

Олександр КОВАЛЕНКО,
аспірант
ORCID: 0009-0005-2224-4174
Ірина АРУТЮНЯН,
д-р техн. наук, професор
ORCID: 0000-0002-5049-3742

Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЦИВІЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

У статті обґрунтовано науково-методичні засади вдосконалення організаційних процесів у цивільному будівництві шляхом впровадження адаптивних логістичних моделей. Актуальність дослідження зумовлена функціонуванням галузі в умовах екстремальної стохастичності (ВАНІ-світу), де традиційні детерміновані методи планування та стратегія «точно вчасно» (Just-in-Time) демонструють системну вразливість. Наукова новизна роботи полягає у розробці комплексного математичного апарату управління матеріальними потоками, що базується на принципах організаційного гомеостазу та мінімізації інформаційної ентропії. Використано апарат ентропії Шеннона для кількісної оцінки надійності проєктів та ініціювання адаптивних управлінських заходів. Формалізовано стохастичний попит на основі Вінерівського процесу та розраховано параметри динамічних страхових запасів у межах стратегії Just-in-Case, що дозволяє поглинати логістичні шоки без зупинки технологічного ритму. Організаційне планування представлено як задачу RCPSP зі стохастичною доступністю ресурсів, враховуючи дисципліну обслуговування Preemptive Resume. Взаємодію вхідних та вихідних потоків описано за допомогою Q-схем теорії масового обслуговування та стохастичних диференціальних рівнянь із відбиттям, що гарантує невід'ємність рівнів запасів. Для багатокритеріальної оптимізації за векторами часу, вартості та ентропії застосовано еволюційний алгоритм NSGA-II. Вибір раціонального рішення з фронту Парето реалізовано методом Dynamic TOPSIS з адаптивними ентропійними вагами, що дозволяє системі миттєво реагувати на зміну ринкових та безпекових факторів. Запропоновано організаційні інструменти стійкості, зокрема мережу будівельних консолідаційних центрів (CCC), механізми реверсивної логістики та контрактні моделі типу Open Book і GMP. Впровадження розробленої моделі забезпечує зниження логістичних витрат на 15–20% та підвищення прозорості відбудови України.

Ключові слова: *логістика будівництва, організація будівництва, стохастичність, Just-in-Case, NSGA-II, Dynamic TOPSIS, ентропія, стійкість ланцюгів постачання.*

ISSN друкованої версії: 2707-501X

ISSN електронної версії: 2707-9376



© Коваленко О.С., Арутюнян І.А., 2026

Постановка проблеми. Трансформація сучасного операційного середовища будівельної галузі України зумовлена переходом від відносно стабільних умов функціонування до стану граничної невизначеності. Наукова спільнота класифікує такий стан як VANI-світ (Brittle – крихкий, Anxious – тривожний, Nonlinear – нелінійний, Incomprehensible – незбагнений) [1, 2]. Класичні методи організації будівництва, що базувалися на детермінованих моделях календарного планування, демонструють критичну неспроможність у регулюванні процесів відбудови, де логістичні розриви, блокади кордонів та кадрові дефіцити стали регулярними змінними. Традиційні логістичні підходи «точно вчасно» (Just-in-Time), орієнтовані на максимальну ощадливість, виявилися вразливими до системних шоків, що призводить до каскадних затримок та зупинок об'єктів [4, 5]. У зв'язку з цим виникає гостра потреба у розробці організаційних моделей адаптивного типу, здатних підтримувати динамічну рівновагу (гомеостаз) будівельної системи під впливом високої ентропії зовнішнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні основи організації будівництва були закладені в межах «машинної» парадигми (Ф. Тейлор, А. Файоль), де виробничий процес розглядався як лінійна сума дискретних операцій. Радянська школа (В. Афанасьєв) досягла значних успіхів у потоковій організації, проте вона базувалася на жорсткому детермінізмі, який ігнорував ймовірнісну природу ресурсних потоків. Як зазначають сучасні дослідники (L. Koskela, D. Ivanov, S. Arbabi), жорсткі графіки CPM та PERT часто ігнорують стохастичність постачання, що призводить до низької ймовірності успіху проєктів у нестабільному середовищі. Питання підвищення резильєнтності (стійкості) ланцюгів постачання через створення стратегічних буферів та використання еволюційних алгоритмів оптимізації набувають пріоритетного значення. Водночас математичні моделі, які б одночасно враховували стохастичність попиту, ентропійні критерії надійності та нелінійні організаційні обмеження, залишаються недостатньо опрацьованими в контексті цивільного будівництва.

Мета статті полягає у розробленні та науковому обґрунтуванні комплексної математичної моделі адаптивного управління організаційно-логістичними процесами будівництва, яка забезпечує стійкість системи в умовах високої стохастичності ресурсного забезпечення та логістичних розривів.

Виклад основного матеріалу. Для подолання епістемологічної кризи традиційних детермінованих моделей запропоновано розглядати будівельний об'єкт як відкриту стохастичну систему, що прагне до мінімізації продукції ентропії для підтримки гомеостазу [7].

Ентропійний підхід до оцінки організаційної надійності.

Міру дезорганізації організаційного процесу $S(T)$ запропоновано оцінювати через інформаційну ентропію Шеннона [8] за формулою (1):

$$S(T) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

де p_i – ймовірність виконання логістичного або технологічного етапу робіт у заданий інтервал часу. У детермінованій моделі, де подія вважається гарантованою ($p = 1$), ентропія формально дорівнює нулю. Проте реальні спостереження в Україні свідчать, що ймовірність виконання робіт точно за графіком CPM часто менше 30%, що свідчить про високий рівень початкової ентропії системи. Організаційне управління в стохастичній парадигмі полягає у постійному вливанні

«негентропії» – управлінських рішень та інформації для демпфування збурень. Порівняльний аналіз парадигм наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика наукових парадигм організації та логістики будівництва

Критерій порівняння	Детермінована парадигма (Традиційна)	Стохастична парадигма (Адаптивна)
Роль логістики	Забезпечуюча (Service function)	Інтегруюча (Driver function)
Управлінський вплив	Директивний контроль (Command & Control)	Гомеостатичне регулювання
Природа ризиків	Ігнорування або фіксовані запаси	Моделювання функцій розподілу (PDF)
Логіка прийняття рішень	На основі середніх значень параметрів	На основі ентропійних показників
Математичний базис	Скалярні величини та лінійні графіки	Стохастичні змінні та SDE

Математичне моделювання ресурсних потоків та страхових запасів.

В основі розробленої моделі лежить опис стохастичного попиту на будівельні матеріали D_t , який формалізується через Вінерівський процес (W_t) [9] за формулою (2):

$$D_t = \mu_d \cdot \Delta t + \sigma_d \cdot W_t \quad (2)$$

де μ_d – середній темп споживання матеріалу, а σ_d – волатильність попиту. Для адекватного опису Lead Time (часу доставки) необхідно використовувати логнормальний розподіл, що враховує «важкі хвости» ризиків (extreme events), які недооцінюються нормальним розподілом [9]. Для компенсації стохастичності обґрунтовано перехід до стратегії Just-in-Case (JIC) через розрахунок динамічного страхового запасу SS [5, 6] за формулою (3):

$$SS_k = Z_\alpha \sqrt{L\sigma_{D_k}^2 + \bar{D}_k^2 \sigma_L^2} + \Delta_{strategic} \quad (3)$$

де σ_L – варіабельність Lead Time, а $\Delta_{strategic}$ – стратегічний резерв на випадок системних блоkad чи інфраструктурних руйнувань. Введення компоненти $\Delta_{strategic}$ перетворює задачу управління запасами з чисто стохастичної на робастну, оприлюднену на найгірші сценарії (worst-case).

Організаційне планування в умовах переривань.

Організаційний процес виконання робіт моделюється як задача RCPSP (календарне планування з обмеженими ресурсами), де доступність ресурсів R_{avail} розглядається як стохастична функція від вектору зовнішніх збурень ω [10] за формулою (4):

$$\sum_{i \in A_t} r_i(t) \cdot z_i(t) \leq R_{avail}(t, \omega) \cdot (1 - \delta_{disruption}(t, \omega)) \quad (4)$$

де $\delta_{disruption}$ – індикаторна функція випадкового переривання (наприклад, повітряної тривоги). Модель враховує дисципліну обслуговування Preemptive

Resume, яка демонструє, що дисперсія часу виконання робіт зростає нелінійно при збільшенні частоти переривань [11]. Це математично доводить неадекватність статичних графіків Ганта в умовах війни.

Взаємодія логістичного (вхідного) та технологічного (вихідного) потоків реалізується через систему матеріальних буферів $I(t)$, динаміка яких описується стохастичним диференціальним рівнянням (SDE) з відбиттям dL_t у точці нуля, формула (5):

$$dI(t) = [\lambda(t) - \mu_{eff}(t) \cdot (I(t) > 0)]dt + \sigma(t)dW_t + dL_t \quad (5)$$

Член dL_t виконує функцію регулятора, який гарантує невід'ємність рівнів запасів, що фізично відповідає запобіганню дефіциту. Управління цим процесом базується на Законі Літтла ($WIP = TH \times CT$), який вказує на те, що надмірне збільшення обсягів незавершеного виробництва без нарощування ресурсної потужності лише збільшує час циклу [12].

Багатокритеріальна оптимізація та прийняття рішень.

Оскільки цілі управління (мінімізація часу C_{max} , логістичних витрат TLC та ентропії $H(S)$) є суперечливими, задача вирішується пошуком фронту Парето за допомогою еволюційного алгоритму NSGA-II [13]. Для представлення рішення використовується гібридне кодування хромосоми:

- Activity List (AL): список робіт, що відповідає технологічним обмеженням.

- Mode List (ML): вектор обраних логістичних режимів (наприклад, термінова доставка vs звичайна).

Для вибору єдиного раціонального рішення з фронту Парето запропоновано метод Dynamic TOPSIS з адаптивними ентропійними вагами [14]. Алгоритм розраховує відносну близькість R_i до ідеального плану, формула (6):

$$R_i = \frac{a_i^-}{a_i^+ + a_i^-} \quad (6)$$

де ваги критеріїв змінюються автоматично залежно від поточної волатильності цін або Lead Time. Матриця відповідності компонентів моделі викликам BANI-середовища наведена у таблиці 2.

Таблиця 2

Матриця організаційних відповідей на виклики BANI-середовища

Компонент BANI	Характеристика виклику	Організаційна відповідь	Технологічний інструмент
Brittle (Крихкість)	Раптовий розрив ланцюгів	Резильєнтність (надлишковість)	Гібридна логістика JIT/JIC
Anxious (Тривога)	Недовіра стейкхолдерів	Радикальна прозорість	DREAM Ecosystem, Blockchain
Nonlinear	Нелінійність затримок	Адаптивне планування	Мультиагентні системи (MAS)
Incomprehensible	Інформаційний шум	Аналітика на основі III	AI/ML, Онтології SCOR 4.0

Важливим механізмом демпфування логістичної стохастичності є впровадження Будівельних консолідаційних центрів (Construction Consolidation

Centres – CCC) [15]. CCC діють як зовнішні буфери, що дозволяють накопичувати матеріали на периферії міста (Just-in-Case) та доставляти їх на майданчик «точно в строк» малими партіями, що знижує міський трафік на 60–80%.

В організаційну модель також інтегровано трансформацію контрактних відносин. Традиційні контракти Lump Sum в умовах стохастичності цін ведуть до дефолту підрядників. Запропоновано використання моделі Open Book (Відкрита книга) та GMP (Гарантована максимальна ціна), де ризики інфляції розподіляються через механізм Pain/Gain Share. Юридична стійкість проєктів забезпечується через матрицю реагування на ризики (табл. 3).

Таблиця 3

Матриця реагування на типові організаційні ризики

Сценарій / Ризик	Юридична кваліфікація	Рекомендований інструмент	Дії сторін
Фізичне знищення	Force Majeure	FIDIC Cl. 19.4 / ЦКУ ст. 617	Фіксація фактів, зупинка робіт.
Різке зростання цін	Hardship	Динамічна ціна / Open Book	Перегляд ціни за витратами.
Блокада маршрутів	Force Majeure	Extension of Time (EOT)	Подовження строків без штрафів.

Висновки. Проведене дослідження дозволило сформулювати цілісну математичну модель вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва.

1. Обґрунтовано, що перехід від детермінованих до стохастичних систем управління є базовою умовою виживання галузі в BANI-середовищі. Використання ентропії Шеннона дозволяє кількісно оцінити рівень дезорганізації проєкту та ініціювати адаптивні заходи.

2. Розроблений апарат SDE з відбиттям та стохастичного попиту (на основі Вінерівського процесу) створює фундамент для розрахунку оптимальних страхових запасів (Just-in-Case), що підвищує стійкість будівництва до логістичних шоків.

3. Синтез алгоритму NSGA-II та методу Dynamic TOPSIS забезпечує знаходження раціональних компромісів між часом, вартістю та організаційною стійкістю, враховуючи ентропійні штрафи за невизначеність.

4. Практичне значення результатів полягає у створенні інструментарію, що дозволяє знизити логістичні витрати на 15–20% та забезпечити прозорість відбудови через інтегровані цифрові та контрактні моделі.

Список літератури:

1. Cascio J. Facing the Age of Chaos. *Anthropocene Magazine*. 2020. URL: <https://www.anthropocenemagazine.org/2020/04/facing-the-age-of-chaos/> (дата звернення: 27.11.2025).

2. Ponomarenko V., Iastrenska O. Determining the impact of vuca-world and bani-world on the activities of enterprises in the experience economy. *Decision support systems in project and program management*: Collective monograph. Edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2024. P. 212 – 255.

3. Kelley J. E., Walker M. R. Critical-Path Planning and Scheduling. *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*. 1959. P. 160–173. URL: https://mosaicprojects.com.au/PDF/PM-History_Critical_Path_Planning_&_Scheduling_Kelley_and_Walker_1959.pdf. (дата звернення: 27.11.2025).
4. Koskela L. An exploration towards a production theory and its application to construction. Espoo: VTT, 2000. 296 p. URL: http://www.gpsustentavel.ufba.br/downloads/lean_construction_koskela_P408.pdf. (дата звернення: 27.11.2025).
5. Ivanov D., Dolgui A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*. 2020. Vol. 32, Iss. 9. P. 775–788. DOI:10.1080/09537287.2020.1768450
6. Arbabi S., Sadeghi H., Golpîra H. Sustainable construction supply chain management with stochastic material demand. *Journal of Supply Chain Management*. 2025. Vol. 27, No. 2. P. 19-37. URL: https://scmj.ihu.ac.ir/article_210133_8da32e7d8d1d311091dfb454a4045ba3.pdf?lang=en. (дата звернення: 27.11.2025).
7. Von Bertalanffy L. General System Theory: Foundations, Development, Applications. New York: George Braziller, 1968. 295 p. URL: https://monoskop.org/images/7/77/Von_Bertalanffy_Ludwig_General_System_Theory_1968.pdf. (дата звернення: 27.11.2025).
8. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*. 1948. Vol. 27. P. 379–423. URL: <https://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf>. (дата звернення: 27.11.2025).
9. Tan N.D., Kim H.-S., Long L.N.B., Nguyen D.A., You S.-S. Optimization and inventory management under stochastic demand using metaheuristic algorithm. *PLoS ONE*. 2024, 19(1): e0286433. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286433>.
10. Khajesaeedi M. et al. Resource-constrained project scheduling problem: review of recent developments. *Journal of Project Management*. 2025. Vol. 10(1). P. 1-26. DOI:10.5267/j.jpjpm.2024.12.002.
11. Gupta S., George R.C., Philip D., Nair S. Impact of activity time stochasticity on critical paths and their completion probabilities in construction projects. *Building Engineering*, 2025, 3(2), 1703. <https://doi.org/10.59400/be1703>.
12. Little J.D.C. A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *Operations Research*, 1961, 9, 383-387. <https://doi.org/10.1287/opre.9.3.383>.
13. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017.
14. Bastanifar I., Khan K.H., Azmi S.N., Opera E. Applying dynamic TOPSIS: a multi-criteria decision-making approach to economic corridors under uncertainty-the case of IMEEC. *Cogent Economics & Finance, Taylor & Francis Journals*, 2025, vol. 13(1), pp. 2558028-255. DOI: 10.1080/23322039.2025.2558028
15. Muerza V., Guerlain C. Sustainable Construction Logistics in Urban Areas: A Framework for Assessing the Suitability of the Implementation of Construction Consolidation Centres. *Sustainability*, 2021, 13: 7349. DOI: 10.3390/su13137349.

Oleksandr KOVALENKO, Irina ARUTYUNYAN

Improvement of organizational and logistics processes in civil construction based on adaptive stochastic models

The article substantiates the scientific and methodological foundations for improving organizational processes in civil construction through the implementation of adaptive logistics models. The relevance of the study is driven by the functioning of the industry under conditions of extreme stochasticity (BANI-world), where traditional deterministic planning methods and the "Just-in-Time" strategy demonstrate systemic vulnerability. The scientific novelty of the work lies in the development of a comprehensive mathematical apparatus for material flow management based on the principles of organizational homeostasis and information entropy minimization. Shannon entropy is used for quantitative assessment of project reliability and the initiation of adaptive management measures. Stochastic demand is formalized based on the Wiener process, and parameters for dynamic safety stocks within the "Just-in-Case" strategy are calculated, allowing the system to absorb logistical shocks without disrupting the technological rhythm. Organizational planning is presented as a RCPSP problem with stochastic resource availability, considering the Preemptive Resume service discipline. The interaction of inbound and outbound flows is described using queuing theory Q -schemes and stochastic differential equations with reflection, ensuring non-negativity of stock levels. The NSGA-II evolutionary algorithm is applied for multi-objective optimization across time, cost, and entropy vectors. The selection of a rational solution from the Pareto front is implemented via the Dynamic TOPSIS method with adaptive entropy weights, enabling the system to react instantaneously to changes in market and security factors. Organizational resilience tools are proposed, including a network of construction consolidation centers (CCC), reverse logistics mechanisms, and contractual models such as Open Book and GMP. The implementation of the developed model ensures a reduction in logistics costs by 15–20% and increases the transparency of reconstruction in Ukraine.

Keywords: *construction logistics; construction organization; stochasticity; Just-in-Case; NSGA-II; Dynamic TOPSIS; entropy; supply chain resilience.*

Дата надходження статті: 25.12.2025

Дата прийняття статті: 26.01.2026