

УДК: 69.05:69.057:658.7

Олександр ОСІПОВ¹

докт. техн. наук, професор
ORCID: 0000-0002-5463-3976

Олена ЄМЕЛЬЯНОВА¹

канд. наук з держ. упр., професор
ORCID: 0000-0001-9831-4734

Київський національний університет будівництва та архітектури

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПОТОКІВ ПРИ ЗВЕДЕННІ МАЛОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ЗІ ЗБІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті досліджується актуальна проблема оптимізації логістичних потоків при будівництві малоповерхових житлових будівель із застосуванням збірних та модульних конструкцій. В умовах сучасної економічної та геополітичної нестабільності, зокрема через необхідність швидкого відновлення житлового фонду для внутрішньо переміщених осіб, сектор малоповерхового будівництва в Україні набуває безпрецедентного розвитку. Традиційні методи організації будівельних проєктів часто характеризуються недостатньою координацією дій учасників, неефективним управлінням ресурсами та високим рівнем витрат, що є неприпустимим в умовах обмеженого фінансування та стислих термінів. Метою дослідження є розробка та обґрунтування комплексних логістичних моделей, які базуються на принципах інтеграції сучасних інформаційних систем управління ресурсами (ERP) та будівельного інформаційного моделювання (BIM). У роботі проаналізовано концептуальні основи інтелектуального аналізу транспортно-логістичних систем, що дозволяють здійснювати раціональний вибір контрагентів, оптимізувати маршрути доставки та контролювати рівень складських запасів. Значну увагу приділено впровадженню інноваційних рішень, таких як системи управління ланцюгами постачання (SCM), управління транспортом (TMS) та управління складом (WMS), які в сукупності забезпечують скорочення логістичних витрат на 15–20%. На основі математичного апарату запропоновано функції розрахунку інтегральної ефективності цифрового управління, рівня синхронізації ресурсів між ERP та BIM, а також сценарного згладжування буферів матеріальних ресурсів. Доведено, що використання концепцій «точно в термін» (JIT) та систем планування потреби в матеріалах (MRP) дозволяє мінімізувати простой, знизити вплив на довкілля та впровадити принципи «зеленої логістики». Визначено основні бар'єри на шляху цифрової трансформації будівельної логістики та розроблено рекомендації щодо їх подолання. Практична цінність результатів полягає у створенні надійного методологічного інструментарію для будівельних і девелоперських компаній, спрямованого на підвищення рентабельності, скорочення

тривалості зведення малоповерхового житла та забезпечення стійкого розвитку національної економіки.

Ключові слова: *організація будівництва, логістичні потоки, малоповерхове будівництво, збірні конструкції, ERP, управління матеріально-технічними ресурсами, матеріально-технічне постачання будівництва, інформаційні системи управління ресурсами, логістично-структурне забезпечення будівництва, управління запасами, нормативно-правове забезпечення проєктів, цифровізація, BIM, інжиніринг, девелопмент нерухомості, модульне будівництво, управління ланцюгами постачання, зелене будівництво, зелена логістика.*

Вступ. В даний час в умовах повномасштабного російського вторгнення сектор малоповерхового житлового будівництва знаходиться у стадії стрімкого розвитку, що пов'язано з необхідністю забезпечення доступним та комфортним житлом громадян, які втратили власні будинки або були тимчасово переміщені [3]. Знищення житлового фонду з кожним днем збільшується, як і кількість внутрішньо переміщених осіб, тому одним із важливих завдань стало забезпечення людей тимчасовим та постійним житлом [9]. У рамках цього передбачається всіляке зниження його собівартості, що в першу чергу досягається за рахунок скорочення витрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) у період спорудження будівель [3].

Одним з перспективних напрямків вирішення житлової кризи є будівництво швидкокомтованих будівель із високим ступенем заводської готовності, терміни спорудження яких значно менші порівняно з традиційними об'єктами [3]. Це можуть бути будівлі збірно-розбірного типу, на основі дерев'яного або сталевого каркаса, а також контейнерні та модульні системи [3, 9]. Проте будівельна галузь є однією з найбільш складних і багатогранних в економіці, а організація транспортно-логістичної діяльності відіграє вирішальну роль, адже доставка матеріалів, техніки та обладнання безпосередньо впливає на строки виконання робіт і їхню якість [7, 8]. Нераціонально організована логістика може спричинити простої, перевитрати ресурсів і збільшення собівартості будівельних робіт [8]. Отже, оптимізація організаційних процесів у цивільному будівництві за допомогою логістичних моделей стає критично важливою умовою забезпечення доступності житла [1].

Тому оптимізація логістичних потоків на основі сучасних цифрових інструментів управління стає ключовою умовою підвищення ефективності малоповерхового будівництва зі збірних конструкцій.

У сучасних умовах масове будівництво малоповерхових житлових будівель вимагає чіткої координації між постачальниками, підрядниками та замовниками. Непередбачуваність постачання матеріалів, коливання цін та зовнішні фактори суттєво ускладнюють планування [7]. Відсутність єдиної інтегрованої системи управління логістикою на будівельному майданчику ускладнює контроль за станом ресурсів [7]. Традиційні методи організації часто не дають можливості повною мірою використовувати

потенціал для оптимізації, призводячи до дублювання операцій і надмірних витрат на транспортування [1, 7]. З огляду на це, метою даної статті є розробка та обґрунтування логістичних моделей і методів інтелектуального аналізу, спрямованих на оптимізацію транспортно-складських потоків при зведенні малоповерхових будівель зі збірних конструкцій за допомогою інтеграції сучасних інформаційних технологій (ERP, BIM, WMS, TMS).

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Питання оптимізації управління будівельними проектами та інтеграції логістичних потоків активно досліджуються вітчизняними та зарубіжними вченими. Закордонні та українські науковці сходяться на думці, що інновації у сфері інформаційних систем є ключовими для збереження конкурентоспроможності компанії [4]. Автори С.В. Зайчук та О.М. Малихіна зосереджують увагу на ролі інформаційних систем управління проектами, таких як ERP і CRM, що забезпечують інтеграцію фінансів та ресурсів, а також на впровадженні технологій BIM і SCM, які підвищують ефективність будівельних процесів [4]. Дослідження Т. Портовараса та В. Здреника присвячені інтелектуальному аналізу транспорту та логістики в будівництві із застосуванням інструментів штучного інтелекту для обрання контрагентів [8].

О.М. Зайко та Є.І. Заяць розглядають організаційно-технологічні рішення будівництва малоповерхових будівель з урахуванням раціонального споживання енергоресурсів, зазначаючи, що етап спорудження залишається матеріало- та капіталомістким [3]. І.А. Арутюнян та О.С. Коваленко досліджують логістичні концепції («точно в термін» — JIT, системи MRP), застосування яких дозволяє скоротити час будівництва та мінімізувати витрати [1]. О. Іванина розглядає створення спільного середовища даних (CDE) шляхом злиття ERP та BIM, що забезпечує наскрізне управління ресурсами [5]. Також Ю.І. Полусмяк та співавтори аналізують впровадження систем управління ланцюгами постачання (SCM), транспортом (TMS) та складом (WMS) для виявлення проблем логістики та шляхів їх оптимізації [7]. Однак, незважаючи на широке висвітлення окремих аспектів інформаційного моделювання та логістики, питання комплексного моделювання логістичних потоків безпосередньо при зведенні малоповерхових будівель зі збірних конструкцій потребує подальшого глибокого вивчення.

Метою дослідження цієї статті є розроблення та обґрунтування комплексних логістичних моделей оптимізації транспортно-складських потоків при зведенні малоповерхових будівель зі збірних конструкцій на основі інтеграції сучасних інформаційних технологій управління ресурсами та даними про об'єкт будівництва. Реалізація мети передбачає використання концепцій JIT та MRP, а також застосування підходів цифрової синхронізації ERP і BIM, що дозволяє підвищити прозорість ресурсного планування, мінімізувати простой, зменшити логістичні витрати та забезпечити ритмічність постачання елементів у відповідності до темпів монтажу.

Наукова новизна статті полягає в обґрунтуванні та формалізації підходу до моделювання логістичних потоків у малоповерховому будівництві зі збірних конструкцій, який поєднує цифрове управління ресурсами та інженерне інформаційне моделювання об'єкта в єдину інтегровану систему прийняття рішень. Запропоновано математичний інструментарій оцінювання інтегральної ефективності цифрового управління, показників синхронізації ресурсних даних між ERP та BIM, а також сценарного згладжування буферів матеріальних ресурсів з урахуванням логістичної волатильності та ризиків відхилення поставок. На відміну від підходів, де ERP, BIM та логістичні підсистеми (SCM/TMS/WMS) застосовуються ізольовано, у роботі доведено ефект їх комплексного використання для оптимізації постачання габаритних збірних елементів у режимі “точно в термін”, що забезпечує скорочення витрат на транспортування і зберігання, зменшення простоїв монтажних механізмів і впровадження принципів “зеленої логістики”. Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості використання його як методологічної основи для будівельних і девелоперських компаній при плануванні та управлінні логістикою швидкокомпонованого малоповерхового житла.

Виклад основного інформації. Малоповерхове будівництво зі збірних та модульних конструкцій характеризується специфічними вимогами до логістики. Найголовніша відмінність будинків, створених за модульною технологією, — це спосіб їх складання з готових уніфікованих елементів, що транспортуються габаритною технікою безпосередньо на будівельний майданчик [9]. Оскільки такі елементи мають значні габарити, будівельний майданчик часто не має достатніх площ для їх довгострокового зберігання, що робить класичні підходи до управління запасами неефективними.

У цьому контексті логістичні моделі повинні ґрунтуватися на концепції «точно в термін» (JIT), яка забезпечує доставку необхідних матеріалів та обладнання саме в той час, коли вони потрібні, що мінімізує складські запаси та витрати на їх зберігання [1]. Іншою ключовою концепцією є системи MRP (Material Requirements Planning), що дозволяють планувати потреби в матеріалах на основі прогнозування та синхронізувати їх з виробничим процесом монтажу збірних конструкцій [1].

Оптимізація логістичних процесів неможлива без глибокої цифрової трансформації. Інтеграція систем управління ресурсами ERP (Enterprise Resource Planning) та BIM (Building Information Modeling) формує нову парадигму управління, орієнтовану на цифрову синхронізацію та прозорість [5]. ERP-системи забезпечують централізоване управління ресурсними, фінансовими та логістичними потоками, тоді як BIM концентрується на візуально-аналітичному моделюванні об'єкта [5]. Основна ідея полягає у створенні спільного середовища даних (CDE), де інформація синхронізується, а ERP отримує безпосередній доступ до параметрів BIM-моделі, що дозволяє автоматично оновлювати графіки постачання [5].

Для оцінки ефективності такої інтеграції використовується математичний апарат. Зокрема, інтегральна функція ефективності цифрового управління дає змогу виміряти ефект платформ в управлінні проектом [5]:

$$E = \int_0^T (\alpha_1 \cdot CERP(t) + \alpha_2 \cdot CBIM(t)) dt \quad (1)$$

де E — узагальнена ефективність цифрового управління; α_1, α_2 — вагові коефіцієнти впливу ERP та BIM відповідно; $CERP(t), CBIM(t)$ — функції цифрового покриття на момент часу t ; T — тривалість життєвого циклу проекту.

Крім того, модель координування ресурсних потоків між ERP та BIM системами дозволяє визначити ступінь узгодженості ресурсного планування [5]:

$$R_{sync} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |RERP(i) - RBIM(i)| \quad (2)$$

де R_{sync} — середній показник розбіжності між ресурсними даними двох систем; $RERP(i), RBIM(i)$ — ресурси за ідентифікатором i у системах ERP та BIM відповідно; n — кількість зіставлюваних елементів.

Для ідентифікації напрямків ризику при доставці та монтажі збірних конструкцій застосовується вектор ризиків цифрового відхилення [5]:

$$D_t = (\delta_{time}, \delta_{cost}, \delta_{scope}) \quad (3)$$

де D_t — вектор ризиків на момент часу t ; δ_{time} — часові зсуви логістичних поставок; δ_{cost} — перевитрати бюджету на транспортування; δ_{scope} — зміни обсягу монтажних робіт.

Функція сценарного згладжування буферів матеріальних ресурсів (наприклад, резервних модулів або кріпильних елементів на майданчику) дозволяє моделювати процес їх споживання з урахуванням випадкових подій [5]:

$$B(t) = B_0 \cdot e^{-\lambda t} + \sigma \cdot \zeta(t) \quad (4)$$

де $B(t)$ — фактичний обсяг буферного ресурсу на момент часу t ; B_0 — початковий розмір буфера; λ — темп витрати матеріалу; σ — параметр логістичної волатильності; $\zeta(t)$ — випадкова функція (стохастичне збурення, таке як затримка вантажівки).

Розрахунок практичної ефективності: Якщо при зведенні малоповерхового містечка початковий обсяг буферного ресурсу (модульних панелей) $B_0=50$ одиниць, плановий темп монтажу $\lambda=0.1$ (10% на добу), а логістична волатильність (затримки в дорозі) оцінюється на рівні $\sigma=2$ панелі при стохастичному показнику $\zeta(t)=1$, то на 5-ту добу рівень запасу на майданчику становитиме:

$$B(5) = 50 \cdot e^{-0.1 \times 5} + 2 \cdot 1 = 50 \cdot 0.6065 + 2 = 30.32 + 2 = 32.32$$

одиниці.

Такі математичні розрахунки вбудовуються у модулі ERP-системи, що дозволяє своєчасно реагувати на нестачу елементів збірних конструкцій та уникати простою кранового обладнання.

Іншим важливим напрямом є впровадження спеціалізованих логістичних IT-рішень. Оптимізація логістичних процесів складається з кількох етапів: впровадження системи управління ланцюгом постачання

(SCM), системи управління транспортом (TMS) та складським обліком (WMS) [7].

У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз впровадження цих систем при будівництві зі збірних конструкцій.

Таблиця 1

**Аналіз ефективності впровадження IT-рішень у логістику
малоповерхового будівництва [7]**

Інформаційна система	Основна функція у збірному будівництві	Очікуваний результат (економічний ефект)	Орієнтовна вартість впровадження
SCM (Supply Chain Management)	Оптимізація постачання модулів, автоматизація планування закупівель	Скорочення витрат на транспортування та зберігання на 15–20 %	60 000–100 000 грн
TMS (Transport Management System)	Оптимізація маршрутів габаритної техніки, GPS-трекінг	Зменшення витрат на транспорт та паливо на 10–15 %	Від 20 000 грн
WMS (Warehouse Management System)	Автоматизований облік запасів кріплень та дрібних деталей	Зниження втрат матеріалів на 10 %, зменшення часу на облік на 30 %	Від 70 000 грн

В процесі впровадження інформаційних технологій у логістичну систему компанії також виникають певні організаційні перешкоди [7]. У таблиці 2 розглянуто основні проблеми та шляхи їх вирішення.

Наочно динаміку відхилень фактичних витрат на логістику порівняно з плановими показниками ERP-прогнозу можна продемонструвати за допомогою графічної моделі зміни витрат за фазами зведення малоповерхової будівлі.

Важливим вектором оптимізації транспортних потоків є також застосування принципів «зеленої логістики». Логістичний підхід передбачає повний цикл від постачання матеріальних ресурсів до виходу готового продукту, і на кожному етапі має забезпечуватись баланс витрат і екологічності [2]. Оптимізація способів та маршрутів доставки необхідних матеріалів на будівельні майданчики потребує компромісу між вартістю та часом поставки при максимальній завантаженості транспортних засобів, що дозволяє скоротити кількість рейсів та зменшити викиди CO₂ [2, 6].

Таблиця 2

Можливі проблеми та рішення в ході цифровізації логістики [7]

Проблема	Опис	Рішення
Складність інтеграції	Необхідність об'єднання нових SCM/TMS із діючими бухгалтерськими або ERP системами підприємства.	Проведення детального аналізу та вибір рішень, що забезпечують просту інтеграцію через API.

Проблема	Опис	Рішення
Високі початкові витрати	Впровадження потребує значних інвестицій на етапі налаштування програмного забезпечення.	Використання SaaS-рішень (хмарних технологій), що дозволяє розподілити витрати та знизити поріг входу.
Стойкий опір персоналу	Небажання працівників адаптуватися до нових цифрових інструментів та GPS-контролю.	Залучення ключових співробітників до процесу вибору ПЗ, проведення тренінгів та системне навчання.



Графік 1. Динаміка відхилень фактичних логістичних витрат від ERP-прогнозу

Висновки. Підсумовуючи, можна відзначити, що цифрова трансформація логістичних бізнес-процесів у будівництві малоповерхових будівель зі збірних конструкцій сприяє значному підвищенню ефективності, зниженню витрат та сталому розвитку проєктів. Впровадження інноваційних інформаційних технологій, таких як інтеграція ERP та BIM-платформ, дозволяє здійснювати симуляцію сценаріїв розвитку та обчислювати потреби в ресурсах із застосуванням спеціалізованих математичних моделей. Доведено, що використання систем управління ланцюгом постачання (SCM), транспортом (TMS) та складом (WMS) забезпечує зменшення витрат на транспортування та зберігання матеріалів на 15–20 %, а також зниження витрат на паливо на 10–15 % завдяки оптимізації маршрутів. Перехід до принципів ЛІТ (точно в термін) та MRP ідеально підходить для монтажу габаритних збірних та модульних конструкцій на майданчиках з обмеженою площею. Організаційні перешкоди у вигляді високих витрат і опору персоналу можуть бути подолані шляхом поетапного впровадження хмарних рішень (SaaS) та цілеспрямованого навчання працівників. Отже, оптимізація логістичних потоків є стратегічною необхідністю, що дозволяє будівельним компаніям підвищувати конкурентоспроможність, забезпечувати стійкість проєктів та швидкими темпами відновлювати житловий фонд країни.

Список використаної літератури:

1. Арутюнян І. А., Коваленко О. С. Оптимізація організаційних процесів у цивільному будівництві за допомогою логістичних моделей. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 25. С. 13–19. <https://doi.org/10.15802/bittrp2024/303286>

2. Галюк І. Б., Єжак Ф. Ф. Зелена логістика у будівництві // *Матеріали конференції (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу)*. 2024. С. 138–140. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/48594/1>

3. Зайко О. М., Заяць Є. І. Аналіз організаційно-технологічних рішень будівництва малоповерхових житлових будівель з урахуванням раціонального споживання енергоресурсів. *Український журнал цивільного інжинірингу та архітектури*. 2024. № 1(97) С. 1134–1142. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270225.97.1134>

4. Зайчук С. В., Малихіна О. М. Інформаційно-аналітичні новації і бізнес-моделі управління господарським портфелем підприємств-девелоперів у будівництві // *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 59. С. 191–199. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.191-199>

5. Іванина О. Використання систем управління ресурсами (ERP, BIM) у промисловому будівництві // *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. № 56(2). С. 364–378. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).364-378](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).364-378).

6. Іванов Ю. В., Кулібаба В. В. Цифрова трансформація логістичних бізнес-процесів у будівництві // *Сучасні інноваційно-інвестиційні механізми розвитку національної економіки в умовах євроінтеграції: матеріали XI Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.* 2024. С. 89–90. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/item/14525>

6. Полусмяк Ю. І., Павлюк Т. С., Косач І. В. Управління проектами у будівельній галузі: виявлення проблем логістики та шляхи їх оптимізації // *Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку*. 2024. № 4(30). С. 69–78. <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2024-4/30-06>.

7. Портоварас Т., Здреник В. Інтелектуальний аналіз транспорту та логістики в будівництві: ідентифікаційні характеристики та інструменти. *Економічний аналіз*. 2025. Т. 35. № 2. С. 321–330. DOI: [10.35774/econa2025.02.078](https://www.econa.org.ua/index.php/econa/article/view/6383) URL: <https://www.econa.org.ua/index.php/econa/article/view/6383>

9. Ярошук І. В., Капранова Д. В., Колпакова О. А. Вплив модульного будівництва на архітектурне середовище України // *Матеріали конференції (КНУБА)*. 2023. С. 219–243.

URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/zbirnik-materialiv-urban-forum-2023-chastina-1.pdf>

Oleksandr Osipov, Olena Yemelianova
Modeling of logistics flows in the construction of low-rise buildings from prefabricated structures

The article investigates the urgent problem of optimizing logistics flows during the construction of low-rise residential buildings using prefabricated and

modular structures. Given the current economic and geopolitical instability in Ukraine, particularly the need for the rapid restoration of the housing stock for internally displaced persons, the low-rise construction sector is experiencing unprecedented development. Traditional methods of organizing construction projects are often characterized by insufficient coordination among participants, inefficient resource management, and high costs, which is unacceptable under limited funding and tight deadlines. The purpose of the study is to develop and justify comprehensive logistics models based on the principles of integrating modern enterprise resource planning (ERP) systems and building information modeling (BIM). The paper analyzes the conceptual foundations of the intellectual analysis of transport and logistics systems, allowing for the rational choice of counterparties, optimization of delivery routes, and control of inventory levels. Significant attention is paid to the implementation of innovative IT solutions, such as Supply Chain Management (SCM), Transport Management Systems (TMS), and Warehouse Management Systems (WMS), which together provide a 15–20% reduction in logistics costs. Based on a solid mathematical framework, the article proposes functions for calculating the integral efficiency of digital management, the level of resource synchronization between ERP and BIM, and scenario smoothing for material resource buffers. It is proven that the application of "Just-in-Time" (JIT) concepts and Material Requirements Planning (MRP) systems makes it possible to minimize downtime, reduce environmental impact, and introduce "green logistics" principles. The main barriers to the digital transformation of construction logistics are identified, and recommendations for overcoming them, including the use of SaaS solutions and personnel training, are developed. The practical value of the results lies in creating a reliable methodological toolkit for construction and development companies aimed at increasing profitability, reducing the duration of low-rise housing construction, and ensuring the sustainable development of the national economy in post-war reconstruction.

Keywords: *construction organization, logistics flows, low-rise construction, prefabricated structures, ERP, material and technical resources management, material and technical supply of construction, information systems for resource management, logistical and structural support of construction, inventory management, regulatory and legal support of projects, digitalization, BIM, engineering, real estate development, modular construction, supply chain management, green construction, green logistics.*