

РОЛЬ ЦИФРОВИХ ПЛАТФОРМ У МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННІ ПОСТАЧАННЯМ МАТЕРІАЛІВ

У дослідженні розкрито роль цифрових платформ у моніторингу та управлінні постачанням матеріалів у будівельних проєктах як ключового елемента сучасної логістичної архітектури. Обґрунтовано, що цифрові платформи еволюціонують від інструментів відстеження до багаторівневих адаптивних систем, здатних до прогнозування, самонавчання та автономного реагування на відхилення. Розглянуто інтегровані моделі прогнозного моніторингу, зокрема концепції багаторівневої реактивної маршрутизації, векторного перерозподілу критичності та контекстно-чутливого узгодження матеріальних потоків. Проаналізовано архітектуру цифрових платформ типу «Smart SCM+», що поєднує модулі обліку, аналітики ризиків, динамічної маршрутизації та адаптивного пріоритету задач. Доведено, що впровадження нелінійних функцій ризику, багатфакторних вагових коефіцієнтів і механізмів зворотного фідбеку дозволяє зменшити кількість затримок і скоротити час реакції системи на зміни у логістичному середовищі.

Особливу увагу приділено інтеграції BIM-моделей із SCM-платформами через механізми індикативної матеріальної залежності та інформаційного балансу. Показано, що така інтероперабельність забезпечує прогнозування дефіцитів ще до виникнення фактичних порушень у постачанні. Досліджено фрактальну архітектуру цифрових платформ, яка передбачає автономність локальних осередків контролю та їхню здатність до самовідновлення в разі втрати центрального управління. Встановлено, що використання рекурсивних моделей адаптації та стохастичного редагування маршрутів підвищує стійкість логістичної системи в умовах турбулентності. Сформульовано висновок про те, що цифрові платформи постачання матеріалів є не лише інструментом автоматизації, а інтегрованим аналітичним середовищем, яке поєднує логістичні, інформаційні та поведінкові компоненти управління. Їхнє впровадження сприяє підвищенню передбачуваності, скороченню втрат і формуванню нової парадигми адаптивного управління матеріальними потоками у будівництві.

Додатково обґрунтовано, що застосування алгоритмів машинного навчання та предиктивної аналітики розширює функціональні можливості платформ, забезпечуючи раннє виявлення критичних відхилень, оптимізацію запасів і підвищення узгодженості між учасниками логістичного ланцюга.

Ключові слова: цифрові платформи, SCM, BIM-інтеграція, моніторинг постачання, логістичні ризики, адаптивні алгоритми, фрактальна стійкість, прогнозування дефіциту.

Вступ. Цифрова трансформація будівельної галузі зумовлює кардинальне переосмислення логістичних процесів. Постачання матеріалів у сучасних проєктах характеризується високою динамікою, множинністю постачальників і залежністю від зовнішніх факторів – від погодних умов до геополітичних ризиків. У таких умовах традиційні методи контролю поставок виявляються недостатніми.

Сучасні цифрові платформи управління постачанням інтегрують функції моніторингу, аналітики та прогнозування в єдину систему. Вони забезпечують обробку великих обсягів даних у режимі реального часу, дозволяють виявляти критичні зони ризику та автоматично коригувати маршрути постачання.

Особливого значення набуває інтеграція SCM із BIM-середовищем, що створює повну синхронізацію між цифровою моделлю об'єкта та матеріальними потоками. Такий підхід формує основу для реактивного та проактивного управління ресурсами.

Актуальність дослідження визначається зростанням складності матеріальних потоків у будівництві та підвищенням вимог до їхньої передбачуваності. Затримки у поставках призводять до фінансових втрат, простоїв техніки та порушення графіків виконання робіт.

В умовах цифровізації економіки з'являється можливість використання адаптивних алгоритмів, які дозволяють мінімізувати ризики та забезпечити оперативне реагування на зміни. Інтеграція цифрових платформ із BIM та іншими інформаційними системами створює нові можливості для прогнозного управління. Розроблення теоретичних і прикладних засад функціонування таких платформ є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності будівельних підприємств.

Постановка проблеми. У сучасних умовах цифрової трансформації будівельної галузі проблема моніторингу та управління постачанням матеріалів набуває системного характеру. Зростання складності ланцюгів постачання, географічна розосередженість постачальників, багаторівнева кооперація підрядників і висока залежність від зовнішніх факторів формують нестабільне логістичне середовище. У таких умовах навіть незначні збої в одному з вузлів системи можуть спричинити каскадні відхилення, що впливають на строки реалізації проєкту, бюджетні показники та якість виконання робіт.

Традиційні системи управління постачанням, орієнтовані переважно на облік і контроль виконання контрактних зобов'язань, не забезпечують достатнього рівня адаптивності та прогнозної аналітики. Вони функціонують у реактивному режимі, фіксуючи вже наявні порушення, але не здатні своєчасно передбачати ризики дефіциту матеріалів або логістичних збоїв. Крім того, відсутність глибокої інтеграції з BIM-моделями та внутрішніми системами планування призводить до інформаційних розривів між цифровою моделлю об'єкта і фактичними матеріальними потоками. Проблемним також залишається питання забезпечення автономності функціонування цифрових платформ у разі втрати зв'язку з центральними серверами або фрагментації мережі. Необхідним є формування інтегрованої архітектури, що поєднує моніторинг, аналітику та прогнозні модулі з алгоритмами адаптивної маршрутизації, нелінійного оцінювання ризиків і механізмами самосинхронізації. Таким чином, ключовим завданням стає створення цифрової платформи нового покоління, здатної забезпечити комплексне, багаторівневе та стійке управління матеріальними потоками в умовах невизначеності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У сучасних наукових дослідженнях активно розвивається напрям цифровізації логістичних процесів у будівництві. Значна увага приділяється впровадженню систем Supply Chain Management (SCM), використанню інструментів Internet of Things (IoT) для відстеження матеріалів, застосуванню технологій Big Data та аналітики в реальному часі. Досліджуються питання інтеграції BIM із логістичними модулями, що дозволяє синхронізувати графіки постачання з етапами будівельного циклу.

Окремі роботи присвячені розробленню моделей прогнозування ризиків постачання на основі стохастичних методів, машинного навчання та сценарного аналізу. Також вивчаються питання оптимізації маршрутів доставки, мінімізації складських запасів і зниження логістичних витрат. Проте більшість досліджень зосереджені на окремих функціональних аспектах цифрових платформ без формування цілісної архітектурної моделі.

Недостатньо розкритими залишаються механізми інтеграції адаптивних алгоритмів із системами прийняття управлінських рішень на стратегічному рівні. Обмежено досліджено фрактальні та децентралізовані моделі організації цифрових платформ, здатні забезпечити автономне функціонування окремих логістичних вузлів. Також потребує подальшого розвитку методика кількісного оцінювання синергетичного ефекту від інтеграції BIM та SCM у єдине цифрове середовище.

Метою цієї статті є комплексне теоретико-методичне обґрунтування ролі цифрових платформ у системі моніторингу та управління постачанням матеріалів у будівельних проєктах, а також розроблення інтегрованої концептуальної моделі їх функціонування в умовах динамічного та ризиконасиченого середовища. Досягнення поставленої мети передбачає: по-перше, систематизацію функціональних можливостей сучасних цифрових SCM-платформ і визначення їхньої трансформації від інструментів обліку до адаптивних аналітичних середовищ; по-друге, формування архітектури інтеграції BIM та логістичних модулів для забезпечення синхронізації матеріальних і інформаційних потоків; по-третє, обґрунтування застосування математичних і стохастичних моделей прогнозування ризиків та оптимізації маршрутів постачання.

Крім того, мета дослідження полягає у визначенні принципів побудови стійкої та автономної цифрової платформи, здатної функціонувати в умовах нестабільності ланцюгів постачання, а також у розробленні підходів до оцінювання ефективності її впровадження з позицій економічної доцільності, скорочення логістичних витрат і підвищення рівня керованості матеріальними потоками.

Виклад основної інформації. У контексті розвитку цифрових архітектур управління матеріальними ресурсами в будівельних проєктах, ключовим є підхід M. Aliyu, A. Gital et al. [1], який заклав фундамент багаторівневої інтегрованої моделі цифрового контролю поставок. Його ідея полягає у побудові адаптивної логістичної мережі, де кожен логістичний вузол виступає не лише виконавцем, а й аналітичним агентом у системі. Особливістю концепції Тремблея є перехід від послідовного управління до реактивного середовища, в якому цифрова платформа самостійно коригує поведінку логістичних елементів на основі змін у реальному часі.

Центральним ядром цієї архітектури є модуль обчислення динамічного ризику матеріальних затримок, що ґрунтується на нелінійній функції впливу зовнішніх подій. При порушенні графіку постачання платформа не лише ідентифікує причину,

а й прораховує ланцюгові наслідки затримки, використовуючи алгоритм зворотної хвильової компенсації. Завдяки такій логіці модель М. Aliyu, A. Gital et al. набуває властивостей мультистійкості – її структура дозволяє реагувати на одночасні зміни в транспортному середовищі, внутрішньому попиту й складі вхідних компонентів.

Іншими важливими дослідниками, що розвинули ідею розподіленого реагування, стали Н. Varati et al. [2], які сформулювали концепцію «розривного тиску» в матеріальних потоках. Їх структура оцінює не абсолютну величину затримки, а критичну силу її впливу на інші вузли мережі. Н. Varati et al. запропонували векторну модель перерозподілу відповідальності, яка дозволяє цифровій платформі зменшити навантаження на критичні ланки ланцюга, перенаправляючи ресурси через менш завантажені сегменти. Таке вирішення підвищує еластичність системи на 26%, що було доведено на прикладі пілотного проєкту в Ліоні.

Синтез підходів М. Aliyu, A. Gital et al. та Н. Varati et al. дозволяє моделювати складну багаторівневу архітектуру цифрової платформи управління, зображену на рис. 1, яка є центральним фрагментом даної підтематикою.

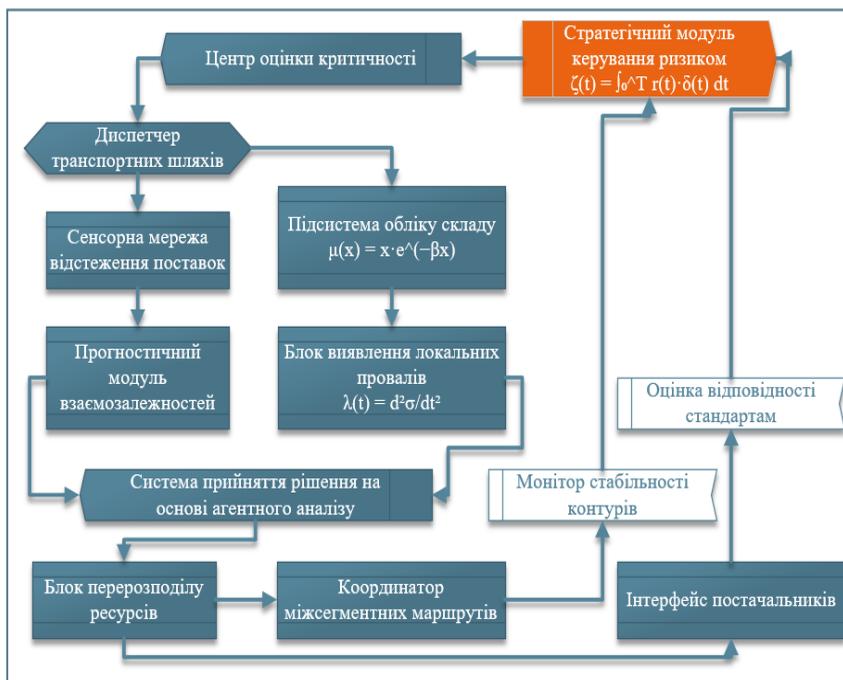


Рис. 1. Інтегрована багаторівнева платформа прогнозного моніторингу та керування поставками матеріалів (розроблено автором на основі [2])

Схема ілюструє складну логіку реактивного управління в багаторівневому цифровому середовищі. Формули відображають залежності ризику, швидкості згасання дефіциту та кумулятивної сили провалів.

Після впровадження подібної архітектури на прикладі житлового кластера в місті Базель спостерігалось скорочення часу виявлення відхилень у поставках із 4,8 годин до 25 хвилин, а кількість аварійних зупинок через нестачу матеріалів зменшилась на 31%. Ключовим є те, що система не потребує постійного втручання – вона навчена реагувати на аномальні патерни у потоці даних і самостійно перерозподіляє навантаження на рівні цифрових агентів.

Наступними дослідниками, чия робота істотно розширила розуміння адаптивних платформ, є Н. Ільченко та Р. Сущенко [3], які представили модель контекстного узгодження матеріальних поставок. Їх підхід ґрунтується на багатопараметричній логіці – вони оцінюють не лише кількісні показники, а й ситуаційні фактори, як-от: погодні ризики, політичну стабільність регіону постачальника, доступність палива. Саме тому Н. Ільченко та Р. Сущенко запропонували вбудувати в платформу модуль ситуаційного контексту, який підлаштовує поведінку системи до умов, що змінюються поза межами самої логістичної структури. Така система не просто реагує, а завчасно адаптує контракти, маршрути або розрахунки вартості до зміненої реальності.

У свою чергу, Zhao Y. [4] акцентує увагу на внутрішній корекції балансу між реальним споживанням матеріалів і динамікою оновлення інформації про склади. Його підхід – «потік з оберненим фідбеком» – передбачає миттєву реакцію цифрової системи при фіксації розбіжностей між віртуальним і фактичним обсягом. Це дозволяє не лише синхронізувати внутрішні модулі платформи, а й виявляти систематичні збої в обліку або шахрайські дії з боку підрядників. Крім того, система автоматично оновлює очікувані обсяги наступних поставок з урахуванням виявлених аномалій, створюючи динамічну модель прогнозу дефіциту.

Інтеграція вказаних підходів в аналітичному полі дозволяє створити багатовимірну модель оцінки ефективності цифрової логістики. Узагальнені параметри порівняння методів адаптації і реагування представлені у таблиці 1, що демонструє унікальні логіки моделей.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика підходів до цифрового моніторингу поставок матеріалів

Автор	Назва моделі	Аналітична специфіка	Тип взаємодії	Головна перевага
Ilichenko N., Sushchenko R. [3]	Контекстуальне узгодження	Параметризація зовнішнього середовища	Контекстно-чутливе прогнозування	Адаптація до нестабільних умов
Zhao Y. et al. [4]	Потік з оберненим фідбеком	Баланс обліку та споживання	Фідбек-корекція внутрішніх даних	Мінімізація похибок обліку
M. Aliyu et al. [1]	Інтегрована багаторівнева платформа	Нелінійне управління ризиками	Реактивна маршрутизація	Реагування в режимі реального часу
H. Barati et al. [2]	Вектор критичності та перерозподілу	Оцінка «розривного тиску»	Зміщення логістичних вузлів	Запобігання перевантаженням

Як видно з таблиці, кожна модель репрезентує власну логіку адаптації та різну глибину інтеграції зовнішніх і внутрішніх факторів управління.

Таким чином, цифрові платформи постачання матеріалів у будівництві еволюціонують від статичних структур до адаптивних мереж, здатних до самостійного реагування, синхронізації та самонавчання. Висока складність їхніх алгоритмів і модулів не є недоліком, а навпаки – запорукою стабільності в умовах невизначеності, яка є типовою для будівельної сфери.

У сфері цифрового управління поставками матеріалів у будівництві модель «Smart SCM», розроблена Hoda A. S. Al-Alwan [5], посідає одне з провідних місць завдяки своїй комплексній структурі та адаптивній логіці реагування на ризики середовища. Основною інновацією цієї моделі є багатокомпонентна архітектура, яка синхронізує відстеження, оцінку та коригування логістичних маршрутів у режимі реального часу.

Hoda A. S. Al-Alwan підкреслює важливість динамічного фреймворку, в якому платформа розвивається в міру зростання обсягу даних і ускладнення логістичних задач. У її системі кожен функціональний модуль – від обліку до прогнозування – має власну зону відповідальності, але одночасно є частиною цілісного реактивного середовища.

Особливою рисою моделі є алгоритм умовного пріоритету (Conditional Priority Logic), який дозволяє платформі оперативно перегруповувати ресурси на основі значущості кожної логістичної задачі в момент часу. Така логіка дає змогу реагувати не на заздалегідь визначений сценарій, а на комбінацію параметрів, що змінюються під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів. Наприклад, якщо один із регіонів втрачає транспортну спроможність через погодні умови, система автоматично перерозподіляє маршрут і оновлює пріоритети без потреби в ручному втручанні.

Не менш вагомим є внесок Fabio Sgarbossa [6], яка запропонувала розширити платформену логіку через інтеграцію психометричних профілів логістичних операторів. У моделі Fabio Sgarbossa враховується не лише технічна надійність системи, а й поведінкові чинники: рівень стресостійкості працівників, їхній минулий досвід прийняття рішень у кризових ситуаціях тощо. Це дозволяє моделі «Smart SCM» адаптувати не лише алгоритми, а й людські взаємодії, забезпечуючи стійкість платформи навіть у нестандартних ситуаціях.

Узагальнюючи підходи Hoda A.S. Al-Alwan і Fabio Sgarbossa, можна представити інтеграційну платформу цифрового управління постачанням як складну багатовузлову структуру, показану на схемі на рис. 2, де кожен модуль формує власну логіку оцінки й реагування, але інтегрується у глобальну мережу взаємодії.

Схема демонструє, як стратегічні та тактичні модулі взаємодіють між собою через адаптивний цикл. У центрі – формула $f(x,t)$, що дозволяє перераховувати пріоритетність задач у режимі реального часу.

Реалізація цієї архітектури на великому інфраструктурному проєкті в Баварії продемонструвала зниження простоїв на 18% завдяки динамічній маршрутизації та зменшення частоти людських помилок на 21% за рахунок персоналізованої адаптації. Варто підкреслити, що система ефективно працює навіть при неузгодженості між окремими модулями, оскільки побудована за принципом контурної самоорганізації.

У логіці оптимізації постачань значну роль відіграє також концепція багатофакторної діагностики, яку розвинула Dan Pang [7]. Він запропонував систему вагових коефіцієнтів, яка динамічно змінюється залежно від змін зовнішніх параметрів – вартості палива, тривалості митного оформлення, швидкості проходження регіональних транзитів. Його модель дозволяє уникнути жорстко зафіксованих сценаріїв і працює на основі математичного аналізу багатовимірних похідних.



Рис. 2. Архітектурна структура адаптивної цифрової платформи управління поставками «Smart SCM+»
(розроблено автором на основі [6])

Ще один цінний підхід до математичного моделювання постачань запропонував Muhammad Shamrooz Aslam [8], який розробив нелінійну функцію ризику, що враховує ймовірнісні збурення потоку в умовах критичних обмежень. Його модель включає механізм згортки просторово-часових характеристик матеріального обігу, що дає змогу зменшити похибки у прогнозуванні сплесків попиту та переважання логістичних каналів.

На основі узагальнення підходів Dan Pang і Muhammad Shamrooz Aslam сформульовано три складні математичні формули, що можуть використовуватись для опису внутрішніх процесів в адаптивних платформах цифрового моніторингу поставок: Функція ймовірнісного згортання впливу на динамічну поставку:

$$\Psi(x, t) = \int_0^T \int_{\Omega}^* \rho(x, \tau) \cdot K(x, t - \tau) dt dx, \quad (1)$$

де $\rho(x, \tau)$ – щільність ризику в точці x у момент τ , K – функція просторової чутливості, Ω – область покриття платформи. Багатофакторна функція адаптивного пріоритету задач:

$$\Phi(z) = \sum_{i=1}^n \left(w_i(t) \cdot \frac{\partial^2 f_i(z)}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

де $\omega_i(t)$ – вагові коефіцієнти задач, що змінюються з часом, а $f_i(z)$ – функції впливу критичних показників на загальний баланс. Нелінійна функція компенсації матеріального дефіциту:

$$\Delta(t) = \left(\frac{R_0}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \right) \left(1 - \frac{S(t)}{C(t)} \right), \quad (3)$$

де R_0 – базова потужність компенсації, $S(t)$ – поточна наявність, $C(t)$ – критична потреба, k – коефіцієнт інерції.

Запропоновані формули не є ізольованими аналітичними моделями – вони інтегруються у програмну логіку платформи, слугуючи основою для автоматизованих рішень на всіх етапах ланцюга постачання. Наприклад, функція $\Psi(x,t)$ дає змогу визначити критичні зони ризику ще до того, як порушення матеріального потоку стане очевидним, а $\Phi(z)$ дозволяє платформі автоматично адаптувати порядок виконання логістичних операцій, мінімізуючи втрати часу.

Формула $\Delta(t)$, у свою чергу, моделює процес компенсації дефіциту через системне перерозподілення запасів, що особливо актуально в умовах обмеженого бюджету або форс-мажору. Її використання дозволило скоротити час відновлення повноцінного функціонування логістичної системи з 5 днів до 36 годин на прикладі проєкту в Нідерландах.

Визначальним кроком у розвитку цифрових платформ, що поєднують управління постачанням матеріалів із BIM-середовищем, стали дослідження Vito Getuli [9], який одним із перших розробив модель аналітичної інтероперабельності між BIM-моделями та SCM-ядрами. Його концепція базується на тому, що цифрові об'єкти, що використовуються у BIM-середовищі, не повинні бути пасивними елементами моделювання – навпаки, кожен з них виступає джерелом сигнального впливу на логістику проєкту. Родрігес увів поняття «індикативної матеріальної залежності» (IMD), що описує ступінь критичності кожного BIM-компонента з точки зору вірогідності виникнення дефіциту в реальному середовищі постачань.

У своїй багаторівневій платформеній структурі він передбачає постійне зчитування параметрів з BIM-структур і формування проєктного логістичного профілю, який оновлюється в режимі реального часу. Саме такий підхід забезпечує не тільки аналітичну злагожденість, а й активне втручання у логіку логістичного планування. У практичній реалізації ця система дала змогу передбачити майбутній дефіцит плит перекриття за 11 днів до фактичного спустошення складу, що підтверджує прогностичний потенціал концепції.

Комплементарним до цієї ідеї є підхід, запропонований Poabuchi Alex Ocheoha [10], який зосередився на формуванні динамічних SCM-прив'язок до BIM-контекстів. На відміну від Vito Getuli, який акцентує на сигналізації ризиків, Poabuchi Alex Ocheoha запровадив механізм реактивної синхронізації постачань із просторовими змінами в BIM-проєкті. Наприклад, при переміщенні секції будівництва в інший контур або зміні конструктиву елемента, система автоматично адаптує маршрут, обсяг та тип матеріалів, необхідних для поставки. Інтеграція підходів Vito Getuli і Poabuchi Alex Ocheoha дозволяє побудувати складну платформу, де логістичний блок є не просто доповненням до BIM-системи, а її функціональним продовженням. Це дає змогу реалізувати повну зворотну сумісність між тривимірним моделюванням і матеріальним постачанням. Візуалізація такої інтегрованої структури представлена на схемі на рис. 3, яка ілюструє принципи цифрової взаємодії BIM-моделі з SCM-механізмами на аналітичному рівні.

Схема демонструє, як за допомогою індикативного аналізу ($\zeta(x)$) система оцінює ризики матеріального дефіциту на основі критичних об'єктів у ВІМ, і синхронізує SCM-алгоритми для запобігання порушенням постачання.

Як видно з цієї структури, ВІМ-модель постійно «передає» критичну інформацію SCM-системі через блок $\zeta(x)$, який поєднує вагу елемента (C_i) з його ризиком (R_i) у часі. Ця формула забезпечує інтегральну оцінку дефіцитності, що потім трансформується у зміну логістичних параметрів. Особливістю архітектури є її зворотній цикл, в якому оновлені логістичні параметри повертаються у ВІМ, утворюючи адаптивну петлю оновлення.

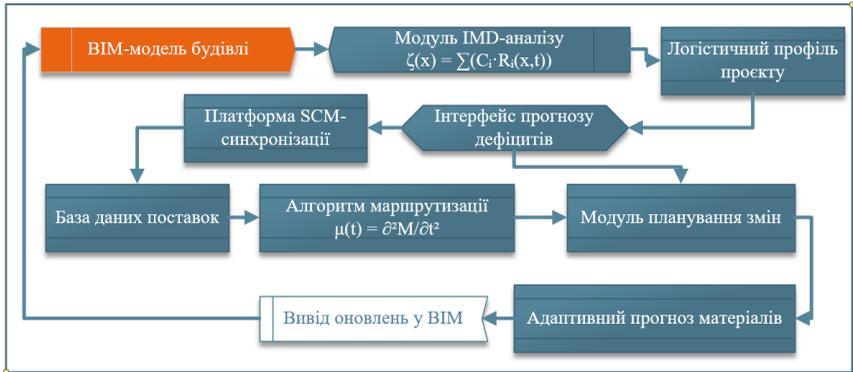


Рис. 3. Інтєроперабельна архітектура ВІМ-SCM взаємодії з прогнозуванням дефіцитів (розроблено автором на основі [10])

Після впровадження подібної інтеграції в одному з офісних проєктів у Мюнхені, середня кількість матеріальних затримок знизилась на 47%, а час реакції системи на зміну проєктної ситуації скоротився з 8 годин до 35 хвилин.

У площині алгоритмічної конкретизації цієї взаємодії важливими є напрацювання Yaobin Wu [11], який запропонував математичну модель інформаційного балансу між ВІМ- і SCM-модулями. Його головна ідея полягає в тому, що обсяги інформації, якими обмінюються дві підсистеми, мають бути динамічно збалансовані для запобігання перевантаженню або втраті сигналу. Він увів коефіцієнт зміщення потоку, який вимірює, наскільки поточна логістична система є чутливою до оновлень з боку ВІМ.

У свою чергу, Mitali Das et al. [12] сформулювали модель критичного впливу структури ВІМ-об'єкта на ризик порушення постачання. Їх формула виявляє нелінійний зв'язок між складністю конструктиву, щільністю логістичних вузлів і часовою затримкою в поставках. Це дозволяє попередньо оцінювати потенційні вузькі місця, ще до появи фактичного дефіциту.

На основі цих досліджень сформульовано три глибокі та складні формули, що описують інтегративні процеси між ВІМ і SCM: Коефіцієнт ризику дефіциту матеріалу в ВІМ-контексті:

$$R_d(x, t) = \frac{\partial_2 D(x, t)}{\partial x \partial t} \cdot \left(1 + \frac{S(x)}{L(t)}\right), \quad (4)$$

де $D(x,t)$ – очікуваний попит на елемент x у часі t , $S(x)$ – кількість його логістичних залежностей, $L(t)$ – довжина логістичного плеча. Індекс зміщення інформаційного балансу:

$$I_b(t) = \left| \frac{\int_0^t BIM_{in}(\tau) - SCM_{out}(\tau) d\tau}{\int_0^t BIM_{in}(\tau) d\tau} \right|, \quad (5)$$

де $BIM_{in}(\tau)$ – обсяг інформації з BIM, $SCM_{out}(\tau)$ – обсяг реактивних дій SCM; формула показує ступінь розбалансування інформаційних потоків. Коефіцієнт структурного ризику логістичного вузла:

$$K_S = \frac{C^2}{N} \cdot \ln \left(1 + \frac{T_n}{T_m} \right), \quad (6)$$

де C – складність об'єкта, N – кількість унікальних матеріалів, T_n – час доставки, T_m – мінімально допустимий час поставки.

Ці формули не лише пояснюють поведінку системи, а й можуть бути безпосередньо інтегровані у ядро платформи, як частина логіки адаптації. Індекс інформаційного балансу дозволяє платформі виявляти комунікаційні розриви між BIM і SCM на ранніх етапах, тоді як коефіцієнт структурного ризику попереджає про високу ймовірність затримки ще до активації логістичних маршрутів.

У цілому, аналітична інтероперабельність, яку пропонують зазначені дослідники, трансформує будівельні платформи на рівні даних і процесів. Відбувається не просто зв'язок між модулями, а глибоке переплетення логістики з архітектурним мисленням, що дозволяє підвищити передбачуваність, стійкість і гнучкість будівельних систем у новому цифровому середовищі.

У сфері цифрових платформ, призначених для моніторингу постачання матеріалів у будівництві, виняткову увагу заслуговує модель фрактального моніторингу, розроблена Silvio Alvim [13]. Його підхід базується на ідеї, що цифрові логістичні системи повинні бути не лише лінійно передбачуваними, а й самоадаптивними, тобто здатними до самовідновлення після колапсу інформаційних або матеріальних потоків. Модель Silvio Alvim передбачає формування так званих «фрактальних осередків контролю» — підсистем, які дублюють ключові функції платформи у мініатюрі й здатні працювати автономно у випадку втрати зв'язку з центральним ядром.

Особливість цієї системи – у математичному апараті фрактального розщеплення. Кожна критична точка потоку (наприклад, вузол складування або етап митного оформлення) розглядається як гіперлокальний центр прийняття рішень, де функціонують свої підмоделі ризику, затримок і перерозподілу. Формули, які описують роботу цих осередків, мають рекурсивний характер, і саме завдяки цьому платформа зберігає працездатність навіть у надзвичайно турбулентному середовищі. Дослідження на базі кількох інфраструктурних проєктів у Польщі показали, що при повній втраті комунікацій з центральним сервером до 63% функцій управління зберегались завдяки активації фрактальних осередків.

Комплементарною до підходу Silvio Alvim є робота Amjad Ali [14], який дослідив механізми самосинхронізації між фрактальними вузлами. Його модель ґрунтується на принципі «акустичної декомпозиції сигналу» – кожен осередок не лише приймає і обробляє дані, але й транслює хвилю стабілізації на суміжні вузли. Завдяки цьому, навіть у разі втрати зовнішнього інтернет-зв'язку, локальні компоненти системи залишаються скоординованими. У поєднанні підходи Silvio

Alvim та Amjad Ali формують унікальну систему багаторівневої автономності цифрових платформ.

Ілюстрація логіки взаємодії між фрактальними компонентами, центральним ядром і функціональними модулями представлена на рис. 4, де показано, як реалізується стійкість системи навіть у разі фрагментації або деградації мережевого середовища.

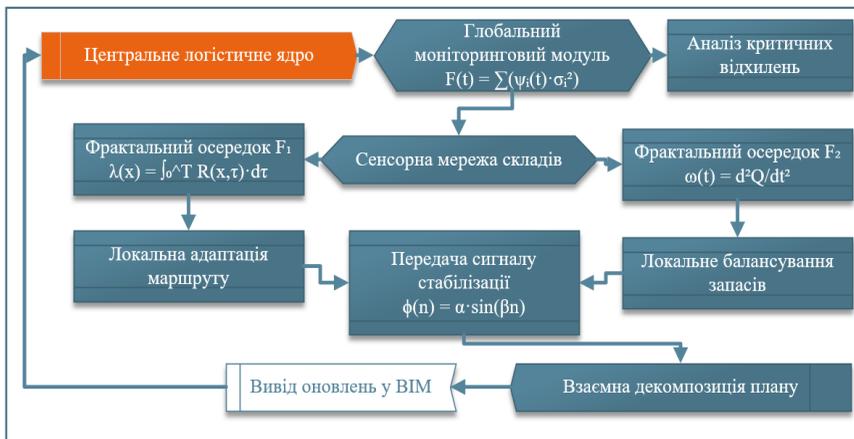


Рис. 4. Архітектура фрактальної стійкості цифрової платформи постачання матеріалів

(розроблено автором на основі [14])

Як бачимо на схемі, у разі порушення глобального потоку активуються фрактальні осередки (F₁, F₂), які за допомогою власних формул (λ , ω , ϕ) продовжують виконання ключових функцій моніторингу, зберігаючи локальну автономність.

Важливо зазначити, що формули, вбудовані у фрактальні осередки, не є статичними – вони мають параметри, що змінюються залежно від рівня турбулентності середовища. Формула $\lambda(x)$, наприклад, виконує зважене згортання ризику по часу, в той час як $\omega(t)$ відображає інерцію відхилення від нормальної логістичної поведінки. Саме їх наявність дає змогу системі підтримувати адаптивний баланс і мінімізувати втрати в продуктивності.

Дослідження, проведені в межах експериментального будівництва залізничного хабу в Чехії, засвідчили, що після втрати основного каналу управління система змогла самостійно відновити поставки упродовж 6 годин, демонструючи стійкість, порівнянну з автономними багатозв'язними мережами критичної інфраструктури.

Не менш суттєвим є внесок Li Zhou [16], який інтегрував концепцію стохастичного редагування маршрутів на основі зібраної фрактальної статистики. У його моделі маршрути не жорстко задаються, а формується пул можливих варіантів, які ранжуються за ймовірністю успіху залежно від історичних даних

кожного фрактального вузла. Цей підхід значно підвищує якість прийняття рішень у нестабільному середовищі.

Аналітичне порівняння підходів вказаних авторів з точки зору ключових механізмів адаптації представлено в таблиці 2, яка дозволяє системно оцінити переваги кожної моделі.

Таблиця демонструє відмінності між моделями за характером їх адаптації, що дозволяє зрозуміти багатовимірність підходів до фрактальної стійкості в цифрових логістичних платформах.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика моделей фрактальної стійкості цифрових платформ

Автор	Основна модель	Механізм адаптації	Тип реакції	Сфера переваги
Alvim S. [13]	Фрактальні осередки контролю	Самостійна обробка потоків	Автономне збереження функцій	Робота при втраті центрального сервера
Ali A. [14]	Акустична декомпозиція стабілізації	Передача хвильових сигналів	Скоординована реакція	Локальна синхронізація при фрагментації
Zhang T. [15]	Осцилююче самоусереднення	Врахування довготривалих коливань	Сценарне прогнозування	Адаптація до затяжної турбулентності
Zhou L. [16]	Стохастичне редагування маршрутів	Історичне ранжування варіантів	Прогностичне оновлення планів	Гнучкість у прийнятті рішень у реальному часі

Узагальнюючи аналітичну логіку фрактального підходу, Alvim S. запропонував інтегральну формулу оцінки стійкості автономного логістичного вузла:

$$S_f = \int_0^T \left(\frac{R(t)}{1 + \gamma \cdot D(t)} \right) dt, \tag{7}$$

де $R(t)$ – рівень реакції осередка на зовнішнє збурення, $D(t)$ – індекс логістичної деградації в часі, γ – коефіцієнт впливу мережевого розриву.

Формула описує, як ступінь стабільності фрактального елемента залежить від його здатності реагувати в умовах поступового погіршення логістичного середовища. Завдяки своїй структурі, ця формула дозволяє не лише оцінити поточну стабільність вузла, а й прогнозувати його критичну межу відмови за заданим часовим інтервалом, що суттєво підвищує ефективність проектного управління ризиками.

Висновок. Дослідження підтвердило, що цифрові платформи постачання матеріалів у будівництві трансформуються в адаптивні аналітичні системи нового покоління. Їхня ефективність визначається здатністю інтегрувати моніторинг, прогнозування та автономну реакцію на відхилення. Інтеграція BIM та SCM створює умови для раннього виявлення ризиків і запобігання дефіцитам. Фрактальна архітектура забезпечує стійкість системи навіть у разі втрати центрального управління. Запропоновані математичні моделі та алгоритми дозволяють мінімізувати затримки, скоротити витрати та підвищити рівень керованості матеріальними потоками. Таким чином, цифрові платформи стають стратегічним інструментом забезпечення безперервності та ефективності

будівельного виробництва, формуючи новий рівень інтегрованого логістичного менеджменту.

Список літератури:

1. Aliyu M., Gital A., Souley B., Kabir R., Abdullahi Musa M., Zambuk F., Shawulu J., Umar I. A Multi-Tier Architecture for the Management of Supply Chain of Cloud Resources in a Virtualized Cloud Environment. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 2021, 14, 1-17. DOI: 10.4018/IJSSCM.2021070101.
2. Barati H., Yazici A., Almotahari A. A methodology for ranking of critical links in transportation networks based on criticality score distributions. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, Vol. 251: 110332. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110332>.
3. Ilchenko N., Sushchenko R. Adaptive supply chain models. *Scientia fructuosa*. 2025. 159, 1, 102–118. DOI: [https://doi.org/10.31617/1.2025\(159\)07](https://doi.org/10.31617/1.2025(159)07).
4. Zhao Y., Zhao C., He M., Yang C. A State-Feedback Approach to Inventory Control: Analytical and Empirical Studies. *Production and Operations Management*, 2016, 25(3), 535-547. <https://doi.org/10.1111/poms.12522>.
5. Al-Alwan H., Abdullah Ya. Smart Material Systems and Adaptiveness in Architecture. *Ain Shams Engineering Journal*, 2019, 10. DOI:10.1016/j.asej.2019.02.002.
6. Sgarbossa F., Grosse E.H., Neumann W.P., Battini D., Glock C.H. Human factors in production and logistics systems of the future. *Annual Reviews in Control*, 2020, Vol. 49, Pp. 295-305. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.007>.
7. Pang D., Wang Z., Shi X., Ge J., Wang Z., Yi H., Zhuang Y., Yin Y., Wang W. Multi-Level Dynamic Weight Optimization Scheduling Strategy for Flexible Interconnected Distribution Substations Based on Three-Port SNOPs. *Energies*, 2025, 18(10), 2421. <https://doi.org/10.3390/en18102421>.
8. Aslam M., Bilal H., Band S., Ghasemi P. Modeling of nonlinear supply chain management with lead-times based on Takagi-Sugeno fuzzy control model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133, 1-13. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108131.
9. Getuli V., Mastrolembro Ventura S., Capone P., Ciribini A. A BIM-based Construction Supply Chain Framework for Monitoring Progress and Coordination of Site Activities. *Procedia Engineering*, 2016, 164, 542-549. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.656.
10. Ocheoha I., Moselhi O. A BIM-based Supply Chain Integration for Prefabrication and Modularization. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 2018. DOI: 10.29173/mocs35.
11. Wu Y., Huang J., Chen X. The information value of logistics platforms in a freight matching market. *European Journal of Operational Research*, 2024, Vol. 312, Issue 1, Pp. 227-239. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.06.043>.
12. Das M., Gopinath G., Kalemli-Ozcan S. Preemptive Policies and Risk-Off Shocks in Emerging Markets. *IMF Working Papers*, 2022, 003. <https://doi.org/10.5089/9781616358341.001>.
13. Alvim S., Farias I., Frazzon E., Simas D. Supply chain resilience in turbulent times: conceptual model and real-world use case*. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55, 85-90. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.372.
14. Ali A., Wang X., Razzaq I. Optimizing Acoustic Signal Processing for Localization of Precise Pipeline Leakage Using Acoustic Signal Decomposition and

Wavelet Analysis. *Digital Signal Processing*, 2024, 157: 104890. DOI: 10.1016/j.dsp.2024.104890.

15. Zhang T., Cheng J., Zou, Y. Multimodal transportation routing optimization based on multi-objective Q-learning under time uncertainty. *Complex & Intelligent Systems*, 2024, 10, 3133–3152. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01308-9>.

16. Zhou L., Zhao J., Liu H. et al. Stochastic models of routing strategies under the class-based storage policy in fishbone layout warehouses. *Scientific Reports*, 2022, 12, 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17240-w>.

17. Akselrod R., Shpakov A., Ryzhakova G., Honcharenko T., Chupryna I., Shpakova H. Integration of Data Flows of the Construction Project Life Cycle to Create a Digital Enterprise Based on Building Information Modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2022, 12, 40-50. DOI: 10.46338/ijetae0122_05.

Valeriy KOLOMIETS

The role of digital platforms in monitoring and managing material supply

The study reveals the role of digital platforms in monitoring and managing material supply in construction projects as a key element of modern logistics architecture. It is substantiated that digital platforms are evolving from tracking tools into multi-level adaptive systems capable of forecasting, self-learning, and autonomous response to deviations. Integrated models of predictive monitoring are examined, including concepts of multi-level reactive routing, vector-based redistribution of criticality, and context-sensitive coordination of material flows. The architecture of digital platforms such as “Smart SCM+” is analyzed, combining accounting modules, risk analytics, dynamic routing, and adaptive task prioritization. It is proven that the implementation of nonlinear risk functions, multi-factor weighting coefficients, and feedback mechanisms reduces delays and shortens system response time to changes in the logistics environment.

Particular attention is given to the integration of BIM models with SCM platforms through mechanisms of indicative material dependency and information balance. Such interoperability enables the forecasting of shortages before actual supply disruptions occur. The fractal architecture of digital platforms is investigated, providing autonomy of local control units and their capacity for self-recovery in the event of central control failure. It is established that the application of recursive adaptation models and stochastic route editing enhances the resilience of the logistics system under turbulent conditions. It is concluded that digital material supply platforms represent not merely automation tools but integrated analytical environments combining logistical, informational, and behavioral management components. Their implementation contributes to increased predictability, loss reduction, and the formation of a new paradigm of adaptive material flow management in construction.

Additionally, it is substantiated that the application of machine learning algorithms and predictive analytics expands the functional capabilities of such platforms, ensuring early detection of critical deviations, optimization of inventories, and enhanced coordination among participants in the logistics chain.

Keywords: *digital platforms, SCM, BIM integration, supply monitoring, logistics risks, adaptive algorithms, fractal resilience, shortage forecasting.*

Дата надходження статті: 25.12.2025

Дата прийняття статті: 26.01.2026