Ці попередження базуються на вбудованих правилах, шаблонах взаємодій, а також розрахунках часу виконання, які у свою чергу залежать від ресурсного навантаження. Поява хмарних сервісів дала змогу оновлювати ці моделі миттєво для всіх учасників, незалежно від їхнього фізичного розташування [5].

У структурі ERP-систем функціональність реалізується зовсім іншим шляхом – тут головним є нормалізація потоків ресурсів, фінансів, кадрових процесів та контрактних зобов'язань. Наприклад, у системах типу SAP S/4HANA чи Oracle Fusion Cloud кожне переміщення товару фіксується як транзакція, яка формує запис у загальному ланцюгу вартості. Фінансові витрати пов'язуються із закупівлею, остання – із планом постачань, а той – із графіком виконання робіт. Це формує складну карту відповідностей, у якій кожна подія має причинно-наслідкові зв'язки, що виводяться на інтерфейс у вигляді ризиків, затримок або пропозицій оптимізації. Для прикладу, якщо ресурс поставлений із затримкою, то ERP може ініціювати перегляд графіка, надіслати сигнал у BIM-модель і автоматично змінити критичний шлях. Така взаємодія потребує постійної аналітичної перевірки сумісності графіків, ресурсних таблиць та фінансових прогнозів.

IoT-компонента в цій архітектурі виступає гарантом достовірності. У той час як BIM і ERP оперують передусім цифровими відображеннями реальності, саме сенсори надають ці дані в режимі реального часу. Наприклад, сенсор температури може зафіксувати перегрів бетонної суміші, що порушує умови твердіння, а отже система автоматично переносить графік монтажу. GPS-трекери фіксують переміщення будівельної техніки, датчики навантаження реєструють вібраційні коливання, що можуть свідчити про перевантаження. Ці дані агрегуються у хмарні сховища, де піддаються автоматичній валідації і порівнюються з плановими значеннями. Такий рівень верифікації дозволяє уникнути хибної звітності, запізненого реагування або помилкових рішень [6].

Поведінка системи моніторингу в умовах коливань продуктивності, що виникають на етапах високого навантаження, може бути змодельована через синусоїдально-експоненціальну функцію, яка враховує періодичність змін, гасіння ефективності та залежність від ресурсу.

$$s(t) = \sqrt{H} \times \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \times e^{-B \times t}, \quad (4)$$

де  $s(t)$  – поточна функція продуктивності,  $H$  – початковий ресурсний потенціал,  $T$  – номінальна тривалість процесу,  $B$  – коефіцієнт зниження ефективності. Ця формула дає змогу описати ефект втоми ресурсів або зниження швидкості внаслідок тривалого навантаження. Вона особливо актуальна для моніторингу в проєктах з циклічним графіком, наприклад, монтажні роботи з повторюваними етапами, де кожен наступний цикл стає менш ефективним через кумулятивні фактори виснаження.

Паралельно з моделлю спадання ефективності важливо враховувати й фактори затримки системної реакції на зміни. У цифровому середовищі, що ґрунтується на великій кількості вхідних сигналів, не всі процеси реагують миттєво. Навпаки, затримка в оновленні моделей або виконанні команд спричиняє зсув продуктивності у часі, що має бути враховано у формалізованій моделі. Для цього використовується формула 5, кумулятивного навантаження з інерційним множителем:

$$K = \int_0^T \frac{s(t)}{1+\gamma t} dt, \quad (5)$$

де  $K$  – загальна реактивність системи,  $s(t)$  – функція навантаження у момент часу  $t$ ,  $\gamma$  – параметр інерції,  $T$  – повний часовий інтервал. Це рівняння дозволяє моделювати ситуації, коли інформація надходить швидко, але системна реакція або її реалізація має часовий лаг – через затримки в обробці, людський фактор або регламент процедур [7].

На цьому етапі цифровий моніторинг переходить від спостереження до передбачення. В аналітичному полі це означає побудову функцій, які не лише відображають реальність, а й здатні на основі історичних даних будувати сценарії розвитку. У такому випадку використовуються моделі складених відхилень, які враховують як експоненційне падіння ефективності, так і кумулятивний ефект втрат у часі. Універсальне формула для таких цілей виглядає наступним чином:

$$E = K \times e^{-RT} + M \times \int_0^T k \times e^{-\tau t} dt, \quad (6)$$

де  $E$  – загальне прогнозоване відхилення,  $K \times e^{-RT}$  – компонент спадання початкового потенціалу,  $M$  – коефіцієнт значущості накопичених втрат,  $k$  – функція ризикованого навантаження або повторних дій,  $\tau$  – інтенсивність амортизації. Це рівняння широко використовується у прогнозній аналітиці, зокрема у модулях Business Intelligence, де потрібно передбачити критичний момент досягнення порогу втрат або момент, коли поточна стратегія вичерпає ресурсний запас [8].

Щоб візуалізувати, як саме змінюється динаміка продуктивності, кумулятивна реактивність та інтегральне відхилення в умовах цифрового моніторингу будівельного проєкту, необхідно представити ці процеси у формі функціонального графіка. Така візуалізація дозволяє не лише побачити вплив навантаження та інерційності системи, а й окреслити порогові зони, де стратегічне втручання є критично необхідним. Рис. 2 ілюструє ці три ключові аспекти цифрової взаємодії BIM, ERP та IoT у контексті адаптивного управління.

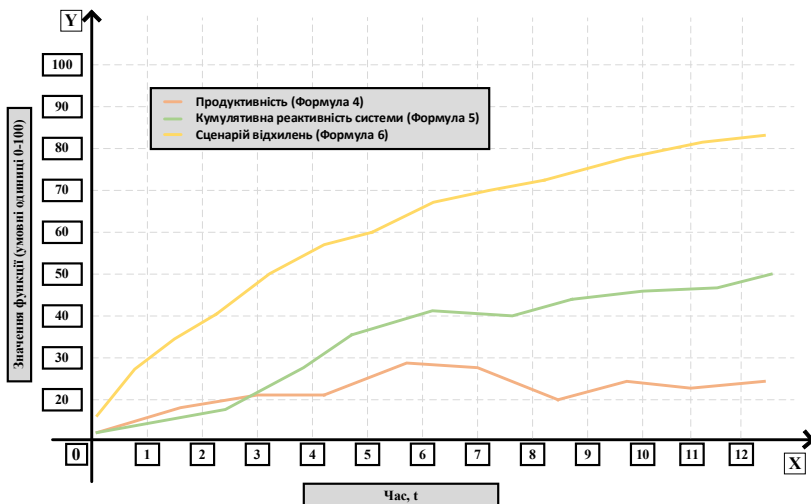


Рис. 2. Графічна взаємодія продуктивності, реактивності та відхилення в цифровому моніторингу будівельного проєкту (розроблено автором на основі [8])

Таким чином, функціонально-аналітичний огляд інструментарію цифрового моніторингу в системах BIM, ERP і IoT дозволяє зробити висновок, що ефективність сучасного управління базується не на окремих рішеннях, а на їхній здатності працювати в єдиному координаційному середовищі. Цей інструментарій не є усталеним – він постійно змінюється, адаптується до нових умов, враховує ризики, що виникають у зв'язку з нестабільністю середовища, і формує динамічну аналітичну інфраструктуру, в якій керівне рішення є функцією взаємодії цифрової моделі, реального об'єкта та обчислювального механізму прогнозування.

Таким чином, аналіз архітектури цифрового моніторингу в системах BIM, ERP і IoT окреслює складну багаторівневу взаємодію між просторовими моделями, ресурсним обліком і сенсорними потоками даних, що формує цілісну інформаційно-аналітичну інфраструктуру будівельного управління. Проте однієї фіксації показників, навіть у реальному часі, недостатньо для забезпечення високої адаптивності до зовнішніх ризиків, змін середовища та внутрішньої невизначеності проєктної реалізації. Саме тому в сучасних системах виникає потреба переходу від статичного контролю до динамічного прогнозування. Цей зсув акцентів відкриває новий вимір цифрового інструментарію – орієнтованого вже не на факт, а на ймовірність. У цьому контексті доцільно перейти до розгляду методів і моделей, які дозволяють прогнозувати і попереджати критичні відхилення, забезпечуючи проактивну логіку прийняття управлінських рішень у будівельному проєкті [9].

Прогнозування та попередження відхилень у процесі управління будівельними проєктами перетворилось на одну з центральних функцій сучасного цифрового моніторингу. У середовищі динамічної проєктної взаємодії, де час і ресурси є змінними з високим ступенем чутливості до зовнішніх впливів, традиційні інструменти обліку вже не здатні забезпечити необхідну передбачуваність. На зміну

ретроспективним системам прийшли інтегровані цифрові моделі прогнозування, які використовують штучний інтелект, стохастичні алгоритми, статистичні трендові функції, методи нечіткої логіки, а також симуляційні та агентні підходи. В центрі цього інструментарію лежить здатність обробляти великий масив неоднорідних даних, ідентифікувати закономірності та формувати сценарії, які дозволяють менеджеру ухвалювати рішення ще до виникнення проблеми, тобто переходити від реактивного до проактивного управління.

У фундаменті аналітичного ядра прогнозних систем лежить поняття часово-ресурсної чутливості, яке визначає, наскільки зміна одного з параметрів здатна порушити баланс в іншій частині проектної системи. З цієї точки зору, важливою є побудова моделей взаємозалежності, де кожен параметр – від обсягу бетону до кількості доступних працівників – має свою функцію впливу на критичний шлях. У системах типу Oracle Primavera P6 або Deltek Acumen Fuse використовуються алгоритми CPM (Critical Path Method), які доповнені модулями статичної оцінки ризиків. Ці системи дозволяють змінювати параметри завдань, тривалості, доступності ресурсів і негайно бачити, як змінюється час завершення проекту. Проте сучасні інструменти пішли далі – вони не тільки демонструють зміну дати фінішу, а й визначають ймовірність провалу того чи іншого етапу, формують heatmap ідентифікованих зон ризику і пропонують варіанти їх усунення через сценарії перепланування [10].

Ці сценарії, у свою чергу, базуються на імовірнісних прогнозних моделях, які використовують методи Монте-Карло, логістичні регресії, басові мережі та трендові ковзаючі середні. Вони дозволяють здійснювати моделювання не лише одного проекту, а й усього портфеля, ідентифікуючи закономірності між відхиленнями, наприклад, у матеріальному забезпеченні і кадровій забезпеченості. Прогнозна ефективність таких систем базується на щільності історичних даних – чим більше даних накопичено, тим точнішими стають прогнози. У цій структурі з'являється поняття цифрового «вектору відхилення» – синтезованої метрики, яка одночасно фіксує тренд, прискорення і локальні збурення в часово-ресурсному балансі.

Щоб описати динамічну нестабільність у часових параметрах на основі імовірнісного поширення ризику, варто ввести стохастичну модель, у якій відхилення формується під впливом декількох змінних, включаючи довільні параметри системного збурення. Така модель має вигляд формули:

$$\sigma^2(t) = \int_0^t [\alpha(\tau)^2 + \beta(\tau)^2 \cdot e^{-2\lambda\tau}] d\tau, \quad (7)$$

де  $\sigma^2(t)$  – дисперсія прогнозного відхилення на момент часу  $t$ ,  $\alpha(\tau)$  – трендове зрушення очікуваного значення у момент часу  $\tau$ ,  $\beta(\tau)$  – амплітуда випадкового шуму,  $\lambda$  – коефіцієнт згасання флуктуацій. Ця формула дозволяє обчислити, як із часом накопичуються ризики і якою є ймовірність того, що проєкт вийде за межі допустимого інтервалу за часом чи ресурсом. На основі цієї метрики побудовані модулі попередження у системах типу @RISK або RiskyProject, які генерують сигнали на ранньому етапі, коли ще можна втрутитися у логіку проекту.

Разом із цим необхідно враховувати й симулятивну складову прогнозування, зокрема агентні моделі, в яких кожен ресурс або виконавець моделюється як окремий агент із власною поведінкою, швидкістю виконання, можливістю взаємодії. Такі системи застосовуються у складних інфраструктурних проєктах, де взаємозалежності між задачами настільки складні, що аналітичне вирішення задачі прогнозування стає неможливим. У таких випадках доцільно застосувати чисельну інтеграцію ефектів взаємодії, яка формалізується як:

$$H = \sum_{i=1}^n \int_0^T [c_i(t) \cdot \delta_i(t) \cdot \rho_i(t)] dt, \quad (8)$$

де  $H$  – сукупний ефект взаємодії агентів у часовому інтервалі  $T$ ,  $c_i(t)$  – вагова функція значущості  $i$ -го агента,  $\delta_i(t)$  – рівень завантаженості агента,  $\rho_i(t)$  – ефективність виконання задачі. Ця модель застосовується, зокрема, у програмному забезпеченні типу AnyLogic або FlexSim, що дозволяє створити тривимірну симуляцію виконання проєкту з урахуванням специфіки людської поведінки, відволікань, кооперативного навантаження і логістичних фрагментацій.

Окрім моделей імовірнісного та агентного типу, важливе значення має використання нейромережевих підходів до прогнозування. Такі моделі здатні виявити складні нелінійні залежності, які недоступні традиційній регресійній аналітиці. Наприклад, LSTM-моделі, які фіксують довготривалі залежності у часових рядах, застосовуються для прогнозування відхилень у темпах виконання, сезонних зсувів у поставанні або поведінкових змін підрядників. Ці моделі реалізуються через TensorFlow, Keras або PyTorch та інтегруються в аналітичні панелі типу Power BI або Tableau. На їх основі формуються дашборди, які відображають ймовірності порушення KPI, необхідні коригувальні дії та рівень невизначеності [11].

З огляду на складність сучасних проєктних середовищ, прогнозування відхилень перестає бути допоміжною функцією та трансформується у центральний елемент управління ризиками. Для цього використовуються різні типи цифрових моделей, кожна з яких виконує специфічну роль у системі прийняття рішень. У таблиці 1 представлено класифікацію таких моделей відповідно до їх методологічної основи, функціонального призначення та практичних реалізацій.

Таблиця 1

**Класифікація цифрових моделей прогнозування відхилень у будівельних проєктах**

Тип моделі	Методи/Інструменти	Основні функції	Приклади застосування
<b>Імовірнісні моделі</b>	Метод Монте-Карло, логістична регресія, басові мережі, ковзаючі середні	Оцінка ймовірностей ризиків, побудова heatmap, сценарне перепланування	@RISK, RiskyProject
<b>Стохастичні моделі</b>	Формула дисперсії з урахуванням тренду та шуму: $\sigma^2(t) = \int_0^t [\alpha^2(\tau) + \beta^2(\tau)] e^{-2\lambda\tau} d\tau$	Моделювання накопичення ризиків у часі, прогнозування перевищень критичних порогів	Oracle Primavera, Deltak Acumen Fuse
<b>Симуляційні моделі</b>	Агентне моделювання, чисельна інтеграція	Імітація поведінки агентів, врахування взаємодій, логістичних збурень, зміни темпу виконання задач	AnyLogic, FlexSim
<b>Нейромережеві моделі</b>	LSTM, TensorFlow, Keras, PyTorch	Виявлення нелінійних залежностей, прогнозування темпів, сезонних зсувів, поведінкових відхилень	Power BI, Tableau
<b>Гібридна модель</b>	Комбіновані підходи: нейромережі + Монте-Карло, агентні системи + стохастичні алгоритми	Системна інтеграція кількох типів прогнозування, зменшення похибки, підвищення точності сценарного аналізу	BM Watson, SAP Predictive Analytics

Джерело: розроблено автором на основі [11]

Розвиток інструментарію цифрового прогнозування відхилень у проєктах пов'язаний не тільки з математичними імітаціями, а й із новим класом моделей, які працюють з мультифакторною взаємодією параметрів. Такі моделі поєднують часові, ресурсні, організаційні та технологічні фактори в єдине прогностичне середовище, що потребує формалізації на рівні багатовимірної аналітики. У цьому контексті розглядається формула зваженої багатофакторної інтеграції, яка дозволяє оцінити узагальнений рівень відхилення з урахуванням структури проєктного ризику. Формально вона виражається так:

$$W = \sum_{a=1}^m \gamma_a \times \left( \int_0^T \vartheta_a(t) \cdot e^{-\beta_a t} dt \right), \quad (9)$$

де  $W$  – прогнозована глибина відхилення у багатофакторній проєктній системі,  $\gamma_a$  – ваговий коефіцієнт важливості  $a$ -го фактора,  $\vartheta_a(t)$  – функція зміни  $a$ -го ризику в часі,  $\beta_a t$  – швидкість зниження впливу фактора у часі,  $m$  – кількість незалежних параметрів. Застосування цієї моделі дозволяє побудувати ієрархію факторів впливу, порівнювати їхню значущість у різні періоди життєвого циклу проєкту, а також розраховувати сценарії компенсації, коли один фактор зростає, а інший – знижується. На практиці такі підходи застосовуються в гнучких дашбордах, які інтегрують інформацію з BIM, ERP та систем зовнішнього аналітичного моніторингу ризиків, наприклад, ринку постачальників, індексів вартості матеріалів, графіків опадів або інших середовищних умов.

Окремої уваги заслуговує взаємодія прогностичних моделей з механізмами прийняття рішень, зокрема в умовах мультиагентного проєктного управління. Коли маємо справу з середовищем, де рішення приймаються різними суб'єктами – підрядниками, інженерами, логістами, інвесторами – важливо враховувати узгодженість їхніх прогностичних моделей. Інакше відхилення буде виникати не через об'єктивні фактори, а через асинхронність інформаційних дій. Тому сучасні системи типу BIM Collaborate Pro або Procure Design Coordination включають не лише інструменти прогнозування, а й засоби узгодження планів, контроль версій рішень і перевірки відповідності сценаріїв на стику відповідальності [12].

Переходячи до візуалізації зазначених взаємозв'язків, доцільно узагальнити архітектуру цифрового прогнозування у вигляді рис. 3, що демонструє структурну логіку взаємодії основних класів цифрових систем – BIM, ERP та IoT – у межах прогностично-аналітичного інструментарію управління будівельними проєктами. Такий підхід дозволяє не лише окреслити межі відповідальності кожного цифрового блоку, а й побачити, як на перетині між ними формуються нові функції – симуляційні, неймережеві, імовірнісні – що забезпечують гнучкість та стійкість до змін.

Таким чином, третє питання логічно розкриває інтеграційні зв'язки між математичними основами, цифровими платформами, механізмами імітаційної логіки та прикладними сценаріями аналітики в проєктному середовищі. Функціональність таких інструментів не тільки дає змогу скоротити втрати, пов'язані з непередбаченими затримками, а й оптимізує розподіл ресурсів, динамізує рішення у реальному часі та створює принципово нову архітектуру управлінської відповідальності, в якій цифровий прогноз – це більше ніж обчислення: це основа стратегічного управління в умовах невизначеності.

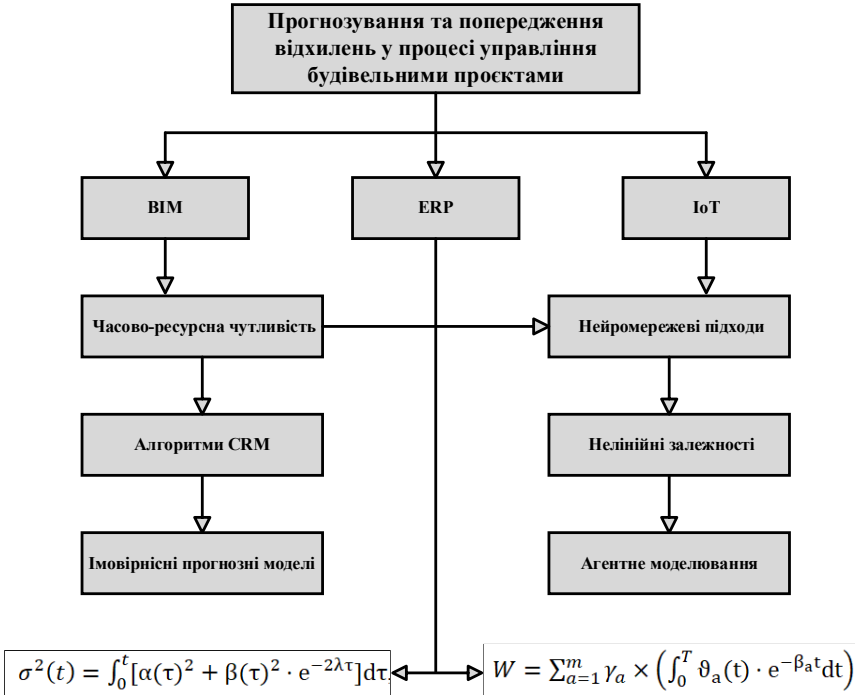


Рис. 3. Функціональна структура цифрових моделей прогнозування та попередження відхилень у будівельному проєкті (розроблено автором на основі [12])

**Висновок.** Розвиток інструментарію цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів у будівельних проєктах відображає загальну тенденцію переходу від статичного контролю до інтегрованого прогнозно-аналітичного управління. У межах дослідження встановлено, що ефективність сучасного моніторингу визначається не лише технічною наявністю сенсорів чи програмних платформ, а насамперед узгодженістю математичних моделей, цифрових архітектур та організаційних процедур прийняття рішень.

Інтеграція BIM як просторово-інформаційної основи, ERP як ресурсо-фінансової системи координації та IoT як сенсорного шару забезпечує формування цілісного інформаційного середовища. Така архітектура дозволяє синхронізувати планові та фактичні параметри, зменшити часові лаги в обробці даних і забезпечити прозорість управлінських процесів.

Запропоновані математичні моделі – експоненційні, логарифмічні, інтегральні та стохастичні – дозволяють формалізувати динаміку ресурсного виснаження, ефективність використання та накопичення відхилень. Використання імовірнісних і симуляційних методів, а також нейромережових підходів, розширює можливості сценарного аналізу та раннього попередження критичних ситуацій.

Важливим результатом є визначення ролі мультифакторних моделей у побудові адаптивної системи управління, здатної враховувати комплекс взаємозалежних параметрів. Такий підхід дозволяє перейти від реактивного реагування на відхилення до проактивного управління ризиками.

Отже, цифровий моніторинг у сучасному будівельному середовищі виступає стратегічним інструментом забезпечення ресурсної збалансованості, часової дисципліни та стійкості проєктів до невизначеності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів інтеграції прогностичних моделей із механізмами автоматизованого прийняття управлінських рішень.

#### **Список літератури:**

1. Sadova U., Stepura T., Korytska O. Formation of digital databases in monitoring of realization of educational-intellectual potential of the regions of Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 2022, 2(4(64)), 28–32. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256570>
2. Попик Б. Сучасні системи моніторингу цін на матеріальні ресурси у будівництві: принципи роботи та виклики. *Економіка та суспільство*, 2024, 64. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-33>
3. Chupryna I., Ryzhakova G., Chupryna K., Biloshchytskyi A., Tormosov R., Gonchar V. Designing a toolset for the formalized evaluation and selection of reengineering projects to be implemented at an enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 1(13(115)), 6–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251235>
4. Yurchyshyn O.Ya., Stepanets O.V., Skorobogatova N.Ye. Analysis of digital technologies in Ukraine: problems and prospects. *IX International Workshop on Professional Retraining and Life-Long Learning using ICT: Person-oriented Approach, co-located with the 19th International Conference on ICT in Education, Research, and Industrial Applications (ICTERI 2024)*. September 23, 2024, Lviv, Ukraine. Pp. 114-131
5. OECD. Enhancing Resilience by Boosting Digital Business Transformation in Ukraine. URL: [https://www.oecd.org/en/publications/enhancing-resilience-by-boosting-digital-business-transformation-in-ukraine\\_4b13b0bb-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/enhancing-resilience-by-boosting-digital-business-transformation-in-ukraine_4b13b0bb-en.html)
6. Ingram G., Vora P. Ukraine: Digital resilience in a time of war. URL: <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2024/01/Digital-resilience-in-a-time-of-war-Final.pdf>
7. Ogwueleka A.C., Ikediashi D.I. Exploring Monte Carlo Simulation Technique for Construction Project Risk Management. *Proceedings from the fourth International Sustainable Ecological Engineering Design for Society (SEEDS)*, 2018. Pp. 168-177
8. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Rubtsova O., Homenko O., Nesterenko I., Honcharenko T. Construction Project Management with Digital Twin Information System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2022. Vol. 12, Issue 10. P. 19-28. DOI: 10.46338/ijetae1022\_03
9. Chernyshev D., Ivakhnenko I., Klymchuk M. The Organization of Biosphere Compatibility Construction: Justification of the Predictors of Building Development and the Implementation Prospects. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, 7(3.2), 584-586. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14594>
10. Jenselin N. Risk Analysis of Construction Project Scheduling Using Monte-Carlo Simulation. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, Vol. 8, Issue 3. P. 2673-2680. DOI: 10.15680/IJIRSET.2019.0803158

11. Sharma M.K. Monte Carlo Simulation Applications for Construction Project Management. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2020, Vol. 11, Issue 2, pp. 88-100. DOI: <https://doi.org/10.34218/IJCIET.11.2.2020.010>

12. Svystun S., Melnychenko O., Radiuk P., Savenko O., Lysyi A. Distributed Intelligent System Architecture for UAV-Assisted Monitoring of Wind Energy Infrastructure. *1st International Workshop on Advanced Applied Information Technologies*, December 5, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine - Zilina, Slovakia, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.09387>

**Dmytro RIZUN**

***Digital monitoring toolkit for resource and time parameters under conditions of dynamic project interaction***

*The toolkit for digital monitoring of resource and time parameters in construction projects is formed as a multi-level information and analytical system that ensures continuous tracking, forecasting, and adjustment of project dynamics within a changing environment. In contemporary project management practice, monitoring extends beyond the mere recording of actual indicators and transforms into a comprehensive predictive analytics system integrated with BIM, ERP, and IoT digital platforms. Such integration synchronizes spatial models, resource flows, and sensor data received in real time, thereby creating a unified digital management environment.*

*The study reveals the conceptual foundations for the formation of a digital monitoring toolkit that combines mathematical models of resource depletion, logarithmic assessments of utilization efficiency, integral indicators of productivity losses, and stochastic risk models. The feasibility of applying exponential, logarithmic, and integral functions to formalize the dynamics of resource consumption and the accumulation of time deviations is substantiated. It is demonstrated that the use of multifactor models enables the assessment not only of absolute changes in indicators but also of their sensitivity to external and internal disturbances.*

*Special attention is given to the functional and analytical interaction of digital platforms. BIM is considered as the spatial and informational basis of monitoring, ERP as the system of resource and financial coordination, and IoT as the sensor layer ensuring data reliability. Their integration forms an adaptive management architecture capable of reconfiguration depending on changes in project parameters.*

*Within the framework of the research, approaches to forecasting deviations based on probabilistic, stochastic, simulation, and neural network models are systematized. The application of Monte Carlo methods, agent-based modeling, and LSTM architectures enables scenario analysis, assessment of the probability of exceeding critical thresholds, and the generation of early warning signals. This approach transforms monitoring from a reactive function into a proactive instrument of strategic management.*

*It is concluded that the effectiveness of digital monitoring is determined by the structural coherence of mathematical models, software platforms, and organizational procedures. The integration of analytical mechanisms into a unified coordination system ensures improved resource balance, minimization of time losses, and enhanced project resilience under conditions of uncertainty.*

**Keywords: digital monitoring, resource parameters, time deviations, BIM, ERP, IoT, predictive analytics, project management.**

Дата надходження статті: 14.01.2026

Дата прийняття статті: 18.02.2026