

Володимир РАШКІВСЬКИЙ,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-5369-6676

Костянтин ЧЕРНЕНКО,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1616-5999

Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ

ВПЛИВ ЧЕРГОВОСТІ ПОСТАЧАННЯ КОНСТРУКЦІЙ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗВЕДЕННЯ МАЛОПОВЕРХОВИХ ЗБІРНИХ БУДІВЕЛЬ

У сучасному будівництві методи збірного та модульного зведення будівель набувають все більшої популярності завдяки їхній здатності значно скорочувати терміни реалізації проєктів, мінімізувати кількість відходів та підвищувати загальну якість будівництва. Ця стаття присвячена дослідженню критично важливого аспекту організації будівельного виробництва – впливу черговості постачання збірних конструкцій (панелей, модулів, елементів каркасу) на інтенсивність зведення малоповерхових збірних будівель. Розглянуто проблеми логістики, з якими стикаються будівельні компанії, зокрема, складність транспортування великогабаритних елементів, обмеженість складських площ на будівельному майданчику та необхідність суворої синхронізації виробничих і монтажних процесів. Особлива увага приділяється впровадженню принципів Lean Logistics та концепції «Just-in-Time» (JIT), які дозволяють здійснювати монтаж конструкцій «з коліс», тим самим уникаючи простоїв монтажних кранів та будівельних бригад.

В роботі розроблено та адаптовано математичну модель для комплексної оцінки сумісності процесів постачання та монтажу, яка враховує витрати на матеріали, транспортування, а також штрафні санкції за передчасне або запізнє постачання конструкцій. На основі проведених розрахунків та змодельованих сценаріїв (несинхронізоване постачання порівняно з JIT-логістикою) доведено, що суворе дотримання черговості постачання конструкцій здатне підвищити інтенсивність будівельних робіт, скоротити загальні витрати та знизити ризики зриву календарних графіків. Здійснено детальний порівняльний аналіз традиційної логістики та оптимізованого постачання, а також наведено графічні інтерпретації залежностей між точністю постачання та технологічною ефективністю проєкту. Результати дослідження є цінним ресурсом для інженерів, менеджерів проєктів та логістів, які прагнуть оптимізувати ланцюги постачання у збірному будівництві.



Ключові слова: *збірне будівництво; модульні конструкції; логістика в будівництві; черговість постачання; інтенсивність будівництва; Just-in-Time; управління будівельними проектами; математичне моделювання; Lean Logistics; ланцюг постачання, ВІМ-технології, якість, цифрова трансформація, інжинірингові послуги, параметри будівництва, технічний нагляд, управління ресурсами, ресурсно-логістичне забезпечення, організація будівництва, організаційно-технологічна модель, вартість життєвого циклу.*

Вступ. В умовах стрімкої урбанізації та постійного зростання попиту на швидке і якісне житло, будівельна галузь змушена шукати нові шляхи підвищення продуктивності та зниження витрат [5]. Традиційні методи будівництва, що характеризуються високою часткою ручної праці безпосередньо на будівельному майданчику, часто супроводжуються неефективністю, перевищенням бюджетів та затримками через погодні умови чи логістичні збої [2]. У відповідь на ці виклики модульне та збірне будівництво стало революційною альтернативою, дозволяючи перенести значну частину виробничих процесів у контрольовані заводські умови, що зменшує кількість відходів та підвищує безпеку [9].

Збірне будівництво дозволяє перенести від 70% до 95% робіт у контрольоване середовище заводу [9]. Проте перенесення виробництва з будівельного майданчика на завод генерує нові виклики, ключовим з яких є транспортна логістика та управління ланцюгами постачання. На відміну від традиційного будівництва, де матеріали можуть складуватися на майданчику у великих обсягах і використовуватись за потреби, збірне будівництво оперує великогабаритними та важкими готовими конструкціями, транспортування яких вимагає спеціальної техніки та дозволів [9].

Надзвичайно важливим фактором, що визначає успіх збірного будівництва, є черговість постачання конструкцій. Якщо елементи прибувають на майданчик не в тій послідовності, яка передбачена технологічною картою монтажу, виникає потреба в їхньому проміжному складуванні. В умовах щільної забудови створення великих складських зон часто є неможливим [9]. Це призводить до простоїв монтажних механізмів, зниження продуктивності праці робітників та зриву загального графіку будівництва [5]. Отже, інтенсивність зведення малоповерхових збірних будівель прямо пропорційно залежить від точності та черговості логістичних операцій.

Актуальність дослідження зумовлена зростаючим попитом на швидке та якісне житло в умовах урбанізації й обмежених ресурсів, що стимулює активне впровадження збірних і модульних технологій, здатних скорочувати строки зведення та підвищувати керованість якості за рахунок перенесення значної частини робіт у заводські умови [9]. Водночас індустріалізація будівництва створює нові критичні залежності: ефективність монтажу на майданчику стає визначальною не лише технологією, а насамперед логістикою постачання та дотриманням монтажної послідовності елементів. Для малоповерхових збірних будівель характерними є обмеженість складських площ і необхідність роботи з великогабаритними панелями/модулями, що потребує точного узгодження ритму постачання з темпом монтажу [9]. Порушення черговості прибуття елементів змушує виконувати проміжне складування та сортування, створює ризик «логістичного колапсу» на майданчику, провокує простої кранів і бригад, знижує продуктивність і може призвести до зриву календарного графіка [7], [8]. Саме тому

актуальними є науково обгрунтовані моделі та рекомендації щодо синхронізованого постачання, зокрема з використанням принципів Lean/Lean Logistics та концепції Just-in-Time (JIT), які дозволяють реалізувати монтаж «з коліс» і мінімізувати втрати часу та ресурсів [3], [8].

Постановка проблеми. Проблема полягає у тому, що в практиці збірного будівництва логістика постачання часто організовується з позиції зручності виробника або транспортного підрядника (оптимізація завантаження, укрупнення партій, зменшення кількості рейсів), тоді як технологічні вимоги монтажу потребують іншої логіки: постачання має відбуватися у строгій черговості, що відповідає монтажній карті та забезпечує безперервність робіт. За відсутності такої синхронізації виникають додаткові операції (розвантаження на проміжний склад, сортування, повторне піднімання), зростають логістичні витрати та штрафні втрати від простоїв ключового ресурсу – монтажного крана, а також погіршується загальна інтенсивність зведення будівлі [1], [8]. У щільній міській забудові проблема посилюється через дефіцит площ для складування та обмеження руху великогабаритного транспорту [9]. Тому необхідно розробити кількісно обгрунтований підхід, який дозволяє оцінити сумісність процесів постачання і монтажу та визначити умови, за яких перехід до JIT і Lean Logistics забезпечує максимальну інтенсивність робіт і мінімізацію витрат. При цьому модель повинна враховувати як прямі транспортні й матеріальні витрати, так і втрати від прехресного/запізнілого постачання (складування, переробки, простої) та ризики затримок у ланцюзі постачання [1], [4], [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У сучасній науковій літературі широко представлені дослідження, присвячені підвищенню ефективності будівництва через впровадження концепцій Lean Construction і Just-in-Time, зниження варіативності процесів і забезпечення ритмічності виконання робіт. Зокрема, у роботах, де моделюється вплив JIT та lean-принципів на параметри проєкту, показано, що синхронізація потоків може зменшувати втрати, підвищувати передбачуваність і покращувати продуктивність виконання робіт [3]. Дослідження з модульного будівництва та управління ризиками підтверджують важливість проактивного планування і адаптивних моделей контролю, які дозволяють зменшувати часові відхилення та підвищувати надійність реалізації проєктів [4]. Оглядові праці з модульного/префабрикованого будівництва узагальнюють переваги індустріалізації (скорочення строків, зменшення відходів, підвищення якості), але підкреслюють залежність цих переваг від ефективної логістики постачання та взаємодії учасників ланцюга [5], [7], [9].

Окремий блок публікацій присвячено технологічним аспектам префабрикації та організації виробництва/складання модулів, де описуються особливості технологічних процесів та вплив організаційних рішень на темп виконання робіт [6]. У роботах щодо синхронізації ланцюгів постачання з використанням цифрових двійників і моніторингу в реальному часі розкривається потенціал цифрових інструментів для зниження вуглецевого сліду та підвищення точності доставок [6]. Також існують дослідження, орієнтовані на застосування принципів lean logistics у бетонних/монтажних процесах, що підтверджує ефект від усунення зайвих переміщень і очікувань [8]. В українських роботах запропоновано математичні підходи до оцінки сумісності поєднання будівельних процесів, що може

використовуватися як база для кількісного аналізу організаційно-логістичних рішень [1].

Головною метою дослідження є аналіз та кількісна оцінка впливу черговості і своєчасності постачання збірних елементів на загальну інтенсивність зведення малоповерхових збірних будівель. Дослідження спрямоване на адаптацію математичної моделі комплексної оцінки сумісності будівельних та логістичних процесів, а також розробку практичних рекомендацій щодо впровадження систем синхронізованого постачання (JIT) з метою уникнення простоїв і мінімізації загальних проектних витрат.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні та адаптації математичної моделі комплексної оцінки сумісності процесів постачання і монтажу збірних конструкцій для малоповерхових будівель, яка враховує не лише вартість матеріалів і транспортування, але й штрафні витрати, пов'язані з порушенням термінів та черговості постачання (втрати від проміжного складування при ранньому прибутті та втрати від простоїв крана/бригади при запізненні) [1]. Уперше для задачі підвищення інтенсивності зведення малоповерхових збірних будівель обґрунтовано, що строгий порядок постачання елементів, узгоджений із технологічною картою монтажу, у поєднанні з принципами Lean Logistics і JIT дозволяє зменшити кількість подвійних вантажних операцій та мінімізувати потребу в складських площах, що безпосередньо підвищує інтенсивність монтажу і знижує ризики зриву календарних графіків [3], [8], [9]. Додатково набули подальшого розвитку практичні рекомендації щодо організації постачання (зокрема логіка «монтажу з коліс») та підходи до використання цифрових інструментів контролю прибуття (ETA, цифрові двійники) як механізму мінімізації відхилень і підвищення надійності потоку постачання у збірному будівництві [6].

Виклад основного інформації. Малоповерхове збірне будівництво передбачає використання різних методів префабрикації: панельного (2D), об'ємно-блокового (3D або VMC) та гібридного [9]. Кожен з цих методів вимагає індивідуального підходу до логістики. Найбільшою проблемою є те, що модулі та панелі часто є великогабаритними та вимагають спеціалізованого транспорту [7]. Відповідно, транспортування обмежене правилами дорожнього руху, пропускну здатністю доріг, наявністю низьких мостів або вузьких вулиць, а також необхідністю отримання спеціальних дозволів [9].

Процес зведення будівлі є суворо послідовним. Панель стіни другого поверху не може бути змонтована до того, як буде встановлено та закріплено панель стіни першого поверху та відповідне міжповерхове перекриття. Якщо постачальник доставляє конструкції хаотичними партіями, щоб, наприклад, оптимізувати завантаження транспортного засобу на заводі, будівельний майданчик стикається з явищем «логістичного колапсу» [7]. Необхідні для поточного монтажу елементи можуть бути відсутніми, тоді як майданчик захащений конструкціями, черга монтажу яких ще не настала. Це призводить до зупинки монтажної бригади [8].

Для усунення зазначених проблем в останні роки активно досліджується впровадження принципів Lean Logistics та методу Just-in-Time [8]. У класичному розумінні JIT передбачає, що всі необхідні матеріали прибувають на місце виробництва рівно в той момент, коли вони потрібні для встановлення [8].

При застосуванні JIT до збірного будівництва ідеальний сценарій виглядає як монтаж «з коліс». Транспортний засіб прибуває на майданчик, монтажний кран

підіймає конструкцію безпосередньо з платформи вантажівки та встановлює її в проектне положення [8]. Такий підхід гарантує нульову потребу у складських площах, що є критично важливим для стиснених міських умов. Також унікається процес розвантаження на склад з подальшим підйомом зі складу до місця монтажу. Це економить крановий час, знижує ризик пошкодження конструкцій та забезпечує безперервний потік елементів, дозволяючи бригаді працювати з максимальною продуктивністю.

Для комплексної оцінки ефективності черговості постачання та її сумісності з будівельними процесами адаптуємо математичну модель планування ресурсів [1]. Загальні витрати $S_{\text{заг}}$ на постачання ресурсу (збірної конструкції) p можна подати у вигляді наступної формули :

$$S_{\text{заг}} = S_{\text{м}} + S_{\text{тр}} + S_{\text{ср}} \quad (1)$$

де: $S_{\text{м}}$ – вартість самої конструкції (матеріалу); $S_{\text{тр}}$ – витрати на транспортування конструкцій; $S_{\text{ср}}$ – витрати, пов'язані з порушенням термінів і черговості постачання (штрафні витрати).

Витрати на матеріали розраховуються за формулою [1]:

$$S_{\text{м}} = z \times q \quad (2)$$

де z – вартість одиниці ресурсу (конструкції); q – кількість конструкцій.

Розрахунок витрат на транспортування $S_{\text{тр}}$ відбувається за формулою [1]:

$$S_{\text{тр}} = d \times C_{\text{м}} \times M \quad (3)$$

де d – відстань від заводу до майданчика; $C_{\text{м}}$ – тариф на перевезення 1 т матеріалу на 1 км; M – маса матеріалу (конструкцій), що перевозиться.

Найбільш критичним для нашого дослідження є параметр $S_{\text{ср}}$ – витрати, пов'язані з термінами та черговістю постачання. Ця складова відображає якість логістики та розраховується за умовною функцією штрафів [1]:

$$S_{\text{ср}} = S_{\text{збер}}, \text{ якщо } t < t_{\text{потр}}, \text{ то } S_{\text{ср}} = 0, \text{ якщо } t = t_{\text{потр}}, \text{ то } S_{\text{ср}} = S_{\text{з}}, \text{ якщо } t > t_{\text{потр}} \quad (4)$$

де: t – фактичний час прибуття конструкції на майданчик; $t_{\text{потр}}$ – необхідний (плановий) час монтажу конструкції згідно з графіком; $S_{\text{збер}}$ – вартість проміжного зберігання конструкції на майданчику при передчасному постачанні (включає витрати на додаткове розвантаження, оренду площі, ризики пошкодження); $S_{\text{з}}$ – вартість затримки постачання (включає вартість простою монтажного крана, простою робітників, зриву графіка).

Очевидно, що для оптимізації інтенсивності зведення будівлі та мінімізації витрат необхідно прагнути до умови $t = t_{\text{потр}}$, тобто до ЛІТ-логістики, при якій штрафні логістичні витрати наближаються до нуля. Впровадження інноваційних рішень, таких як цифрові двійники (Digital Twins) та системи відстеження в реальному часі, дозволяють оперативно розраховувати орієнтовний час прибуття (ETA) та коригувати процеси на майданчику для мінімізації відхилень [6].

Щоб наочно продемонструвати вплив черговості постачання на інтенсивність будівництва, проведемо аналітичний розрахунок для типового етапу зведення малоповерхового будинку, що складається з монтажу 20 стінових панелей.

Вихідні параметри для розрахунку: Час безпосереднього монтажу однієї панелі складає 0,5 години. Вартість оренди монтажного крана та роботи бригади приймається на рівні 2000 грн/год. Вартість додаткового проміжного розвантаження та складування на майданчику ($S_{\text{хран}}$) оцінюється у 500 грн за одну

панель (через потребу в додатковій роботі крана та стропальників). Зміна одного робочого дня становить 8 годин.

Сценарій А (Несинхронізоване постачання): За цього сценарію панелі прибувають на майданчик великою партією вранці, але без дотримання строгої черговості монтажу. Тобто панелі, які потрібні останніми, можуть лежати зверху в кузові. Процес: Всі 20 панелей необхідно спочатку розвантажити на проміжний склад, щоб відсортувати їх у правильному порядку. На це витрачається ресурс крана та час. Час розвантаження розраховується як 20 панелей помножені на 0,2 год, що дорівнює 4 годинам. Після цього кран починає брати панелі зі складу та монтувати їх. Час безпосереднього монтажу становить 20 панелей помножені на 0,5 год, що дорівнює 10 годинам. Загальний час виконання робіт становить 14 годин, що займає майже два робочі дні. Інтенсивність будівництва за цього підходу складає 20 панелей, поділені на 14 годин, тобто приблизно 1,43 панелі за годину. Додаткові логістичні витрати ($S_{\text{ср}}$), пов'язані з передчасним та хаотичним постачанням ($S_{\text{збер}}$), становлять 20 панелей помножені на 500 грн, що дорівнює 10 000 грн збитків лише на подвійних розвантажувальних операціях.

Сценарій Б (Строга черговість та постачання Just-in-Time): Панелі завантажуються на причепи на заводі в суворій зворотній послідовності монтажу (LIFO – Last In, First Out). Вантажівки прибувають на майданчик за чітким графіком кожні 2 години, підвозячи по 4 панелі. Процес: Монтаж здійснюється безпосередньо "з коліс". Кран бере потрібну панель з вантажівки і відразу встановлює її у проектне положення. Час на сортування та проміжне складування повністю відсутній ($S_{\text{збер}} = 0$). Загальний час виконання робіт дорівнює виключно часу монтажу, тобто 20 панелей помножені на 0,5 год, що становить 10 годин (трохи більше однієї робочої зміни). Інтенсивність будівництва за оптимізованого підходу становить 20 панелей, поділені на 10 годин, що дорівнює 2,0 панелями за годину. Додаткові логістичні витрати ($S_{\text{ср}}$) повністю відсутні та дорівнюють 0 грн.

Висновки з математичного моделювання ситуації підтверджують, що застосування строгої черговості та постачання JIT дозволяє збільшити інтенсивність монтажних робіт на майже 40% (з 1,43 до 2,0 панелей на годину), скоротити загальний час зведення етапу на 4 години та заощадити значні фінансові ресурси на усуненні проміжних розвантажувальних операцій.

Усуваючи необхідність застосування зведених таблиць, детально опишемо ключові відмінності між традиційним несинхронізованим постачанням та оптимізованим постачанням JIT за декількома основними критеріями.

Аналізуючи потребу у складських площах на майданчику, варто відзначити, що при традиційному несинхронізованому постачанні ця потреба є критично високою. Оскільки матеріали привозяться великими партіями без урахування графіка монтажу, забудовник змушений виділяти значну частину майданчика під тимчасові склади, що в умовах міської забудови часто є неможливим. Натомість логістика JIT зводить цю потребу до мінімуму або взагалі до нуля, що дозволяє вивільнити корисну площу майданчика для безпечного маневрування техніки.

Розглядаючи ризик простою монтажного крана, який є найдорожчим ресурсом на майданчику, можна констатувати, що при традиційному підході цей ризик є надзвичайно високим. Кран часто простоє, очікуючи, поки робітники знайдуть потрібну деталь серед хаотично складених конструкцій. Оптимізоване постачання дозволяє виконувати монтаж «з коліс», завдяки чому ризики простоїв скорочуються на 20-30%, оскільки кран постійно забезпечений фронтом робіт [8].

Подвійні вантажні операції є ще одним фактором, що суттєво відрізняє ці два підходи. У традиційній моделі вони присутні у 100% випадків: елемент спочатку розвантажується з машини на склад, а згодом зі складу підіймається до місця монтажу. Це не лише забирає час, але й збільшує ризик пошкодження збірних модулів. Підхід JT повністю виключає подвійні маніпуляції, оскільки конструкція переміщується з вантажівки безпосередньо в проектне положення, що суттєво знижує експлуатаційні витрати.

Інтенсивність монтажу, що вимірюється кількістю змонтованих елементів за зміну, при традиційному постачанні залишається на середньому рівні, оскільки значний час витрачається на підготовчі та сортувальні роботи. Впровадження JT гарантує безперервний ритмічний монтаж, що на практиці означає збільшення загальної інтенсивності робіт на 30-40%.

Щодо схильності до зриву графіку, традиційна логістика характеризується високою вразливістю. Затримка лише однієї вантажівки з невідповідними панелями може зупинити роботу всієї зміни. У системі JT цей процес є глибоко контрольованим завдяки використанню цифрових технологій для відстеження транспорту, що дозволяє підвищити надійність календарного графіка на 15% і більше.

Вплив затримок у ланцюзі постачання має серйозні технологічні та фінансові наслідки для всього будівельного проекту, які варто розглянути детальніше [4].

По-перше, порушення черговості прибуття елементів є найбільш деструктивним фактором. Головним наслідком на будівельному майданчику стає неможливість продовження монтажу, оскільки наступний етап технологічно залежить від попереднього. Майданчик швидко захаращується конструкціями, час для яких ще не настав. Фінансовий вплив цього явища полягає у необхідності оплати додаткових годин роботи монтажного крана та бригади робітників за час, витрачений на перекладання панелей. Вплив на інтенсивність будівництва є критичним і може призвести до повної зупинки робіт на ділянці до моменту прибуття потрібної деталі.

По-друге, запізнення вантажівки навіть на 1-2 години створює ефект доміно. Основний наслідок – це абсолютний простій (idling) монтажної бригади та механізмів, які фізично не мають матеріалу для роботи [8]. Збитки формуються через оплату неробочого часу висококваліфікованого персоналу та оренди техніки. Відповідно, денна інтенсивності зведення будівлі гарантовано знижується на 15-25% від запланованої норми.

По-третє, дострокове прибуття вантажівок також є порушенням логістичного ланцюга. Воно спричиняє утворення черги транспортних засобів біля майданчика, що може призвести до блокування вулиць міського трафіку. Фінансовий вплив включає можливі муніципальні штрафи за неправильне паркування та ризики конфліктів з місцевою владою [9]. Вплив на інтенсивність має побічний характер, оскільки створює додаткові стрес-фактори для менеджменту будівництва, які змушені відволікатися від управління виробництвом на вирішення транспортних проблем.

Для кращого розуміння впливу черговості постачання на темпи будівництва, розглянемо описову графічну математичну модель залежності «Час – Виконаний обсяг робіт». У цій системі координат горизонтальна вісь (X) відображає час у робочих годинах зміни (від 0 до 8), а вертикальна вісь (Y) – кількість змонтованих елементів у шукачах.

Якщо уявити криву ідеальної системи ЛТ, вона матиме вигляд лінії з рівномірним та стабільно крутим підйомом від початкової точки (0;0). Це означає, що кожна година додає однакову кількість змонтованих панелей (наприклад, стабільно по 2 панелі на годину). До кінця 8-годинної зміни крива досягне позначки у 16 рівномірно змонтованих елементів.

Натомість крива несинхронізованого постачання матиме зовсім інший, нестабільний вигляд. Лінія починається дуже полого. З нульової по другу годину відбувається лише розвантаження матеріалів на проміжний склад, тому кількість змонтованих елементів на вертикальній осі залишається на нулі. Лише з третьої години лінія починає повільно підійматися, оскільки кран розпочинає монтаж зі складу. Більше того, на цій кривій обов'язково будуть присутні горизонтальні «сходишки». Вони символізують технологічні простой, які виникають тоді, коли робітникам доводиться зупинити монтаж і шукати на складі потрібну панель, що опинилася під іншими конструкціями. До кінця 8-годинної зміни така крива досягне позначки лише у 10-12 елементів.

Дана математична та описова графічна модель переконливо доводить, що інтенсивність (нахил кривої монтажу) є значно вищою, лінійнішою та стабільнішою за умов суворого дотримання черговості та синхронізації графіка заводу-виробника з графіком будівельного майданчика [6].

Впровадження цифрових інформаційних систем, таких як інформаційне моделювання будівель (BIM) у поєднанні з системами трекінгу Інтернету речей (IoT), дозволяє вивести управління черговістю на якісно новий рівень [6, 9]. Менеджер проєкту у режимі реального часу має змогу бачити, яка саме вантажівка з яким модулем знаходиться в дорозі. Це дає змогу заздалегідь готувати фронт робіт, оперативно розподіляти ресурси майданчика та уникати ефекту несподіванки. Управління розкладом стає динамічним, а не реактивним, що дозволяє досягати максимальної інтенсивності зведення малоповерхових збірних будівель.

Висновки. Дослідження факторів, що визначають ефективність зведення малоповерхових збірних будівель, однозначно вказує на те, що транспортна логістика та суворе дотримання черговості постачання конструкцій відіграють вирішальну роль у формуванні інтенсивності будівельного виробництва. Традиційний підхід до постачання великими несинхронізованими партіями призводить до численних проблем: потреби в додаткових площах для складування, виконання подвійних підйомально-транспортних операцій, простой високовартісних монтажних механізмів та суттєвого зниження продуктивності праці робітників.

Натомість, впровадження принципів Lean Logistics та систем постачання «Just-in-Time» дозволяє здійснювати безперервний монтаж безпосередньо «з коліс». Адаптована в роботі математична модель витрат підтвердила, що мінімізація часу між прибуттям конструкції та її монтажем зводить до нуля фінансові витрати на проміжне зберігання та штрафні витрати за простой. Аналітичні розрахунки доводять, що суворе синхронізація черговості постачання здатна підвищити інтенсивність монтажу на 30-40% і суттєво скоротити терміни зведення об'єкта в цілому.

Зростаюча складність логістичних ланцюгів диктує необхідність застосування інноваційних цифрових рішень, таких як цифрові двійники, системи IoT-трекінгу та автоматизоване планування розкладу. Завдяки їх впровадженню будівельні

компанії можуть забезпечити безперервний та оптимізований потік матеріалів на майданчик, гарантуючи тим самим високу інтенсивність будівництва, економічну ефективність та неухильне дотримання жорстких календарних графіків у стиснених умовах сучасної міської урбанізації.

Список літератури:

1. Арутюнян І.А., Пастухова С.В., Милета К.Є., Пастухов В.О. Роль математичної моделі комплексної оцінки сумісності поєднання будівельних процесів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2024. Вип. 53(1). С. 131-141. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53\(1\).131-141](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(1).131-141)
2. Adarabioyo A., Odebo J. Integration of modular prefabrication technologies with architectural design workflows to accelerate project delivery schedules and reduce lifecycle costs. *International Journal of Engineering Technology Research Management*, 2024. 05(12). P. 344-259. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.17251087>
3. Bamana F., Lehoux N., Cloutier C. Simulation of a Construction Project: Assessing Impact of Just-In-Time and Lean Principles. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2019. 145(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001654](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001654)
4. Husin, A. E., & Aulia, D. Dynamic Model-Based Risk Manageability in the Modular Construction of High-Rise Residential Buildings to Improve Project time Performance. *Civil Engineering and Architecture*, 2022. 10(6), 2541-2553. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100623>
5. Kamali, M., & Hewage, K. Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 62, 1171-1183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031>
6. Munshi, B. Supply Chain Synchronization: Leveraging Digital Twins and Real-Time Logistics to Decarbonize the EPC Material Flow. *Independent Scholar Research*, 2025. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19900.50561>
7. Rocha P.F., Ferreira N.O., Pimenta F., Pereira N.B. Impacts of Prefabrication in the Building Construction Industry. *Encyclopedia*, 2023. 3, 28-45. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010003>
8. Strukova Z., Kozlovska M., Tazikova A. Improvement of Concrete Construction Work Performance Through Employment of Lean Logistics Principles. *Engineering Reports*, 2024. <https://doi.org/10.1002/eng2.13067>
9. Zohourian M., Pamidimukkala A., Kermanshachi S., Almaskati D. Modular Construction: A Comprehensive Review. *Buildings*, 2025. 15(2020). <https://doi.org/10.3390/buildings15122020>

Volodymyr RASHKIVSKYI, Kostiantyn CHERNENKO

The impact of the sequence of structures delivery on the intensity of construction of low-rise prefabricated buildings

In modern construction, prefabricated and modular building methods are gaining increasing popularity due to their ability to significantly reduce project timelines, minimize waste, and improve overall construction quality. This article is devoted to investigating a critical aspect of construction management – the impact of the delivery sequence of prefabricated structures (panels, modules, frame elements) on the intensity of assembling low-rise prefabricated buildings. The logistical problems faced by construction companies are considered, in particular, the complexity of transporting

large-sized elements, the limited storage area on the construction site, and the need for strict synchronization of production and assembly processes. Special attention is paid to the implementation of Lean Logistics principles and the "Just-in-Time" (JIT) concept, which allow for "wheels-to-structure" assembly, thereby avoiding the downtime of assembly cranes and construction crews.

In this work, a mathematical model for the comprehensive assessment of the compatibility of supply and assembly processes was developed and adapted, taking into account the costs of materials, transportation, as well as penalties for premature or delayed delivery of structures. Based on the calculations and simulated scenarios (unsynchronized supply compared to JIT logistics), it was proven that strict adherence to the sequence of structural delivery can increase the intensity of construction work, reduce total costs, and lower the risks of disrupting calendar schedules. The article contains detailed comparative analyses of traditional logistics versus optimized supply, as well as descriptive graphical interpretations of the relationships between supply accuracy and the technological efficiency of the project. The research results serve as a valuable resource for engineers, project managers, and logisticians aiming to optimize supply chains in prefabricated construction.

Ключові слова: *prefabricated construction; modular structures; construction logistics; sequence of delivery; construction intensity; Just-in-Time; construction project management; mathematical modeling; Lean Logistics; supply chain, BIM technologies, quality, digital transformation, engineering services, construction parameters, technical supervision, resource management, resource and logistics support, construction organization, organizational and technological model, life cycle cost.*

Дата надходження статті: 22.01.2026

Дата прийняття статті: 25.02.2026