МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Коваленко Олександр Сергійович

УДК 69:658.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЦИВІЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА ЗА РАХУНОК ЛОГІСТИЧНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія
Подається на здобуття ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.
Коваленко О.С. _____
(підпис)

Науковий керівник:
Арутюнян Ірина Андріївна,
доктор технічних наук, професор

Запоріжжя – 2026 року

АНОТАЦІЯ

Коваленко О. С. Вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок логістичного інструментарію. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Запоріжжя, Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні, Запоріжжя, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання, пов’язаного з удосконаленням організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок використання логістичного інструментарію, багатокритеріального математичного моделювання та програмної підтримки прийняття організаційно-логістичних рішень.

Актуальність дослідження зумовлена ускладненням умов реалізації цивільних будівельних проєктів, зростанням нестабільності постачання матеріально-технічних ресурсів, обмеженістю простору будівельного майданчика, дефіцитом трудових ресурсів, підвищенням вартості капіталу та необхідністю забезпечення стійкості будівельного потоку. У таких умовах традиційне календарне планування, орієнтоване переважно на послідовність виконання робіт і нормативні строки, не завжди забезпечує достатній рівень узгодженості між графіком робіт, фактичною готовністю фронтів, ресурсними потребами, можливостями постачання та пропускною здатністю логістичних вузлів.

У роботі організаційно-логістичні процеси цивільного будівництва розглядаються як система взаємопов’язаних матеріальних, трудових, інформаційних і просторових потоків, що потребують узгодження в часі та просторі. Показано, що ефективність організації будівельного процесу залежить не лише від календарної послідовності робіт, а й від надійності постачання ресурсів, доступності логістичних

вузлів, складської місткості майданчика, готовності фронтів робіт і здатності системи адаптуватися до можливих відхилень.

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок розроблення багатокритеріальної організаційно-логістичної моделі та алгоритмічного інструментарію підтримки рішень, що забезпечують узгодження строків виконання робіт, логістичних витрат, надійності постачання та ресурсної збалансованості в умовах обмежень будівельного майданчика.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі проаналізовано теоретико-методичні засади організації цивільного будівництва, визначено роль логістичного інструментарію у підвищенні узгодженості будівельних процесів, досліджено фактори впливу на стабільність логістичних ланцюгів, сформовано систему параметрів організаційно-логістичної моделі, обґрунтовано критерії оптимізації, розроблено багатокритеріальну математичну модель, адаптовано алгоритмічний підхід на основі NSGA-II, створено програмну реалізацію моделі на Python та проведено її розрахункову апробацію на основі даних цивільного будівельного об’єкта.

Об’єктом дослідження є організаційно-логістичні процеси цивільного будівництва, що охоплюють планування, постачання, складування, переміщення та використання матеріально-технічних ресурсів у межах будівельного проєкту.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритмічний інструментарій багатокритеріальної оптимізації організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва з урахуванням часових, вартісних, ресурсних, просторових і ризикових параметрів.

У дисертаційній роботі сформовано логіку вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва, яка передбачає перехід від традиційного календарно-ресурсного планування до багатокритеріального організаційно-логістичного оцінювання альтернатив. Запропонований підхід базується на поєднанні параметризації логістичних процесів, математичного

моделювання, алгоритмічного пошуку Парето-ефективних рішень та програмної реалізації розрахункової моделі.

У першому розділі досліджено теоретико-методичні засади організації цивільного будівництва, розглянуто еволюцію організаційних систем управління, визначено роль логістики як інструменту координації матеріальних, трудових, інформаційних і просторових потоків. Досліджено сучасні підходи до координації будівельних процесів, інформаційного моделювання, спільного обміну даними та моніторингу фактичного стану робіт, а також визначено їхню роль у підтримці організаційно-логістичних рішень у будівництві.

У другому розділі визначено систему факторів, що впливають на стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві. До таких факторів віднесено макроекономічні, інфраструктурні, енергетичні, кадрові, просторово-організаційні та інформаційно-координаційні умови. Сформовано логіку параметризації організаційно-логістичних процесів через часовий, вартісний, ресурсний, просторовий, ризиковий та кадровий блоки. Обґрунтовано систему критеріїв оптимізації, що включає тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість.

У третьому розділі розроблено багатокритеріальну математичну модель організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва. Модель враховує технологічні залежності між роботами, потребу в ресурсах, вибір каналів постачання, часові вікна доставки, обмеження складської місткості, пропускну здатність логістичних вузлів та готовність операцій до виконання. Для розв’язання задачі адаптовано алгоритмічний підхід на основі NSGA-II, який дозволяє формувати множину Парето-ефективних альтернатив за кількома критеріями одночасно. Розроблено архітектуру програмного модуля підтримки організаційно-логістичних рішень.

У четвертому розділі проведено розрахункову апробацію запропонованої моделі на основі даних цивільного будівельного об’єкта. Виконано порівняння традиційного підходу до організації будівельного процесу з оптимізаційним сценарієм, сформованим за допомогою Python-програми. Отримані результати

показали можливість скорочення тривалості реалізації проєкту, зниження сукупних логістичних витрат, підвищення надійності забезпечення ресурсами та покращення ресурсної збалансованості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку теоретико-методичних засад і розробленні організаційно-логістичного інструментарію вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва на основі багатокритеріального математичного моделювання, параметризації логістичних обмежень і формування множини Парето-ефективних альтернатив.

Вперше:

- розроблено багатокритеріальну організаційно-логістичну модель оптимізації процесів цивільного будівництва, яка одночасно враховує критерії тривалості виконання робіт, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості, що дає змогу формувати множину допустимих компромісних альтернатив;
- запропоновано алгоритмічний підхід до формування Парето-ефективних організаційно-логістичних рішень на основі адаптації NSGA-II до задачі будівельної логістики, що відрізняється багаторівневим поданням рішення через технологічну послідовність робіт, параметри постачання, часові вікна доставки та обмеження логістичних вузлів будівельного майданчика;
- формалізовано умову готовності будівельної операції до включення в оперативний план через поєднання інформаційної, ресурсної, просторової та технологічної готовності, що дозволяє враховувати не лише календарну послідовність робіт, а й фактичну можливість їх виконання в конкретний момент часу.

Удосконалено:

- систему параметризації організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва шляхом виокремлення часових, вартісних, ресурсних, просторових, ризикових і кадрових параметричних блоків, що забезпечує перехід від описового аналізу факторів до формалізованої математичної постановки задачі оптимізації;

- систему критеріїв оцінювання організаційно-логістичних рішень, у якій часові, вартісні, надійнісні та ресурсні показники розглядаються як взаємопов'язані й частково конфліктні критерії, що потребують багатокритеріального підходу до вибору управлінських сценаріїв;
- математичну постановку задачі організаційно-логістичної оптимізації за рахунок включення технологічних, ресурсних, просторових, логістичних та інформаційних обмежень, зокрема обмежень складської місткості, пропускної здатності логістичних вузлів, доступності ресурсів і готовності фронтів робіт.

Дістали подальшого розвитку:

- теоретико-методичні положення щодо використання логістичного інструментарію в організації цивільного будівництва, зокрема в частині узгодження матеріальних, трудових, інформаційних і просторових потоків у межах будівельного майданчика;
- підходи до застосування цифрової підтримки організаційно-логістичних рішень у будівництві, де дані про проєкт, постачання, стан ресурсів і фактичне виконання робіт використовуються для уточнення параметрів моделі, перевірки готовності робіт і коригування розрахункових сценаріїв;
- методичний підхід до порівняльної оцінки традиційного календарно-ресурсного планування та оптимізаційного сценарію, сформованого програмною реалізацією моделі на Python, за показниками тривалості, сукупних логістичних витрат, надійності та ресурсної збалансованості.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованої організаційно-логістичної моделі та алгоритмічного інструментарію для підтримки прийняття управлінських рішень під час планування й коригування організаційних процесів цивільного будівництва.

Розроблена модель дозволяє формувати альтернативні сценарії організації будівельного процесу з урахуванням строків виконання робіт, логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості. Її застосування дає змогу оцінювати вплив логістичних обмежень будівельного майданчика, зокрема

складської місткості, пропускної здатності під'їзних шляхів, зон розвантаження, доступності логістичних вузлів і готовності фронтів робіт.

Практична реалізація запропонованого підходу виконана у вигляді розрахункового програмного модуля на Python, який забезпечує формування вихідних даних, перевірку обмежень, розрахунок цільових функцій, побудову множини допустимих альтернатив і порівняння результатів традиційного та оптимізаційного сценаріїв.

Розрахункова апробація моделі на основі даних цивільного будівельного об'єкта показала можливість скорочення тривалості реалізації проєкту з 395 до 382 днів, зниження сукупних логістичних витрат з 7,58 млн грн до 7,26 млн грн, підвищення показника надійності забезпечення ресурсами з 0,51 до 0,85 та покращення ресурсної збалансованості з 0,86 до 0,88.

Отримані результати можуть бути використані будівельними організаціями, проєктними та інжиніринговими компаніями, службами матеріально-технічного забезпечення, менеджерами будівельних проєктів і фахівцями з організації будівництва для підвищення обґрунтованості управлінських рішень щодо постачання, складування, використання ресурсів і синхронізації будівельних робіт.

Отримані результати підтверджено актами впровадження на підприємствах ТОВ «ЗВ «ГІДРОСПЕЦБУД», ТОВ «ЗАПОРІЖБУДГРУП» і ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ» (м. Запоріжжя), а також використано в навчальному процесі під час підготовки здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Основні результати дисертаційного дослідження відображено у 7 наукових працях, з яких 4 статті опубліковано у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 3 праці – у матеріалах науково-практичних конференцій.

Ключові слова: цивільне будівництво, організаційні процеси, будівельна логістика, логістичний інструментарій, матеріально-технічне забезпечення, багатокритеріальна оптимізація, математична модель, NSGA-II, Парето-ефективні альтернативи, сукупні логістичні витрати, надійність постачання, ресурсна збалансованість.

ABSTRACT

Kovalenko O. S. Improvement of Organizational Processes in Civil Construction through Logistics Models. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 “Construction and Civil Engineering”. – Zaporizhzhia, Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebnia, Zaporizhzhia, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and applied task related to the improvement of organizational processes in civil construction through the use of logistics tools, multi-criteria mathematical modeling, and software support for making organizational and logistics decisions.

The relevance of the study is determined by the increasing complexity of civil construction project implementation, growing instability in the supply of material and technical resources, limited construction site space, shortage of labor resources, rising cost of capital, and the need to ensure the stability of the construction flow. Under such conditions, traditional scheduling, which is mainly focused on the sequence of works and regulatory time limits, does not always provide a sufficient level of coordination between the work schedule, actual readiness of work fronts, resource needs, supply capabilities, and the throughput capacity of logistics nodes.

In the dissertation, organizational and logistics processes in civil construction are considered as a system of interrelated material, labor, information, and spatial flows that require coordination in time and space. It is shown that the efficiency of construction process organization depends not only on the calendar sequence of works, but also on the reliability of resource supply, availability of logistics nodes, storage capacity of the construction site, readiness of work fronts, and the ability of the system to adapt to possible deviations.

The purpose of the dissertation is to improve organizational processes in civil construction by developing a multi-criteria organizational and logistics model and

algorithmic decision-support tools that ensure the coordination of work execution time, logistics costs, supply reliability, and resource balance under construction site constraints.

To achieve this purpose, the dissertation analyzes the theoretical and methodological foundations of civil construction organization, determines the role of logistics tools in improving the coordination of construction processes, investigates the factors influencing the stability of logistics chains, forms a system of parameters for the organizational and logistics model, substantiates optimization criteria, develops a multi-criteria mathematical model, adapts an algorithmic approach based on NSGA-II, creates a Python-based software implementation of the model, and conducts its computational testing based on data from a civil construction object.

The object of the study is organizational and logistics processes in civil construction, which include planning, supply, storage, movement, and use of material and technical resources within a construction project.

The subject of the study is models, methods, and algorithmic tools for multi-criteria optimization of organizational and logistics processes in civil construction, taking into account time, cost, resource, spatial, and risk parameters.

The dissertation forms a logic for improving organizational processes in civil construction, which provides for the transition from traditional calendar-resource planning to multi-criteria organizational and logistics assessment of alternatives. The proposed approach is based on a combination of logistics process parameterization, mathematical modeling, algorithmic search for Pareto-efficient solutions, and software implementation of the computational model.

The first chapter examines the theoretical and methodological foundations of civil construction organization, considers the evolution of organizational management systems, and defines the role of logistics as a tool for coordinating material, labor, information, and spatial flows. The approaches of Lean Construction, Last Planner System, BIM, CDE, IoT, and Digital Twin are analyzed from the standpoint of their use in supporting organizational and logistics decisions in construction.

The second chapter identifies the system of factors influencing the stability of logistics chains in civil construction. These factors include macroeconomic,

infrastructural, energy-related, personnel-related, spatial-organizational, and information-coordination conditions. The logic of parameterizing organizational and logistics processes is formed through time, cost, resource, spatial, risk, and personnel blocks. A system of optimization criteria is substantiated, including work execution duration, total logistics costs, reliability of resource supply, and resource balance.

The third chapter develops a multi-criteria mathematical model of organizational and logistics processes in civil construction. The model takes into account technological dependencies between works, resource requirements, selection of supply channels, delivery time windows, storage capacity limitations, throughput capacity of logistics nodes, and readiness of operations for execution. To solve the problem, an algorithmic approach based on NSGA-II is adapted, which allows forming a set of Pareto-efficient alternatives according to several criteria simultaneously. The architecture of a software module for supporting organizational and logistics decisions is developed.

The fourth chapter presents computational testing of the proposed model based on data from a civil construction object. A comparison is made between the traditional approach to organizing the construction process and the optimization scenario generated by the Python program. The obtained results demonstrate the possibility of reducing the project implementation duration, decreasing total logistics costs, increasing the reliability of resource supply, and improving resource balance.

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of theoretical and methodological foundations and the creation of organizational and logistics tools for improving organizational processes in civil construction based on multi-criteria mathematical modeling, parameterization of logistics constraints, and formation of a set of Pareto-efficient alternatives.

For the first time:

- a multi-criteria organizational and logistics model for optimizing civil construction processes has been developed. The model simultaneously takes into account the criteria of work execution duration, total logistics costs, reliability of resource supply, and resource balance, which makes it possible to form a set of feasible compromise alternatives;

- an algorithmic approach to forming Pareto-efficient organizational and logistics decisions has been proposed on the basis of adapting NSGA-II to the task of construction logistics. This approach differs by a multi-level representation of a decision through the technological sequence of works, supply parameters, delivery time windows, and constraints of construction site logistics nodes;
- the condition of readiness of a construction operation for inclusion in the operational plan has been formalized through the combination of information, resource, spatial, and technological readiness. This makes it possible to take into account not only the calendar sequence of works, but also the actual feasibility of their execution at a specific point in time.

The following has been improved:

- the system of parameterization of organizational and logistics processes in civil construction by distinguishing time, cost, resource, spatial, risk, and personnel parameter blocks, which ensures the transition from descriptive factor analysis to a formalized mathematical formulation of the optimization problem;
- the system of criteria for assessing organizational and logistics decisions, in which time, cost, reliability, and resource indicators are considered as interrelated and partly conflicting criteria that require a multi-criteria approach to the selection of management scenarios;
- the mathematical formulation of the organizational and logistics optimization problem by including technological, resource, spatial, logistics, and information constraints, in particular constraints on storage capacity, throughput capacity of logistics nodes, resource availability, and readiness of work fronts.

The following has been further developed:

- theoretical and methodological provisions on the use of logistics tools in the organization of civil construction, particularly in terms of coordinating material, labor, information, and spatial flows within the construction site;
- approaches to the use of digital support for organizational and logistics decisions in construction, which involve the use of BIM, CDE, IoT/GPS/RFID, and ERP

system data to refine model parameters, verify work readiness, and update computational scenarios;

- a methodological approach to the comparative assessment of traditional calendar-resource planning and an optimization scenario generated by the Python-based software implementation of the model according to the indicators of duration, total logistics costs, reliability, and resource balance.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed organizational and logistics model and algorithmic tools to support managerial decision-making in the planning and adjustment of organizational processes in civil construction.

The developed model makes it possible to form alternative scenarios for organizing the construction process, taking into account work execution time, logistics costs, reliability of resource supply, and resource balance. Its application allows assessing the impact of construction site logistics constraints, in particular storage capacity, throughput capacity of access roads, unloading zones, availability of logistics nodes, and readiness of work fronts.

The practical implementation of the proposed approach is carried out in the form of a Python-based computational software module, which provides the formation of input data, verification of constraints, calculation of objective functions, generation of a set of feasible alternatives, and comparison of the results of the traditional and optimization scenarios.

Computational testing of the model based on data from a civil construction object showed the possibility of reducing the project implementation duration from 395 to 382 days, decreasing total logistics costs from UAH 7.58 million to UAH 7.26 million, increasing the resource supply reliability indicator from 0.51 to 0.85, and improving resource balance from 0.86 to 0.88.

The obtained results may be used by construction organizations, design and engineering companies, material and technical supply departments, construction project managers, and specialists in construction organization to improve the justification of

managerial decisions related to supply, storage, resource use, and synchronization of construction works.

The obtained results were confirmed by implementation acts at the enterprises LLC "ZV "HIDROSPETSBUD", LLC "ZAPORIZHBUDGRUP", and LLC "ANSTROY PROEKT" (Zaporizhzhia), and were also used in the educational process for training first- and second-level higher education students in specialty 192 "Construction and Civil Engineering".

The main results of the dissertation research are reflected in 7 scientific publications, including 4 articles published in Ukrainian category "B" professional scientific journals and 3 papers published in the proceedings of scientific and practical conferences.

Keywords: civil construction, organizational processes, construction logistics, logistics tools, material and technical supply, multi-criteria optimization, mathematical model, NSGA-II, Pareto-efficient alternatives, total logistics costs, supply reliability, resource balance.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Арутюнян І. А., Коваленко О. ОПТИМІЗАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛОГІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ. Мости та тунелі: теорія, дослідження практика. 2024. № 25. С. 13-19. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303286

2. Коваленко О., Арутюнян І. А. Вдосконалення організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва на основі адаптивних стохастичних моделей. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2026. Т. 1. № №57 (2026). С. 57-63. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(1).57-63

3. O. S. Kovalenko. MULTI-AGENT COORDINATION OF REVERSE LOGISTICS FLOWS IN RESIDENTIAL RESTORATION UNDER STOCHASTIC ENVIRONMENTS. Bridges and tunnels: theory, research, practice, 2026, No 29. C. 59–65. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2026-29-07

4. Коваленко О. С. Багатокритеріальна математична модель оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2026. No 25. С. 124-139. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-10

Список публікацій які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Коваленко О. С. Вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок логістичних моделей. Геостратегічні трансформації та траєкторія національної безпеки в контексті відбудови і сталого розвитку України: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (25–26 трав. 2023 р., м. Запоріжжя) / наук. ред. Н. Г. Метеленко. Одеса : Олді+, 2023. С. 581-584.

2. Коваленко О. С. Логістичні моделі як інструмент вдосконалення організаційних процесів у цивільному будівництві. Програма та тези доповідей. Архітектура, Дизайн та Будівництво: Інноваційні технології: Міжнародний науково-технічний форум, 15–16 листопада 2023 р., м. Київ. Київ : Видавництво Ліра-К, 2023. С. 493–494.

3. Коваленко О. С. Інтеграція будівельних консолідаційних центрів та моделей Open Book як драйвер стійкості процесів відбудови. Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали Міжнар. наук. інтернет-конф. (вип. 108, 5–6 берез. 2026 р.). Тернопіль, 2026. URL: http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2491

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ..... 2
ABSTRACT.....8
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....14
ЗМІСТ..... 16
ВСТУП..... 18
РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ЛОГІСТИЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ.....30
1.1. Еволюція організаційних систем управління в будівництві.....30
1.2. Теоретичне обґрунтування логістичних моделей у забезпеченні неперервності будівельного виробництва..... 39
1.3. Цифрові інструменти підтримки логістичних рішень у цивільному будівництві..... 48
Висновки до розділу 1.....58
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ПЛАТФОРМА ОПТИМІЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ..... 60
2.1. Аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів стабільності логістичних ланцюгів у цивільному будівництві України..... 60
2.2. Методологічні основи параметризації та аналітичної валідації організаційних процесів у логістичних системах цивільного будівництва.....67
2.3. Формування системи критеріїв оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві.....80
Висновки до розділу 2.....92
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ РІШЕНЬ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ..... 95
3.1. Математична постановка багатокритеріальної задачі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві..... 95
3.2. Алгоритмічна оптимізація багатокритеріальних організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві.....108
3.3. Архітектура та логіка функціонування програмного модуля оптимізації організаційно-логістичних рішень.....125
Висновки до розділу 3.....138
РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ..... 141

4.1. Випробування запропонованої моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів..... 141
4.2. Порівняльна оцінка ефективності традиційного підходу та запропонованої моделі оптимізації..... 158
Висновки до розділу 4..... 163
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....165
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....169

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне цивільне будівництво функціонує в умовах істотного ускладнення організаційних, ресурсних і логістичних зв'язків між учасниками будівельного процесу. Зростання складності об'єктів, обмеженість будівельних майданчиків, нестабільність постачання матеріалів, дефіцит трудових ресурсів, пошкодження транспортної та енергетичної інфраструктури, а також підвищення вартості капіталу формують нові вимоги до організації будівельного виробництва. У таких умовах традиційне календарне планування, орієнтоване переважно на послідовність виконання робіт і нормативні строки, не завжди забезпечує належну стійкість реалізації проєкту.

Особливої актуальності набуває проблема узгодження матеріальних, трудових, інформаційних і просторових потоків у межах будівельного майданчика. На практиці значна частина організаційних збоїв виникає не через відсутність календарного графіка, а через неузгодженість між графіком виконання робіт, фактичною готовністю фронтів, наявністю ресурсів, можливостями постачальників, пропускною здатністю логістичних вузлів і складською місткістю майданчика. Це призводить до простоїв бригад і техніки, надмірного накопичення матеріалів, блокування робочих зон, повторних переміщень ресурсів, зростання логістичних витрат і порушення ритмічності будівельного потоку.

У наукових працях з організації будівництва, логістики, календарного та мережевого планування, Lean Construction, Last Planner System, BIM-орієнтованого управління та багатокритеріальної оптимізації сформовано значне методологічне підґрунтя для вдосконалення будівельних процесів. Водночас у практиці цивільного будівництва залишається недостатньо розробленим питання комплексного поєднання логістичних параметрів, критеріїв часу, вартості, надійності та ресурсної збалансованості в єдиній моделі підтримки організаційно-логістичних рішень. Існуючі підходи часто зосереджуються або на календарному плануванні, або на постачанні матеріальних ресурсів, або на оцінюванні окремих ризиків, але не завжди

дозволяють одночасно враховувати конфліктність критеріїв та обмеження реального будівельного майданчика.

У сучасних умовах для цивільного будівництва України особливо важливим стає перехід від реактивного управління логістичними збоями до попереднього оцінювання альтернативних організаційно-логістичних сценаріїв. Таке оцінювання має враховувати не лише мінімізацію строків чи витрат, а й надійність постачання, готовність фронтів робіт, обмеження складської місткості, пропускну здатність логістичних вузлів і можливість оперативного коригування рішень. Це зумовлює потребу у формуванні багатокритеріальної математичної моделі та алгоритмічного інструментарію, здатного генерувати не одне формально оптимальне рішення, а множину допустимих компромісних альтернатив.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є використання логістичного інструментарію у поєднанні з методами багатокритеріальної оптимізації та програмною реалізацією розрахункової моделі. Такий підхід дозволяє представити організаційно-логістичне рішення як систему взаємопов’язаних параметрів: строків виконання робіт, обсягів і партій постачання, вибору каналів забезпечення, часових вікон доставки, використання логістичних вузлів і готовності операцій до виконання. Застосування алгоритмів формування Парето-ефективних альтернатив дає змогу порівнювати варіанти за кількома критеріями одночасно та обирати рішення з урахуванням пріоритетів конкретного будівельного проєкту.

Актуальність дисертаційної роботи полягає у необхідності вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва шляхом розроблення та випробування організаційно-логістичної моделі, яка забезпечує формалізоване врахування часових, вартісних, ресурсних, просторових і ризикових параметрів будівельного процесу. Запропонований підхід спрямований на підвищення узгодженості робіт, зменшення логістичних втрат, підвищення надійності забезпечення ресурсами та підтримку вибору раціональних управлінських сценаріїв у складних умовах реалізації цивільних будівельних проєктів.

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок розроблення багатокритеріальної

організаційно-логістичної моделі та алгоритмічного інструментарію підтримки рішень, що забезпечують узгодження строків виконання робіт, логістичних витрат, надійності постачання та ресурсної збалансованості в умовах обмежень будівельного майданчика.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Проаналізувати теоретико-методичні засади організації цивільного будівництва та визначити роль логістичного інструментарію у підвищенні узгодженості будівельних процесів.

2. Дослідити сучасні підходи до управління матеріальними, ресурсними, інформаційними та просторовими потоками у будівництві з урахуванням принципів ощадливої організації робіт, інформаційного моделювання, спільного обміну даними та оперативного моніторингу виконання будівельних процесів.

3. Визначити систему факторів, які впливають на стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві, та встановити їх зв’язок із параметрами організаційно-логістичної моделі.

4. Сформувати логіку параметризації організаційно-логістичних процесів шляхом виокремлення часових, вартісних, ресурсних, просторових, ризикових і кадрових параметрів.

5. Обґрунтувати систему критеріїв оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві, що включає тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість.

6. Розробити багатокритеріальну математичну модель організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва з урахуванням технологічних, ресурсних, просторових, логістичних та інформаційних обмежень.

7. Адаптувати алгоритмічний підхід на основі NSGA-II для формування множини Парето-ефективних організаційно-логістичних альтернатив.

8. Розробити програмну реалізацію моделі у вигляді розрахункового модуля на Python, який забезпечує формування вихідних даних, перевірку обмежень, розрахунок цільових функцій і порівняння альтернативних сценаріїв.

9. Провести розрахункову апробацію запропонованої моделі на основі даних цивільного будівельного об’єкта та порівняти результати традиційного підходу із результатами оптимізаційної моделі.

10. Оцінити ефективність запропонованого організаційно-логістичного підходу за показниками тривалості, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення та ресурсної збалансованості.

Об’єктом дослідження є організаційно-логістичні процеси цивільного будівництва, що охоплюють планування, постачання, складування, переміщення та використання матеріально-технічних ресурсів у межах будівельного проєкту.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритмічний інструментарій багатокритеріальної оптимізації організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва з урахуванням часових, вартісних, ресурсних, просторових і ризикових параметрів.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення задач дисертаційної роботи використано сукупність загальнонаукових і спеціальних методів дослідження.

Методи системного аналізу, узагальнення та класифікації використано для дослідження теоретико-методичних засад організації цивільного будівництва, визначення факторів впливу на стабільність логістичних ланцюгів та формування системи параметрів організаційно-логістичної моделі.

Методи структурно-логічного моделювання застосовано для побудови логіки взаємозв’язку між факторами середовища, параметрами моделі, системою обмежень, критеріями оптимізації та результатами організаційно-логістичного вибору.

Методи мережевого та календарного планування, зокрема PERT/CPM, використано для оцінювання часових параметрів будівельних операцій, визначення технологічних залежностей між роботами та формування розрахункових сценаріїв виконання будівельного проєкту.

Методи математичного моделювання застосовано для формалізації багатокритеріальної задачі оптимізації, побудови цільових функцій тривалості, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення та ресурсної збалансованості,

а також для опису технологічних, ресурсних, просторових, логістичних та інформаційних обмежень.

Методи багатокритеріальної оптимізації використано для формування множини допустимих компромісних альтернатив. Алгоритм NSGA-II застосовано для недомінованого сортування рішень, формування Парето-ефективної множини та збереження різноманітності альтернатив у просторі критеріїв.

Методи підтримки прийняття рішень, зокрема AHP і TOPSIS, використано для ранжування отриманих альтернатив з урахуванням пріоритетів особи, що приймає рішення.

Методи імітаційного та чисельного моделювання застосовано під час програмної реалізації запропонованої моделі у середовищі Python, перевірки обмежень, розрахунку значень цільових функцій та порівняння традиційного й оптимізаційного сценаріїв організації будівельного процесу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку теоретико-методичних засад та розробленні організаційно-логістичного інструментарію вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва на основі багатокритеріального моделювання, параметризації логістичних обмежень і формування множини Парето-ефективних альтернатив.

Вперше:

- розроблено багатокритеріальну організаційно-логістичну модель оптимізації процесів цивільного будівництва, яка одночасно враховує критерії тривалості виконання робіт, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості, що дає змогу формувати не одне детерміноване рішення, а множину допустимих компромісних альтернатив;
- запропоновано алгоритмічний підхід до формування Парето-ефективних організаційно-логістичних рішень на основі адаптації NSGA-II до задачі будівельної логістики, що відрізняється багаторівневим поданням рішення через технологічну послідовність робіт, параметри постачання, часові вікна доставки та обмеження логістичних вузлів будівельного майданчика;

- формалізовано умову готовності будівельної операції до включення в оперативний план через поєднання інформаційної, ресурсної, просторової та технологічної готовності, що дозволяє враховувати не лише календарну послідовність робіт, а й фактичну можливість їх виконання в конкретний момент часу.

Удосконалено:

- систему параметризації організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва шляхом виокремлення часових, вартісних, ресурсних, просторових, ризикових і кадрових параметричних блоків, що забезпечує перехід від описового аналізу факторів до формалізованої математичної постановки задачі оптимізації;
- систему критеріїв оцінювання організаційно-логістичних рішень, у якій часові, вартісні, надійнісні та ресурсні показники розглядаються як взаємопов'язані й частково конфліктні критерії, що потребують багатокритеріального, а не однокритеріального підходу до вибору управлінських сценаріїв;
- математичну постановку задачі організаційно-логістичної оптимізації за рахунок включення технологічних, ресурсних, просторових, логістичних та інформаційних обмежень, зокрема обмежень складської місткості, пропускної здатності логістичних вузлів, доступності ресурсів і готовності фронтів робіт.

Дістали подальшого розвитку:

- теоретико-методичні положення щодо використання логістичного інструментарію в організації цивільного будівництва, зокрема в частині узгодження матеріальних, трудових, інформаційних і просторових потоків у межах будівельного майданчика;
- підходи до застосування цифрової підтримки організаційно-логістичних рішень у будівництві, де інформація про проєкт, ресурси, постачання та фактичний стан робіт використовується для уточнення параметрів моделі, перевірки готовності операцій і своєчасного коригування розрахункових сценаріїв;
- методичний підхід до порівняльної оцінки традиційного календарно-ресурсного планування та оптимізаційного сценарію, сформованого

програмною реалізацією моделі на Python, за показниками тривалості, сукупних логістичних витрат, надійності та ресурсної збалансованості.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованої організаційно-логістичної моделі та алгоритмічного інструментарію для підтримки прийняття управлінських рішень під час планування й коригування організаційних процесів цивільного будівництва.

Розроблена модель дозволяє:

- формувати альтернативні сценарії організації будівельного процесу з урахуванням строків виконання робіт, логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості;
- оцінювати вплив логістичних обмежень будівельного майданчика, зокрема складської місткості, пропускної здатності під'їзних шляхів, зон розвантаження, доступності логістичних вузлів і готовності фронтів робіт;
- порівнювати традиційний підхід до календарно-ресурсного планування з оптимізаційним сценарієм, сформованим на основі багатокритеріальної моделі;
- визначати Парето-ефективні альтернативи, які відображають компроміс між тривалістю, вартістю, надійністю та ресурсною збалансованістю;
- використовувати результати розрахунку як основу для вибору раціонального організаційно-логістичного сценарію в умовах обмеженого простору майданчика, нестабільності постачання та зміни фактичної готовності робіт.

Практична реалізація запропонованого підходу виконана у вигляді розрахункового програмного модуля на Python, який забезпечує формування вихідних даних, перевірку обмежень, розрахунок цільових функцій, побудову множини допустимих альтернатив і порівняння результатів традиційного та оптимізаційного сценаріїв.

Розрахункова апробація моделі на основі даних цивільного будівельного об'єкта показала можливість скорочення тривалості реалізації проєкту, зниження сукупних логістичних витрат, підвищення надійності забезпечення ресурсами та покращення ресурсної збалансованості порівняно з традиційним підходом до організації будівельного процесу.

Отримані результати підтверджено актами впровадження на підприємствах ТОВ «ЗВ «ГІДРОСПЕЦБУД», ТОВ «ЗАПОРІЖБУДГРУП» і ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ» (м. Запоріжжя), а також використано в навчальному процесі під час підготовки здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрямок дослідження, його мета та завдання відповідають тематиці науково-дослідних на системно-пошукових робіт кафедри промислового та цивільного будівництва Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, при виконанні яких автор виконував функції виконавця, за наступною тематикою: «Систематологія селективної концепції активізації та адаптації організаційно-технологічних рішень будівництва, реконструкції та експлуатації до сучасних умов інтегрованого розвитку» (номер державної реєстрації: 0121U108178) 2021 -2025 р.р.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукового напряму кафедри "Будівництва та цивільної інженерії" Запорізького національного університету, пов'язаного з удосконаленням організаційно-технологічних процесів у будівництві, підвищенням ефективності використання ресурсів і розвитком методів математичного моделювання в управлінні будівельними проєктами.

Результати дослідження можуть бути використані в межах науково-дослідних робіт, спрямованих на розвиток організації будівництва, оптимізацію матеріально-технічного забезпечення, підвищення стійкості логістичних ланцюгів та цифрову підтримку прийняття управлінських рішень у цивільному будівництві.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Основні наукові положення, теоретичні узагальнення, математичні моделі, алгоритмічні рішення, програмна реалізація та висновки, що виносяться на захист, отримані автором особисто.

Особистий внесок здобувача полягає у:

- аналізі сучасного стану організаційних процесів цивільного будівництва та визначенні ролі логістичного інструментарію в їх удосконаленні;

- систематизації факторів, що впливають на стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві;
- формуванні параметричних блоків організаційно-логістичної моделі: часового, вартісного, ресурсного, просторового, ризикового та кадрового;
- обґрунтуванні системи критеріїв оптимізації, що включає тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість;
- розробленні багатокритеріальної математичної моделі організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва;
- адаптації алгоритму NSGA-II до задачі формування Парето-ефективних організаційно-логістичних альтернатив;
- розробленні програмного модуля на Python для розрахункової перевірки запропонованої моделі;
- проведенні порівняльної оцінки традиційного підходу та запропонованої оптимізаційної моделі на основі даних цивільного будівельного об’єкта.

Основні положення, що виносяться на захист. На захист виносяться такі основні наукові положення та результати дисертаційної роботи:

1. Теоретико-методичний підхід до вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва на основі логістичного інструментарію, який передбачає узгодження матеріальних, трудових, інформаційних і просторових потоків у межах будівельного проєкту.

2. Система параметризації організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва, що охоплює часові, вартісні, ресурсні, просторові, ризикові та кадрові параметри і створює основу для формалізованої математичної постановки задачі оптимізації.

3. Багатокритеріальна математична модель організаційно-логістичної оптимізації, яка враховує критерії тривалості виконання робіт, сукупних логістичних витрат, надійності забезпечення ресурсами та ресурсної збалансованості, а також систему технологічних, ресурсних, просторових, логістичних та інформаційних обмежень.

4. Алгоритмічний підхід до формування множини Парето-ефективних організаційно-логістичних альтернатив на основі адаптації NSGA-II до умов цивільного будівництва.

5. Програмна реалізація запропонованої моделі у вигляді розрахункового модуля на Python та результати її розрахункової апробації на основі даних цивільного будівельного об’єкта.

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням загальновизнаних методів системного аналізу, структурно-логічного моделювання, мережевого та календарного планування, математичного моделювання, багатокритеріальної оптимізації та чисельного розрахунку.

Коректність запропонованої математичної моделі підтверджується її узгодженістю з логікою організації будівельного процесу, урахуванням технологічних залежностей між роботами, ресурсних потреб, логістичних обмежень, складської місткості, пропускної здатності логістичних вузлів і готовності фронтів робіт.

Достовірність алгоритмічних результатів забезпечується використанням адаптованого алгоритму NSGA-II, процедурою недомінованого сортування, розрахунком crowding distance, застосуванням штрафних функцій для врахування обмежень та формуванням множини Парето-ефективних альтернатив.

Практична перевірка результатів здійснена шляхом розрахункової апробації запропонованої моделі у програмному модулі на Python. Порівняння традиційного підходу з оптимізаційним сценарієм засвідчило можливість скорочення тривалості виконання робіт, зменшення сукупних логістичних витрат, підвищення надійності забезпечення ресурсами та покращення ресурсної збалансованості.

Апробація результатів дисертації. *Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися у 2023–2026 рр. на:* Міжнародній науково-практичній конференції «Геостратегічні трансформації та траєкторія національної безпеки в контексті відбудови і сталого розвитку України» (м. Запоріжжя, 2023); Міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура, Дизайн та Будівництво: Інноваційні технології» (м. Київ, 2023); Міжнародній

науковій інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м. Тернопіль, 2026); VIII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції МІСТ «КИЇВ-ДНІПРО» «Управління проєктами. Перспективи розвитку проєктного та нейроменеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності, трансфер технологій» (м. Дніпро, 2026), а також на кафедральних науково-методичних семінарах у Запорізькому національному університеті.

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 8-ми наукових працях, з яких 4 статей – у наукових фахових виданнях України, 4 праць – у матеріалах науково-практичних конференцій.

У публікаціях, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать результати, пов'язані з аналізом організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва, формуванням параметрів моделі, обґрунтуванням критеріїв оптимізації, розробленням математичної моделі та програмною апробацією запропонованого підходу.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі досліджено теоретико-методичні засади організації цивільного будівництва, роль логістичного інструментарію та можливості цифрової підтримки організаційно-логістичних рішень.

У другому розділі визначено систему факторів впливу на стабільність логістичних ланцюгів, сформовано параметричні блоки організаційно-логістичної моделі та обґрунтовано систему критеріїв оптимізації.

У третьому розділі розроблено багатокритеріальну математичну модель, алгоритмічний підхід на основі NSGA-II та архітектуру програмного модуля підтримки організаційно-логістичних рішень.

У четвертому розділі проведено розрахункову апробацію запропонованої моделі на основі даних цивільного будівельного об’єкта та виконано порівняльну оцінку традиційного підходу й оптимізаційного сценарію.

Загальний обсяг дисертації становить 178 сторінок, з них основного тексту – 126 сторінок. Робота містить 24 рисунки та 25 таблиць. Список використаних джерел налічує 119 найменувань.

РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ЛОГІСТИЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

1.1. Еволюція організаційних систем управління в будівництві

Розвиток організаційних систем управління в будівництві відображає поступовий перехід від емпіричних способів координації робіт до більш формалізованих підходів, заснованих на стандартизації, плануванні та аналітичному обґрунтуванні рішень. На ранніх етапах індустріалізації будівельне виробництво характеризувалося низьким рівнем узгодженості між окремими виконавцями, відсутністю єдиних норм організації праці та переважанням практичного досвіду над системними управлінськими рішеннями. У таких умовах ключовими організаційними проблемами були слабка передбачуваність строків виконання робіт, нерівномірний розподіл ресурсів, обмежена керованість процесів і залежність результату від індивідуальної майстерності виконавців.

Важливим етапом у трансформації підходів до організації будівництва стало впровадження принципів наукового менеджменту, пов’язаних із працями Фредеріка Тейлора [1]. Їхня сутність полягала у подоланні розриву між плануванням і виконанням шляхом раціоналізації трудових процесів, нормування операцій і запровадження функціонального контролю. Для будівельної практики це означало перехід до більш жорстко регламентованої моделі організації робіт, у межах якої управлінські рішення концентрувалися на рівні керівництва, а виконавський рівень орієнтувався на дотримання встановлених норм і процедур. Разом із тим така модель породила нові обмеження: надмірну ієрархічність, зниження гнучкості в реагуванні на зміни та недостатню здатність системи враховувати складну взаємодію між окремими видами робіт.

Подальше ускладнення будівельних об’єктів зумовило потребу в інструментах, які дозволяли б не лише регламентувати операції, а й узгоджувати їх у часі. У цьому контексті важливе значення мало поширення календарного планування, пов’язаного з використанням діаграм Ганта [2]. Їх застосування дало змогу візуалізувати послідовність виконання робіт, контролювати просування проєкту та зіставляти планові й фактичні строки. Саме це створило основу для посилення управлінської уваги до часових параметрів будівельного процесу. Водночас календарні графіки виявилися недостатніми для відображення складних логічних залежностей між роботами у великих і багатокомпонентних проєктах [3]. Це зумовило подальший розвиток мережевих методів планування, які стали наступним етапом еволюції організаційних систем управління в будівництві.

Таблиця 1.1 – Еволюція організаційних проблем та підходів до їх вирішення в будівництві

Етап еволюції	Ключова організаційна проблема	Методологічний підхід до вирішення	Роль людського фактора
Доіндустріальний етап	Відсутність стандартів організації робіт, низька продуктивність	Емпіричний досвід, індивідуальні практики виконання робіт	Визначальна роль особистої майстерності виконавця
Науковий менеджмент	Розрив між плануванням і виконанням, недостатня керованість процесів	Стандартизація операцій, нормування, функціональний контроль	Відокремлення управлінських функцій від виконавських
Календарне планування	Недостатня наочність перебігу робіт у часі, складність контролю строків	Діаграми Ганта, візуалізація послідовності та тривалості робіт	Посилення ролі професійного управлінського персоналу

Мережеве планування (CPM/PERT)	Складність координації технологічних залежностей і резервів часу	Аналіз критичного шляху, імовірнісне оцінювання тривалості робіт	Орієнтація на аналітичне обґрунтування рішень
Потоково-орієнтовані підходи (Lean Construction)	Втрати на стиках процесів, варіативність виконання, нестабільність потоку	Управління потоком, усунення втрат, робота з обмеженнями	Командна відповідальність, залучення виконавців до планування
Цифрова підтримка управління	Інформаційні розриви, неузгодженість даних, колізії рішень	BIM, CDE, інтеграція інформаційного середовища	Узгоджена взаємодія учасників проєкту на основі спільних даних

Розвиток методів критичного шляху (CPM) та техніки оцінювання проєктів (PERT) у середині XX століття став відповіддю на ускладнення великих інфраструктурних і виробничих об’єктів, для яких традиційних календарних інструментів уже було недостатньо [4]. Метод CPM дозволив виокремлювати роботи, що безпосередньо визначають загальний строк завершення проєкту, тоді як PERT увів імовірнісний підхід до оцінювання тривалості операцій в умовах невизначеності. У результаті план почав розглядатися не лише як часовий графік, а як система взаємопов’язаних робіт із різним ступенем впливу на кінцевий результат [5]. Водночас мережеві методи, попри їхню високу аналітичну цінність, виявили певні обмеження в умовах реального будівельного майданчика, де на строки виконання істотно впливають зміни проєктних рішень, порушення постачання, погодні фактори та ресурсні обмеження. Саме це зумовило подальший пошук підходів, здатних враховувати не лише логіку залежностей, а й фактичну динаміку виконання будівельних процесів [6].

Наприкінці XX століття в теорії організації будівництва сформувалося розуміння обмеженості традиційного підходу, за якого будівельний процес розглядався переважно як послідовність окремих перетворень ресурсів у готовий

результат. У межах такого бачення основна увага зосереджувалася на виконанні окремих операцій, тоді як питання узгодженості між ними, втрат на стиках процесів і впливу варіативності залишалися недостатньо врахованими. Це зумовило розвиток концепції Lean Construction, у якій будівництво трактується як виробнича система, орієнтована не лише на виконання робіт, а й на забезпечення безперервності потоку та створення цінності. Однією з ключових причин організаційних порушень у такій системі вважається варіативність, тобто відхилення в умовах виконання робіт, що негативно впливають на ритмічність процесів [7]. Її джерелами можуть виступати неточності проєктної документації, зміни проєктних рішень, недосконалість договірної координації, а також збої у взаємодії між учасниками будівництва.

Важливим кроком у розвитку цих підходів стало впровадження Last Planner System (LPS), яка змінила саму логіку оперативного планування [9]. Якщо традиційна модель виходила з того, що роботи мають виконуватися відповідно до заздалегідь встановленого графіка, то LPS акцентує увагу на реальній готовності завдань до виконання. У центрі цього підходу перебуває процедура make-ready, зміст якої полягає у виявленні та усуненні обмежень до початку виконання конкретної роботи. Така постановка питання означає перехід від формального слідування плану до перевірки здійсненності робіт у конкретних організаційних умовах. У результаті посилюється увага до узгодження строків, доступності ресурсів, готовності фронтів робіт та якості координації між учасниками процесу.

Таблиця 1.2 – Порівняння традиційного та потоково-орієнтованого підходів до організації будівельного виробництва

Характеристика	Традиційна («push») логіка	Потоково-орієнтована («pull») логіка
Мета планування	Виконання централізовано встановленого графіка	Забезпечення безперервності та узгодженості потоку робіт
Реакція на збої	Посилення контролю, збільшення резервів	Усунення причин відхилень, адаптація процесу
Управління ресурсами	Подача ресурсів відповідно до попереднього плану	Подача ресурсів відповідно до фактичної готовності робіт

Об’єкт контролю	Окремі операції та їх локальна продуктивність	Стики процесів, узгодженість і ритмічність виконання
Роль запасів	Засіб страхування від можливих зупинок	Потенційне джерело втрат і індикатор неузгодженості процесів

У сучасному будівництві організаційні системи управління характеризуються зростанням ролі цифрових засобів підтримки управлінських рішень. Використання BIM-технологій розширює можливості попереднього аналізу просторових і часових колізій, а середовище спільних даних (CDE) забезпечує узгоджене інформаційне середовище для учасників будівельного процесу [9]. Водночас методологічно важливо підкреслити, що цифрові засоби не усувають організаційні проблеми самі по собі, а лише підвищують ефективність тих підходів, які вже ґрунтуються на належній координації, перевірці готовності робіт і узгодженості дій учасників. Саме тому подальший розвиток організаційних систем у будівництві пов’язується не лише з удосконаленням інструментів планування, а й із пошуком підходів, здатних інтегрувати часові, ресурсні та координаційні аспекти в єдину систему управління.

Рисунок 1.1 узагальнює еволюцію організаційних систем управління в будівництві через зміну ключових організаційних проблем і підходів до їх вирішення. Послідовне ускладнення організаційних завдань зумовило перехід від регламентації окремих операцій до інтегрованого узгодження строків, ресурсів, готовності робіт і просторових обмежень, що створило передумови для розвитку сучасних координаційних підходів у будівництві.

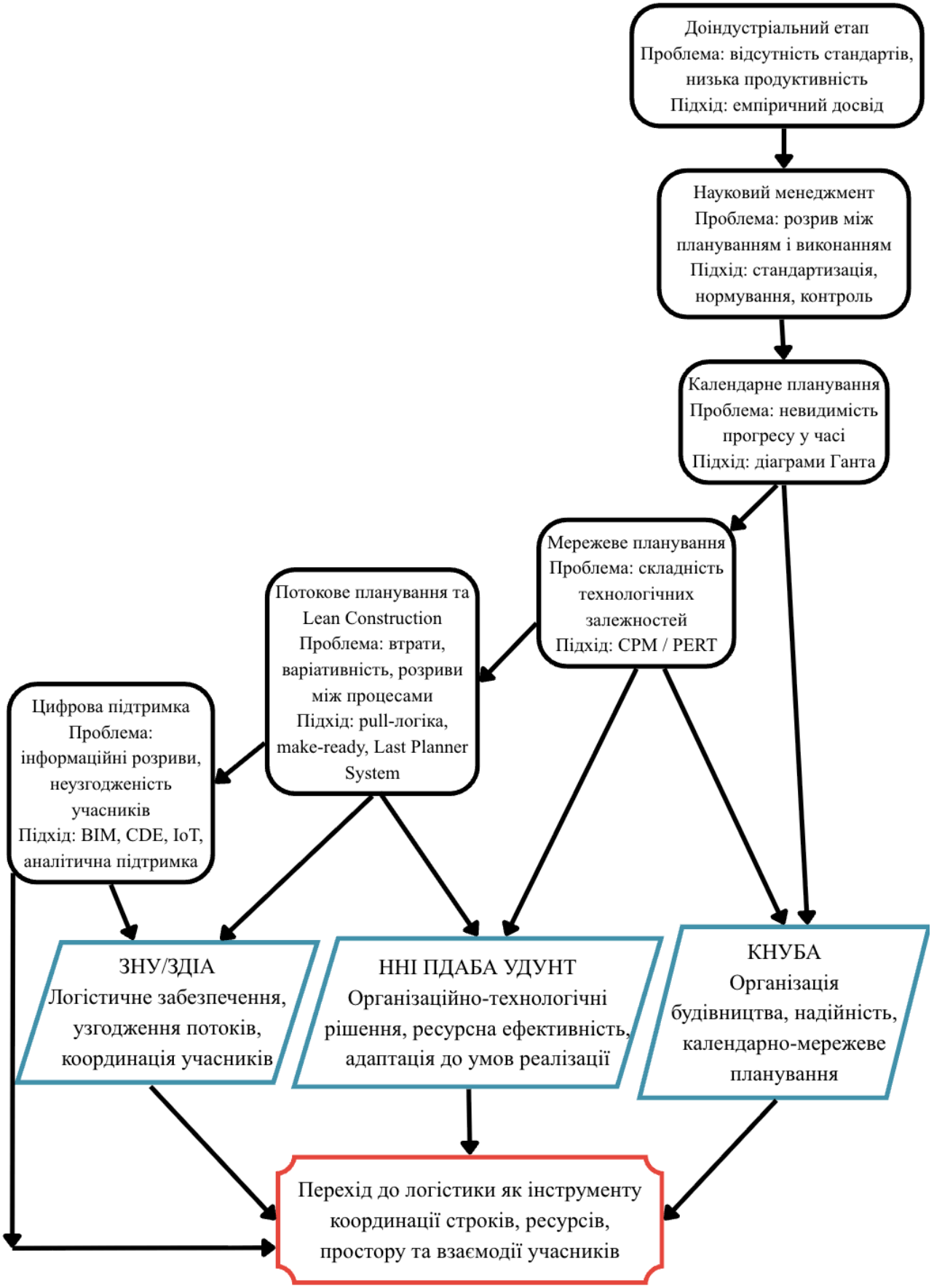


Рисунок 1.1 – Еволюція організаційних систем управління в будівництві

Розвиток організаційних систем управління в будівництві в Україні відбувався на основі поєднання загальносвітових підходів до планування і координації з власними науковими традиціями, сформованими у провідних вітчизняних наукових осередках [10]. Українські наукові школи зробили вагомий внесок у формалізацію організаційно-технологічних рішень, розвиток підходів до забезпечення надійності будівельного виробництва, ресурсної ефективності та адаптації управління до змінних умов реалізації проєктів [11].

Наукова школа Київського національного університету будівництва і архітектури сформувала підхід до організації будівництва як цілісної системи координації учасників інвестиційно-будівельного процесу [12]. У працях її представників основну увагу приділено узгодженню організаційних, технологічних і управлінських рішень, що забезпечують цілісність реалізації будівельного проєкту.

У науковому доробку А. М. Тугая організація будівництва розглядається як системна галузь знань, що поєднує інженерні, управлінські та економічні аспекти будівельної діяльності. Праці цього напряму заклали важливу методологічну основу для подальшого розвитку підходів до організаційно-технологічного проєктування, календарного узгодження та координації учасників будівництва [13]. О. А. Тугай розвинув цей підхід у напрямі побудови варіативних моделей організаційних процесів і адаптації організаційних структур управління до змін зовнішнього середовища [12; 13]. Використання інструментів математичного моделювання та нечітких множин дозволило обґрунтувати підходи до прийняття рішень в умовах підвищеної невизначеності, що має безпосереднє значення для сучасного будівельного виробництва.

У працях В. О. Поколенка акцент зміщується до девелоперського та управлінського виміру будівельної діяльності [14]. У межах цього підходу будівельний проєкт трактується не лише як технологічна послідовність робіт, а як складна система взаємодії інвесторів, девелоперів, підрядних організацій, муніципального середовища та інших стейкхолдерів. Для теми дисертації ця школа є важливою тим, що підкреслює необхідність координації строків, ресурсів та інтересів учасників у межах єдиного організаційного контуру.

Дніпровська наукова школа організації будівництва, сформована на базі Придніпровської державної академії будівництва та архітектури та продовжена в межах ННІ ПДАБА УДУНТ, зробила вагомий внесок у розвиток підходів до організаційно-технологічної надійності будівельного виробництва. Її представники зосередилися на тому, що традиційні статичні схеми планування не забезпечують належної стійкості будівельних процесів у реальних умовах, де на результати впливають випадкові збурення, обмеження ресурсів та варіативність середовища.

У працях А. В. Радкевича сформовано підхід до комплексного моделювання організаційно-технологічної надійності, у межах якого будівельний процес розглядається як система взаємопов'язаних технологічних комплексів із різним ступенем стійкості до відхилень [15]. Це дозволяє перейти від формального календарного планування до вибору таких організаційних рішень, які зберігають працездатність системи навіть за зміни зовнішніх умов.

Т. С. Кравчуновська розвиває напрям організаційно-технологічного проєктування в умовах реконструкції, ущільненої міської забудови та підвищеної просторової обмеженості [16]. Значення її праць полягає у посиленні уваги до перевірки реалізованості планів, до обмежень міського середовища та до ризиків, що виникають у складних умовах виконання робіт. У працях Т. В. Ткач, Ф. І. Павлова та інших представників школи розвиваються питання забезпечення надійності при зведенні складних і висотних об'єктів, оптимізації монолітного будівництва, зниження енергоємності процесів і вдосконалення технологічних рішень. У сукупності школа ННІ ПДАБА УДУНТ сформувала важливий напрям, у якому організація будівництва розглядається крізь призму надійності, стохастичності та адаптації планування до умов невизначеності [15; 16].

Запорізька наукова школа, пов'язана із ЗДІА та її наступником – ЗНУ, розвиває підходи, в яких організація будівництва поєднується з ресурсозбереженням, техніко-економічною ефективністю, реконструкцією та модернізацією виробничої бази [17]. Для цього напряму характерне розширене трактування будівельного процесу, у межах якого враховуються не лише календарні й технологічні аспекти, а й

питання матеріально-технічного забезпечення, економічної стійкості та оновлення виробничої інфраструктури.

У працях І. А. Арутюнян акцент зроблено на вдосконаленні організаційно-технологічних процесів за рахунок інноваційних підходів, зокрема використання BIM-технологій, а також на логістичному забезпеченні будівельних об’єктів і керуванні проєктними рішеннями [18]. Н. О. Данкевич розвиває напрям техніко-економічного обґрунтування проєктних рішень, ціноутворення та аналізу виробничо-господарської діяльності будівельних організацій, що посилює економічний аспект організації будівництва. Праці В. І. Аніна та інших представників запорізької школи підкреслюють значення підготовки наукових кадрів, економічної стабільності підприємств і поєднання інженерних та управлінських підходів. У цілому ця школа є важливою для даного дослідження, оскільки підсилює ресурсний, економічний і логістичний виміри організації будівельного виробництва [18; 19].

Таблиця 1.3 – Систематизація внеску провідних українських наукових шкіл у розвиток організації будівництва

Наукова школа	Ключові напрями досліджень	Значення для теми дисертації
КНУБА (Київ)	Координація учасників будівництва, адаптація організаційних структур, варіативні моделі, девелоперський підхід	Формує уявлення про будівництво як інтегровану організаційну систему, у якій мають бути узгоджені строки, ресурси та інтереси учасників
ННІ ПДАБА УДУНТ (Дніпро)	Організаційно-технологічна надійність, стохастичне моделювання, реалізованість планів, висотне та ущільнене будівництво	Потрібне для врахування надійності, обмежень і невизначеності в організації будівельного процесу
ЗНУ / ЗДІА (Запоріжжя)	Ресурсозбереження, логістичне забезпечення, BIM-інтеграція, техніко-економічне обґрунтування, модернізація виробничої бази	Підсилює ресурсний, економічний і логістичний аспекти організації будівництва та підводить до сучасних підходів координації потоків

Отже, еволюція організаційних систем управління в будівництві свідчить про поступове ускладнення змісту організаційних завдань: від регламентації окремих операцій і контролю виконання до забезпечення узгодженості строків, технологічних залежностей, ресурсного забезпечення, готовності фронтів робіт і адаптації до змінних умов реалізації проєктів. Вагомий внесок у розвиток цих підходів зробили українські наукові школи, які розширили теорію організації будівництва в напрямах формалізації організаційно-технологічних рішень, забезпечення надійності, ресурсної ефективності та координації учасників будівельного процесу. У сучасних умовах організація будівництва вже не може обмежуватися лише календарним плануванням або розподілом окремих ресурсів, а потребує інтегрованого підходу до узгодження матеріальних, інформаційних і трудових потоків з урахуванням просторових і часових обмежень майданчика [6; 7; 11; 18; 19]. У цьому контексті логістика доцільно розглядається як сучасний інструментарій координації будівельного процесу, що дає змогу підвищити ритмічність, узгодженість та організаційно-технологічну надійність виконання робіт, зумовлюючи необхідність її подальшого теоретичного розгляду в підрозділі 1.2.

1.2. Теоретичне обґрунтування логістичних моделей у забезпеченні неперервності будівельного виробництва

У загальноуправлінському розумінні логістика – це частина управління ланцюгом постачання, яка планує, реалізує та контролює ефективний і результативний прямий та зворотний рух і зберігання товарів, послуг і пов’язаної інформації між точкою походження та точкою споживання з метою задоволення вимог споживача [20]. У будівництві «точка споживання» має виробничий характер: це конкретний фронт робіт, де матеріали, конструкції, техніка та трудові ресурси

повинні бути доступними у потрібний момент і у відповідному стані готовності, що зближує логістичні завдання з організацією виробництва на майданчику [21].

Специфіка цивільного будівництва полягає у поєднанні двох взаємопов'язаних рівнів логістики: (а) зовнішнього – організація постачання від виробників і постачальників до майданчика, (б) внутрішнього (майданчикового) – транспортування, розміщення, комплектування, подачі на робочі місця, управління запасами, простором і доступами, а також координація руху техніки та потоків робіт [19; 22]. Такий погляд узгоджується з підходами до управління ланцюгом постачання в будівництві як системою, де проблеми часто виникають «у різних місцях і моментах», ніж вони виявляються, і вимагають інтеграції рішень між учасниками [23].

Концепція логістики у будівництві ґрунтується на розгляді будівельного процесу як системи взаємопов'язаних потоків, що мають бути узгоджені за часом, місцем, обсягом і станом готовності. На відміну від традиційного підходу, де основна увага приділяється календарній послідовності робіт, логістичний підхід зосереджується на тому, чи забезпечена кожна операція необхідними матеріалами, технікою, трудовими ресурсами, інформацією та доступом до фронту робіт у потрібний момент. Тому логістика в будівництві виступає не лише функцією постачання, а інструментом організаційної координації будівельного виробництва.

Застосування логістики в цивільному будівництві охоплює планування потреби в матеріально-технічних ресурсах, вибір постачальників і маршрутів доставки, визначення партій і часових вікон постачання, організацію складування, внутрішньомайданчикове переміщення ресурсів, координацію роботи підйомно-транспортних механізмів та контроль готовності фронтів робіт. У такому розумінні логістична система поєднує зовнішній контур постачання з внутрішньою організацією будівельного майданчика.

Для цивільного будівництва особливе значення має те, що логістичні рішення безпосередньо впливають на неперервність будівельного потоку. Несвоєчасна доставка, надмірні запаси, перевантаження зон складування, обмежена пропускна здатність під'їзних шляхів або неготовність фронту робіт можуть призводити до

простоїв, повторних переміщень, зростання витрат і порушення ритмічності виконання робіт. Саме тому логістичний підхід доцільно розглядати як основу для узгодження календарного плану з фактичними ресурсними, просторовими та інформаційними умовами реалізації будівельного проєкту.

Логістика у проєктно-організаційному вимірі виконує кілька ключових функцій. По-перше, вона забезпечує узгодження матеріального потоку з календарно-організаційною структурою робіт (що і коли потрібно для виконання завдань) [20]. По-друге, вона встановлює правила керування запасами та місцями складування з урахуванням просторових обмежень майданчика, що особливо важливо в міських умовах і на обмеженій території [24]. По-третє, логістика підтримує інформаційний потік (замовлення, підтвердження, статуси поставок, зміни, обмеження), без якого неможливо синхронізувати рішення учасників проєкту [25].

У працях зарубіжних дослідників із lean construction та управління ланцюгом постачання в будівництві наголошується, що підвищення результативності в проєктах досягається через переорганізацію системи на рівні потоків і взаємодій, а не лише через локальну оптимізацію окремих операцій. У цьому сенсі логістичні моделі слугують методологічним інструментом, який «прикріплює» виробниче планування до реальної пропускної здатності постачання, простору, техніки та фронтів робіт [7; 23; 26].

Логістика в цивільному будівництві оперує передусім трьома взаємопов’язаними потоками: матеріальним, інформаційним і ресурсним (людські ресурси, техніка, енергозабезпечення, виробничі потужності). Координація цих потоків визначає здатність організаційної системи забезпечити ритмічність виконання робіт, зменшити втрати часу на очікування та переміщення, уникати надмірних запасів і збоїв у фронтах робіт [26].

Класичне протиставлення «push» і «pull» дозволяє методологічно описати, як саме організація проєкту формує логіку руху ресурсів [27]. «Push»-логіка означає подачу ресурсів відповідно до наперед визначеного плану (часто з більшими страховими запасами), тоді як «pull»-логіка передбачає подачу ресурсів у відповідь

на реальну готовність до виконання робіт і потребу фронту робіт. У lean construction «pull» пов'язується із прагненням зменшити незавершене виробництво та запаси й водночас підтримати безперервний потік робіт [7; 26].

У межах «pull»-орієнтації концепція Just-in-Time (JIT) розглядається як принцип узгодження постачань із потребою виробництва: «потрібне – тоді, коли потрібне – у потрібній кількості» [28]. Важливо підкреслити методологічно: JIT не є тотожним «нульовим запасам». У реальних системах, де присутня варіативність, необхідні механізми буферизації та дисципліни планування, інакше нестача запасів або пропускної здатності призведе до простоїв і втрат [29].

Проблема варіативності (невизначеність строків поставок, коливання продуктивності, погодні впливи, просторові конфлікти, зміни у проєктній документації) є типовою для будівництва. В теорії виробничих систем підкреслюється, що варіативність «породжує» потребу в буферах, а вибір типу буфера визначає поведінку системи: що саме «захищає» потік – запас, час або потужність/ресурс [29]. У будівництві до цієї тріади додається суттєвий практичний вимір – простір, оскільки майданчик є обмеженою виробничою територією, де запаси й переміщення ресурсів конкурують за доступи, зони зберігання та робочі проходи [24].

Таблиця 1.4 - Порівняння логіки push/pull та типів буферів у цивільному будівництві

Елемент порівняння	«Push»-логіка (подача за планом)	«Pull»-логіка (подача за готовністю/попитом)
Ключовий принцип	Виконання плану «зверху вниз», випереджальне забезпечення	Запуск робіт і постачань від готовності фронту робіт і реальної потреби
Типові наслідки	Ризик надлишкових запасів, перенавантаження майданчика, приховані простої	Вища дисципліна координації та інформаційної прозорості; менші надлишки запасів
Вимоги до інформації	Достатньо планових даних і періодичного контролю	Потрібні регулярні підтвердження готовності, статуси обмежень, надійний зворотний зв'язок

Елемент порівняння	«Push»-логіка (подача за планом)	«Pull»-логіка (подача за готовністю/попитом)
Роль логістики	Переважно «забезпечення плану» (доставка/склад)	Інтеграція виробництва й постачання, синхронізація потоків
Часові буфери	Часто «вбудовані» як резерви строків через нестабільність поставок	Використовуються цілеспрямовано для захисту критичних ділянок та керування варіативністю
Ресурсні/запасів буфери	Страхові запаси матеріалів/елементів як типова компенсація невизначеності	Запаси мінімізуються до керованого рівня; акцент на готовність і надійність постачань
Просторові буфери	Ризик «забивання» майданчика матеріалами та транспортом	Планування зон зберігання і маршрутів як умова потоку; контроль інтерференції переміщень
Організаційний ефект	Зростання запасів, перевантаження майданчика	Підвищення ритмічності, зменшення простоїв

Описана логіка є методологічною основою для формування задач «організація–логістика»: організаційна модель задає правила запуску робіт і координації, а логістична модель забезпечує узгоджене постачання, розміщення та подачу ресурсів з урахуванням обмежень часу, потужності та простору. У будівельних ланцюгах постачання підкреслюється необхідність інтегрувати рішення між учасниками, оскільки локальна оптимізація (наприклад, «завести більше матеріалу наперед») може погіршувати роботу системи загалом через просторові й організаційні конфлікти [22; 23; 30].

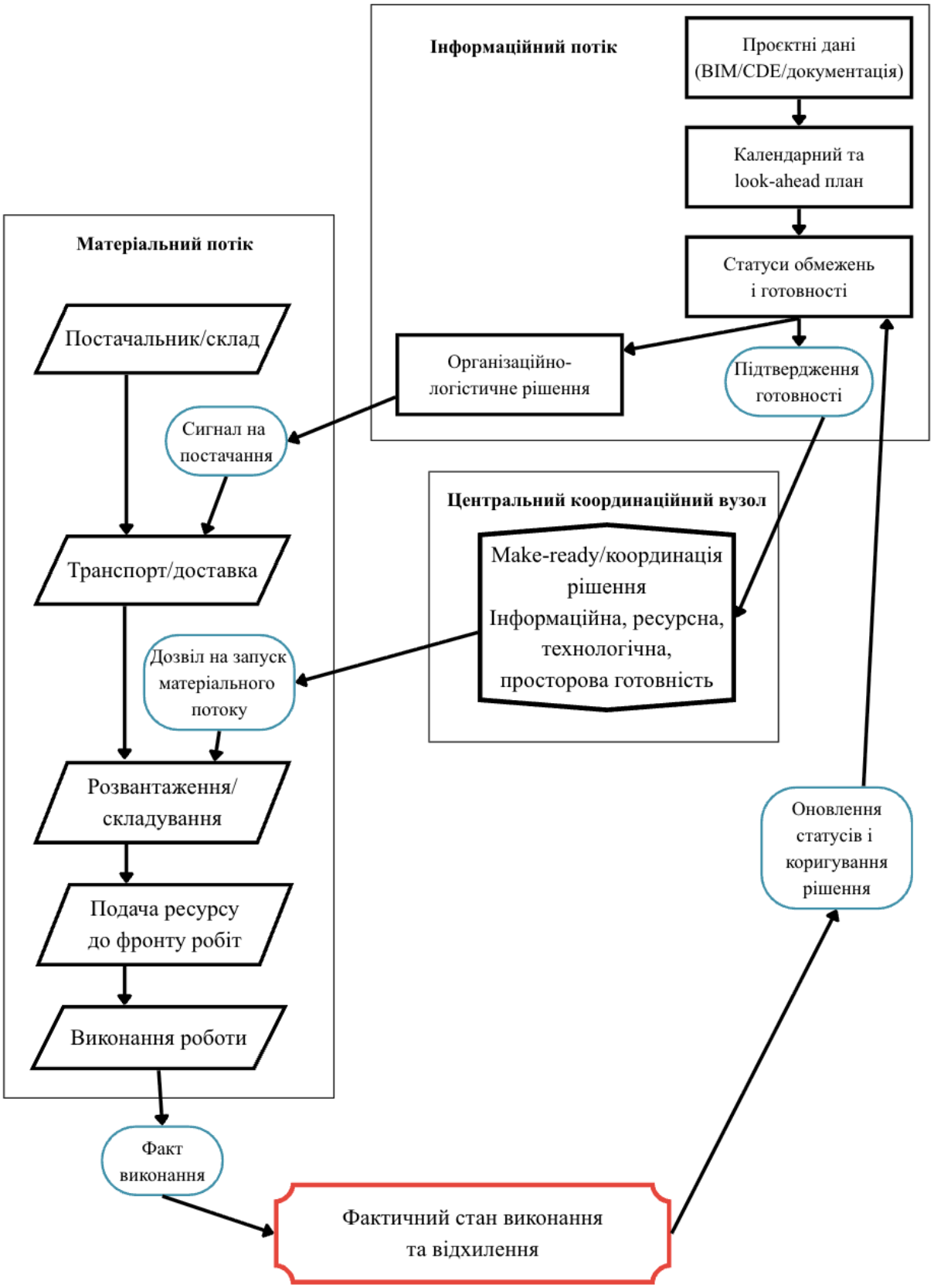


Рисунок 1.2 - Взаємодія матеріального та інформаційного потоків у системі прийняття організаційно-логістичних рішень на будівельному майданчику

Рисунок 1.2 відображає, що прийняття рішень на будівельному майданчику формується через узгодження матеріального потоку з інформацією про готовність робіт, ресурсні та просторово-часові обмеження. Наявність зворотного зв'язку забезпечує коригування логістичних рішень відповідно до фактичного стану виконання робіт і підтримує ритмічність виробничого потоку.

У теорії та практиці lean construction Last Planner System (LPS) розглядається як система виробничого планування і контролю, що зміщує фокус із «післяфактумного» виявлення відхилень до забезпечення реалізації планів через керування готовністю завдань [8; 26]. Науково-методологічна цінність LPS полягає в тому, що вона формує регулярні цикли планування, комунікації та зобов'язань між виконавцями («останніми планувальниками»), а також створює механізм систематичного виявлення та усунення обмежень.

Ключова ідея LPS – перед тим як завдання потрапляє до короткострокового (наприклад, тижневого) плану, воно має бути готовим до виконання [8; 26]. У практичній організації робіт це означає узгодження проєктної готовності (наявність інформації/рішень), технологічної готовності (можливість виконання в заданій послідовності), ресурсної готовності (матеріали, техніка, персонал), а також просторової готовності (фронт робіт, доступи, безпека, логістичні маршрути) [8; 26; 31]. Така «готовність» формує прямий міст між організаційними моделями й логістичним забезпеченням: поставка матеріалів має сенс тоді, коли робота реально може стартувати без блокувань.

У цьому контексті логістика переходить від реактивного «закриття дефіцитів» до проактивної роботи з обмеженнями: планування постачань у прив'язці до фронтів робіт, керування переліком обмежень, узгодження зон складування та подачі, синхронізація переміщень техніки й матеріалів із виробничим ритмом [18; 19; 31]. У матеріалах з LPS підкреслюється, що керування виробництвом передбачає механізми «pull» і забезпечення того, щоб у план потрапляли лише роботи, які можуть бути виконані, що підвищує передбачуваність потоку.

Для цивільного будівництва інтеграція LPS з логістичними моделями має методологічний сенс як спосіб підвищення ритмічності: стабільний ритм робіт

знімає пікові навантаження на постачання, зменшує потребу в надлишкових запасах і знижує напругу в просторово обмежених умовах майданчика [7; 26; 31]. Водночас LPS не заперечує довгострокових графіків (календарних чи мережевих), а доповнює їх виробничою логікою забезпечення виконання на рівні коротких циклів.

У традиційній проєктній логіці широко застосовуються критерії, пов'язані зі строками та бюджетом, а також із якістю/обсягом [5; 32]. Проте для задач удосконалення організаційних процесів у цивільному будівництві доцільно доповнювати «час» і «вартість» логістичним виміром, оскільки саме логістика визначає здатність системи підтримувати потік робіт у змінному середовищі [19; 22; 23].

У теоретико-методологічному наближенні каркас «час–вартість–логістика» може бути описаний через такі групи показників (без математичних формулювань):

- Час (організаційний результат): дотримання календарних меж робіт, стабільність короткострокових планів, частота зривів і переробок, узгодженість послідовності робіт та готовності фронтів.
- Вартість (економічний результат): витрати на постачання та транспортування, витрати на складування й втрати від надлишкових запасів, витрати від простоїв та повторних переміщень, витрати на координацію. У будівельних ланцюгах постачання наголошується, що значна частина втрат пов'язана не з «ціною матеріалу», а з неузгодженістю потоків і рішень між учасниками, що породжує непрямі витрати [23; 30].
- Логістика (стійкість і керованість потоків): надійність постачань (без деталізації статистичних метрик), доступність ресурсів на фронті робіт, рівень «готовності» завдань, ефективність використання простору майданчика, узгодженість інформації (актуальність даних, відсутність конфліктів версій, прозорість статусів). Такі критерії відбивають здатність організаційної системи перетворювати запланований графік у фактичне виконання [7; 26; 31].

Інформаційна складова логістики в сучасному будівництві посилюється, оскільки управління потоками потребує своєчасних даних про потреби, обмеження, статуси поставок і фактичний прогрес [9; 25; 33]. У цьому сенсі цифрові

інструменти розглядається як засоби підтримки організаційно-логістичної координації, а не як самодостатнє «рішення» логістичних проблем.

У міжнародно визнаних дефініціях BIM описується як цифрове подання фізичних і функціональних характеристик об’єкта, яке слугує спільним ресурсом знань для ухвалення рішень упродовж життєвого циклу [9; 33]. Для організації логістики це важливо тим, що BIM може підтримувати узгоджене уявлення про обсяги робіт, потребу в ресурсах і просторові умови виконання, якщо процеси координації встановлені належним чином.

Середовище спільних даних (CDE) у настановах до ISO 19650 розглядається як спосіб організувати керовані процеси збирання, управління та поширення інформації між учасниками [25]. Для логістики це означає зменшення ризику рішень на основі неактуальних даних (наприклад, зміни у потребі чи послідовності робіт), кращу трасованість узгоджень і підвищення узгодженості планування між «постачанням» і «виробництвом».

Водночас будь-які цифрові інструменти є ефективними лише тоді, коли вони підтримують коректно побудовані організаційні процеси (логіку «pull», керування обмеженнями, дисципліну короткострокового планування, правила роботи з простором і запасами) [8; 8; 25; 26]. Тому в межах дисертації прийнято розглядати BIM і CDE саме як «підсилювачі» логістичних моделей, а не як їхній замінник.

Таким чином, логістичні моделі в цивільному будівництві можуть виконувати роль забезпечення неперервності виробничого потоку через узгодження матеріальних, інформаційних і ресурсних потоків [18; 19; 22; 23]. Подальший розвиток цієї логіки пов’язаний із використанням цифрових інструментів підтримки таких рішень.

1.3. Цифрові інструменти підтримки логістичних рішень у цивільному будівництві

Еволюція організаційних систем управління, розглянута у попередніх розділах, свідчить про поступове зміщення акцентів від жорсткої регламентації операцій до гнучкого управління потоками та ресурсами. Якщо в межах класичної наукової організації праці логістика сприймалася як суто допоміжна функція забезпечення, а мережеві методи планування зосереджувалися на часових залежностях, то нинішні умови розвитку галузі вимагають інтеграції цих аспектів у єдине інформаційне середовище. У цьому контексті цифрові інструменти розглядаються передусім як засоби роботи з даними, необхідними для логістичних рішень: про обсяги робіт, статуси постачання, готовність фронтів, переміщення ресурсів і зміни на майданчику [33; 34].

У межах дослідження цифрова підтримка розглядається не як самостійна мета, а як засіб кращої координації організаційно-логістичних рішень [33; 25; 35; 44]. Її практичне значення полягає в тому, що вона допомагає об’єднати розрізнені дані про фактичний стан робіт, наявність ресурсів, погодження, просторові обмеження та можливі відхилення від плану [34; 36].

Цифрові інструменти доцільно розглядати не окремо від організації будівництва, а у зв’язку з логістичним забезпеченням неперервності будівельного процесу. У такому підході цифровізація виконує допоміжну, але важливу функцію: вона дає змогу порівнювати планові параметри з фактичним станом робіт і швидше виявляти розриви між ними [34; 36].

У практиці будівництва значна частина організаційних збоїв виникає не через відсутність плану, а через несвоєчасну або неповну інформацію між проєктним офісом, службою постачання та будівельним майданчиком [25]. Ці розриви призводять до накопичення надлишкових запасів («push»-логіка) або, навпаки, до

простоїв через дефіцит критичних ресурсів. Цифрові інструменти дозволяють реалізувати «pull»-логіку, де кожен рух матеріального потоку ініціюється реальною потребою фронту робіт, підтвердженою актуальними даними про стан об'єкта [7; 8; 37]. У такій постановці BIM, IoT та інші цифрові засоби допомагають синхронізувати дії учасників: постачання бачить фактичну потребу майданчика, а виробничий контур отримує більш точну інформацію про строки й можливості забезпечення [33; 36; 38].

Логістичні моделі в будівництві виконують різні функції залежно від рівня управління. Одні допомагають обирати постачальників і маршрути, інші – узгоджувати графіки поставок із календарним планом, а операційні моделі потрібні для контролю готовності робіт безпосередньо на майданчику. Цифрові інструменти надають специфічну підтримку для кожного з цих рівнів, пов’язуючи розрахункові моделі з практичними завданнями координації.

На стратегічному рівні моделі спрямовані на вибір постачальників та визначення структури мережі розподілу [22; 20; 39]. Тут цифрові дані допомагають оцінити логістичне плече та надійність каналів. Тактичний рівень фокусується на узгодженні графіків поставок із календарними планами, де ключову роль відіграє часова та просторова синхронізація [34; 40]. Операційний рівень забезпечує контроль "готовності" робіт (make-ready) та управління обмеженнями в оперативному режимі [8; 26; 37].

Узагальнена типологія логістичних моделей та відповідних інструментів підтримки наведена в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Типологія логістичних моделей за функціональним призначенням та рівнем цифрової підтримки

Тип моделі	Об'єкт управління	Ключові організаційні завдання	Інформаційна підтримка (інструменти)	Вплив на логістичні рішення
Мережеві моделі	Структура ланцюга постачання	Вибір постачальників, маршрутизація, оцінка логістичного плеча	Бази даних ERP, аналітичні модулі CDE	Оптимізація загальної вартості та надійності забезпечення
Моделі управління запасами	Рівень буферів	Розрахунок страхових запасів, JIT-параметри, нормування	5D BIM, дані облікових систем	Мінімізація витрат на утримання капіталу в запасах
Моделі розміщення (Location)	Простір майданчика	Планування зон складування, кранових стоянок, під'їздів	4D BIM, лазерне сканування	Оптимізація внутрішньомайданчикових переміщень
Моделі черг (Queuing)	Логістичні вузли	Пропускна здатність під'їздів, графіки розвантаження	Симуляція потоків, дані IoT (GPS/RFID)	Запобігання простоям техніки та заторам на майданчику
Моделі готовності (Make-ready)	Обмеження робіт	Контроль зняття логістичних бар'єрів, підготовка завдань	CDE (Workflows), статуси в BIM	Забезпечення стабільності та ритмічності виробничого потоку

Наведена типологія показує, що цифрові інструменти мають цінність лише тоді, коли вони прив'язані до конкретного управлінського завдання: вибору постачальника, планування запасів, перевірки готовності робіт або контролю переміщення ресурсів. Наприклад, модель готовності (make-ready), яка є центральною для Last Planner System, отримує в цифровому середовищі механізм автоматизованої перевірки статусів: робота не потрапляє в тижневий план, поки в CDE не підтверджено наявність матеріалу, ресурсу та інформації [26; 25; 37].

Якщо BIM описує планову частину проєкту, то IoT дає змогу бачити фактичний стан логістичних процесів: де перебуває ресурс, чи рухається поставка, чи є затримка, чи змінюється стан техніки або матеріалів [38; 41]. Для організації будівництва найбільшу цінність мають виміри 4D і 5D, оскільки вони дозволяють пов'язати календарний графік із простором майданчика та вартісними параметрами ресурсного забезпечення [33; 34]. У логістичному аспекті BIM підтримує синхронізацію поставок із виробничим ритмом, планування зон складування, координацію маршрутів переміщення техніки та виявлення просторово-часових конфліктів між логістичними й будівельними операціями [34; 40; 42]. Таким чином, BIM виступає основним джерелом структурованої інформації, необхідної для узгодження матеріальних потоків із ходом виконання робіт.

IoT доповнює BIM фактичними даними про рух поставок, стан техніки, місцезнаходження ресурсів і можливі затримки [38; 41]. Завдяки цьому параметри постачання, використання ресурсів і завантаження логістичних вузлів можуть уточнюватися вже під час виконання робіт [36; 38; 41].

Для координації учасників важливу роль відіграє середовище спільних даних CDE, у якому фіксуються статуси, погодження, документи та зміни, що впливають на виконання робіт і постачання. Відповідно до підходів ISO 19650, CDE забезпечує збирання, керування та поширення інформації між учасниками проєкту через узгоджені робочі процеси [25; 43]. У логістичному аспекті це означає зменшення ризику рішень, що приймаються на основі неактуальних даних, підвищення прозорості узгоджень і підтримку інформаційної готовності робіт [25; 43].

Digital Twin у цій роботі доцільно трактувати як інструмент сценарного оцінювання, який поєднує планові дані з фактичними спостереженнями і дозволяє перевірити, як зміниться логістичне рішення за різних умов [35; 44]. Її роль полягає у підтримці перевірки альтернативних логістичних сценаріїв, уточненні параметрів організації робіт і оцінюванні стійкості рішень до змін зовнішнього середовища [44]. Таким чином, Digital Twin виступає не заміною системи управління, а аналітичним засобом підвищення якості організаційно-логістичних рішень.

Отже, цифрові інструменти доцільно розглядати як різні джерела та середовища роботи з даними, що підтримують прийняття логістичних рішень. Одні з них формують планову основу проєкту, інші уточнюють фактичний стан робіт і ресурсів, забезпечують узгодження між учасниками або дають змогу перевіряти можливі сценарії розвитку будівельного процесу [33; 25; 35; 38; 44]. У такому розумінні цифрова підтримка не замінює управління, а підвищує обґрунтованість організаційно-логістичних рішень.

Використання цифрових інструментів також змінює те, які показники можна реально контролювати в процесі будівництва. Традиційний трикутник "час-вартість-якість" у логістичному середовищі доповнюється специфічними вимірами, які характеризують стійкість виробничого потоку.

Впровадження цифрової підтримки дозволяє оперувати такими критеріями [36; 37]:

- Надійність (Reliability): здатність ланцюга постачання забезпечити ресурс точно у задане "вікно потреби". Цифрові дані дозволяють вимірювати надійність не як статичний показник, а через варіативність Lead Time.
- Ритмічність (Rhythm): ступінь узгодженості темпів постачання та споживання. Завдяки 4D BIM стає можливим візуально і кількісно оцінити порушення ритму на ранніх стадіях [34].
- Здійсненність (Feasibility): перевірка плану на відповідність ресурсним та просторовим обмеженням. Використання моделей імітаційного моделювання дозволяє оцінити реалістичність графіка з урахуванням логістичних бар'єрів [34; 42].

Екологічні наслідки логістичних рішень у цьому контексті розглядаються як супровідний аспект, що проявляється через скорочення непродуктивних перевезень, точнішу комплектацію та зменшення надлишкових запасів.

Таблиця 1.6 – Порівняльна характеристика цифрових інструментів підтримки логістики

Критерій порівняння	BIM (3D/4D/5D)	IoT (Sensors/Tracking)	Digital Twin	CDE (ISO 19650)
Основна роль у логістиці	Планування, візуалізація, обсяги	Моніторинг фактичного стану	Аналітика та перевірка сценаріїв	Координація та обмін даними
Характер даних	Статичні / Проєктні	Динамічні / Реальний час	Предиктивні / Модельні	Процесні / Регламентні
Об'єкт фокусування	Продукт (будівля, ресурси)	Процес (рух, стан)	Система (взаємодія)	Інформація (узгодженість)
Етап впровадження	Переважно ПОБ/ПВР	Операційне виконання	Увесь цикл проєкту	Постійно протягом ЖЦ
Ключова цінність	Усунення просторових колізій	Прозорість потоку ресурсів	Підтримка оцінювання стійкості системи	Єдність джерела достовірних даних

Застосування цих інструментів дає змогу раніше помічати проблеми: не після зриву поставки або простою бригади, а ще на етапі, коли видно нестачу даних, ресурсів, доступу чи готового фронту робіт. Це робить організаційно-логістичну систему більш стійкою до зовнішніх збурень, що є критично важливим для сучасного будівництва.

Методологічне значення цифрових інструментів посилюється фактором нестабільності зовнішнього середовища. В умовах обмеженості ресурсів, логістичних розривів та кадрового дефіциту традиційні методи організації будівництва втрачають свою ефективність. Актуальність цифрової підтримки логістичних рішень зумовлена потребою у більшій гнучкості, прозорості та швидкості координації між учасниками проєкту.

Цифровізація зменшує потребу в надлишковому резервуванні за рахунок підвищення обґрунтованості організаційних рішень. Це досягається через:

- Зменшення інформаційної невизначеності щодо термінів та обсягів.
- Швидке оцінювання альтернативних сценаріїв при виникненні логістичних збоїв.
- Синхронізацію дій усіх ланок ланцюга постачання на основі єдиних даних.

Таким чином, цифрові інструменти не лише підвищують ефективність поточного управління, а й створюють аналітичну основу для переходу до оптимізації процесів, що є ключовим завданням наступного розділу дослідження [33; 25; 36; 44].

Узагальнення ролі цифрових інструментів дозволяє виділити кілька положень, важливих для подальшого дослідження:

- Цифрова підтримка в цьому контексті виконує допоміжну, але важливу роль: вона не замінює організаційно-технологічне управління, а забезпечує його більш повними й актуальними даними для прийняття рішень.
- BIM-технологія виступає основним джерелом структурованої інформації про обсяги (5D) та просторово-часові умови (4D) виконання робіт, що дозволяє синхронізувати логістичні потоки з виробничим ритмом та уникати просторових конфліктів на майданчику [33; 34; 42].
- Інтернет речей (IoT) забезпечує динамічний зворотний зв'язок, дозволяючи відстежувати місцеперебування ресурсів, контролювати їхній стан та оперативно оновлювати фактичні дані для прийняття організаційних рішень [38; 41].
- Середовище спільних даних (CDE) створює необхідну координаційну платформу для всіх учасників проєкту, забезпечуючи інформаційну готовність робіт

(make-ready) та усуваючи розриви в комунікації між постачанням і будівництвом [25; 43].

- Digital Twin може виконувати роль інтеграційної методологічної платформи для оцінювання альтернативних сценаріїв організації робіт, що дозволяє підвищити стійкість логістичних рішень у змінному середовищі [35; 44].

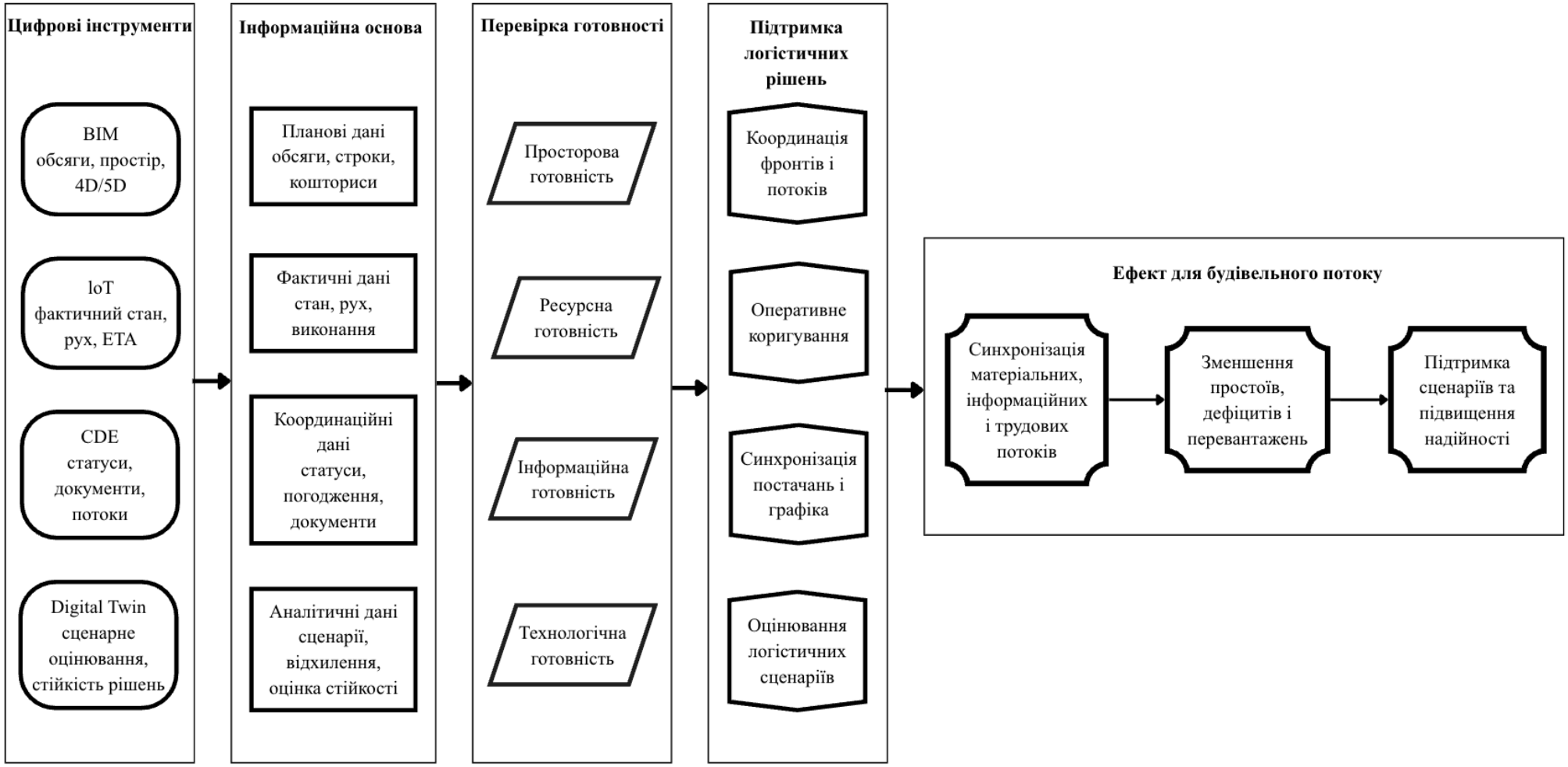


Рисунок 1.3 – Цифрова підтримка організаційно-логістичних рішень у цивільному будівництві

Отже, цифрові інструменти формують інформаційну основу для подальшого аналізу організаційно-логістичних процесів. У наступному розділі це дозволяє перейти від загального опису цифрової підтримки до конкретних факторів, параметрів і критеріїв, які можуть бути використані для оптимізації рішень у цивільному будівництві.

Висновки до розділу 1

Аналіз еволюції підходів до організації будівництва показав поступовий перехід від регламентації окремих операцій до координації взаємопов'язаних процесів. Якщо на початкових етапах основна увага приділялася підвищенню продуктивності праці та впорядкуванню виконання робіт, то зі зростанням складності будівельних об'єктів визначальними стали питання узгодження строків, технологічних залежностей, ресурсного забезпечення, просторових обмежень і взаємодії між учасниками будівельного процесу. Це дає підстави стверджувати, що в сучасних умовах календарне планування має доповнюватися логістичними та координаційними інструментами.

Класичні інструменти організації будівництва, зокрема календарне та мережеве планування, створили важливу основу для управління строками й послідовністю робіт. Водночас вони не повністю враховують ті умови, з якими стикається реальний будівельний майданчик: затримки поставок, зміни проєктних рішень, дефіцит ресурсів, нестачу персоналу, обмеженість місця для складування та інформаційні розриви між учасниками. Тому організація будівництва не може зводитися лише до складання графіка. Вона потребує постійної перевірки того, чи справді роботи можуть бути виконані у запланований момент і чи забезпечені вони необхідними ресурсами, простором та інформацією.

Окремо узагальнено внесок українських наукових шкіл у розвиток теорії організації будівництва. Наукові напрями КНУБА, ННІ ПДАБА УДУНТ та ЗНУ/ЗДІА сформували важливе підґрунтя для дослідження організаційно-технологічної надійності, адаптивності управлінських рішень, ресурсної ефективності, логістичного забезпечення та координації учасників будівельного виробництва. Для цієї роботи важливо, що зазначені підходи розглядають будівництво не як набір ізольованих операцій, а як систему, у якій результат залежить від узгодження строків, ресурсів, технологічної послідовності, економічних умов і взаємодії між учасниками.

На цій основі обґрунтовано доцільність переходу до логістичного бачення організаційних процесів. У межах дослідження логістика розглядається не лише як постачання матеріалів, а як інструмент координації матеріальних, інформаційних і трудових потоків. Її значення полягає в тому, що вона пов’язує календарний план із фактичною готовністю фронтів робіт, доступністю ресурсів, можливостями майданчика та ритмом виконання будівельних процесів. Такий підхід дозволяє краще пояснити, чому навіть формально правильний графік може не виконуватися, якщо він не підкріплений своєчасним постачанням, достовірною інформацією та реальною організаційною готовністю.

Також визначено роль цифрових інструментів у підтримці логістичних рішень. Такі інструменти як BIM, CDE, IoT та Digital Twin у роботі розглядаються не як самостійна заміна управлінню, а як джерела й середовища роботи з даними, що допомагають уточнювати обсяги, статуси, просторові умови, переміщення ресурсів і можливі сценарії виконання робіт. Їх застосування підсилює логістичну координацію, оскільки дає змогу швидше виявляти неузгодженості, працювати з актуальною інформацією та коригувати рішення відповідно до фактичного стану проєкту. Водночас цифрові інструменти є ефективними лише тоді, коли спираються на зрозумілу організаційну логіку й правила взаємодії учасників.

Отже, у розділі 1 сформовано теоретико-концептуальну основу подальшого дослідження. Показано еволюцію організаційних підходів у будівництві, визначено значення українських наукових шкіл, обґрунтовано роль логістики як інструмента координації будівельного процесу та окреслено місце цифрової підтримки в цій системі. Отримані результати створюють основу для переходу до наступного етапу дослідження – аналізу факторів, параметрів і критеріїв, через які організаційно-логістичні процеси можуть бути подані в більш формалізованому вигляді для подальшої оптимізації.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ПЛАТФОРМА ОПТИМІЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

2.1. Аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів стабільності логістичних ланцюгів у цивільному будівництві України

Аналіз факторів впливу доцільно почати з макроекономічних та інфраструктурних умов України, які у 2024–2025 роках істотно впливають на стабільність логістичних ланцюгів у будівництві [45; 46]. Стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві визначається сукупною дією зовнішніх обмежень та внутрішніх управлінських характеристик суб’єктів галузі [22; 23; 47].

У межах дослідження доцільно виокремити дві групи факторів впливу на стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві: зовнішні (макроекономічні, інфраструктурні, енергетичні) та внутрішні (кадрові, просторово-організаційні, інформаційно-координаційні). Такий поділ дає змогу простежити, як умови зовнішнього середовища та характеристики самого будівельного майданчика спільно формують обмеження для організаційно-логістичних рішень [47; 48].

Згідно з розгорнутими показниками Державної служби статистики та коментарями Національного банку України, реальний ВВП у 2025 році продемонстрував зростання на рівні 1,8–2,1%, що свідчить про очікуване сповільнення темпів відновлення порівняно з 3,2% у 2024 році. Для будівельної галузі такий темп економічного розвитку зумовлює обмеженість інвестиційного ресурсу та підвищує значення оптимізації витрат [45].

Критичним фактором, що безпосередньо впливає на логістичну стабільність, є рівень інфляції та монетарна політика. Протягом 2024 року інфляція склала близько

12%, а за прогнозами НБУ на кінець 2025 року вона може становити 8,4% після проходження пікових значень у першій половині року [45]. У відповідь на ці виклики Національний банк утримував облікову ставку на рівні 15,5% протягом значної частини 2025 року. Висока облікова ставка істотно підвищує вартість утримання запасів, оскільки вартість залучення обігових коштів стає фінансово обтяжливою [20; 45]. Модель «стратегічного буферування» (створення великих складських резервів) у таких умовах веде до заморожування капіталу, змушуючи підприємства шукати компроміс між ризиком дефіциту та фінансовими втратами [27; 47; 49].

Аналіз структури витрат також виявляє цінову аномалію: індекс цін у будівництві у 2025 році (прогнозно 5,5%) є суттєво нижчим за загальний рівень інфляції, що пояснюється обмеженим купівельним попитом [45]. Це створює додатковий тиск на маржинальність проєктів, роблячи логістичну оптимізацію шляхом до підвищення економічної стійкості бізнесу.

Для математичної постановки це означає необхідність урахування вартості капіталу (WACC), структури сукупних логістичних витрат (TLC) та змінних вартості утримання запасів у математичній моделі [20; 27; 50].

Таблиця 2.1 – Макроекономічний ландшафт України 2024–2025

Показник	2024 рік (факт)	2025 рік (прогноз/факт)	Вплив на логістичні рішення
Зростання реального ВВП, %	3,2	1,8 – 2,1	Обмеження попиту, посилення потреби в оптимізації
Індекс споживчих цін (CPI), %	12,0	8,4 – 10,0	Волатильність витрат на ресурси та паливо
Облікова ставка НБУ, %	13,0 – 13,5	15,5	Підвищення вартості утримання капіталу в запасах

Торговий дефіцит, млрд дол. США	55,8	–	Залежність від імпорту будматеріалів та техніки
Міжнародні резерви, млрд дол.	37,0 – 40,0	49,5	Стабільність валютних розрахунків з імпортерами

Суттєве руйнування фізичної інфраструктури безпосередньо формує логістичні розриви (supply chain gaps) [46; 51]. За оцінками KSE Institute станом на кінець 2024 року, сукупні прямі збитки інфраструктурі України наблизилися до 170 млрд дол. США [46]. Найбільш постраждалим сегментом є житлові будівлі (понад 236 тис. об’єктів), що формує значний попит на логістичне забезпечення будівельних матеріалів у регіонах відновлення [46; 51].

Збитки транспортної інфраструктури, що забезпечує стабільність ланцюгів постачання, становлять близько 38,5 млрд дол. США, включаючи руйнування понад 26 тис. км доріг та 311 мостів [46; 51]. Для цивільного будівництва це означає неможливість використання традиційних маршрутів постачання інертних матеріалів та конструкцій [46; 51; 52]. Необхідність постійної перенавігації потоків призводить до подовження логістичного плеча та зростання транспортної складової у собівартості [22; 23; 52]. Ризики фізичного пошкодження вантажів або транспортних засобів під час доставки стають суттєвими у структурі очікуваних втрат, що вимагає впровадження систем оперативного моніторингу та диверсифікації джерел постачання [47; 49; 53].

У моделі цей вплив може бути врахований через параметри логістичного плеча, фактичного часу доставки, коефіцієнтів ризику маршрутів та варіативності тривалості логістичного циклу [27; 47; 53].

Енергетичний фактор у 2024–2025 роках став одним із ключових обмежувачів стабільності логістичних процесів [51; 54]. Прямі збитки енергетичного сектору досягли 14,6 млрд дол. США, що спричиняє дефіцит потужності та незаплановані зупинки виробництва матеріалів (цементу, металоконструкцій тощо). Систематичні

атаки на об’єкти генерації та розподілу електроенергії можуть призводити до зупинки або суттєвого уповільнення робіт безпосередньо на будівельному майданчику (зупинка кранів, бетононасосів) [51; 54].

У контексті логістики енергетична криза істотно впливає на ритмічність поставок [53; 54]. Затримки у виробничому циклі постачальників через відключення роблять графіки Just-in-Time практично неможливими без використання підвищених коефіцієнтів резервування [28; 29; 54]. Крім того, потреба у використанні дизель-генераторів для підтримки роботи складів та майданчиків підвищує операційні витрати.

У подальшій математичній постановці вплив енергетичного фактора може бути врахований через варіативність тривалостей операцій, параметри ризику простоїв та додаткові витрати на енергозабезпечення логістичних процесів [27; 29; 53].

Кадрова ситуація в будівельній галузі характеризується стійким дефіцитом трудових ресурсів [55; 56]. Встановлено, що загальний брак фахівців перевищує 30% (близько 150 тис. працівників), а 74% опитаних компаній відчули високий дефіцит кадрів у 2025 році. Мобілізаційні заходи та міграційні процеси призвели до зростання заробітних плат операторів техніки, водіїв та робітників на 33–50% протягом 2024–2025 років [55; 56].

Для логістичних процесів цей фактор має кілька наслідків. Зростає вартість складських і транспортних операцій, ускладнюється комплектування бригад, а ланцюги постачання стають вразливішими до зупинок через відсутність критичних фахівців [55; 56]. На одного доступного кандидата в галузі припадає 2,4 вакансії, тому стабільність трудового ресурсу слід розглядати як одне з важливих обмежень організаційно-логістичної моделі.

У моделі кадровий фактор може бути поданий через параметри продуктивності бригад, доступності персоналу, часу мобілізації ресурсів та обмеження пропускної здатності логістичних вузлів [6; 55; 56].

У 2024–2025 роках спостерігається зміщення будівельної активності вглиб території України, зокрема до Львівської та Івано-Франківської областей [45; 51]. Це

зумовило суттєве зростання навантаження на логістичну інфраструктуру цих регіонів. Обмеженість складських потужностей та зростання вартості оренди вимагають прискорення обороту ресурсів та поширення моделей прямих поставок [20; 22; 24]. Ефективність таких рішень залежить від пропускної здатності транспортних вузлів та стабільності енергозабезпечення [52; 54].

У подальшій моделі вплив просторово-організаційних умов може бути врахований через параметри складської місткості майданчика, обмеження пропускної здатності під'їзних шляхів та характеристики маршрутизації матеріальних потоків [22; 24].

Сучасні умови також зумовлюють потребу враховувати ресурсоефективні та екологічно орієнтовані підходи. Використання збірних конструкцій і елементів префабрикації скорочує кількість логістичних операцій на майданчику, зменшує обсяг відходів і спрощує організацію постачання. У межах аналізу логістичних ланцюгів екологічний аспект доцільно розглядати як супровідний фактор, що посилює економічну та організаційну стійкість через оптимізацію перевезень, зниження втрат ресурсів і раціональніше використання матеріалів [57].

Для подальшої параметризації цей вплив може бути поданий через характеристики комплектації лотів, коефіцієнти зниження трудомісткості та показники екологічної ефективності маршрутів.

Таблиця 2.2 – Аналіз збитків від руйнувань та їх наслідків для логістики

Тип інфраструктури	Прямі збитки (млрд дол.)	Характеристика втрат та наслідки для логістики
Житлові будівлі	60,0	Понад 236 тис. об'єктів; колосальний попит на матеріали у зонах відновлення
Транспортна інфраструктура	38,5	Дороги (26 тис. км), залізниця, порти; подовження логістичного плеча

Енергетика	14,6	Знищення генеруючих потужностей; порушення ритмічності постачань
Промисловість та будівництво	14,4	Втрата активів підприємств та складів; дефіцит місткості зберігання

Підсумовуючи аналіз чинників впливу, слід зазначити, що стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві визначається сукупною дією макроекономічних, інфраструктурних, енергетичних, кадрових, просторових та організаційно-інформаційних факторів [45; 46; 47; 51; 55]. Виявлені чинники формують зовнішній і внутрішній контури впливу, що мають бути подані у формалізованому вигляді в межах подальшої параметризації [47; 48; 58].

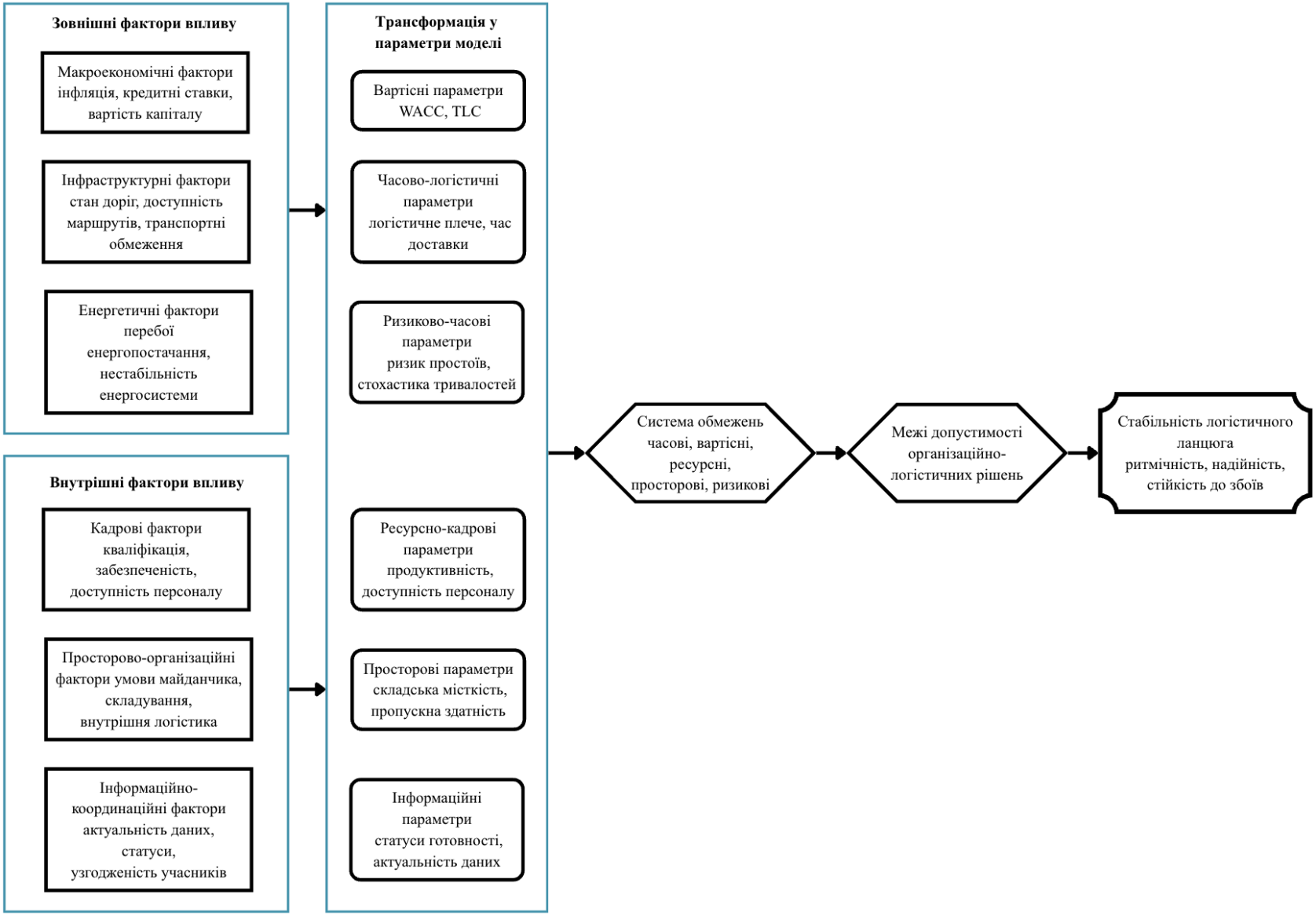


Рисунок 2.1 – Система факторів впливу на стабільність логістичних ланцюгів цивільного будівництва

Таким чином, аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів дозволяє сформувати факторний каркас організаційно-логістичної системи цивільного будівництва [22; 23; 47; 58]. Виявлені чинники визначають межі стійкості логістичних ланцюгів, впливають на часові, вартісні, ресурсні та просторові характеристики процесів і створюють підґрунтя для подальшої параметризації організаційно-логістичних рішень [47; 48; 58]. Саме тому наступний підрозділ присвячено переходу від факторного аналізу до формалізованого подання цих впливів у вигляді параметрів моделі.

2.2. Методологічні основи параметризації та аналітичної валідації організаційних процесів у логістичних системах цивільного будівництва

У сучасних умовах будівельна галузь поступово переходить від традиційних методів планування до більш формалізованих аналітичних підходів [59–61]. Історично організація будівництва значною мірою спиралася на вербальні описи послідовності робіт і директивне встановлення термінів, що в умовах зростання складності проєктів призводило до похибок у прогнозуванні та координації ресурсів [62]. Традиційний підхід, за якого будівельний майданчик розглядався як відносно замкнена система з переважно лінійними зв’язками, виявляється недостатнім для врахування багатофакторного характеру сучасних будівельних процесів [21; 47; 61].

Для складних об’єктів цивільного будівництва суто описовий підхід є обмеженим, оскільки не забезпечує достатньої чутливості до зовнішніх і внутрішніх ризиків та не дає змоги сформувати належну основу для подальшого формалізованого аналізу [47; 48; 50]. Перехід до кількісної параметризації передбачає детальну декомпозицію будівельного проєкту на елементарні процеси й операції, кожна з яких характеризується сукупністю властивостей, що можуть бути виміряні та зіставлені [59; 61; 62]. Такий підхід передбачає перетворення експертних оцінок, наприклад імовірності затримки, у параметри, придатні для подальшого

аналітичного опрацювання, а просторових обмежень майданчика – у показники складської та пропускної спроможності [48; 50; 64].

Формалізація організаційних процесів дає змогу подолати обмеженість суто описового планування, оскільки створює основу для системного врахування змін у ресурсному, часовому, просторовому та ризиковому середовищі будівництва [21; 50; 61]. У такому підході об’єкт цивільного будівництва розглядається як система взаємопов’язаних параметрів, зміна яких впливає на організацію виконання робіт [21; 47; 65]. За цих умов логістика перестає бути лише допоміжною функцією забезпечення та набуває значення важливого елемента організаційної узгодженості, що дає змогу повніше враховувати взаємозв’язок між строками, ресурсами та умовами виконання будівельних процесів [22; 50].

Таблиця 2.3 - Порівняння традиційного і параметричного підходів до організації будівельних процесів

Характеристика	Традиційний підхід	Параметричний підхід
Основа прийняття рішень	Досвід та інтуїція	Аналітичні підходи, параметри та дані
Характер планування	Переважно статичний	Більш гнучкий, з урахуванням змін факторів
Оцінка ризиків	Вербальна	Кількісно-описова
Координація ресурсів	Централізована	Узгоджена на основі параметрів процесу
Облік простору	Статичні схеми складування	Формалізоване врахування просторових обмежень

У цивільному будівництві часовий параметр є одним із ключових у системі організаційно-логістичного планування, а його оцінка потребує врахування ймовірнісного характеру виробничих і логістичних процесів [59–61]. Для складних об’єктів тривалість окремих операцій не може бути подана як строго фіксована детермінована величина, оскільки на неї впливає сукупність зовнішніх і внутрішніх

факторів, зокрема енергетична нестабільність, перебої в постачанні матеріалів, зміни в доступності трудових ресурсів та організаційні затримки [27; 48; 66].

Для оцінки часових характеристик доцільним є використання імовірнісного підходу в межах методу PERT (Program Evaluation and Review Technique). Цей метод дозволяє отримати очікувану тривалість j-ї операції ($t_{e,j}$) на основі трьох оцінок, що відображають можливі сценарії її виконання [59; 61].

$$t_e = \frac{t_o + \Delta t_m + t_p}{6} \quad (2.1)$$

У цій формулі t_o представляє оптимістичну оцінку часу, тобто мінімально можливу тривалість операції за ідеальних умов виконання робіт. Параметр t_m відповідає найбільш імовірному часу, який базується на нормативних показниках та статистичних даних попередніх періодів. Найважливішим у контексті управління ризиками є параметр t_p – песимістична оцінка, що враховує максимальну тривалість при виникненні непередбачуваних затримок, таких як енергетичні збої або критичні перебої в постачанні матеріалів.

Використання такого підходу дає змогу отримати не лише очікуване значення тривалості операції, а й оцінити варіативність часових параметрів [59; 66]. Зокрема, на його основі можуть бути визначені дисперсію (σ^2) та стандартне відхилення (σ), що є важливим для подальшого аналізу часової визначеності процесів і формалізованого опису календарного планування.

Таблиця 2.4 – Параметризація часових характеристик організаційних процесів об’єкта цивільного будівництва

Позначення	Найменування параметра	Фізичний зміст та одиниці виміру	Методика визначення
t_o	Оптимістичний час	Мінімальна тривалість операції за ідеальних умов (дні/години)	Експертна оцінка, аналіз техрегламентів
t_m	Найбільш імовірний час	Мода розподілу тривалості операції (дні/години)	Історичні дані, BIM-модель проєкту

t_p	Песимістичний час	Максимальна тривалість при виникненні ризиків (дні/години)	Сценарне моделювання, аналіз форс-мажорів
t_e	Розрахунковий час	Математичне очікування тривалості за PERT (дні/години)	Аналітичний розрахунок за формулою бета-розподілу
t_{start}	Момент початку	Календарна точка старту логістичного або техпроцесу	Мережеве моделювання (CPM)
t_{end}	Момент завершення	Фіксація виконання та передача фронту робіт наступній ланці	Алгоритм розрахунку ранніх та пізніх закінчень

Параметризація часового блоку також включає врахування технологічних перерв і часових резервів, які у роботі прийняті як елементи підвищення стійкості календарного планування до можливих зовнішніх і внутрішніх збоїв [27; 60; 66]. Такі параметри можуть уточнюватися в процесі реалізації проєкту залежно від фактичних умов виконання робіт, що дає змогу своєчасно враховувати можливі відхилення у строках та коригувати послідовність виконання окремих операцій. У цьому контексті часові буфери слугують не інструментом жорсткого резервування, а засобом адаптації графіка до змінних умов будівництва [27; 29; 66].

Вартісна параметризація організаційних процесів у цивільному будівництві передбачає врахування не лише прямих витрат на матеріали та оплату праці, а й супутніх фінансових і логістичних складових [20; 50; 67]. В умовах нестабільності ринку та підвищеної невизначеності доцільно виокремлювати сукупні логістичні витрати (Total Logistics Costs, TLC) як узагальнений параметр, що характеризує вартісний аспект організації постачання, складування та ресурсного забезпечення будівництва [19; 50; 67].

Структура сукупних логістичних витрат може бути подана через кілька основних компонентів, кожен з яких має власну специфіку оцінювання та впливу на загальний бюджет проєкту:

Транспортні витрати. Цей компонент пов’язаний із відстанню перевезення, тарифними ставками, особливостями маршруту та умовами проходження логістичної інфраструктури [50; 52; 67]. У сучасних умовах транспортна складова визначається не лише протяжністю маршруту, а й можливими витратами, пов’язаними зі зміною логістичних схем, затримками в перевалочних вузлах та обмеженнями транспортної доступності.

Витрати на утримання запасів (C_{inv}). Цей компонент відображає залежність між обсягом матеріальних запасів, вартістю залученого в них капіталу та витратами на їх зберігання [63]. Його врахування є важливим при обґрунтуванні рішень щодо обсягу запасів і частоти поставок.

Адміністративні та операційні витрати. До них належать витрати, пов’язані з формуванням, обробкою та супроводом замовлень, координацією постачань, а також організаційним забезпеченням логістичних процесів [50; 67].

Витрати, пов’язані з ризиками. Цей складник відображає можливі втрати, зумовлені затримками постачання, дефіцитом ресурсів, пошкодженням матеріалів під час транспортування або складування та іншими несприятливими чинниками [47; 48; 64].

Одним із прикладів формалізації вартісного блоку є розрахунок витрат на утримання запасів, який може враховувати вартість матеріалу, обсяг запасу та супутні ставки витрат:

$$C_{inv,i} = V_i(\tau) \cdot P_i \cdot \frac{\tau_{wacc} + \tau_{store} + \tau_{risk}}{365} \quad (2.2)$$

де $V_i(\tau)$ – обсяг матеріалу, P_i – ціна одиниці, τ_{wacc} – вартість капіталу, τ_{store} – ставка витрат на складування, τ_{risk} – коефіцієнт ризику.

Наведена залежність дає змогу формалізовано врахувати вплив запасів на вартісні параметри проєкту та створює основу для подальшого аналізу рішень у сфері постачання й складування [63].

Ресурсне забезпечення об’єкта цивільного будівництва розглядається як система взаємопов’язаних параметрів, де кожен вид ресурсу має власну логістичну

специфіку та різний ступінь впливу на хід виконання робіт [22; 62]. Для складних об’єктів характерна висока неоднорідність ресурсів, що потребує їх диференційованої параметризації залежно від особливостей використання, інтенсивності споживання та умов постачання.

Параметризація ресурсів може базуватися на нормах денної потреби, об’ємно-вагових характеристиках, умовах транспортування, а також часових обмеженнях щодо строків зберігання [62; 63]. Важливим параметром є також час реакції постачальника, який визначає мінімально необхідний інтервал між моментом формування замовлення та фактичним надходженням ресурсу на будівельний майданчик [20; 22; 50]. Урахування цього показника є необхідним для подальшого обґрунтування параметрів запасу та узгодження графіка постачання з графіком виконання робіт [22; 63].

Таблиця 2.5 – Параметри ресурсного забезпечення для об’єкта цивільного будівництва (узагальнений вигляд)

Група ресурсів	Одиниця виміру	Характер споживання	Метод поставки	Метод параметризації в моделі
Основні конструкційні (бетон, розчин)	$м^3$	Високоінтенсивне, неперервне	Just-in-Time («з коліс»)	Часові вікна доставки (t_{tr}< год)
Стратегічні матеріали (арматура, метал)	т	Дискретне, великими партіями	Стратегічний буфер	Обсяг страхового запасу (V_{safe})
Штучні вироби (цегла, блоки, плити)	$м^3$ / шт	Ритмічне, середньоінтенсивне	Робочий запас	Рівень поповнення (Reorder Point)
Оздоблювальні та спецматеріали	$м^2$ / комплект	Специфічне, під етап робіт	Пряма поставка	Комплектність та цілісність лоту
Механізація та спецтехніка	маш.-год	Постійне або періодичне	Орендний ресурс	Коефіцієнт утилізації потужності

Дані таблиці 2.5 демонструють, що для об’єкта цивільного будівництва ресурсні параметри є базою для формування обмежень щодо пропускної здатності логістичних вузлів майданчика.

У межах параметризації ресурсного забезпечення кожен вид ресурсу виконує роль окремої облікової одиниці з визначеними характеристиками щодо походження, обсягу, строків постачання, умов транспортування та місця використання на будівельному майданчику [22; 50; 62]. Такий підхід дає змогу простежувати взаємозв’язок між графіком постачання ресурсів і графіком виконання робіт, а також своєчасно враховувати можливі затримки чи відхилення. Параметризація ресурсного забезпечення створює основу для оцінювання пропускної спроможності логістичних вузлів майданчика та запобігання дефіциту критично важливих позицій [22; 24].

Просторовий блок параметрів є одним із найскладніших у цивільному будівництві, особливо в умовах щільної міської забудови [16; 24; 40]. Площа будівельного майданчика виступає суттєвим обмеженням, яке впливає на логістичні можливості системи та вибір організаційно-технологічних рішень. Просторова параметризація передбачає формалізацію геометрії майданчика, виділення зон складування, маршрутів руху техніки та зон безпеки [24; 40; 68].

Ключовим параметром просторового блоку є складська потужність $V_{max,\,wh}$, яка визначає максимальний обсяг матеріалів, що можуть одночасно перебувати на об’єкті. Для складних об’єктів характерною є змінність просторових умов: доступна площа змінюється залежно від етапу будівництва. Наприклад, після завершення окремих робіт можуть вивільнятися додаткові зони для складування, тоді як на інших етапах ці площі, навпаки, скорочуються через розміщення тимчасових конструкцій, техніки або розширення фронтів робіт.

Формалізація цього обмеження може бути подана у вигляді нерівності складської потужності:

$$\sum_{i=1}^{k} V_i(\tau) \le V_{max,\,wh}(\tau) \qquad (2.3)$$

де $V_{max,\,wh}(r)$ – доступний обсяг складського простору в момент часу τ\tauτ.

Така формалізація дозволяє врахувати просторові обмеження при подальшій математичній постановці задачі та узгодити обсяги поставок із фактичними можливостями будівельного майданчика. Це є важливим для запобігання просторовим конфліктам, зокрема перевантаженню зон складування, блокуванню під'їзних шляхів і ускладненню доступу до фронтів робіт [24; 40; 68].

Окрему групу внутрішніх чинників становлять інформаційно-координаційні фактори, які визначають узгодженість дій між службами постачання, виробничими підрозділами та управлінським контуром проєкту [25; 33; 69]. Недостатня актуальність даних про потребу в ресурсах, статус виконання робіт і доступність логістичних вузлів призводить до помилок у графіках постачання, перевантаження майданчика або локального дефіциту матеріалів [25; 69]. У межах подальшої формалізації цей фактор трансформується у параметри інформаційної готовності, статусів обмежень та доступності логістичних ресурсів, що є важливими для узгодження матеріального потоку з фактичним станом виконання робіт [25; 26; 37].

Ризиковий блок у структурі параметризації призначений для врахування факторів, що можуть впливати на стабільність організаційних і логістичних процесів будівництва. В умовах підвищеної невизначеності ризики доцільно розглядати не як поодинокі випадкові події, а як чинники, що потребують системного кількісного врахування [48; 64; 65]. Параметризація ризиків може ґрунтуватися на методах імовірнісного аналізу та експертного оцінювання [64; 65].

Основними параметрами ризикової складової є:

Ймовірність збою – частота виникнення логістичних, технічних або енергетичних перерв, визначена на основі попередніх спостережень чи статистичних даних.

Вплив на строки – часові втрати, що виникають унаслідок реалізації ризикової події та можуть призводити до зміщення строків виконання окремих робіт.

Вартість простою – вартісне вираження затримок, що може включати оплату праці, витрати на утримання техніки та інші супутні втрати.

Урахування зазначених параметрів дає змогу формалізовано описати ризикову складову організаційно-логістичних процесів і створює основу для її подальшого

включення до системи критеріїв та обмежень у наступних підрозділах дослідження [64; 65].

Параметризація людських ресурсів у цивільному будівництві передбачає перехід від статичних норм виробітку до більш гнучких показників продуктивності, що враховують кваліфікацію працівників, умови виконання робіт і фактичну доступність персоналу. В умовах обмеженості трудових ресурсів людський фактор виступає одним із суттєвих параметрів організаційно-логістичної системи, оскільки саме він визначає реальну здатність будівельного майданчика забезпечувати виконання запланованих обсягів робіт [55; 56; 62].

До складу організаційно-кадрового блоку доцільно включити такі параметри:

Продуктивність і-ї бригади – обсяг робіт, який може бути виконаний за одиницю часу з урахуванням кваліфікації працівників, складу бригади та фактичних умов праці.

Доступність персоналу – кількість працівників певної спеціалізації, які можуть бути залучені до виконання робіт у визначений календарний період.

Час мобілізації – період, необхідний для залучення додаткових трудових ресурсів у разі зміни темпу або обсягу робіт.

Урахування кадрових параметрів дає змогу узгоджувати графік постачання матеріалів із реальною здатністю бригад до їх використання в процесі виконання робіт [55; 56; 62]. Це є важливим для запобігання ситуаціям, за яких матеріали вже доставлені на майданчик, але не можуть бути своєчасно використані через нестачу персоналу або обмеження в організації робіт. Таким чином, кадровий блок безпосередньо пов’язаний із часовими, ресурсними та вартісними параметрами системи.

Ефективність параметризації значною мірою залежить від якості й актуальності вхідних даних [63; 69]. У цивільному будівництві джерела даних доцільно поділяти на статичні, що характеризують проєктні рішення, та динамічні, що відображають фактичні умови виконання робіт [25; 33; 69].

До основних джерел даних для параметризації можуть належати:

- проєктна документація – визначає обсяги робіт, конструктивні характеристики об’єкта та загальні організаційно-технологічні умови будівництва;
- календарні та ресурсні плани – містять інформацію про строки виконання робіт, черговість процесів і потребу в ресурсах;
- облікові та звітні дані будівельного майданчика – відображають фактичний рух матеріалів, використання трудових ресурсів, техніки та стан виконання робіт;
- дані спостережень і контролю – дають змогу уточнювати параметри тривалості, витрат, ризиків і просторових обмежень у процесі реалізації проєкту.

Валідація даних передбачає перевірку їх повноти, узгодженості та відповідності фактичному стану будівельного процесу [63; 69]. На цій основі забезпечується уточнення параметрів, які використовуються для формалізованого опису організаційно-логістичної системи [69].

Таблиця 2.6 – Джерела даних для параметризації та валідації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

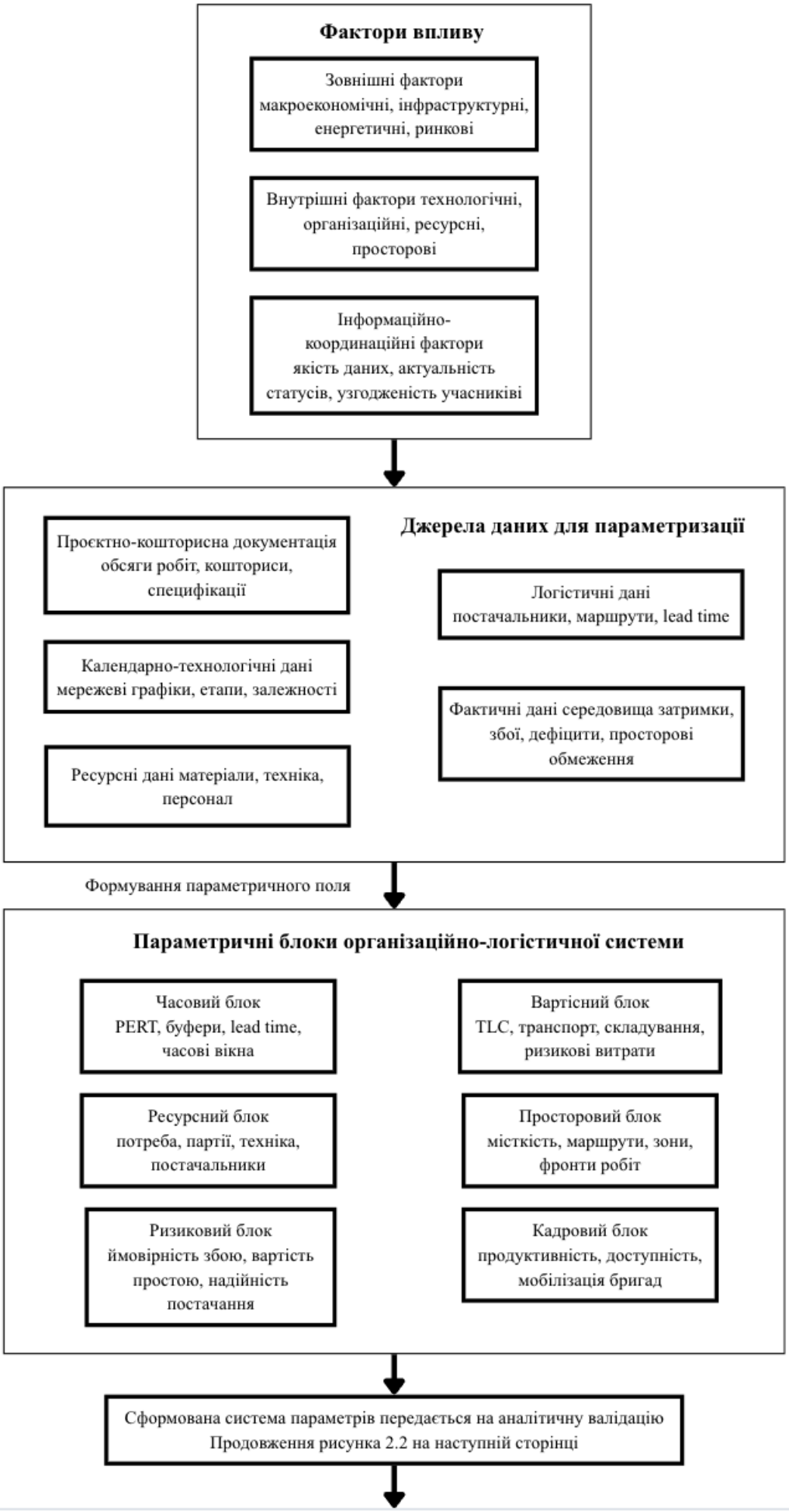
Джерело даних	Тип параметрів	Метод збору	Роль у валідації
BIM-модель	Геометрія, обсяги	Автоматичний парсинг IFC	Верифікація потреби
CDE-платформа	Статуси, документи	Робочі потоки (Workflows)	Контроль готовності
GPS / RFID	Координати, рух	Сенсорна мережа	Фіксація фактів доставки
Дані ERP	Ціни, контрагенти	Фінансовий облік	Коригування TLC-блоку

Завершальним етапом формалізації організаційних процесів є узагальнення параметрів, що характеризують ключові складові організаційно-логістичної системи цивільного будівництва [21; 50; 61]. Для складного об’єкта така система параметрів охоплює часові, вартісні, ресурсні, просторові, ризикові, кадрові та, за потреби,

екологічні характеристики, які у сукупності формують формалізоване подання предметної області [21; 50; 64].

Кожен із зазначених блоків відображає окремий аспект функціонування будівельного проєкту. Часові параметри характеризують тривалість і варіативність виконання операцій; вартісні – структуру витрат, пов’язаних із постачанням, зберіганням і організацією процесів; ресурсні – потребу в матеріально-технічному забезпеченні; просторові – обмеження будівельного майданчика; ризикові – вплив імовірних збоїв і затримок; кадрові – реальну забезпеченість трудовими ресурсами та продуктивність виконання робіт.

Систематизація цих параметрів дає змогу перейти від описового представлення будівельного процесу до його формалізованого аналізу [21; 50; 61]. При цьому окремі параметри та обмеження, зокрема часові оцінки, показники витрат, характеристики запасів, складська потужність майданчика, ризикові та кадрові показники, можуть бути використані як основа для подальшого обґрунтування критеріїв і обмежень у наступних підрозділах дослідження [50; 59; 63; 64].


Фактори впливу
Зовнішні фактори макроекономічні, інфраструктурні, енергетичні, ринкові
Внутрішні фактори технологічні, організаційні, ресурсні, просторові
Інформаційно-координаційні фактори якість даних, актуальність статусів, узгодженість учасниківі
Джерела даних для параметризації
Проєктно-кошторисна документація обсяги робіт, кошториси, специфікації
Логістичні дані постачальники, маршрути, lead time
Календарно-технологічні дані мережеві графіки, етапи, залежності
Фактичні дані середовища затримки, збої, дефіцити, просторові обмеження
Ресурсні дані матеріали, техніка, персонал
Формування параметричного поля
Параметричні блоки організаційно-логістичної системи
Часовий блок PERT, буфери, lead time, часові вікна
Вартісний блок TLC, транспорт, складування, ризикові витрати
Ресурсний блок потреба, партії, техніка, постачальники
Просторовий блок місткість, маршрути, зони, фронти робіт
Ризиковий блок ймовірність збою, вартість простою, надійність постачання
Кадровий блок продуктивність, доступність, мобілізація бригад
Сформована система параметрів передається на аналітичну валідацію
Продовження рисунка 2.2 на наступній сторінці

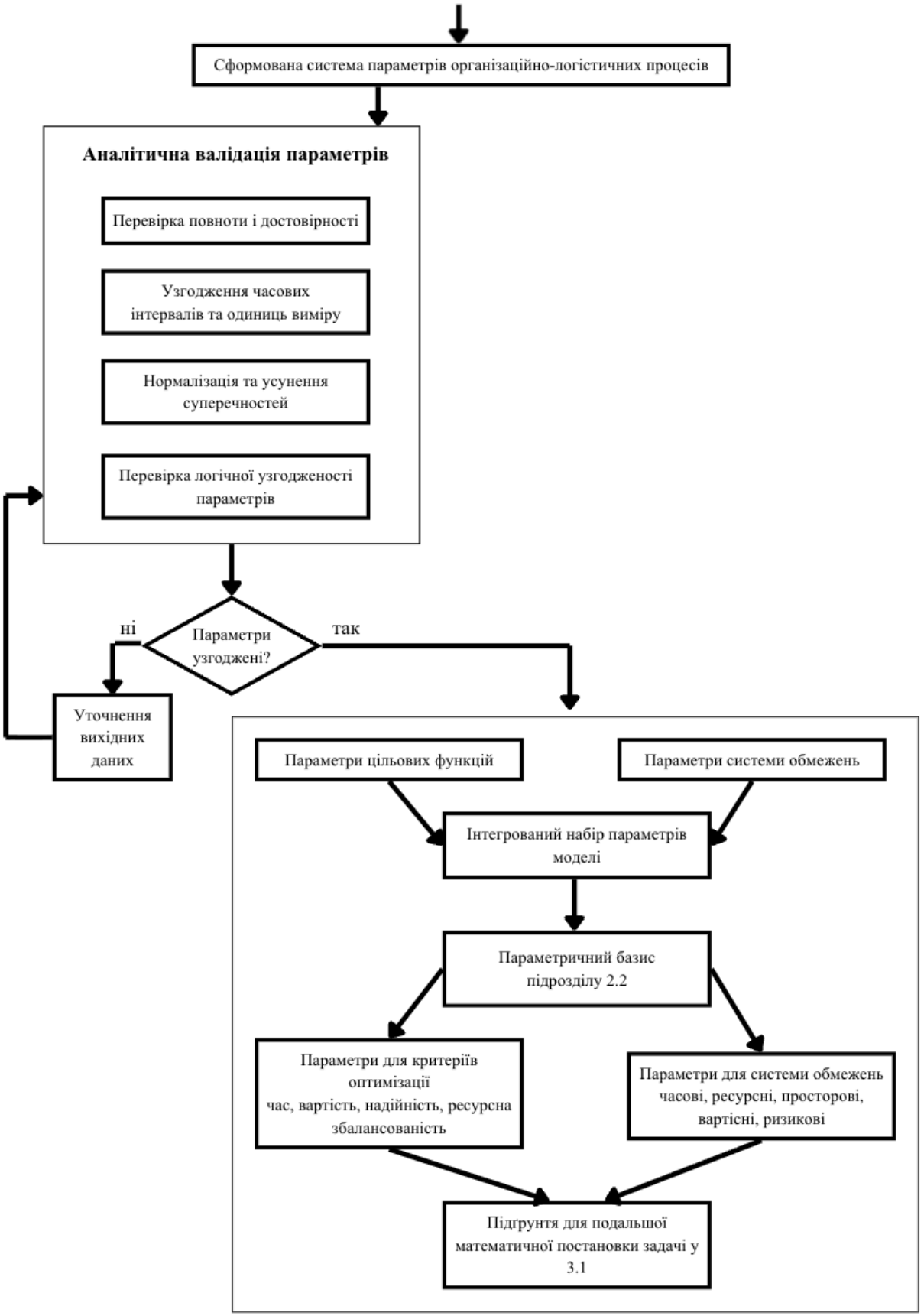


Рисунок 2.2 – Логіка параметризації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

Таким чином, параметризація організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві забезпечує перехід від описового аналізу до формалізованого подання предметної області [21; 50; 61]. Вона впорядковує часові, вартісні, ресурсні, просторові, ризикові та кадрові характеристики процесів і створює основу для подальшого обґрунтування системи критеріїв оптимізації.

2.3. Формування системи критеріїв оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

Для удосконалення організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві недостатньо оцінювати рішення лише за одним показником [70; 71]. На практиці потрібно одночасно враховувати строки, витрати, надійність постачання та збалансованість використання ресурсів [21; 70; 72]. Для будівельної галузі України 2024–2025 років характерними є нестабільність цін, пошкодження інфраструктури, перебої з ресурсами та кадровий дефіцит. У таких умовах організаційні рішення мають оцінюватися не лише за плановими строками, а й за їх стійкістю до можливих відхилень [47; 49; 73]. Традиційні підходи, орієнтовані переважно на виконання календарного графіка, не завжди дозволяють врахувати затримки постачання, енергетичні обмеження, нестачу персоналу та просторові обмеження будівельного майданчика [62; 74].

Формування системи критеріїв є необхідним етапом перед побудовою моделі, оскільки саме критерії показують, за якими ознаками будуть порівнюватися організаційно-логістичні рішення [70; 71; 75]. На будівельному майданчику одночасно потрібно узгоджувати постачання матеріалів, роботу техніки, зайнятість бригад, доступність фронтів робіт і обмежений простір [19; 22; 24]. Тому оптимізація таких процесів має бути багатокритеріальною [70-72]. Такий підхід дає змогу порівнювати різні варіанти рішень і бачити компроміси між швидкістю виконання, вартістю, надійністю та використанням ресурсів [70; 75; 76].

У цій роботі основними критеріями обрано час, вартість, надійність і ресурсну збалансованість [70; 72; 76]. Кожен із цих критеріїв пов’язаний не лише з кінцевим результатом проєкту, а й з тим, як організовано постачання, використання ресурсів, роботу майданчика та взаємодію учасників [21; 22; 74]. При цьому екологічний аспект у межах дослідження розглядається як супровідний вимір, пов’язаний зі зменшенням непродуктивних перевезень, надлишкових запасів і втрат ресурсів [57].

Розвиток організаційних підходів у будівництві поступово посилив роль логістики: від допоміжної функції постачання вона перейшла до інструмента узгодження строків, ресурсів і готовності робіт [18; 19; 22]. На ранніх етапах основна увага приділялася нормуванню й контролю операцій, а постачання розглядалося переважно як допоміжний процес. У таких системах головним критерієм була продуктивність окремих ланок, що часто призводило до накопичення надлишкових запасів («push»-логіка) та зниження загальної ефективності через відсутність узгодженості потоків [27; 28; 29].

Поява інструментів календарного планування, таких як діаграма Ганта, а пізніше мережевих методів (CPM та PERT), змінила фокус управління на часові параметри та логіку залежностей між роботами. Критерій часу став домінуючим, проте його детермінована інтерпретація в класичних моделях часто не дозволяла адекватно реагувати на варіативність реального майданчика [59; 60; 66]. У другій половині XX століття виникла потреба в інтеграції виробничого планування з логістичним забезпеченням, що призвело до поширення концепцій Lean Construction та Just-in-Time (JIT). У межах цих підходів логістика починає сприйматися як ключовий механізм стабілізації потоку, а система критеріїв доповнюється показниками надійності та ресурсної збалансованості [7; 8; 26; 77].

У сучасних умовах, коли зростає вартість капіталу і зберігається дефіцит кадрів, система критеріїв має враховувати здатність організаційної структури адаптуватися до змін [47; 49; 73]. Це обумовлює необхідність розгляду логістики не лише як функції доставки, а як системи управління обмеженнями постачання, простору, часу та ресурсів [19; 22; 50].

Таблиця 2.7 – Еволюційна трансформація змісту критеріїв управління організаційно-логістичними процесами

Етап еволюції	Панівна управлінська логіка	Зміст ключових критеріїв (логістичний аспект)	Характер організаційної відповіді на збої
Рання стандартизація (Тейлоризм)	Жорстка регламентація, ієрархічний контроль	Локальна продуктивність праці, обсяги подачі ресурсів	Адміністративний тиск, посилення резервів
Мережеве планування (CPM/PERT)	Управління залежностями та критичним шляхом	Дотримання календарних вікон, облік імовірнісної тривалості	Маневрування часовими резервами (float)
Потокова оптимізація (Lean Construction)	Управління потоком, цінністю та втратами	Стабільність ритму, мінімізація запасів, надійність виконання	Усунення обмежень, робота з буферами
Управління з цифровою підтримкою	Оцінювання альтернативних рішень, забезпечення стійкості процесів	Сукупні витрати (TLC), ресурсна збалансованість, стійкість до шоків	Оперативне коригування рішень на основі актуальних даних

Час у цивільному будівництві є одним із ключових ресурсів, оскільки затримки швидко впливають на вартість проєкту, завантаження бригад, постачання та виконання суміжних робіт [62; 74; 78]. У системі оптимізації організаційно-логістичних процесів цей критерій виходить за межі простого дотримання кінцевого строку здачі об’єкта [70; 74; 78]. У цьому дослідженні критерій часу пов’язаний не лише з кінцевим строком завершення об’єкта, а й зі здатністю підтримувати ритм робіт попри затримки постачання, простої або зміну доступності ресурсів [26; 31; 66]. В умовах України 2024–2025 років часові оцінки мають враховувати енергетичні обмеження, пошкодження інфраструктури та

можливі затримки постачання. Тому тривалість робіт доцільно задавати не лише одним нормативним значенням, а й через імовірнісні оцінки [59; 61; 79].

Словесна інтерпретація часового критерію в межах розробленої системи базується на аналізі тривалості логістичних та технологічних циклів. Оптимізація за цим критерієм має зменшувати очікування, зайві переміщення, повторне складування та інші затримки, які не додають результату, але збільшують тривалість проєкту [7; 28; 29]. Використання імовірнісного підходу (зокрема методу PERT) дозволяє описувати часові параметри через очікуване значення, що формується на основі трьох сценаріїв: оптимістичного (ідеальні умови), песимістичного (врахування енергетичних збоїв та затримок) та найбільш імовірного [59; 61; 79].

Ключовими складовими змісту критерію часу є:

1. Lead time поставок: Загальний час від моменту фіксації потреби в ресурсі на фронті робіт до моменту його повної готовності до монтажу. Це включає час на замовлення, транспортування, приймання та внутрішню логістику майданчика.

2. Ритмічність будівельного потоку: Ступінь стабільності виконання добових або тижневих планів. Втрата ритмічності призводить до накопичення «хвиль» робіт, що створює пікові навантаження на логістичну систему та підвищує ризик помилок.

3. Тривалість логістичних вікон: Часовий проміжок, протягом якого майданчик готовий прийняти певний вид ресурсу (наприклад, бетонну суміш або великогабаритні конструкції). Оптимізація спрямована на синхронізацію цих вікон із роботою розвантажувальних механізмів.

Зменшення часової довжини логістичного ланцюга безпосередньо корелює з підвищенням загальної ефективності, оскільки вивільняє обігові кошти та зменшує ризик морального або фізичного старіння матеріалів на складі [20; 50; 67].

Критерій вартості в системі організаційно-логістичної оптимізації розглядається через призму концепції сукупних логістичних витрат (TLC). Такий підхід розширює традиційне розуміння вартості, оскільки враховує не лише ціну матеріалу, а й витрати на його доставку, зберігання, координацію та можливі простої

[50; 67]. Навіть дешевший матеріал може виявитися невигідним, якщо його доставка затримує роботи, потребує зайвого складування або створює додаткові витрати на переміщення всередині майданчика [22; 50; 67].

Зміст критерію TLC інтегрує наступні групи видатків:

- Транспортні витрати: Параметризуються не лише через відстань, а й через складність маршрутів у пошкодженій інфраструктурі України (станом на 2025 рік пошкоджено 26 тис. км доріг та 311 мостів). Це вимагає врахування витрат на перенавігацію та збільшеного споживання палива при використанні альтернативних шляхів.
- Витрати на утримання запасів: У 2024–2025 роках цей складник набуває суттєвого значення через високу ставку рефінансування НБУ (15,5%). Через високу вартість капіталу накопичення великих страхових запасів може суттєво погіршувати економіку проєкту.
- Витрати на операційне управління та адміністрування: Включають витрати на цифрову координацію через середовища спільних даних, обробку замовлень, вхідний контроль якості та складські операції.
- Витрати від ризиків та дефіциту: Математичне очікування втрат, що виникають при зупинці робіт через відсутність матеріалу (оплата простою техніки та персоналу, штрафні санкції за порушення строків).

Оптимізація за критерієм вартості спрямована на знаходження такого рівня запасів та такої частоти поставок, які мінімізують TLC при забезпеченні заданого рівня надійності [63; 67]. Це часто вимагає прийняття рішень про використання дорожчих, але швидших каналів доставки, якщо вони дозволяють уникнути простою дорогих кранових систем або монтажних бригад.

Таблиця 2.8 – Склад та змістовне наповнення економічних і часових критеріїв оптимізації

Назва критерію	Складники змісту	Логістична інтерпретація	Показники для оцінювання
Сукупні витрати (TLC)	Транспортування, складування, утримання капіталу (WACC), адміністрування, ризики	Повна вартість організаційного забезпечення матеріального потоку	Рівень логістичних витрат у собівартості, швидкість обертання запасів
Час (T)	Тривалість циклів, ритмічність, lead-time, імовірнісна тривалість робіт	Здатність системи перетворювати ресурси в готову продукцію в заданому темпі	Коефіцієнт своєчасної доставки (OTD), частка часу, що додає цінність

Надійність організаційно-логістичних процесів є комплексним критерієм, що відображає здатність системи зберігати працездатність та виконувати планові завдання при зміні зовнішніх умов [47; 49; 80]. За нестабільної інфраструктури дешевший канал постачання не завжди є кращим, якщо він має високий ризик затримки або зриву доставки [47; 49; 53].

Зміст критерію надійності розкривається через систему наступних характеристик:

1. Безвідмовність логістичних каналів: Ймовірність того, що обраний постачальник або перевізник виконає свої зобов’язання в повному обсязі та в межах часового вікна. Вона базується на історичній статистиці затримок та оцінці ризиків безпеки на маршрутах.

2. Готовність завдань (Make-ready logic): Критерій, запозичений з Last Planner System, що вимагає 100% наявності всіх передумов для виконання роботи до її включення в оперативний план. У такій логіці робота має включатися до оперативного плану лише тоді, коли для неї підтверджено наявність матеріалів, техніки, персоналу та доступного фронту робіт [8; 26; 31].

3. Інформаційна прозорість та відкритість: Ступінь довіри до даних у системі. Надійність рішень прямо залежить від відсутності інформаційних розривів між «останніми планувальниками» на майданчику та службами постачання.

У межах оптимізаційної моделі надійність виступає як інтегральний показник, що корелює продуктивність із імовірністю виникнення збоїв. Високий рівень надійності забезпечується через використання керованих буферів – часових, ресурсних або просторових, які захищають критичний шлях від варіативності, але не призводять до критичного подорожчання проєкту [27; 29; 80].

Ресурсна збалансованість – це критерій, що характеризує ступінь відповідності між потребою у фронтах робіт та пропускною здатністю логістичних вузлів майданчика [24; 81]. У цивільному будівництві майданчик часто виступає «пляшковим горлом» через обмежену площу, складні під'їзні шляхи та лімітовану потужність підйомних механізмів [24; 40; 68]. Критерій ресурсної збалансованості покликаний усунути диспропорції, які призводять до заторів або дефіциту [63; 81; 82].

Зміст критерію ресурсної збалансованості включає:

- Синхронізацію поставок і монтажу: Пріоритет віддається прямим поставкам («з коліс»), що вимагає точного узгодження часу прибуття транспорту з готовністю бригад та вільним часом крана [26; 28; 81]. Це мінімізує потребу в складських площах та зменшує кількість вантажно-розвантажувальних операцій.
- Динамічне управління простором: Облік доступної площі майданчика як обмеження, що змінюється на кожному етапі будівництва. Збалансованість означає, що обсяг матеріалів на майданчику ніколи не перевищує його фізичну місткість і не блокує шляхи евакуації та технологічні проходи.
- Узгодженість із кадровим потенціалом: Координація матеріальних потоків із реальною чисельністю та кваліфікацією персоналу. В умовах дефіциту кадрів (понад 30% вакансій) ресурсна збалансованість вимагає перегляду планів на користь менш трудомістких технологій (наприклад, префабрикації), щоб уникнути накопичення матеріалів, які нікому монтувати.

Оптимізація за цим критерієм має забезпечити рівномірніше завантаження майданчика, без різких піків у постачанні, роботі техніки та використанні персоналу [24; 62; 82]. Це зменшує ризик простоїв, заторів і помилок під час виконання робіт.

Таблиця 2.9 – Склад та змістовне наповнення критеріїв надійності та ресурсної збалансованості

Назва критерію	Складники змісту	Організаційний сенс	Ключові характеристики для оптимізації
Надійність (Reliability)	Безвідмовність поставок, готовність робіт (Make-ready), точність даних	Гарантія виконання запланованого обсягу робіт у задані терміни	Ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності системи
Ресурсна збалансованість	Синхронізація темпів, управління складською потужністю, кадровий баланс	Усунення диспропорцій між постачанням та споживанням ресурсів	Ступінь використання площі майданчика, продуктивність логістичних вузлів

Екологічний аспект у межах дослідження розглядається як супровідний, оскільки більшість екологічно орієнтованих логістичних рішень одночасно сприяє зниженню витрат і підвищенню ресурсної ефективності. У цьому контексті він враховується як додатковий наслідок оптимізації маршрутів, зменшення надлишкових перевезень і мінімізації відходів.

Обрані критерії тісно пов’язані між собою і часто вступають у конфлікт [70; 71; 75]. Традиційне співвідношення між часом, вартістю та якістю в логістиці ускладнюється ще й питаннями надійності постачань, запасів, простору майданчика та готовності робіт. Поліпшення одного критерію часто погіршує інший: швидші поставки можуть бути дорожчими, більші запаси підвищують надійність, але займають місце й заморожують кошти [63; 67; 70].

Найбільш типові конфліктні ситуації:

- Своєчасність (Час) vs Транспортні витрати (Вартість): Для забезпечення термінової поставки критичного матеріалу часто доводиться використовувати менш місткий транспорт або експрес-тарифи, що збільшує TLC.
- Надійність vs Вартість утримання капіталу: Підвищення надійності через збільшення страхових запасів («Just-in-Case») захищає від дефіциту, але різко збільшує фінансове навантаження на проєкт через заморожування обігових коштів.
- Ресурсна збалансованість vs Витрати на перевалку: Пряма подача матеріалів у зону монтажу («з коліс») економить місце і час, але вимагає надвисокої точності координації та залучення кваліфікованого персоналу, чия вартість у 2025 році зросла на 33–50%.

Багатокритеріальний підхід дає змогу не приховувати ці суперечності, а порівнювати альтернативи за кількома критеріями одночасно й формувати компромісні рішення [70-72; 75]. Для різних етапів будівництва пріоритети можуть відрізнятися [62; 74; 78]. На етапі фундаменту або каркаса важливішою може бути надійність постачання, тоді як на оздоблювальних роботах більшу роль може відігравати вартість і раціональне використання ресурсів.

Таблиця 2.10 – Матриця взаємовпливу критеріїв у системі оптимізації

Назва критерію	Час	Вартість	Надійність	Ресурсна збалансованість
Час	-	Прискорення збільшує TLC	Підвищує загальну надійність проєкту	Вимагає жорсткої синхронізації
Вартість	Економія може затягнути строки	-	Зниження витрат часто б’є по надійності	Заощадження на запасах вивільняє площу
Надійність	Зменшує імовірність зривів	Потребує витрат на буферизацію	-	Базується на прозорості ресурсів

Ресурсна збалансованість	Стабілізує темп робіт	Оптимізує операційні видатки	Підвищує стійкість до заторів	-

Хоча архітектура цифрових інструментів детально розглядається далі, уже на цьому етапі важливо зазначити: критерії можуть бути корисними лише тоді, коли для них є достатньо надійні дані [25; 69]. Оптимізація за критеріями часу, вартості, надійності та збалансованості потребує постійного притоку інформації з майданчика та зовнішнього середовища [25; 33; 69].

Цифрові дані забезпечують:

1. Об’єктивність оцінювання: Показники надійності та ритмічності розраховуються не на основі суб’єктивних звітів виконробів, а на базі телеметрії техніки та автоматичної фіксації фактів прибуття вантажів.

2. Попереднє оцінювання наслідків: можливість заздалегідь перевірити, як зміна строків, партії постачання або маршруту вплине на інші параметри. Це дозволяє реалізувати превентивний підхід до управління обмеженнями.

3. Простежуваність рішень: кожне відхилення можна пов’язати з конкретною причиною – затримкою постачання, браком ресурсу, зміною графіка або обмеженням майданчика.

Отже, система критеріїв дозволяє оцінювати не лише поточний стан проєкту, а й можливі наслідки обраних організаційно-логістичних рішень [70; 75; 76].

Сформована система критеріїв охоплює основні сторони організаційно-логістичних процесів: строки, витрати, надійність забезпечення та збалансованість використання ресурсів [70; 72; 76]. Її застосування дозволяє оцінювати не окремі локальні покращення, а взаємозв’язок між рішеннями щодо постачання, запасів, графіка, простору майданчика та роботи учасників [22; 23; 70]. Така інтерпретація критеріїв створює основу для їх подальшого подання у вигляді цільових функцій і обмежень у математичній моделі [70-72].

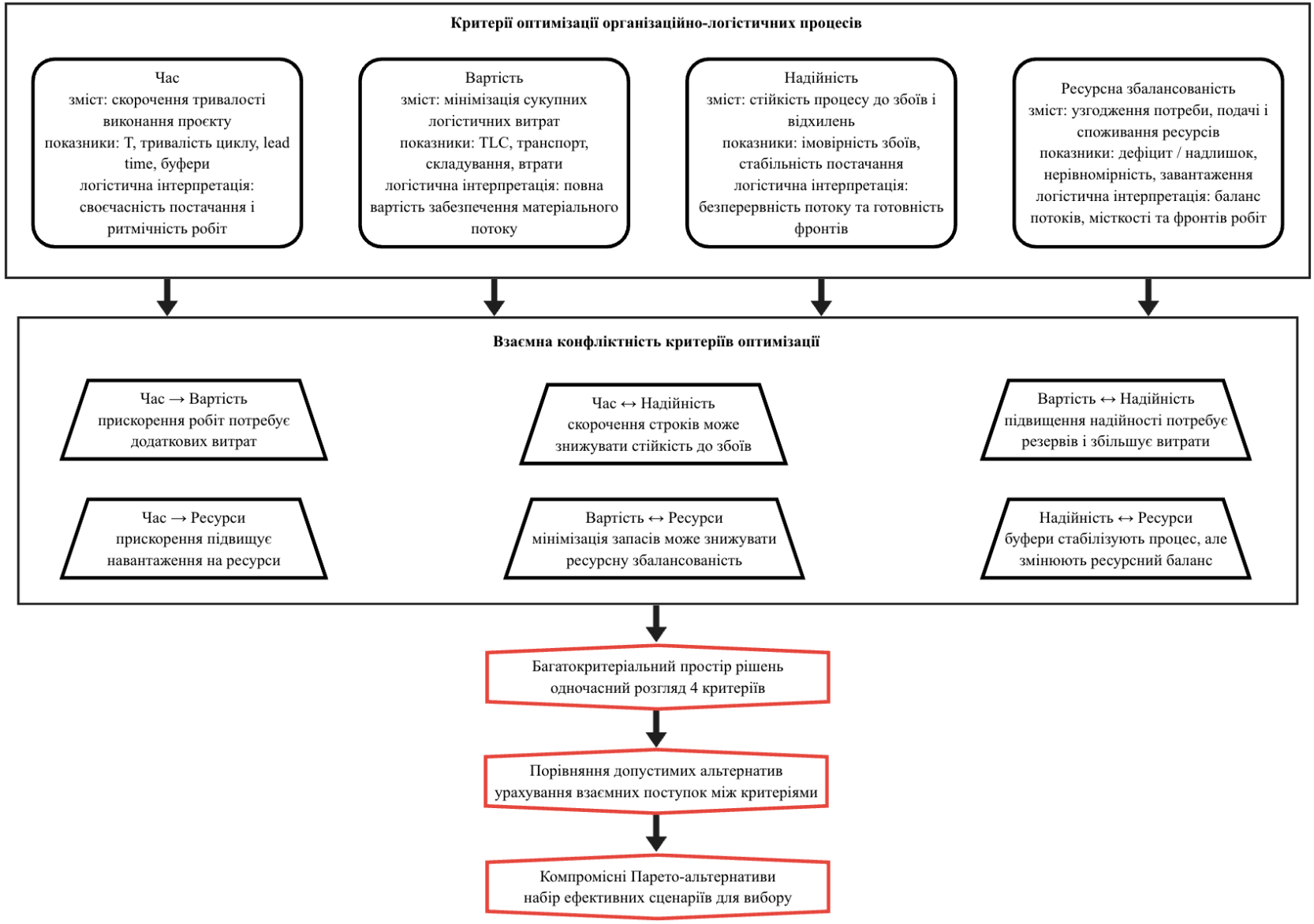


Рисунок 2.3 – Система критеріїв оптимізації організаційно-логістичних процесів та їх конфліктність

Описана словесна інтерпретація та концептуальна валідація системи критеріїв створюють передумови для їх подальшої математичної формалізації [70-72]. У підрозділі 3.1 ці положення буде подано у вигляді цільових функцій і системи обмежень багатокритеріальної задачі оптимізації. Визначені параметри часу, сукупних витрат, надійності та ресурсної збалансованості надалі використовуються як основа для побудови багатокритеріальної математичної моделі [70; 72; 76].

Висновки до розділу 2

Встановлено, що організаційно-логістичні процеси цивільного будівництва формуються під впливом комплексу зовнішніх і внутрішніх факторів, пов'язаних із макроекономічними умовами, інфраструктурними обмеженнями, енергетичною нестабільністю, кадровим забезпеченням, просторовою організацією майданчика та інформаційною координацією учасників будівництва. Для цілей подальшої оптимізації ці фактори мають бути переведені з описового рівня у систему параметрів, обмежень і критеріїв, що забезпечує формалізовану основу побудови організаційно-логістичної моделі.

Аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів показав, що стабільність логістичних ланцюгів залежить не від одного окремого чинника, а від їх сукупної дії. Макроекономічні умови впливають на вартість ресурсів, запасів і залученого капіталу; стан інфраструктури визначає доступність маршрутів, логістичне плече та час доставки; енергетичні обмеження можуть змінювати тривалість операцій і підвищувати ризик простоїв. Водночас внутрішні фактори – кадрова забезпеченість, просторові умови майданчика, пропускна здатність логістичних вузлів, якість інформації та координація учасників – безпосередньо визначають, чи може запланований графік бути виконаний у реальних умовах.

Показано, що ці фактори важливі не лише як характеристика середовища. Для подальшого моделювання вони мають бути перетворені на вимірювані параметри: вартісні, часові, ресурсні, просторові, ризикові та кадрові. Наприклад, нестабільність постачань може бути врахована через варіативність часу доставки й ризик простою; обмеженість майданчика – через складську місткість і пропускну здатність під'їздів; дефіцит персоналу – через продуктивність бригад, доступність працівників і час мобілізації. Такий перехід дозволяє пов'язати загальні умови будівництва з конкретними обмеженнями майбутньої оптимізаційної задачі.

У розділі систематизовано основні параметричні блоки організаційно-логістичних процесів. Часовий блок відображає тривалості операцій, lead time, часові резерви та можливість використання PERT-оцінювання. Вартісний

блок охоплює сукупні логістичні витрати, транспорт, складування, утримання запасів і ризикові втрати. Ресурсний блок пов’язаний із потребою в матеріалах, партіями поставок, постачальниками та доступністю ресурсів. Просторовий блок описує місткість майданчика, маршрути переміщення, зони складування й доступність фронтів робіт. Ризиковий і кадровий блоки дають змогу врахувати ймовірність збоїв, вартість простоїв, продуктивність працівників і реальну можливість залучення персоналу.

Окремо підкреслено значення валідації даних. Для організаційно-логістичної моделі недостатньо просто зібрати вихідну інформацію з проєктної документації, графіків, BIM/CDE, ERP чи фактичних даних майданчика. Важливо перевірити, чи є ці дані повними, актуальними та узгодженими між собою. Якщо потреба в ресурсах, статус готовності робіт або доступність майданчика визначені неточно, модель може запропонувати формально правильне, але практично нереалізоване рішення. Тому перевірка якості даних є необхідною частиною переходу від аналізу до математичної постановки задачі.

На основі параметризації сформовано систему критеріїв оптимізації. До основних критеріїв віднесено час, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення та ресурсну збалансованість. Їх вибір пояснюється тим, що саме ці характеристики найповніше відображають практичну складність організації будівництва: потрібно не лише скоротити строки або зменшити витрати, а й забезпечити стійкість постачання, готовність фронтів робіт і узгодженість використання ресурсів на майданчику.

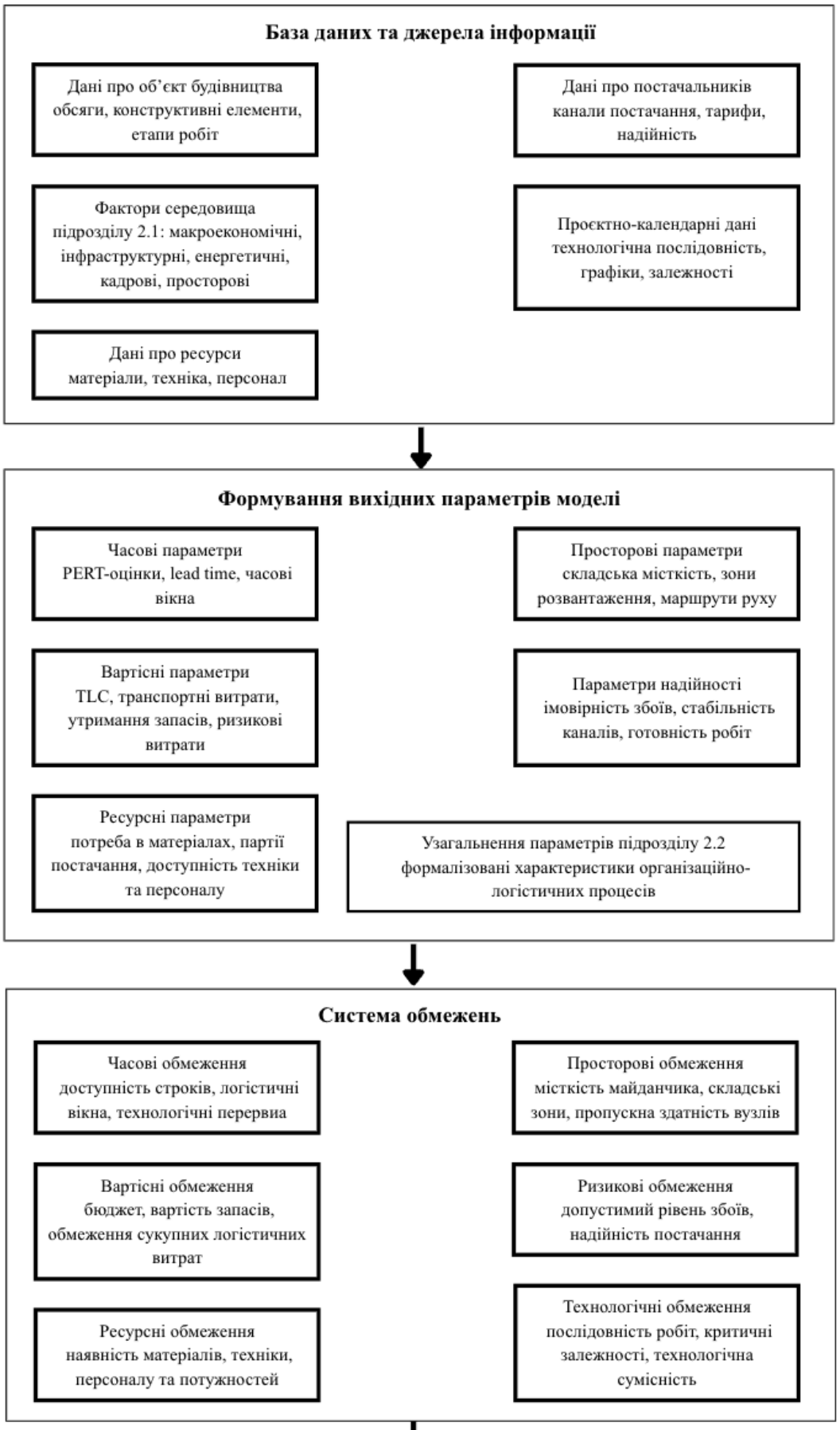
Водночас встановлено, що ці критерії не можна розглядати ізольовано. Скорочення строків часто потребує додаткових витрат; зниження запасів може підвищувати ризик дефіциту; підвищення надійності зазвичай вимагає резервів; прагнення до ресурсної збалансованості може обмежувати максимальне прискорення окремих процесів. Саме тому оптимізація організаційно-логістичних процесів має багатокритеріальний характер і повинна орієнтуватися не на єдиний показник, а на пошук компромісних рішень.

Отже, у розділі 2 сформовано аналітичну основу для подальшої математичної постановки задачі. Визначено фактори, що впливають на стабільність логістичних ланцюгів, розкрито їх трансформацію у систему параметрів, обґрунтовано необхідність валідації даних і сформовано критерії оптимізації організаційно-логістичних процесів. Отримані результати дозволяють перейти до розроблення багатокритеріальної математичної моделі, алгоритму її розв’язання та програмної реалізації у третьому розділі дисертації.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ РІШЕНЬ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

3.1. Математична постановка багатокритеріальної задачі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

На основі факторів, параметрів і критеріїв, сформованих у розділі 2, задачу вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва доцільно формалізувати як багатокритеріальну оптимізаційну задачу [70; 71; 83]. Такий підхід зумовлений тісним зв’язком між часовими, вартісними та ресурсними параметрами: зміна одного з них впливає на графік, потребу в ресурсах, логістику постачання та організацію робіт на майданчику [21; 50; 84]. Предметом математичного опису у цьому підрозділі є формалізація взаємозв’язків між інтенсивністю матеріальних потоків, пропускною здатністю логістичних вузлів майданчика та загальною тривалістю будівельного проєкту цивільного призначення [85; 86].



Продовження на наступній сторінці

Продовження рисунка 3.1

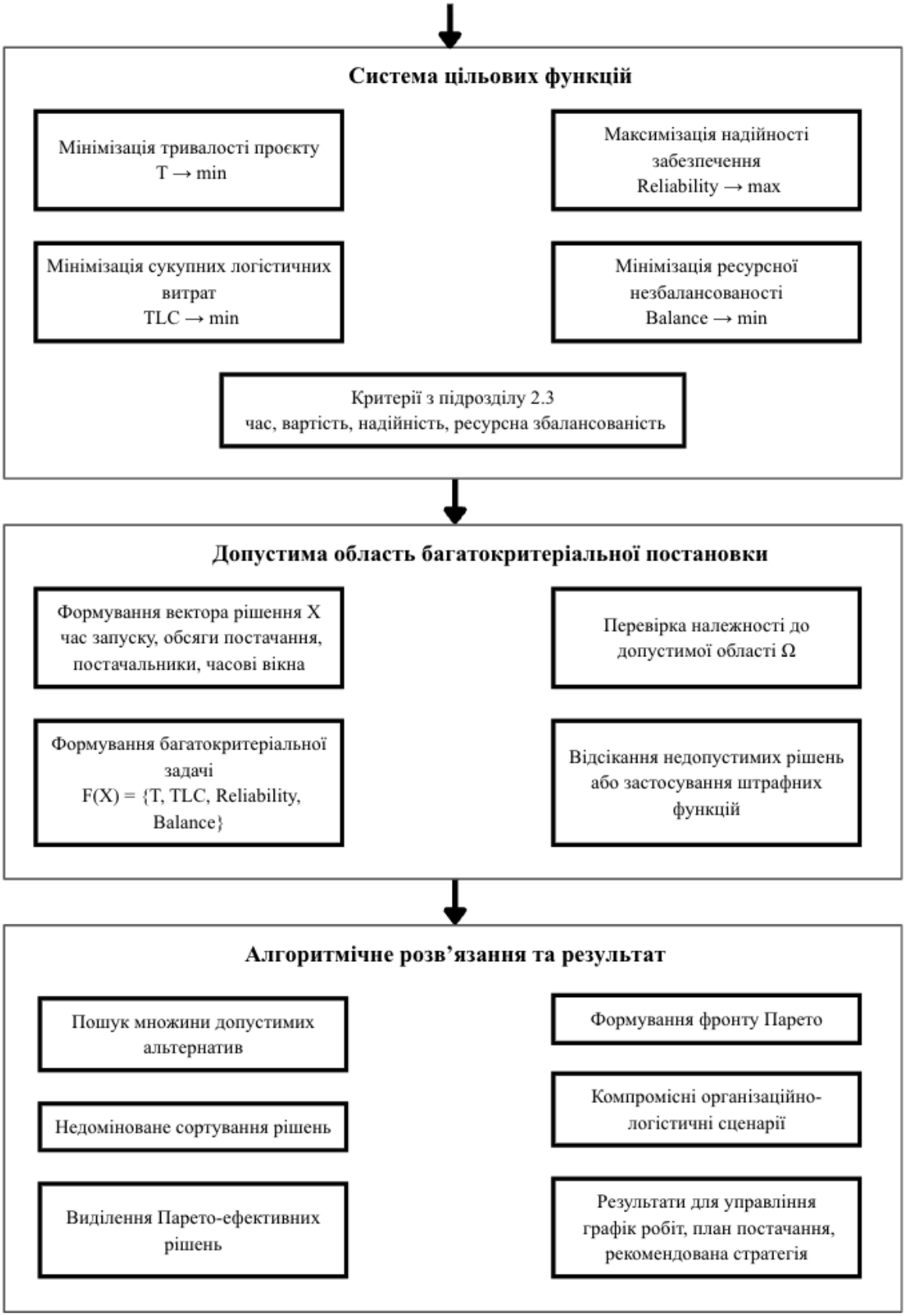


Рисунок 3.1 – Структурно-логічна схема математичної постановки багатокритеріальної задачі оптимізації організаційно-логістичних процесів

Об'єктом моделювання виступає організація зведення об’єкта цивільного будівництва, що розглядається як динамічна система, яка функціонує в умовах стохастичного впливу зовнішнього середовища [47; 53; 87]. Математична постановка задачі спрямована на знаходження такого вектора організаційних рішень, який би забезпечив раціональний баланс між конфліктними цілями учасників проєкту [70; 71; 75]. При цьому відповідні макроекономічні фактори, інфраструктурні обмеження та енергетичні ризики, детально проаналізовані у попередніх розділах, враховано безпосередньо у параметрах і обмеженнях моделі, що дозволяє уникнути надмірної описової частини та зосередитися на аналітичному апараті [48; 64; 88].

Для формалізації задачі введемо такі множини та індекси [83; 84]:

- $i \in I$ – множина технологічних операцій;
- $r \in R$ – множина видів ресурсів;
- $s \in S$ – множина каналів постачання / постачальників;
- $n \in N$ – множина логістичних вузлів майданчика;
- $t \in T$ – множина дискретних часових періодів;
- $p \in P$ – множина можливих сценаріїв зовнішнього впливу.

Для подальшої формалізації організаційно-логістичне рішення подамо у вигляді розширеного вектора керованих змінних:

$$X = \left\{x_i, q_i^r, y_i^{sr}, r_i^r, z_{int}, b_{it}\right\}, \tag{3.1}$$

$$i \in I, r \in R, s \in S, n \in N, t \in T, p \in P \tag{3.2}$$

де x_i – момент початку і-ї технологічної операції; q_i^r – обсяг r-го ресурсу, необхідний для виконання і-ї операції; y_i^{sr} – бінарна змінна вибору s-го каналу постачання для r-го ресурсу; r_i^r – очікуваний час доставки r-го ресурсу для і-ї операції; z_{int} – змінна використання n-го логістичного вузла в момент часу t; b_{it} – бінарна змінна готовності і-ї операції до включення в оперативний план у момент часу t.

Таке подання дозволяє одночасно врахувати технологічний, ресурсний, часовий і просторовий аспекти організаційно-логістичного рішення. На відміну від спрощеного опису календарного плану, вектор *X* містить не лише строки виконання робіт, а й параметри постачання, вибір логістичних каналів, завантаження вузлів майданчика та готовність операцій до виконання.

Параметри моделі поділяються на детерміновані (проєктні обсяги робіт, геометричні характеристики об'єкта цивільного будівництва) та стохастичні (тривалість доставки, надійність постачальників, продуктивність бригад у змінних умовах). Математична структура моделі базується на інтеграції цих параметрів у систему цільових функцій та обмежень.

Багатокритеріальний характер задачі обумовлює необхідність одночасного розгляду декількох цільових функцій, що мають різну фізичну природу та одиниці виміру. Вектор цілей *F(X)* для об'єкта цивільного будівництва представлений у наступному вигляді:

$$F(X) = \left\{ f_{TLC}(X), f_{Time}(X), f_{Rel}(X), f_{Env}(X) \right\} \rightarrow extr \tag{3.3}$$

Детальне обґрунтування та математична структура кожної функції розкриваються нижче.

Функція сукупних логістичних витрат (TLC) відображає повну вартість організаційного забезпечення будівельного проєкту цивільного призначення. У загальному вигляді функція сукупних логістичних витрат може бути подана як сума транспортних, складських, адміністративних і ризикових витрат:

$$f_{TLC}(X) = \sum_{i-1}^{n} \left(C_{tr,i} + C_{inv,i} + C_{ord,i} + C_{risk,i} \right) \rightarrow min \tag{3.4}$$

Для більш детального врахування параметрів постачання, запасів, вартості капіталу та ризиків цю функцію доцільно подати у розгорнутому вигляді:

$$f_1(X) = TLC = \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} y_i^{sr} \cdot q_i^r \cdot c_{tr}^{sr} \cdot d^s + \tag{3.5}$$

$$+ \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} V^r(t) \cdot P^r \cdot \left(WACC + h^r \right) \cdot \Delta t +$$

$$+ \sum_{i \in I} C_{i,adm} +$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} p_i^r \cdot L_i^r \to min,$$

де c_{tr}^{sr} – транспортна ставка перевезення *r*-го ресурсу через *s*-й канал постачання; d^s – логістичне плече відповідного каналу; $V^r(t)$ – обсяг *r*-го ресурсу, що перебуває на майданчику в момент часу *t*; P^r – ціна одиниці *r*-го ресурсу; *WACC* – середньозважена вартість капіталу; h^r – ставка витрат на складування та обслуговування запасу; $C_{i,adm}$ – адміністративні витрати, пов'язані з організацією постачання для *i*-ї операції; p_i^r – імовірність збою у забезпеченні *i*-ї операції *r*-м ресурсом; L_i^r – очікувані втрати від дефіциту або затримки відповідного ресурсу.

Перша складова функції відображає транспортні витрати, друга – витрати на утримання запасів і заморожування капіталу, третя – адміністративно-координаційні витрати, четверта – ризикові втрати, пов'язані з можливими збоями постачання. Завдяки такій структурі функція TLC враховує не лише ціну матеріалу, а й повну логістичну вартість його використання у будівельному процесі.

Кожна компонента функції TLC має власну структуру параметризації:

1. Транспортні витрати ($C_{tr,i}$): визначаються на основі логістичного плеча, тарифних ставок та інтенсивності потоків. У сучасних умовах до цієї складової інтегровано коефіцієнти ризику проходження інфраструктурних вузлів.

2. Витрати на утримання запасів ($C_{inv,i}$): є функцією часу перебування ресурсу на майданчику та вартості залученого капіталу. Коефіцієнт витрат на капітал (WACC) та орендні ставки складів враховані як параметри цієї складової:

$$C_{inv,i} = \int_{o}^{x} \left[V_i(t) \cdot P_i \cdot r_{hold} \right] dt \qquad (3.6)$$

де $V_i(t)$ – поточний обсяг і-го ресурсу на складі; P_i – ціна одиниці ресурсу; r_{hold} – ставка витрат на утримання.

3. Адміністративні витрати ($C_{ord,i}$): фіксують затрати на інформаційну координацію, управління замовленнями та вхідний контроль матеріалів.

4. Витрати від ризиків ($C_{risk,i}$): відображають потенційні збитки від дефіциту ресурсів на фронті робіт або простою техніки. Вони розраховуються як математичне очікування на основі ймовірності збою логістичного ланцюга [48; 64; 87].

Мінімізація загальної тривалості проєкту (T) є критичною для об'єктів цивільного будівництва через високу вартість часу як ресурсу [62; 78; 89]. Часова функція враховує як тривалість технологічних операцій, так і логістичні лаги [59; 61; 89]:

$$f_{Time}(X) = T_{end,J} - T_{start,J} \rightarrow min \tag{3.7}$$

Цільова функція тривалості проєкту може бути подана як різниця між моментом завершення останньої та початком першої операції з урахуванням технологічних і логістичних лагів [60; 89; 90]:

$$f_2(X) = T(X) = max_i \in I\left\{x_i + t_i^{PERT} + l_i\right\} - min_i \in I\left\{x_i\right\} \rightarrow min \tag{3.8}$$

де x_i – момент початку і-ї операції; t_i^{PERT} – очікувана тривалість і-ї операції, визначена за методом PERT; l_i – логістичний лаг, пов'язаний з очікуванням доставки ресурсу, підготовкою фронту робіт або доступністю логістичного вузла.

Очікувана тривалість операції визначається за формулою:

$$t_i^{PERT} = \left(a_i + 4m_i + b_i\right)/6 \tag{3.9}$$

де a_i – оптимістична оцінка тривалості і-ї операції; m_i – найбільш імовірна оцінка; b_i – песимістична оцінка. Для оцінювання варіативності тривалості може бути використана дисперсія:

$$\sigma_i^2 = \left(\left(b_i - a_i\right)/6\right)^2 \tag{3.10}$$

Таким чином, тривалість проєкту в моделі залежить не лише від технологічної послідовності робіт, а й від імовірнісної природи виконання операцій та логістичних затримок, що виникають у процесі постачання ресурсів.

Отже, PERT-оцінювання використовується в моделі як спосіб урахування варіативності тривалості операцій без надмірної деталізації причин цієї варіативності.

Функція надійності відображає здатність організаційної системи забезпечувати неперервність виробничого потоку. У межах моделі вона пов'язується не лише з надійністю постачальника, а й з ресурсною та просторовою готовністю робіт.

$$f_3(X) = R(X) = \prod_{i} \in I \prod^{r} \in R\left[p^{sr} \cdot g_i^r(t) \cdot a_i(t)\right] \rightarrow max \qquad (3.11)$$

де p^{sr} – коефіцієнт надійності s-го постачальника для r-го ресурсу; $g_i^r(t)$ – показник ресурсної готовності i-ї операції за r-м ресурсом у момент часу t; $a_i(t)$ – показник готовності фронту робіт для i-ї операції.

Для уникнення надмірної чутливості добуткової форми до малих значень окремих множників функцію надійності можна подати в еквівалентній мінімізованій логарифмічній формі:

$$f_3^{`}(X) = -\sum_{i} \in I \sum^{r} \in Rl_n\left(p^{sr} \cdot g_i^r(t) \cdot a_i(t)\right) \rightarrow min \qquad (3.12)$$

Така форма дозволяє враховувати не лише статистичну надійність постачальника, а й фактичну готовність ресурсу та будівельного фронту. Це відповідає логіці make-ready, за якою робота може бути включена до оперативного плану лише за наявності матеріалів, персоналу, техніки, доступного простору та підтвердженої інформаційної готовності.

Функція ресурсної збалансованості відображає ступінь узгодженості між потребою у ресурсах, пропускною здатністю логістичних вузлів та фактичною інтенсивністю виконання робіт. Її мінімізація спрямована на усунення локальних перевантажень, простоїв та диспропорцій між постачанням і споживанням ресурсів на майданчику.

$$f_4(X) = \sum_{t} \in T \sum^{r} \in R\left[D^r(t) - A^{\mathrm{r}}(t)\right]^2 + \tag{3.13}$$

$$+ \sum_{t} \in T \sum_{n} \in N \, max\left\{0,\ U_n(t) - Cap_n(t)\right\}^2 \to min$$

де $D^r(t)$ – потреба в r-му ресурсі в момент часу t; $A^{\mathrm{r}}(t)$ – фактична доступність r-го ресурсу; $U_n(t)$ – навантаження на n-й логістичний вузол; $Cap_n(t)$ – пропускна здатність *n*-го логістичного вузла в момент часу t.

Перша складова функції характеризує ресурсний дисбаланс між потребою та наявністю матеріалів, техніки або трудових ресурсів. Друга складова відображає перевищення пропускної здатності логістичних вузлів, зокрема під'їздів, зон розвантаження, кранів і складських ділянок. Мінімізація цієї функції спрямована на вирівнювання інтенсивності постачань і споживання ресурсів, а також на запобігання локальним перевантаженням будівельного майданчика.

Задача не може бути коректно зведена до одного інтегрального критерію без втрати змістовної повноти, оскільки скорочення тривалості виконання робіт, як правило, супроводжується зростанням логістичних витрат, підвищення надійності потребує створення резервів, а ресурсна збалансованість вимагає обмеження локальних перевантажень. Саме тому постановка задачі здійснюється у багатокритеріальній формі.

Реалізація організаційно-технологічних рішень на об'єкті цивільного будівництва обмежена фізичними, часовими та ресурсними бар'єрами. Система обмежень моделі формалізує ці бар'єри у вигляді математичних нерівностей.

Узагальнено система обмежень моделі може бути подана як сукупність технологічних, ресурсних, просторових, логістичних та інформаційних умов.

Технологічна послідовність робіт задається обмеженням [60; 89; 90]:

$$x_j \geq x_i + t_i^{PERT} + \Delta_{ij}, \forall (i,j) \in E \tag{3.14}$$

де E – множина технологічних залежностей між роботами; Δ_{ij} – технологічна або організаційна перерва між завершенням i-ї та початком j-ї операції.

Обмеження ресурсної доступності має вигляд [81; 89; 91]:

$$\sum_{i} \in Iq_i^r \cdot b_{it} \leq A^r(t), \forall_r \in R, t \in T \quad (3.15)$$

де b_{it} – змінна готовності і-ї операції до виконання в момент часу t; $A^r(t)$ – доступний обсяг r-го ресурсу.

Обмеження складської місткості майданчика подається як [50; 63; 85]:

$$\sum^{r} \in Ra^r \cdot V^r(t) \leq V_{max}(t), \forall_t \in T \quad (3.16)$$

де a^r – питомий коефіцієнт зайняття площі або об'єму зберігання для r-го ресурсу; $V^r(t)$ – обсяг r-го ресурсу на майданчику; $V_{max}(t)$ – доступна складська місткість у момент часу t.

Обмеження пропускної здатності логістичних вузлів має вигляд [85; 86; 92]:

$$\sum_{i} \in I \sum^{r} \in R\beta_{in}^r \cdot q_i^r \cdot z_{int} \leq Cap_n(t), \forall_n \in N, t \in T \quad (3.17)$$

де β_{in}^r – коефіцієнт використання *n*-го логістичного вузла при забезпеченні і-ї операції r-м ресурсом; z_{int} – бінарна змінна використання відповідного вузла; $Cap_n(t)$ – пропускна здатність *n*-го вузла в момент часу t.

Окремо доцільно формалізувати умову готовності операції до включення в оперативний план [8; 26; 93]:

$$b_{it} \leq info_{it}$$

$$b_{it} \leq res_{it}$$

$$b_{it} \leq space_{it}$$

$$b_{it} \leq tech_{it}$$

$$b_{it} \geq info_{it} + res_{it} + space_{it} + tech_{it} - 3 \quad (3.18)$$

де $info_{it}$, res_{it}, $space_{it}$, $tech_{it}$ – бінарні змінні інформаційної, ресурсної, просторової та технологічної готовності і-ї операції відповідно.

Ця система нерівностей означає, що операція може бути включена до активного плану лише тоді, коли одночасно виконані всі чотири передумови готовності: наявність актуальної інформації, ресурсів, простору та технологічних умов для виконання роботи [26; 37; 93].

Таблиця 3.1 – Систематизація параметрів та обмежень математичної моделі організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва

Група параметрів	Позначення	Зміст та роль у моделі	Метод врахування факторів
Вартісні	TLC	Сукупні логістичні витрати	Інтегровано через WACC та ризикові надбавки
Часові	t_j, T	Тривалість операцій та проєкту	Оцінка за PERT (імовірнісний підхід)
Просторові	V_{max}	Динамічна місткість майданчика	Залежність від етапу зведення об'єкта
Ресурсні	C_{node}	Пропускна здатність вузлів	Врахування черг та інтенсивності потоків
Надійності	k_{rel}	Коефіцієнт стабільності каналів	Статистична оцінка відхилень

Узагальнена математична постановка задачі вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва має вигляд знаходження вектора X^*, що належить допустимій області Ω, обмеженій наведеними вище нерівностями, та забезпечує оптимальні значення цільових функцій:

$$X^* \in \Omega$$

$$F(X) = \left\{ f_{cost}(X), f_{time}(X), f_{rel}(X), f_{bal}(X) \right\}$$

$$f_{cost}(X) \to min, f_{time}(X) \to min, f_{rel}(X) \to max, f_{bal}(X) \to max \qquad (3.19)$$

Допустима область Ω формується перетином просторових, технологічних та ресурсних обмежень, обмежень пропускної здатності та логічних умов готовності. Особливістю цієї задачі є те, що оптимізація за одним критерієм (наприклад, f_{TLC}) може призводити до погіршення іншого (наприклад, f_{rel} або f_{time}), що характерно для складних будівельних проєктів цивільного призначення [94].

Математична модель не містить детальних описів зовнішніх чинників (інфляція, енергопостачання, кадрові зміни), оскільки їхній вплив уже формалізований у вхідних параметрах: вартості одиниці ресурсу, ймовірнісних оцінках тривалості робіт та коефіцієнтах надійності постачальників. Це дозволяє використовувати модель як універсальний аналітичний інструмент для об'єктів цивільного будівництва різного масштабу та складності.

Для функціонування математичної моделі необхідна безперервна актуалізація даних про стан об'єкта цивільного будівництва. Інформаційні параметри інтегруються в модель через змінні стану, які оновлюються на кожному кроці розрахунку. Це забезпечує динамічність моделі та її здатність до предиктивного реагування на відхилення.

Взаємозв'язок між інформаційною готовністю та логістичним забезпеченням формалізується через логічну умову запуску операції:

$$ready_i = \left(info_i \wedge res_i \wedge space_i \wedge tech_i = 1\right) \quad (3.20)$$

де $info_i, res_i, space_i, tech_i$ – бінарні змінні готовності за інформаційним, ресурсним, просторовим та технологічним напрямами відповідно.

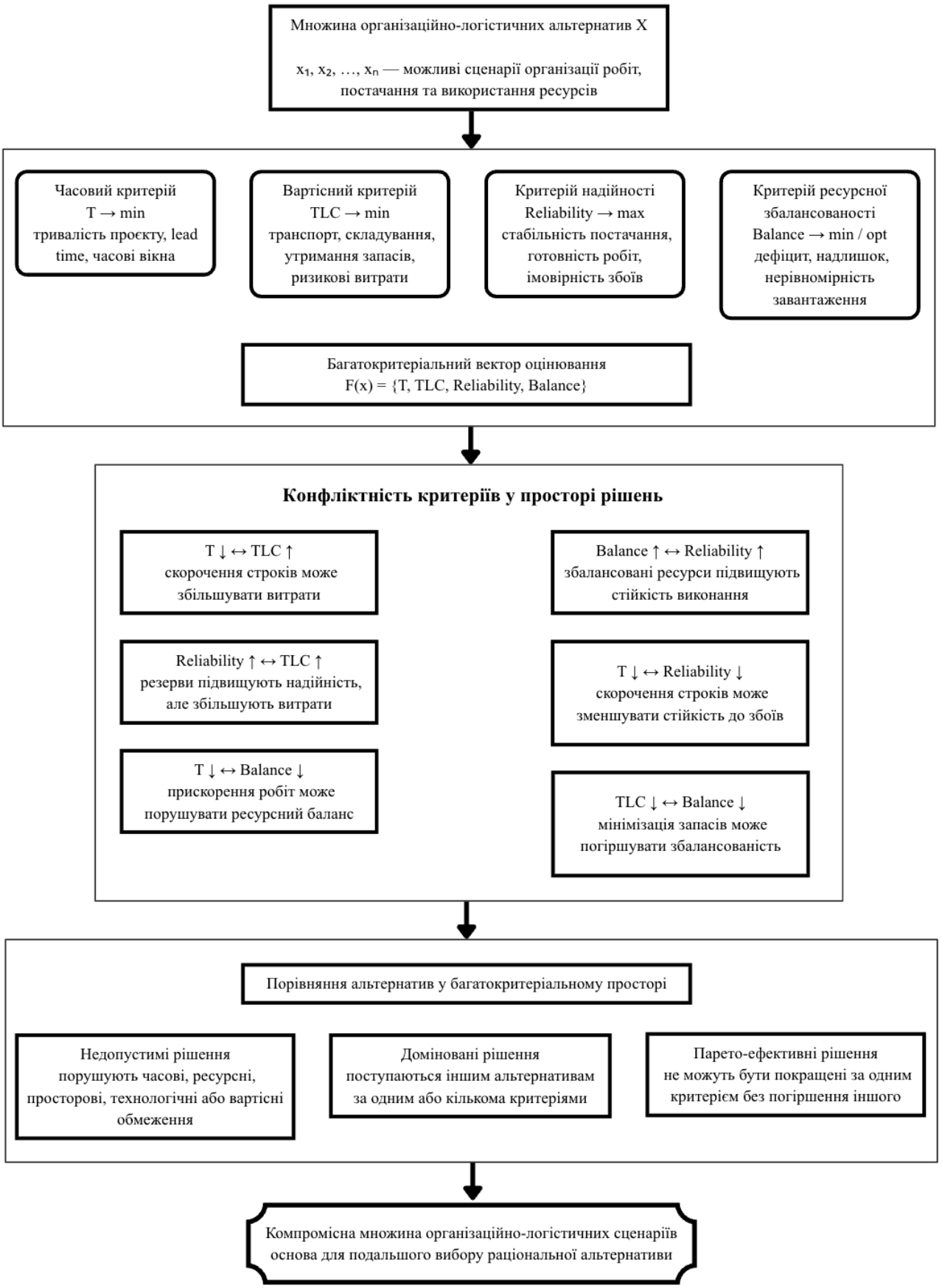


Рисунок 3.2 – Графічна інтерпретація взаємозв'язку критеріїв у просторі рішень

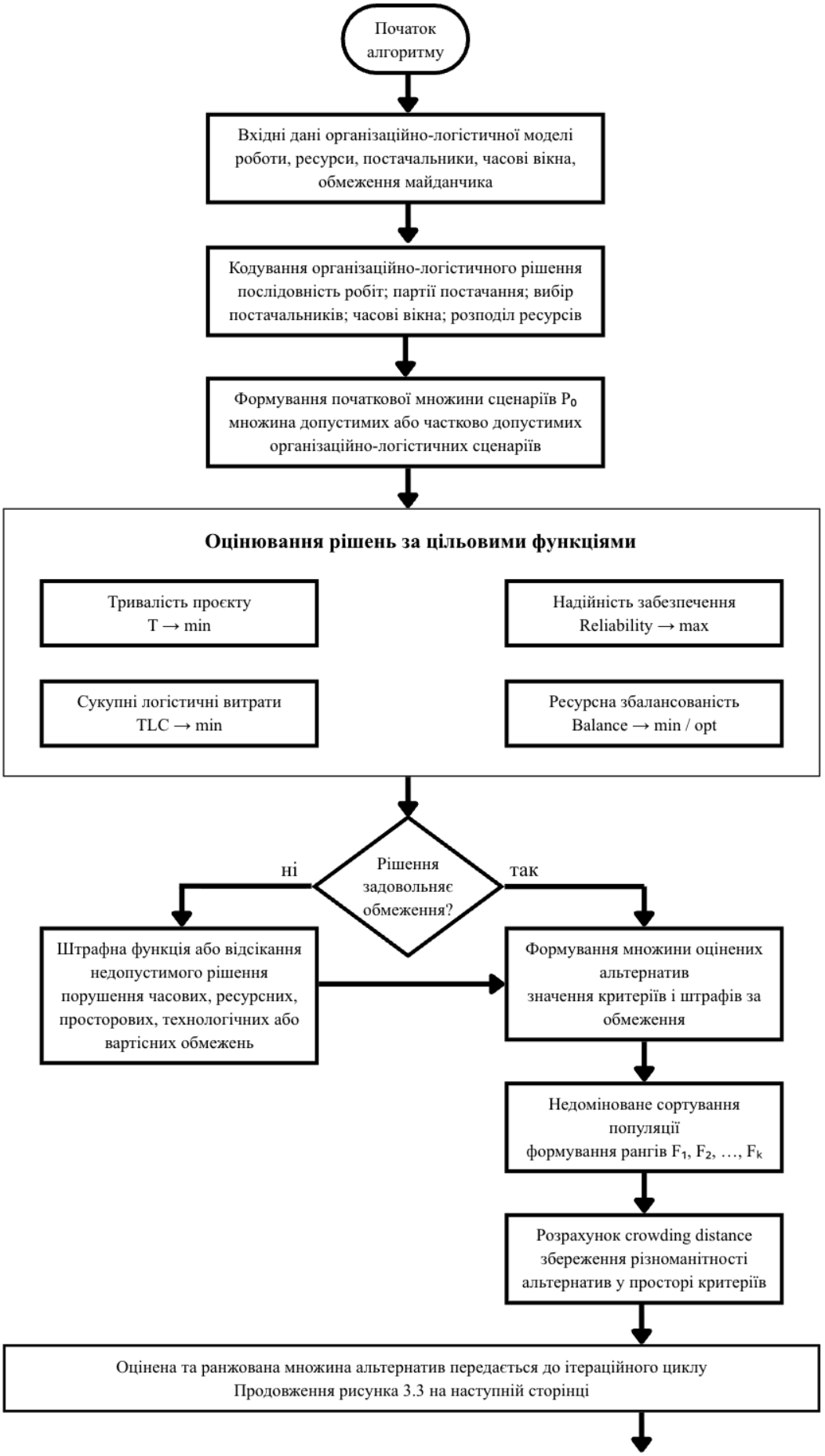
Запропонована постановка створює формальну основу для подальшої алгоритмізації задачі та побудови інструментів підтримки прийняття рішень [70; 71; 95].

3.2. Алгоритмічна оптимізація багатокритеріальних організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві

Після формування математичної моделі необхідно визначити, яким способом вона може бути розв’язана на практиці. У підрозділі 3.1 було сформовано математичну постановку багатокритеріальної задачі оптимізації, яка враховує конфліктність цілей, нелінійність обмежень та стохастичну природу параметрів у сучасних умовах України. Для практичного розв’язання такої задачі потрібен алгоритм, який може працювати з великою кількістю альтернатив, кількома критеріями та складними обмеженнями [96-98]. Класичні детерміновані методи в таких умовах часто втрачають ефективність, оскільки простір можливих рішень швидко зростає зі збільшенням кількості робіт, ресурсів і варіантів постачання [97; 99; 100].

У підрозділі 3.2 розробляється алгоритмічний підхід до розв’язання поставленої задачі на основі адаптованого алгоритму недомінованого сортування другого покоління (NSGA-II) [96; 97]. Такий вибір пояснюється тим, що NSGA-II дає змогу сформувати множину Парето-ефективних рішень [96; 98]. Для будівельного проєкту це важливо, оскільки на практиці рідко існує один універсально найкращий варіант: одне рішення може бути дешевшим, інше – швидшим, а третє – надійнішим [70; 71; 96].

Вибір NSGA-II як базового алгоритмічного підходу ґрунтується на аналізі специфіки задачі, сформованої в підрозділі 3.1. Організаційно-логістичні процеси в цивільному будівництві мають кілька особливостей, через які класичні методи оптимізації не завжди є достатніми.


Початок алгоритму
Вхідні дані організаційно-логістичної моделі роботи, ресурси, постачальники, часові вікна, обмеження майданчика
Кодування організаційно-логістичного рішення послідовність робіт; партії постачання; вибір постачальників; часові вікна; розподіл ресурсів
Формування початкової множини сценаріїв P_0 множина допустимих або частково допустимих організаційно-логістичних сценаріїв
Оцінювання рішень за цільовими функціями
Тривалість проєкту T → min
Надійність забезпечення Reliability → max
Сукупні логістичні витрати TLC → min
Ресурсна збалансованість Balance → min / opt
Рішення задовольняє обмеження?
ні
так
Штрафна функція або відсікання недопустимого рішення порушення часових, ресурсних, просторових, технологічних або вартісних обмежень
Формування множини оцінених альтернатив значення критеріїв і штрафів за обмеження
Недоміноване сортування популяції формування рангів $F_1, F_2, \ldots, F_k$
Розрахунок crowding distance збереження різноманітності альтернатив у просторі критеріїв
Оцінена та ранжована множина альтернатив передається до ітераційного циклу
Продовження рисунка 3.3 на наступній сторінці

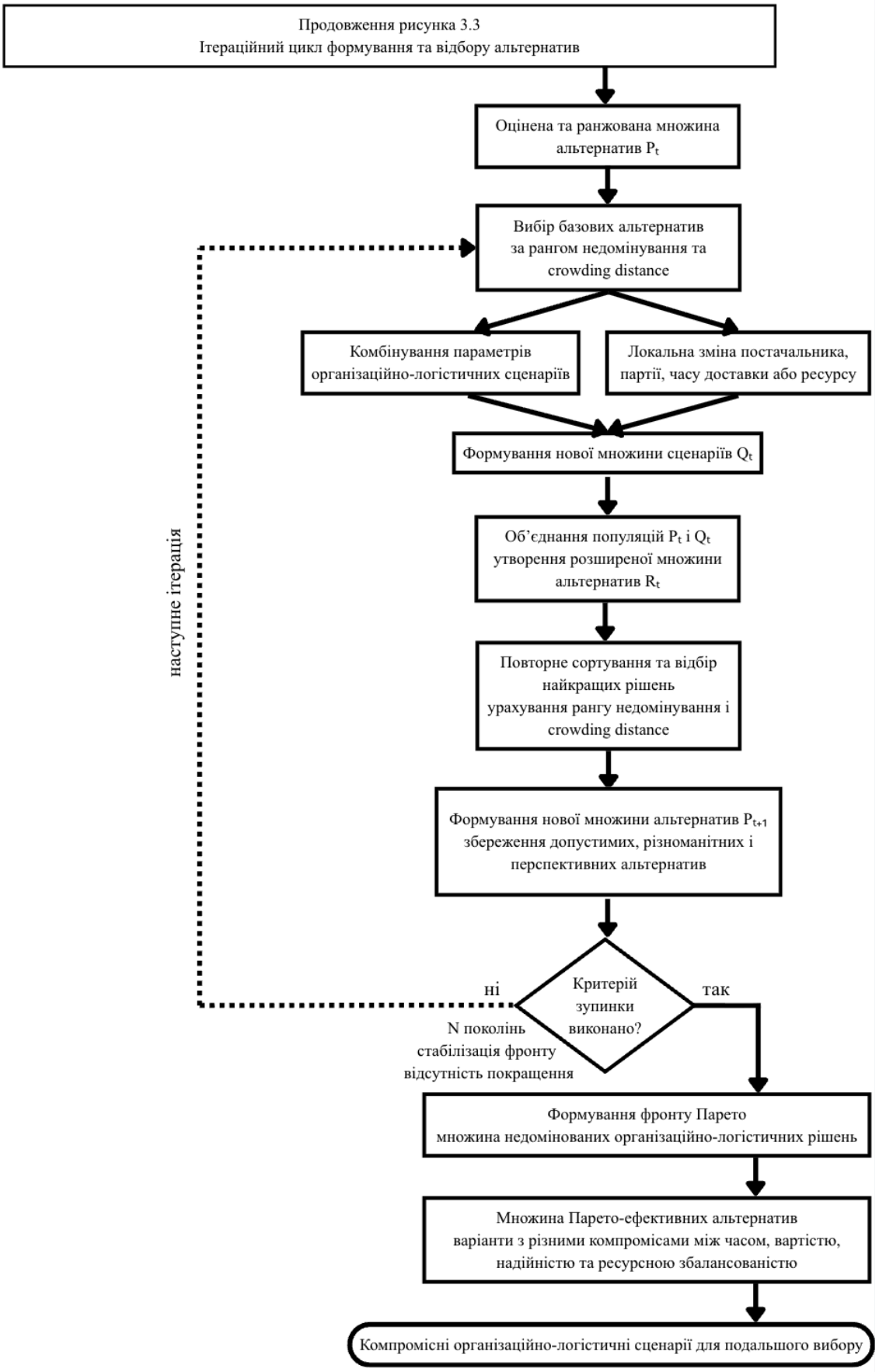


Рисунок 3.3 – Блок-схема адаптованого алгоритму NSGA-II для оптимізації організаційно-логістичних процесів

По-перше, задача є багатокритеріальною за своєю суттю. Необхідність одночасної мінімізації сукупних логістичних витрат (f_{cost}) та тривалості проєкту (f_{time}), за умови максимізації надійності постачань (f_{rel}) та забезпечення ресурсної збалансованості (f_{bal}), створює ситуацію, де поліпшення одного показника майже завжди призводить до погіршення іншого. Традиційні методи згортки критеріїв у єдину адитивну або мультиплікативну функцію є суб'єктивними, оскільки потребують апріорного визначення вагових коефіцієнтів, що в умовах динамічного будівництва є малоефективним.

По-друге, критерії часто суперечать один одному. Наприклад, скорочення тривалості будівництва зазвичай вимагає залучення додаткових транспортних засобів та збільшення інтенсивності роботи підйомних механізмів, що може збільшувати логістичні витрати та створювати просторові конфлікти на майданчику. На відміну від однокритеріальних алгоритмів, NSGA-II зберігає різні типи рішень уздовж фронту Парето. Завдяки цьому особа, що приймає рішення, отримує не один варіант, а кілька сценаріїв із різним співвідношенням часу, вартості та надійності.

По-третє, система обмежень задачі містить нелінійні та дискретні складові. Обмеження складської потужності майданчика (V_{max}) є динамічним і залежить від етапу зведення конструкцій, а часові вікна прибуття ресурсів мають дискретний характер. Класичне лінійне програмування вимагає лінеаризації цих залежностей, що суттєво знижує адекватність моделі. Перевага NSGA-II полягає в тому, що він не потребує спрощення всіх залежностей до лінійного вигляду. Це дає змогу враховувати складні просторові, часові та ресурсні обмеження без суттєвої втрати змісту моделі.

По-четверте, наявність стохастичних параметрів, таких як імовірнісна тривалість робіт за PERT та коефіцієнти надійності постачальників (k_{rel}), вимагає, щоб алгоритм міг працювати з параметрами, які змінюються або мають імовірнісний характер. Механізм елітарності та недомінованого сортування дозволяє зберігати

кращі знайдені рішення і поступово уточнювати множину альтернатив навіть за змінних вхідних параметрів.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика алгоритмічних підходів до багатокритеріальної оптимізації організаційно-логістичних процесів

Характеристика	Стандартний ЕА	Класичне лінійне програмування	Адаптований NSGA-II
Критеріальна основа	Однокритеріальна (агрегація)	Однокритеріальна	Багатокритеріальна (Парето)
Робота з обмеженнями	Відкидання рішень	Суворі лінійні умови	Динамічне штрафування
Тип результату	Одне найкраще рішення	Оптимальна точка	Множина стратегій (фронт)
Обробка стохастики	Обмежена	Потребує лінеаризації	Інтегрована через PERT

Перевага NSGA-II також полягає в його обчислювальній ефективності. Складність алгоритму становить $O\left(M \cdot N^2\right)$, де M – кількість критеріїв, а N – розмір множини альтернатив, що є значним покращенням порівняно з першим поколінням NSGA ($O\left(M \cdot N^3\right)$). Це дає змогу використовувати алгоритм для реальних будівельних об’єктів із сотнями технологічних операцій.

Щоб застосувати NSGA-II до задачі будівельної логістики, необхідно визначити, як саме організаційно-логістичне рішення буде подано в алгоритмі. У межах цього дослідження запропоновано багаторівневе подання рішення, яке дозволяє одночасно враховувати технологічну послідовність робіт, параметри постачання та часові вікна доставки.

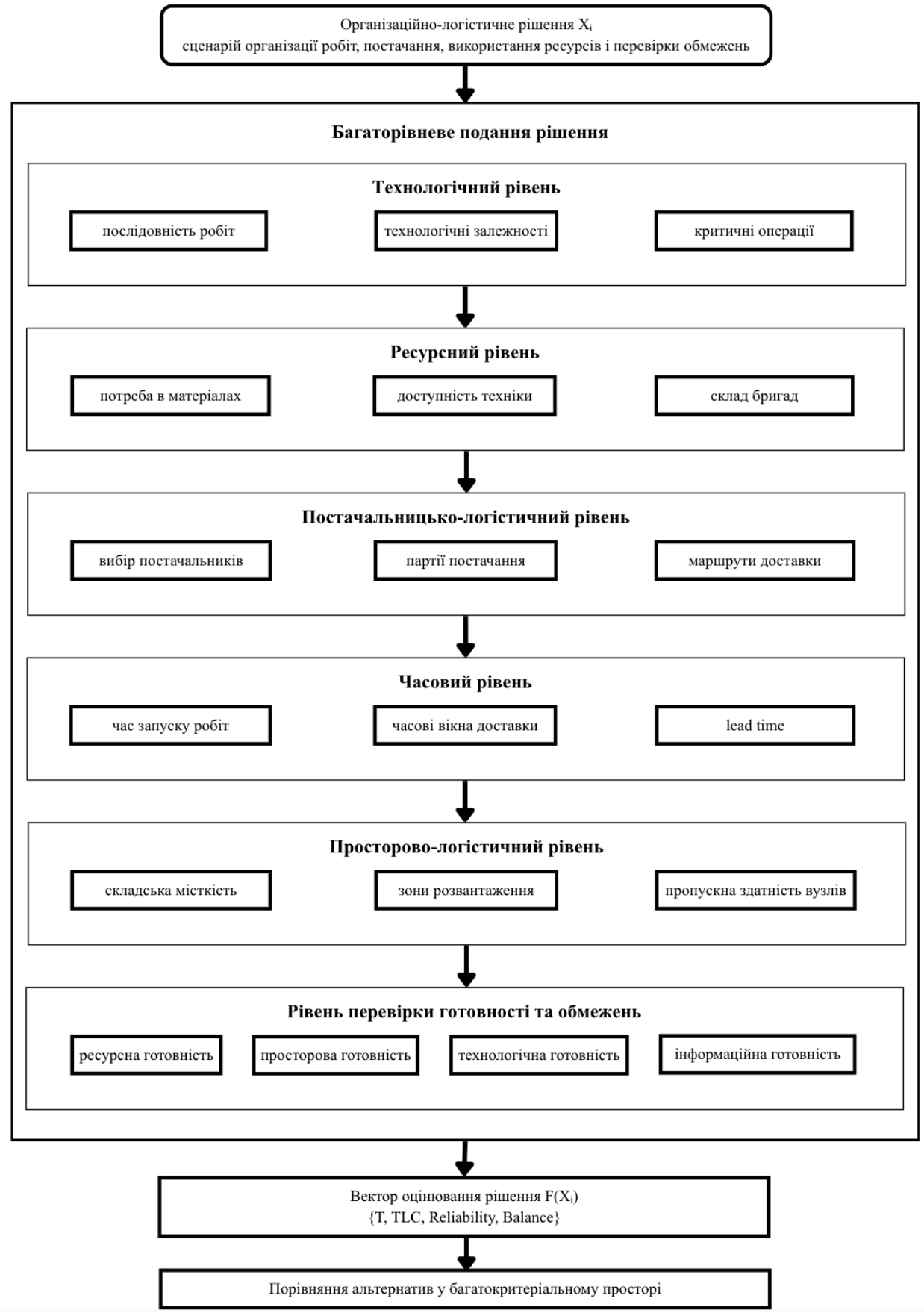


Рисунок 3.4 – Структура багаторівневого подання організаційно-логістичного рішення

Для задач будівництва небажано подавати рішення лише як один нерозділений вектор, оскільки під час комбінування або зміни параметрів можна порушити технологічну послідовність робіт (наприклад, поставити монтаж перекриття раніше зведення стін). Багаторівнева структура дозволяє розділити рішення на логічно пов'язані блоки параметрів, застосовуючи до кожного рівня специфічні правила валідації.

Цей рівень відображає черговість виконання будівельно-монтажних операцій. У моделі цей рівень можна подати як упорядкований перелік робіт. Однак, на відміну від класичної задачі комівояжера, ця перестановка підпорядковується жорстким технологічним залежностям, визначеним у мережевому графіку проєкту. Під час формування та модифікації рішення алгоритм використовує процедуру перевірки допустимості, яка гарантує, що кожна робота в списку з'являється лише після того, як усі її попередники були включені до структури рішення раніше у відповідній послідовності.

Такий підхід забезпечує відповідність алгоритмічного пошуку логіці будівельного процесу. Параметри тривалості для кожної роботи на цьому рівні оцінюються з використанням PERT-аналізу, що дозволяє врахувати можливу варіативність тривалості робіт ще до оцінювання альтернатив.

Другий рівень подання рішення містить інформацію про параметри забезпечення кожної роботи з першого рівня матеріальними ресурсами. Тут кодуються:

- ідентифікатор обраного джерела постачання (постачальника або складу);
- обсяг партії матеріалу;
- коефіцієнт надійності каналу постачання (k_{rel}).

Цей рівень безпосередньо використовується при розрахунку сукупних логістичних витрат (f_{cost}). Він дозволяє алгоритму оцінювати логістичне плече та ризики, пов'язані з проходженням пошкоджених ділянок інфраструктури. В умовах високої облікової ставки НБУ (15,5%) модель має враховувати, що менші партії

можуть зменшувати витрати на запаси, але водночас підвищують вимоги до точності постачання.

Третій рівень визначає конкретні часові інтервали (слоти) прибуття транспортних засобів на майданчик. Ці вікна мають бути синхронізовані з готовністю фронту робіт та вільним часом підйомних механізмів. Кодування часових вікон дозволяє моделі враховувати обмеження пропускної здатності логістичних вузлів (під'їздів, зон розвантаження) та запобігати утворенню черг техніки.

Цей рівень безпосередньо пов'язаний із просторовим обмеженням V_{max}. Якщо вікна доставки призводять до накопичення матеріалів, що перевищує місткість складської зони на певному етапі, рішення отримує штраф [101]. Отже, багаторівневе подання рішення дозволяє розглядати альтернативу не лише як набір числових параметрів, а як узгоджений варіант організації робіт, постачання та використання часу, де кожна зміна в технологічному рівні автоматично потребує перерахунку в ресурсному та часовому блоках параметрів [99-101].

Якість початкової множини альтернатив впливає на те, наскільки швидко алгоритм наблизиться до прийнятного фронту Парето [96; 97; 102]. У запропонованій адаптації NSGA-II доцільно поєднувати випадкове формування альтернатив із простими евристичними правилами, які одразу відсікають явно недопустимі варіанти [99; 100; 103].

Алгоритм формування початкової множини альтернатив включає наступні кроки:

- Евристичне формування початкових рішень: Певна частка множини альтернатив (зазвичай 10–20%) формується на основі класичних методів календарного планування, таких як метод критичного шляху (CPM) та серійна схема генерації розкладів (Serial Schedule Generation Scheme, SSGS) [89; 90; 104]. Це забезпечує наявність у початковій множині альтернатив якісних рішень, які вже на початку пошуку не порушують основну технологічну логіку та мають прийнятні часові характеристики.

- Випадкова генерація з обмеженнями: Решта множини альтернатив генерується випадковим чином, проте з обов'язковою перевіркою технологічної допустимості та залежностей передування. Для кожного рішення послідовність робіт формується крок за кроком: з множини доступних робіт (тих, чиї попередники вже виконані) випадково обирається одна, що гарантує відсутність циклів та порушень логіки зведення об'єкта.
- Ініціалізація ресурсного та часового блоків параметрів: Для кожного обраного постачальника та обсягу партії проводиться перевірка наявності ресурсів. Часові вікна ініціалізуються рівномірно розподіленими значеннями в межах допустимих інтервалів роботи майданчика.
- Початкова перевірка допустимості: ще під час формування стартових альтернатив оцінюється, чи не порушують вони основні часові, ресурсні та просторові обмеження. Це необхідно для того, щоб алгоритм міг почати роботу з динамічними штрафними функціями, поступово зменшуючи частку рішень, які мають суттєві порушення обмежень.

Використання евристик для ініціалізації дозволяє скоротити час пошуку в середньому на 15–25%, оскільки алгоритм починає дослідження з областей, близьких до технологічно реалізовних планів.

Після формування множини альтернатив кожне рішення перетворюється у набір розрахункових показників, за якими визначаються значення чотирьох цільових функцій, визначених у підрозділі 3.1. Цей процес є алгоритмічною основою для подальшого недомінованого сортування.

Функція сукупних логістичних витрат (TLC) обчислюється як сума витрат на транспортування, складування, адміністрування та ризики. Алгоритм використовує дані з другого рівня структури рішення (обсяги партій, постачальники) та множить їх на відповідні тарифні ставки. Особлива увага приділяється компоненту C_{inv}, який розраховується як інтеграл за часом перебування ресурсу на майданчику, що вимагає точної синхронізації з календарними даними першого та третього рівнів подання рішення.

Загальна тривалість проєкту визначається як проміжок часу від початку першої роботи до завершення останньої з урахуванням технологічних і логістичних затримок. Оскільки тривалості окремих операцій (t_e) розраховані за PERT, функція f_{time} повертає очікуване значення, яке враховує імовірнісну природу будівельного процесу. Алгоритм враховує не лише технологічні перерви, а й логістичні лаги, пов'язані з очікуванням прибуття матеріалів [89; 90; 105].

Критерій надійності показує, наскільки ймовірним є своєчасне забезпечення робіт необхідними ресурсами. Він обчислюється як добуток коефіцієнтів безвідмовності обраних каналів постачання (k_{rel}), що містяться в другому рівні подання рішення. Рішення з високою надійністю зазвичай мають більші буфери, що створює конфлікт із вартісним критерієм [27; 29; 97].

Для кожного дискретного моменту часу t алгоритм підраховує сумарну потребу в ресурсах та пропускній здатності вузлів, порівнюючи її з лімітами C_{node}. Значення f_{bal} мінімізує квадратичне відхилення між попитом та пропозицією, що дозволяє зменшувати різкі піки навантаження на техніку, персонал і логістичні вузли.

Основною процедурою NSGA-II є недоміноване сортування, яке розділяє множину альтернатив на кілька ієрархічних фронтів за принципом Парето-домінування [96; 98].

Рішення x_1 вважається таким, що домінує рішення $x_2\left(x_1 \prec x_2\right)$, якщо:

- Значення жодної з цільових функцій для x_1 не є гіршим, ніж для x_2.
- Існує хоча б одна цільова функція, за якою x_1 є строго кращим за x_2.

Усі рішення, які не домінуються жодною іншою альтернативою у множині альтернатив, формують перший фронт Парето (F_1) [70; 71; 96]. Після їх вилучення процедура повторюється для решти альтернатив, формуючи другий фронт (F_2) і так далі. Завдяки цьому під час відбору перевага надається рішенням, які мають кращий баланс між критеріями [96-98].

Щоб рішення не концентрувалися лише в одній частині фронту Парето, використовується показник crowding distance [96; 97]. Він оцінює густину розташування сусідніх рішень у просторі цільових функцій.

Для кожного рішення i у межах одного фронту CD обчислюється як сума нормалізованих відстаней до сусідніх точок за всіма K критеріями:

$$CD_i = \sum_{k=1}^{K} \frac{f_k^{(i+1)} - f_k^{(i-1)}}{f_k^{max} - f_k^{min}} \tag{3.21}$$

$$\overline{F}_k(X) = \left[F_k(X) - F_k min\right] / \left[F_k max - F_k min\right] \tag{3.22}$$

Після нормалізації crowding distance для j-го рішення у межах одного фронту може бути поданий як:

$$CD_j = \sum_{k=1}^{K} \left[\overline{F}_k^{(j+1)} - \overline{F}_k^{(j-1)}\right] \tag{3.23}$$

де K – кількість критеріїв оптимізації; $\overline{F}_k^{(j+1)}$ та $\overline{F}_k^{(j-1)}$ – нормалізовані значення k-ї функції для сусідніх рішень після сортування за відповідним критерієм.

Використання нормалізації є необхідним, оскільки критерії мають різні одиниці виміру: витрати можуть вимірюватися у грошових одиницях, час – у днях, надійність – у безрозмірних імовірнісних показниках, а ресурсна збалансованість – через відхилення навантаження від доступної потужності [96; 97; 102]. Без нормалізації один із критеріїв міг би надмірно впливати на оцінювання різноманітності рішень [96; 97].

Крайні точки фронту отримують значення $CD = \infty$, що гарантує їх збереження для розширення меж пошуку. Важливо, що в адаптованому алгоритмі розрахунок CD проводиться в нормалізованому просторі, оскільки масштаби вартості (мільйони грн) та часу (дні) суттєво різняться. Без нормалізації критерій із більшим числовим масштабом міг би надмірно впливати на оцінювання різноманітності рішень.

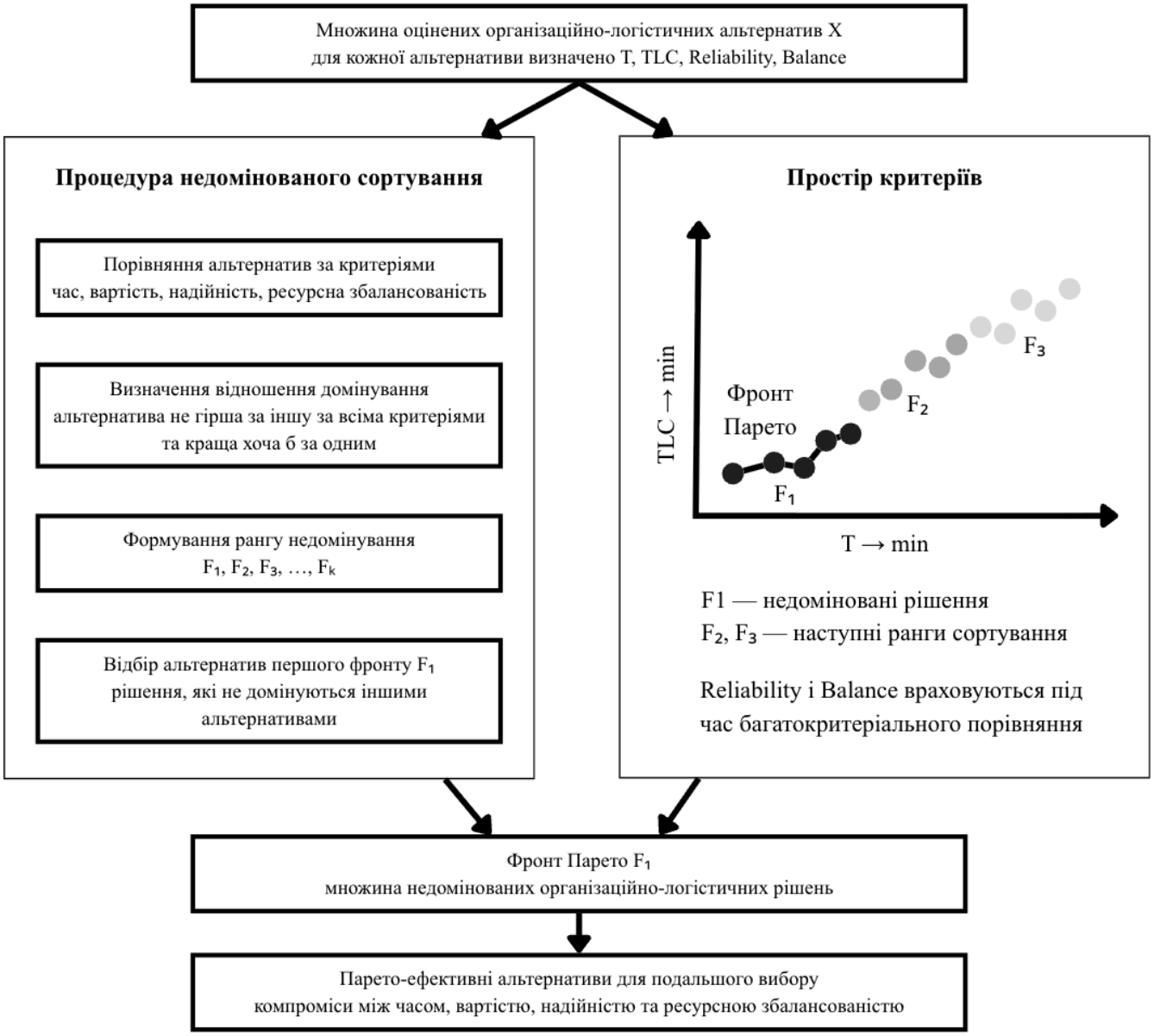


Рисунок 3.5 – Формування фронту Парето-ефективних альтернатив у процесі недомінованого сортування рішень

Для формування нових альтернатив у роботі використовується поєднання SBX-комбінування рішень і гаусової модифікації параметрів з адаптивним кроком [101; 106]. Ці оператори адаптовані для збереження структурної цілісності багаторівневого подання рішення [99; 101; 106].

Стандартне одноточкове комбінування може порушувати узгодженість логістичного плану [99; 101]. Тому для неперервних параметрів, зокрема обсягів партій і часових вікон, використовується SBX-комбінування, яке дозволяє

отримувати нові рішення без різких неконтрольованих змін параметрів. Його головною перевагою є можливість контролювати ступінь відхилення між новими та базовими рішеннями через індекс розподілу η_c.

- При високих значеннях індексу η_c нові рішення формуються близько до базових альтернатив, що сприяє локальному уточненню рішень.
- При нижчих значеннях індексу η_c нові рішення сильніше відрізняються від базових, що допомагає перевіряти віддаленіші ділянки простору альтернатив.

Математично це описується через ймовірнісну функцію розподілу відносного відхилення параметра нового рішення від базового рішення (β):

$$P(\beta) = \begin{cases} 0.5(\eta_c+1)\beta^{n_c}, \text{якщо } \beta \leq 1 \\ 0.5(\eta_c+1)\frac{1}{\beta^{n_c}+2}, \text{якщо } \beta > 1 \end{cases} \quad (3.24)$$

Для технологічного рівня (перестановки робіт) застосовується спеціалізований оператор комбінування рішень для перестановок, який зберігає відношення передування.

Модифікація параметрів потрібна для того, щоб алгоритм не зупинявся надто рано на обмеженій групі схожих рішень. Замість випадкової заміни значень у запропонованому алгоритмі використовується гаусова модифікація параметрів, яка додає до значень параметрів рішення (часових вікон, обсягів) випадкову величину, розподілену за нормальним законом із нульовим очікуванням.

Адаптивність полягає в тому, що крок модифікації параметрів (дисперсія σ) змінюється залежно від динаміки оновлення фронту Парето. Якщо протягом певної кількості ітерацій фронт не покращується, інтенсивність модифікації параметрів автоматично підвищується, що дозволяє продовжити пошук, якщо протягом кількох ітерацій якість рішень майже не змінюється. Це особливо важливо для будівельних задач, де вхідні дані можуть змінюватися через затримки постачання, зміну доступності ресурсів або коригування графіка.

Для врахування жорстких та м’яких обмежень організаційно-логістичної задачі в NSGA-II інтегровано механізм динамічних штрафних функцій. Це дозволяє

не відкидати одразу всі рішення з незначними порушеннями, а поступово посилювати вимоги до їх допустимості в ході роботи алгоритму.

Сутність підходу полягає в коригуванні значень цільових функцій шляхом додавання штрафного доданка $P^{(g)}(x)$, величина якого залежить від номера ітерації g. Для формального врахування порушень обмежень скориговане значення k-ї цільової функції на g-й ітерації алгоритму подамо у вигляді:

$$\overline{F}_k(X, g) = F_k(X) + \lambda(g) \cdot \sum m \in M \, max\left\{0, h_m(X)\right\}^2 \quad (3.25)$$

де $F_k(X)$ – початкове значення k-ї цільової функції; $\overline{F}_k(X, g)$ – скориговане значення функції з урахуванням штрафу; $h_m(X)$ – величина порушення m-го обмеження; M – множина обмежень; $\lambda(g)$ – динамічний коефіцієнт штрафу на g-й ітерації.

Динаміка штрафу може бути задана так:

$$\lambda(g) = \lambda_o \cdot \left(1 + g/G_{max}\right)^y \quad (3.26)$$

де λ_o – початковий коефіцієнт штрафу; G_{max} – максимальна кількість ітерацій алгоритму; y – параметр інтенсивності зростання штрафу.

На початкових ітераціях значення $\lambda(g)$ є відносно невеликим, що дозволяє алгоритму тимчасово зберігати рішення з незначними порушеннями обмежень. У міру наближення до завершення розрахунку штраф зростає, і в підсумковій множині залишаються лише ті альтернативи, які відповідають основним технологічним, просторовим і ресурсним умовам задачі.

Для завершення роботи алгоритму застосовано комбінований критерій зупинки, який враховує обчислювальний бюджет і стабільність отриманих альтернатив.

Комбінований критерій зупинки алгоритму можна подати у вигляді:

$$Stop = \{ \quad (3.27)$$

$$1, \text{ якщо } g \geq G_{max},$$

$$1, \text{ якщо } |HV(g) - HV(g - \Delta g)| \leq \varepsilon HV \text{ протягом } \Delta g \text{ ітерацій},$$

$$1, \text{ якщо } \Delta CD(g) \leq \varepsilon CD,$$

$$0, \text{ в інших випадках}$$

$$\}$$

де g – поточний номер ітерації; G_{max} – максимальна кількість ітерацій; $HV(g)$ – значення показника гіпероб'єму фронту Парето на g-й ітерації; εHV – допустимий поріг зміни гіпероб'єму; $\Delta CD(g)$ – зміна середнього значення crowding distance; εCD – допустимий поріг зміни різноманітності множини альтернатив.

Такий критерій дозволяє завершити алгоритм не лише після досягнення заданої кількості ітерацій, а й тоді, коли подальший пошук майже не змінює якість і різноманітність отриманих Парето-ефективних альтернатив.

Алгоритм припиняє роботу при виконанні однієї з наступних умов:

- Досягнення максимальної кількості ітерацій (g_{max}): Гарантує завершення розрахунку в межах заданого часу, що важливо для оперативного планування.
- Стабілізація фронту Парето: Якщо протягом заданого числа ітерацій (наприклад, 50) медіанне значення гіпероб'єму або показника різноманітності не змінюється більше ніж на заданий $\in$, пошук вважається завершеним.
- Досягнення заданого рівня різноманітності: Якщо фронт Парето рівномірно заповнив простір цілей і подальше збільшення crowding distance не спостерігається.

Такий підхід дозволяє не продовжувати розрахунки тоді, коли подальші ітерації майже не змінюють якість отриманих альтернатив.

Послідовність роботи адаптованого NSGA-II для розв'язання задачі організаційно-логістичної оптимізації можна подати такими кроками.

- Введення вхідних даних: Завантаження параметрів робіт (PERT), ресурсних лімітів, просторових обмежень майданчика та даних про постачальників.

- Формування початкової множини альтернатив P_o:
  - Генерація евристично допустимих рішень за SSGS (20% множини альтернатив).
  - Випадкова генерація решти альтернатив із дотриманням технологічних залежностей робіт.
- Оцінювання множини альтернатив:
  - Декодування багаторівневих подань рішень.
  - Обчислення цільових функцій $\{f_{cost}, f_{time}, f_{rel}, f_{bal}\}$.
  - Перевірка обмежень і розрахунок порушень $q_j(x)$.
- Створення нових альтернатив Q_g:
  - Відбір базових рішень за допомогою бінарного турніру на основі рангу та crowding distance.
  - Застосування SBX-комбінування рішень для кожного рівня подання рішення.
  - Застосування адаптивної гаусової модифікації параметрів.
- Формування об'єднаної множини альтернатив $R_g = P_g \cup Q_g$ (розмір 2N).
- Недоміноване сортування R_g:
  - Розподіл рішень за фронтами Парето $\{F_1, F_2, \ldots, F_n\}$.
  - Застосування динамічних штрафів до значень функцій альтернатив, що порушують обмеження.
- Обчислення crowding distance для рішень у кожному фронті.
- Формування оновленої множини альтернатив P_{g+1}: Відбір найкращих N рішень із фронтів (починаючи з F_1) із пріоритетом за найбільшим CD у межах останнього включеного фронту.
- Перевірка критерію зупинки: Якщо умови виконані – перехід до кроку 10, інакше – повернення до кроку 4.

- Виведення результатів: Отримання множини Парето-ефективних організаційно-логістичних стратегій.

На виході алгоритм формує множину недомінованих рішень, кожне з яких відповідає певному варіанту організації робіт і постачання. Для менеджера це означає можливість порівняти кілька сценаріїв: дешевший, швидший, надійніший або більш збалансований.

Таблиця 3.3 – Типологія Парето-ефективних стратегій організаційно-логістичного управління будівельним проєктом

Тип стратегії на фронті	Пріоритетний критерій	Характеристика рішення
Економічна	Мінімізація TLC	Збільшені партії, використання дешевших каналів, мінімальні запаси (JIT)
Швидкісна	Мінімізація Time	Скорочення логістичних пауз, використання експрес-поставок, максимальна інтенсивність робіт
Консервативна	Максимізація Reliability	Створення страхових буферів (Just-in-Case), вибір найбільш надійних постачальників
Збалансована	Мінімізація $f_4(X)$	Стабільний ритм постачань, рівномірне завантаження підйомних механізмів та зон розвантаження

Важливо, що алгоритм не нав’язує одне остаточне рішення. Для вибору конкретної альтернативи з отриманого фронту Парето можуть застосовуватися додаткові методи підтримки прийняття рішень (DSS), такі як AHP або TOPSIS. У цій роботі AHP і TOPSIS розглядаються як додатковий етап підтримки вибору після формування Парето-множини. Детальніше ця логіка розкривається в підрозділі 3.3.

У підрозділі 3.2 запропоновано алгоритмічний підхід до розв’язання багатокритеріальної задачі організаційно-логістичної оптимізації на основі NSGA-II. Його адаптація до задачі будівельної логістики полягає насамперед у

багаторівневому поданні рішення, де разом враховуються технологічна послідовність робіт, параметри постачання та часові вікна доставки.

Використання SBX-комбінування та адаптивної гаусової модифікації параметрів дозволяє алгоритму одночасно перевіряти нові варіанти рішень і уточнювати вже знайдені альтернативи. Впровадження механізму динамічних штрафних функцій забезпечує коректне врахування складних просторових та часових обмежень будівельного майданчика, характерних для сучасних умов функціонування галузі в Україні [101; 103].

Алгоритм формує множину Парето-ефективних альтернатив, з якої надалі може бути обрано рекомендовану стратегію з урахуванням пріоритетів проєкту. Така послідовність розрахунку забезпечує перехід від математичної моделі до програмного інструменту, здатного перевіряти обмеження, оцінювати альтернативи та підтримувати вибір організаційно-логістичного сценарію.

3.3. Архітектура та логіка функціонування програмного модуля оптимізації організаційно-логістичних рішень

Для практичного використання запропонованої моделі необхідний програмний модуль, який поєднує роботу з вихідними даними, перевірку технологічних і логістичних обмежень, розрахунок цільових показників та формування допустимих альтернатив. У такому вигляді модель може бути інтегрована в інформаційну систему будівельного підприємства й використовуватися для підтримки управлінських рішень на основі актуальних даних будівельного майданчика [107-111].

Практична реалізація модуля спрямована на подолання розриву між статичними календарними графіками та динамічним середовищем реалізації проєктів, що особливо актуально для умов 2024–2025 років в Україні [107; 108; 112]. З огляду на високу вартість обігових коштів, дефіцит кадрів і нестабільність

постачань, програмний модуль має допомагати оцінювати різні сценарії організації потоків і вибирати ті, що зменшують логістичні втрати без порушення готовності робіт. Основна увага приділена структурі модуля, руху даних між його складовими та процедурі формування альтернатив для подальшого вибору [109; 110].

Програмний модуль призначений для підтримки планування та оперативного коригування матеріально-технічного забезпечення будівельних об'єктів [111; 112]. Його основна функція полягає у порівнянні можливих параметрів постачання, складування та подачі ресурсів на фронти робіт. Це дає змогу обрати варіант, який підтримує неперервність робіт і не створює зайвих логістичних витрат (TLC).

У межах загальної організаційної системи управління будівництвом модуль виконує роль інструменту підтримки оперативного коригування логістичних рішень. Він не замінює ERP-системи чи засоби календарного планування, а доповнює їх як окремий аналітичний модуль. Модуль оновлює параметри моделі за фактичними даними з майданчика і дозволяє порівнювати кілька сценаріїв дій у разі відхилень від плану.

Ключовими функціональними завданнями програмного модуля є:

- Синхронізація графіків поставок із фактичною готовністю фронтів робіт за принципом "поставка за потребою" [8; 26; 107].
- Динамічне управління просторовими обмеженнями майданчика шляхом розрахунку оптимальних обсягів запасів, що не перевищують складську потужність V_{max} [63; 112].
- Оцінювання надійності логістичних каналів та прогнозування часових затримок на основі імовірнісних оцінок тривалості операцій [59; 61; 111].
- Підтримка вибору оптимальної стратегії управління з множини Парето-ефективних альтернатив на основі заданих пріоритетів замовника [75; 76; 113].

Використання модуля дозволяє трансформувати організаційну логіку від реагування на дефіцит до проактивного управління обмеженнями [111; 112]. Це досягається через постійну перевірку готовності завдань до виконання: наявності

ресурсів, доступного фронту робіт, погодженої документації та відсутності логістичних перешкод перед включенням роботи в оперативний план [8; 25; 26].

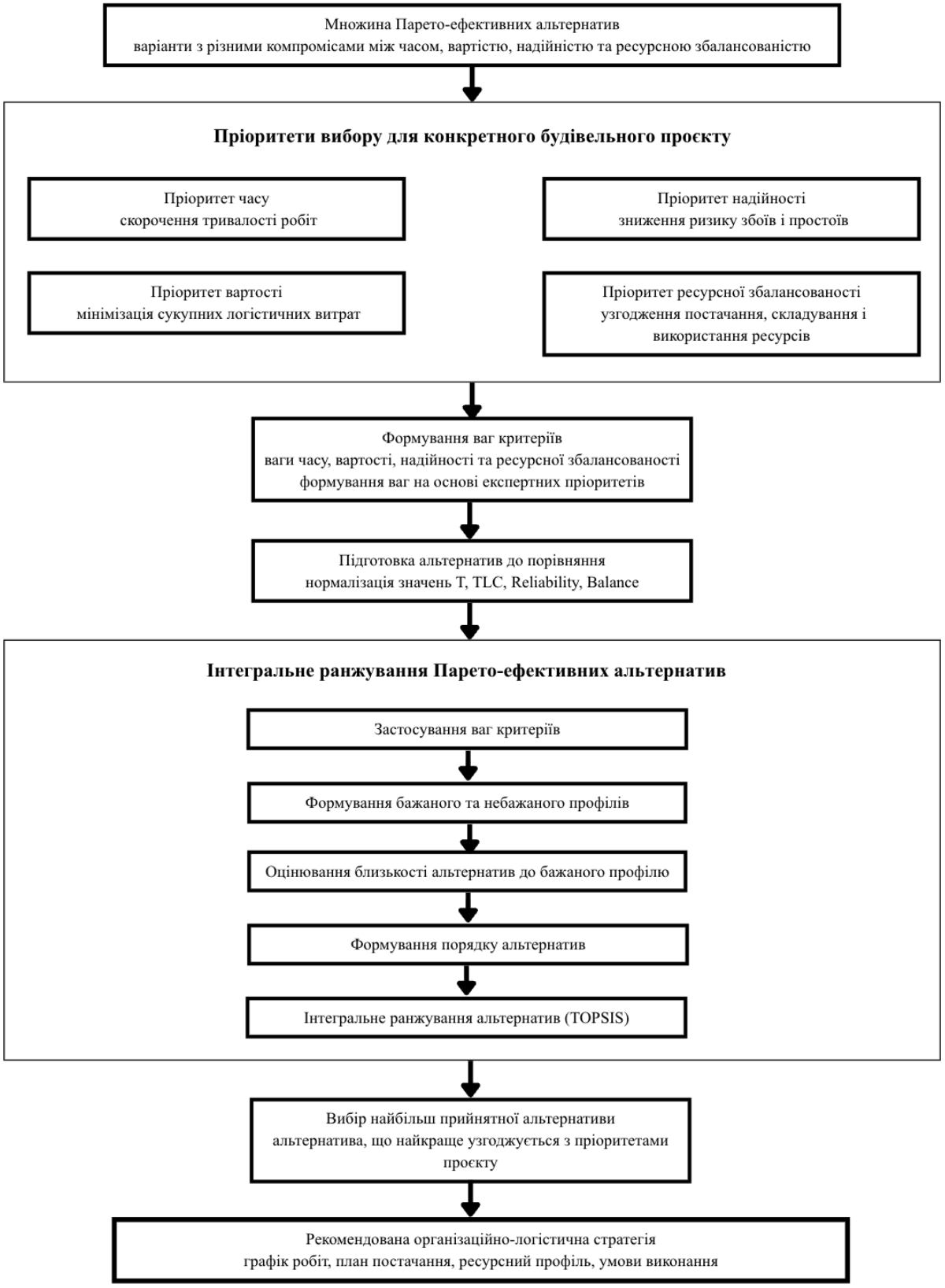
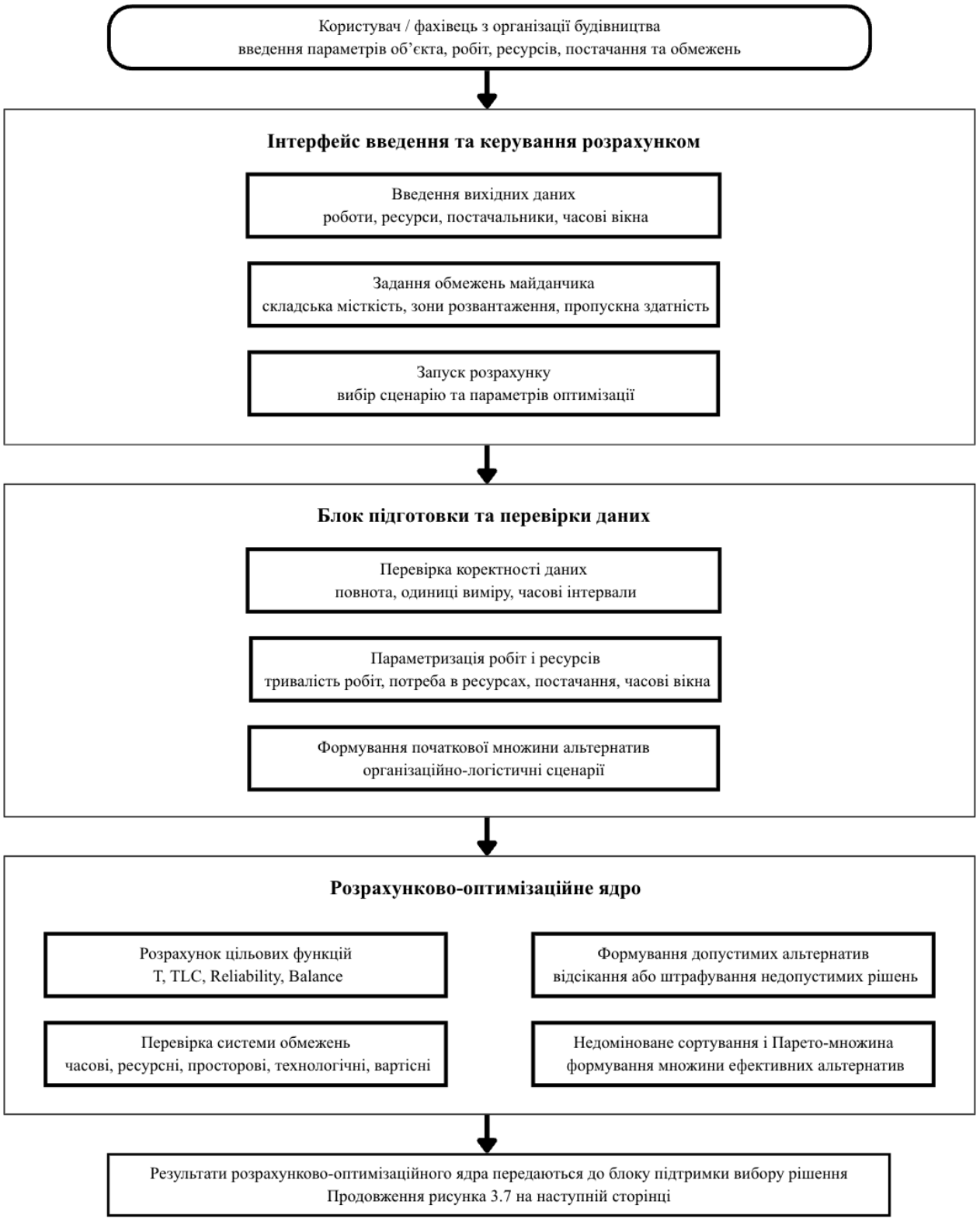


Рисунок 3.6 – Логіка вибору рекомендованої стратегії з множини Парето-ефективних альтернатив

Архітектура програмного модуля має кілька рівнів, які послідовно охоплюють отримання даних, їх перевірку, параметризацію, оптимізаційний розрахунок, підтримку вибору та подання результатів користувачу [107; 109; 110].

На рисунку 3.7 представлена узагальнена архітектура програмного модуля, що демонструє взаємодію основних компонентів [109; 114].



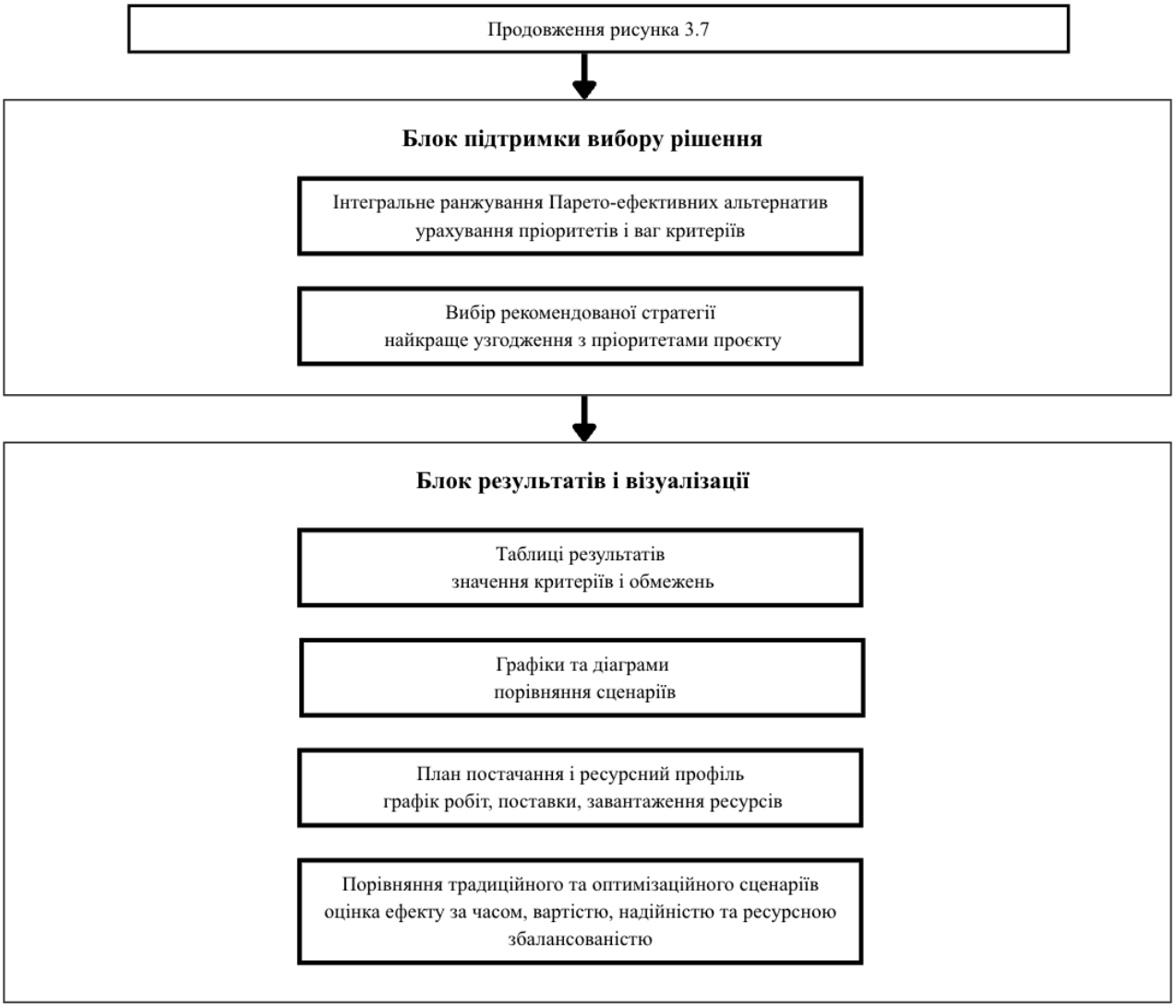


Рисунок 3.7 – Архітектура програмного модуля оптимізації організаційно-логістичних рішень

Рисунок 3.7 відображає вертикально організовану архітектуру програмного модуля, у якій дані з BIM, CDE, IoT та ERP послідовно проходять етапи інтеграції, валідації, параметризації, математичного аналізу та багатокритеріальної оптимізації, після чого результати трансформуються у рекомендовані управлінські сценарії.

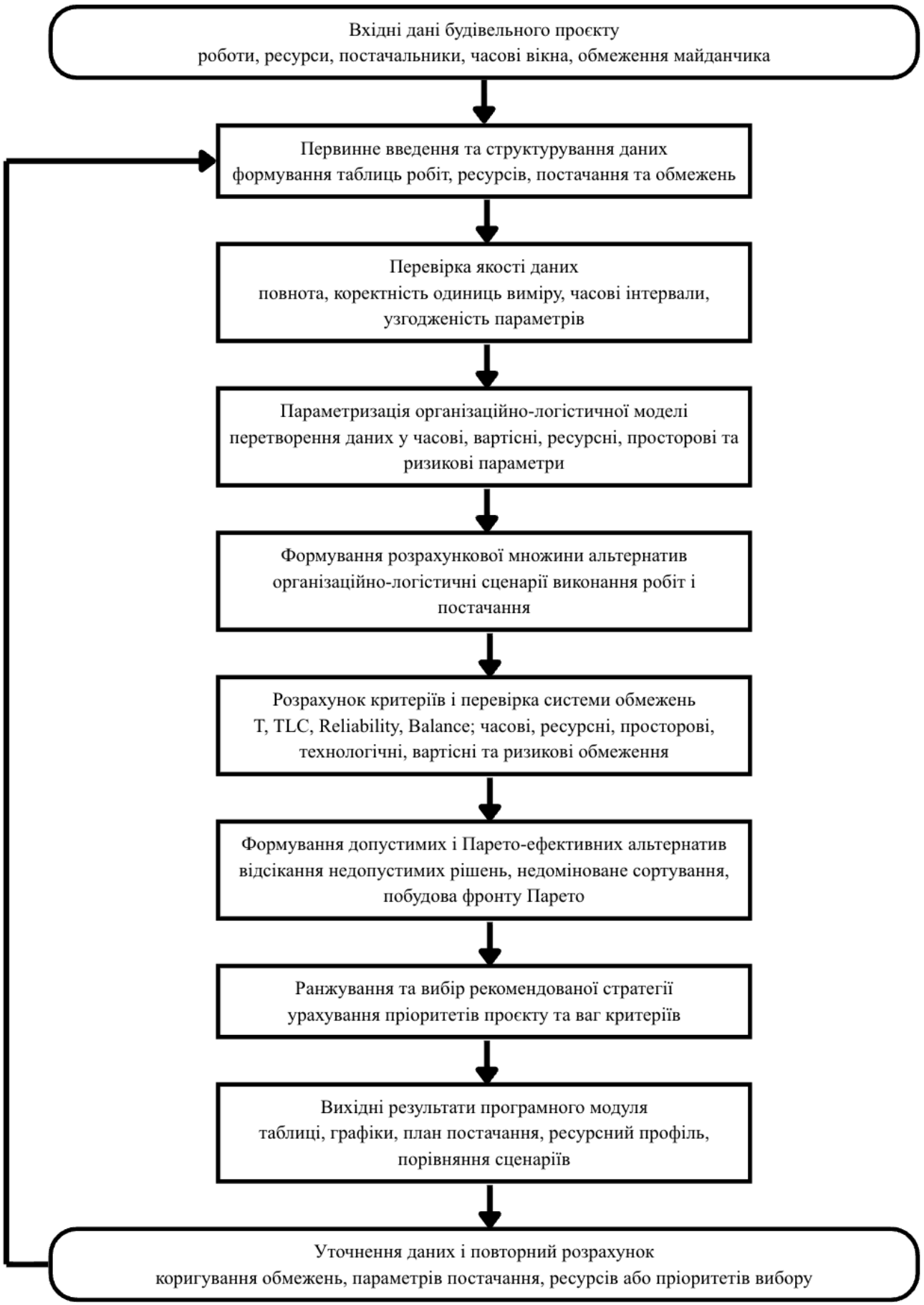


Рисунок 3.8 – Життєвий цикл даних у програмному модулі оптимізації

Рисунок 3.8 деталізує життєвий цикл даних у межах програмного модуля. На відміну від статичної схеми архітектури, він показує повторюваний характер роботи системи: після виконання рішення фактичні дані повертаються до вхідного контуру, уточнюють параметри моделі та можуть ініціювати повторний оптимізаційний розрахунок.

Опис рівнів архітектури модуля:

- Рівень інтеграції та збору даних забезпечує взаємодію із зовнішніми джерелами інформації. Модуль отримує геометричні дані з BIM-моделей у форматі IFC, статуси проєктної документації із середовища спільних даних CDE, фактичні координати ресурсів із систем GPS/RFID та вартісні показники з ERP-систем.
- Рівень обробки та валідації відповідає за очищення вхідних даних, їх структурування та перевірку на узгодженість. На цьому рівні об’єкти BIM пов’язуються з логістичними одиницями, а також розраховуються імовірнісні характеристики операцій за методом PERT.
- Аналітичний рівень є розрахунковим ядром модуля. На цьому рівні за допомогою алгоритму NSGA-II формується множина організаційно-логістичних альтернатив, які перевіряються за технологічними, просторовими та ресурсними обмеженнями.
- Рівень підтримки рішень забезпечує ранжування отриманих альтернатив за допомогою методів AHP та TOPSIS. На цьому рівні результати оптимізації подаються у практичній формі: рейтинг стратегій, графіки часових слотів, перелік обмежень і короткострокові плани робіт.
- Інтерфейсний рівень забезпечує подання результатів користувачам: дашборди, повідомлення для постачальників, короткі звіти для менеджера проєкту та оперативні завдання для виконавців на майданчику.

Така структура дає змогу відокремити розрахункову логіку модуля від конкретних джерел даних. Завдяки цьому модуль легше адаптувати, якщо на підприємстві змінюється програмне забезпечення або спосіб обліку даних.

Для роботи модуля потрібні два типи даних: проєктні дані, які змінюються рідко, та оперативні дані, що відображають поточний стан майданчика. Поділ даних за джерелами допомагає зрозуміти, які саме параметри вони уточнюють у моделі.

У таблиці 3.4 наведено структуру вхідних даних програмного модуля, що використовуються для розрахунку організаційно-логістичних рішень.

Таблиця 3.4 – Структура вхідних даних програмного модуля

Тип даних	Джерело	Функція в модулі	Етап використання
Геометрія та обсяги робіт	BIM-модель (IFC)	Розрахунок потреби в матеріалах, визначення площ складування	Планування, розрахунок потреби
Технологічні залежності	Календарний план (CDE)	Побудова мережевої моделі, визначення "вікон потреби"	Моделювання послідовності
Координати та статус ТМЦ	IoT (GPS/RFID)	Уточнення часу доставки, фіксація фактів доставки	Оперативний моніторинг
Вартісні параметри та ставки	ERP-система	Розрахунок транспортних витрат та вартості капіталу (WACC)	Оптимізація TLC
Пропускна здатність вузлів	Технічні паспорти, сенсори	Встановлення обмежень C_{node} для техніки та розвантаження	Розрахунок обмежень
Показники надійності	Статистична база модуля	Оцінка ймовірності збоїв постачальників	Оцінка ризиків

Проєктні дані можуть надходити з IFC-файлів BIM-моделі. Модуль може визначати елементи моделі, наприклад балки або плити, зчитувати їхні основні характеристики – об’єм, масу, матеріал – і пов’язувати ці дані з відповідними роботами календарного графіка. Завдяки цьому параметри моделі можуть оновлюватися на основі фактичних змін у проєкті.

Дані IoT забезпечують прозорість ланцюга постачання. GPS-дані дозволяють уточнювати очікуваний час прибуття ресурсів і враховувати можливі затримки доставки, що є вхідним параметром для динамічного переобчислення оптимального плану в разі заторів або поломок транспорту. Ринкові та фінансові дані, такі як актуальні тарифи на перевезення та ставки залучення обігових коштів, дозволяють порівнювати стратегії частих поставок малими партіями зі стратегіями створення страхових запасів.

Блок обробки та валідації перевіряє, чи можна використовувати отримані дані в математичній моделі. Обробка включає виявлення неточних або дубльованих записів, узгодження даних за часом і перевірку статусів готовності робіт.

Однією з основних процедур цього блоку є перевірка готовності завдань до виконання. Система автоматично перевіряє виконання сукупності обмежень для кожної запланованої операції:

- Інформаційна готовність: Наявність затверджених робочих креслень та специфікацій у CDE.
- Ресурсна готовність: підтвердження наявності матеріалів на складі або очікуваного прибуття до моменту початку роботи.
- Технологічна готовність: Факт завершення всіх попередніх робіт за мережевим графіком.
- Просторова готовність: Наявність вільного фронту робіт та вільних маршрутів подачі ресурсів, що перевіряється через 4D-моделювання.

Якщо всі передумови виконані, робота може бути включена до переліку активних завдань для оптимізаційного розрахунку. Такий підхід допомагає оновлювати параметри моделі та не включати до розрахунку роботи, які наразі не готові до виконання.

Блок обробки також виконує розрахунок математичного очікування тривалості операцій t_e за формулою PERT, використовуючи три вхідні оцінки часу (оптимістичну, найбільш імовірну та песимістичну) [59; 61; 115]. Це дозволяє модулю оперувати не детермінованими, а імовірнісними величинами, що значно підвищує надійність планів у змінному середовищі будівництва [87; 115; 117].

Блок оптимізації виконує основні розрахунки модуля на основі адаптованого алгоритму NSGA-II для розв'язання багатокритеріальної задачі, сформульованої у підрозділі 3.1 [96; 97; 115]. На цьому рівні програмний модуль використовує цільові функції $f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X)$, а також систему обмежень технологічної послідовності, ресурсної доступності, складської місткості, пропускної здатності логістичних вузлів і готовності робіт. Таким чином, програмна реалізація безпосередньо спирається на математичну постановку задачі, а не виконує лише імітаційне порівняння сценаріїв [83; 84; 108]. Логіка блоку спрямована на пошук Парето-ефективних рішень, що мінімізують сукупні логістичні витрати та тривалість проєкту за умови максимізації надійності [70; 71; 96].

Процес оптимізації базується на багаторівневій структурі подання рішення, яка забезпечує цілісність організаційно-логістичного рішення:

- Технологічний рівень: Послідовність виконання робіт, що відповідає мережевим залежностям.
- Ресурсно-постачальний рівень: Обсяги партій та вибір постачальників для кожної операції.
- Часовий рівень: Конкретні часові слоти прибуття транспорту та роботи розвантажувальних механізмів.

Блок оптимізації дозволяє заздалегідь оцінювати можливі наслідки різних сценаріїв. Він не лише розраховує графік, а й дає змогу порівняти, як зміниться рішення у разі затримки поставки, зміни доступності ресурсу або перевантаження майданчика. Математично це виражається через розрахунок цільової функції сукупних логістичних витрат (TLC):

$$f_{TLC} = \sum_{i=1}^{n} \left(C_{tr,i} + C_{inv,i} + C_{ord,i} + C_{risk,i} \right) \rightarrow min \quad (3.28)$$

де $C_{tr,i}$ – транспортні витрати; $C_{inv,i}$ – витрати на утримання запасів; $C_{ord,i}$ – адміністративні витрати; $C_{risk,i}$ – математичне очікування втрат від ризиків.

Важливою функцією блоку є врахування динамічного обмеження складської потужності майданчика $V_{max}(r)$. Якщо в певний момент часу сумарний обсяг запасів перевищує доступну площу, алгоритм застосовує динамічні штрафи, через що перевага надається рішенням із меншими партіями, іншими часовими вікнами або прямою подачею матеріалів у зону монтажу. Таким чином, параметри моделі можуть уточнюватися відповідно до фактичної конфігурації майданчика на різних етапах зведення об’єкта.

Оскільки результатом роботи блоку оптимізації є множина недомінованих рішень (фронт Парето), виникає потреба в інструменті для вибору єдиної стратегії, найбільш придатної для поточної ситуації. Блок підтримки рішень (DSS) реалізує цей вибір за допомогою комбінації методів AHP та TOPSIS, що подаються як аналітична надбудова модуля.

Логіка роботи блоку підтримки прийняття рішень (DSS):

- Метод визначення ваг критеріїв (AHP): Використовується для встановлення відносної важливості часу, вартості та надійності. Менеджер проєкту через попарні порівняння визначає пріоритети. Наприклад, на критичному шляху вага надійності може бути підвищена, що змусить систему надати перевагу стратегіям із більшими страховими запасами.
- Метод ранжування Парето-альтернатив (TOPSIS): Використовується для математичного ранжування рішень із фронту Парето. Метод обчислює відстань кожної альтернативи до ідеального (найкращі показники за всіма критеріями) та антиідеального рішень. Альтернатива з найвищим коефіцієнтом близькості рекомендується до виконання.

У підрозділі 3.3 ці методи подані як інструменти об’єктивного вибору, що дозволяють усунути суб’єктивізм при прийнятті складних організаційних рішень.

Блок DSS забезпечує перетворення множини складних математичних результатів у конкретний рейтинг стратегій, де менеджер бачить кількісні оцінки ефективності кожного варіанта. Це дозволяє використовувати модуль як інструмент підтримки оперативного коригування логістичних рішень, надаючи обґрунтовані рекомендації щодо маневрування ресурсами.

Фінальний блок модуля відповідає за формування вихідних документів та передачу даних до суміжних систем управління підприємством. Вихідні результати модуля мають прикладний характер і орієнтовані на безпосереднє використання лінійним персоналом та логістичними службами.

До складу вихідних результатів модуля входять:

- Оперативний логістичний план: Графік часових слотів для розвантажувальних зон, що дозволяє уникнути заторів на майданчику.
- Look-ahead звіти: Прогнози потреби та готовності ресурсів на період від 1 до 4 тижнів, що базуються на Make-ready аналізі.
- Дашборди KPI: Візуалізація поточного стану логістичних витрат, ритмічності поставок та рівня запасів у реальному часі.
- Командні інтерфейси: Автоматично згенеровані завдання для ERP-системи (замовлення постачальникам) та повідомлення для водіїв і машиністів кранів.

Програмний модуль забезпечує високу інтеграцію з BIM та CDE середовищами. Кожне прийняте рішення автоматично оновлює атрибутивні дані в цифровій моделі, що дозволяє підтримувати актуальність "цифрового двійника" об’єкта. Важливим аспектом є функціональна конкретика: система не просто "адаптується", а забезпечує оновлення параметрів моделі на основі фактичних даних про хід робіт, що дозволяє проводити переобчислення оптимального плану протягом декількох хвилин після отримання інформації про збій.

Логіка функціонування модуля замикає цикл управління будівництвом, забезпечуючи перехід від планової моделі до інструменту підтримки виконання робіт [107; 109; 111]. Розроблений модуль створює інструментальну основу для розрахункової апробації запропонованої моделі та алгоритму на об’єкті цивільного

будівництва. Це дає змогу оцінити практичну придатність запропонованих рішень та їх вплив на узгодженість, надійність і ресурсну збалансованість будівельного процесу.

У третьому розділі виконано комплекс робіт із математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення логістизації організаційних процесів. Сформовано математичну модель багатокритеріальної оптимізації, яка враховує конфліктність цілей часу, вартості (TLC) та надійності, а також враховує динамічні обмеження складської та пропускної здатності будівельного майданчика.

Розроблено адаптований генетичний алгоритм NSGA-II, що використовує багаторівневу структуру подання рішення для збереження цілісності технологічних та логістичних параметрів рішень. Описана архітектура програмного модуля забезпечує інструментальну реалізацію запропонованих підходів через інтеграцію з сучасними цифровими інструментами (BIM, CDE, IoT, ERP) [25; 33; 43; 118; 119]. Блок обробки та валідації на основі "Make-ready" логіки гарантує достовірність даних, а використання методів AHP та TOPSIS забезпечує об’єктивну підтримку вибору оптимальних альтернатив [26; 69; 76; 113].

Розроблений програмний модуль дозволяє відійти від футуристичних концепцій на користь функціональної конкретики, забезпечуючи оновлення параметрів моделі на основі фактичних даних та виступаючи інструментом підтримки оперативного коригування логістичних рішень [108; 111; 112]. Сформований інструментарій створює передумови для практичного впровадження результатів дослідження, апробація яких на прикладі реального об’єкта цивільного будівництва складає зміст наступного розділу роботи.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано перехід від аналітичної основи, сформованої у другому розділі, до математичної, алгоритмічної та програмної реалізації підходу до оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. Якщо у попередньому розділі було визначено фактори, параметри та критерії, то в цьому розділі ці елементи подано як складові багатокритеріальної задачі, що може бути розв'язана за допомогою відповідного алгоритмічного інструментарію.

Сформовано математичну постановку задачі, у якій будівельний процес розглядається як система взаємопов'язаних робіт, ресурсів, постачань, часових інтервалів, просторових обмежень і ризиків. Для цієї задачі важливо не просто описати вплив зовнішніх і внутрішніх факторів, а перевести його у змінні, параметри, обмеження та цільові функції. Саме тому в моделі враховано обсяги робіт, потребу в ресурсах, характеристики постачальників, логістичні маршрути, місткість майданчика, пропускну здатність логістичних вузлів, часові параметри та показники надійності.

У межах математичної моделі визначено чотири основні напрями оптимізації: зменшення сукупних логістичних витрат, скорочення тривалості проєкту, підвищення надійності ресурсного забезпечення та зменшення ресурсної незбалансованості. Ці напрями не можуть бути зведені до одного простого показника, оскільки між ними існують природні суперечності. Наприклад, прискорення виконання робіт часто потребує додаткових витрат, підвищення надійності пов'язане з резервуванням ресурсів, а зменшення запасів може погіршити стійкість постачання. Тому в роботі прийнято багатокритеріальну постановку, яка дозволяє не шукати одне умовно "найкраще" рішення, а формувати набір прийнятних альтернатив.

Для розв'язання цієї задачі обґрунтовано використання адаптованого алгоритму NSGA-II. Його застосування є доцільним, оскільки організаційно-логістичні рішення в будівництві мають багато обмежень, залежать від змінних умов і потребують порівняння альтернатив за кількома критеріями

одночасно. У роботі алгоритм використовується не як абстрактний математичний механізм, а як спосіб сформувати множину сценаріїв, серед яких можуть бути швидші, дешевші, надійніші або більш збалансовані варіанти організації робіт.

Запропоновано багаторівневе подання організаційно-логістичного рішення, яке поєднує технологічний, ресурсно-постачальний і часовий рівні. Технологічний рівень задає черговість виконання робіт і залежності між ними; ресурсно-постачальний рівень описує вибір постачальників, розміри партій, надійність каналів і логістичне плече; часовий рівень визначає слоти доставки, доступність логістичних вузлів і готовність фронтів робіт. Таке подання дозволяє зберегти зв'язок між алгоритмічним пошуком і реальною логікою будівельного майданчика, де рішення щодо строків, ресурсів і простору не можуть прийматися окремо одне від одного.

Розкрито процедуру формування Парето-ефективних альтернатив. Після перевірки обмежень допустимі рішення порівнюються між собою за принципом домінування. Частина рішень відсікається як менш ефективна, а недоміновані альтернативи формують послідовні фронти Парето. Використання crowding distance дозволяє зберігати різноманітність рішень, щоб підсумкова множина не зводилася лише до кількох близьких варіантів. У практичному сенсі це дає менеджеру не одну відповідь, а набір сценаріїв із різним співвідношенням часу, вартості, надійності та ресурсної збалансованості.

Для вибору рекомендованої стратегії з отриманої множини альтернатив запропоновано використання методів AHP і TOPSIS. AHP дозволяє врахувати пріоритети особи, що приймає рішення, наприклад більшу важливість строків або надійності на певному етапі будівництва. TOPSIS використовується для ранжування альтернатив за їх близькістю до бажаного рішення та віддаленістю від найгіршого варіанта. Така комбінація дає можливість поєднати результати математичної оптимізації з управлінськими пріоритетами конкретного проєкту.

У розділі також запропоновано архітектуру програмного модуля, який може реалізувати описану логіку на практиці. Його структура передбачає роботу з різними джерелами даних, зокрема BIM/IFC, ERP, CDE, IoT/GPS/RFID та інформацією про

фактичне виконання робіт. Модуль має виконувати не лише розрахунок альтернатив, а й перевірку якості даних, оновлення параметрів, формування результатів для користувача та підтримку зворотного зв’язку. Це важливо, оскільки в реальному будівництві вихідні умови швидко змінюються, і оптимізаційне рішення має бути пов’язане з актуальним станом проєкту.

Визначено життєвий цикл даних у програмному модулі: надходження статичних і динамічних даних, перевірка їх якості, параметризація, запуск математичної моделі, формування Парето-альтернатив, вибір рекомендованого сценарію, передача рішення у виконання, моніторинг фактичного стану та повторне оновлення параметрів. Така циклічна логіка показує, що програмний модуль не обмежується одноразовим розрахунком. Він може використовуватися як інструмент підтримки рішень, який уточнює рекомендації після появи нових даних або зміни умов на будівельному майданчику.

Отже, у третьому розділі розроблено цілісний інструментарій оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. Математична модель задає структуру задачі, алгоритм NSGA-II формує множину компромісних рішень, методи AHP і TOPSIS допомагають обрати рекомендовану стратегію, а програмний модуль забезпечує можливість практичного використання цього підходу. Отримані результати формують науково-методичну та прикладну основу для використання логістичного інструментарію в удосконаленні організаційних процесів цивільного будівництва.

РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

4.1. Випробування запропонованої моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів

З метою перевірки працездатності запропонованої математичної моделі та алгоритму багатокритеріальної оптимізації в даному дослідженні проведено її випробування на прикладі цивільного будівельного об’єкта [70; 71; 83; 96]. Практична апробація моделі здійснювалась у вигляді програмного модуля, реалізованого мовою Python, який забезпечує формування вхідних даних, мережево-календарний розрахунок, перевірку системи обмежень, побудову множини Парето-ефективних альтернатив та вибір рекомендованого організаційно-логістичного сценарію [89; 96; 111; 115].

Метою випробування є оцінка здатності запропонованої моделі формувати більш ефективні сценарії організації будівництва порівняно з традиційним підходом за незмінних вихідних характеристик об’єкта, номенклатури робіт, ресурсного забезпечення та просторових обмежень будівельного майданчика [62; 74; 89]. Особлива увага приділяється перевірці впливу логістичної координації постачань на тривалість реалізації проєкту, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення робіт ресурсами та ресурсну збалансованість [50; 67; 70; 80].

На рисунку 4.1 наведено головне вікно програмного модуля, через яке здійснюється перехід до введення вихідних даних, запуску розрахунку та перегляду результатів оптимізації. Інтерфейс модуля побудовано відповідно до логіки апробації моделі: спочатку задаються параметри будівельних робіт, ресурсів, постачальників і

обмежень майданчика, після чого виконується розрахунок альтернативних організаційно-логістичних сценаріїв.

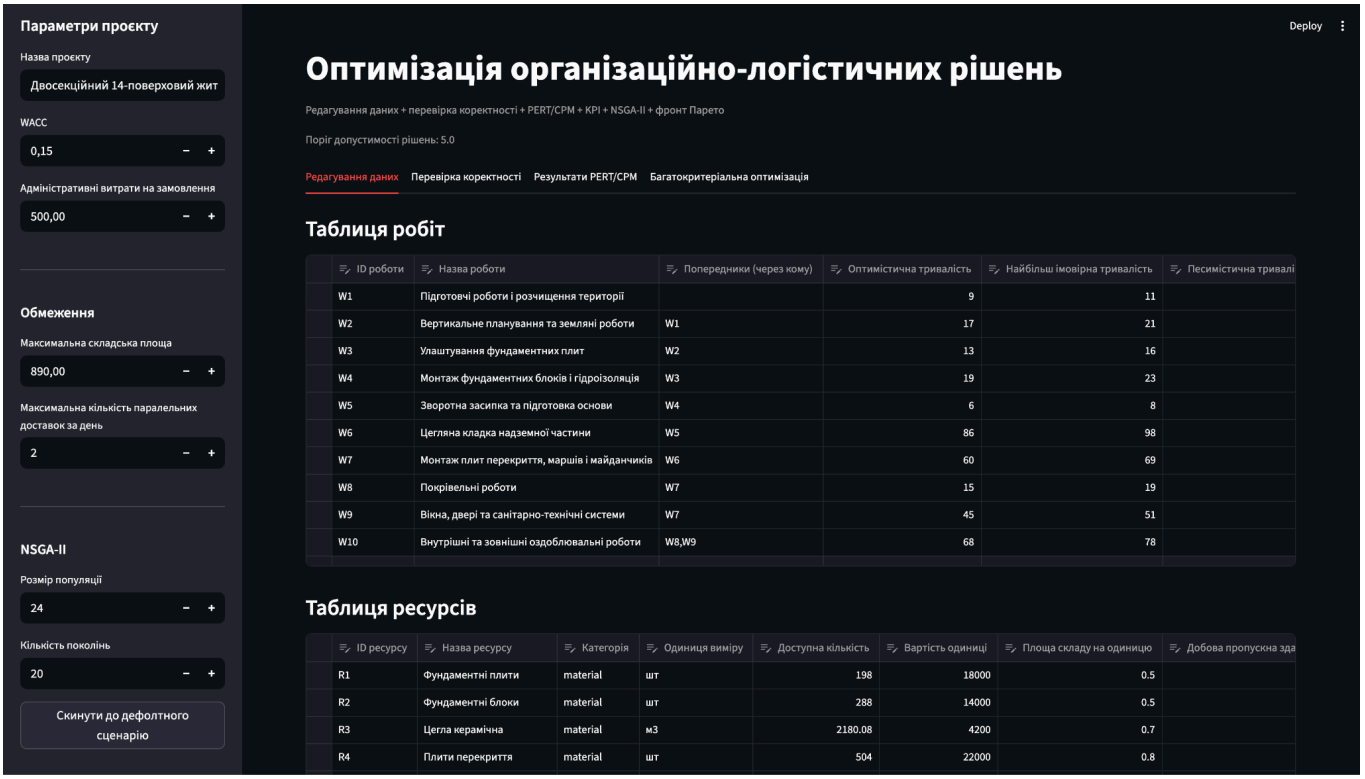


Рисунок 4.1 – Головне вікно програмного модуля оптимізації організаційно-логістичних процесів

Після заповнення вихідних параметрів користувач запускає розрахунок, у межах якого програмний модуль послідовно виконує перевірку даних, розрахунок цільових функцій, перевірку обмежень і формування альтернативних організаційно-логістичних сценаріїв. Результати цих процедур відображаються у підсумкових таблицях і графічних формах, що використовуються для подальшого порівняння традиційного та оптимізаційного сценаріїв.

Для апробації моделі використано дані щодо об’єкта «двосекційний 14-поверховий житловий будинок у м. Запоріжжя», які раніше застосовувалися у попередніх розрахунках календарно-організаційного характеру. У межах програмного випробування об’єкт подано в укрупненому вигляді як систему взаємопов’язаних будівельних робіт, для яких задано тривалості, попередники, потреби в ресурсах, параметри постачання та обмеження будівельного майданчика.

Такий підхід дає змогу зберегти змістовну відповідність реальному об’єкту будівництва та водночас забезпечити можливість формалізованого багатокритеріального аналізу альтернатив.

У межах випробування базовим орієнтиром виступає традиційний сценарій організації будівництва, а результати запропонованої моделі оцінюються як щодо еталонного логістичного сценарію мережево-календарного розрахунку, так і щодо найкращого допустимого рішення, отриманого в межах багатокритеріальної оптимізації.

Вихідні дані для випробування запропонованої моделі формувалися таким чином, щоб забезпечити змістовну відповідність реальному будівельному об’єкту та водночас зробити можливим їх формалізоване використання в межах програмної реалізації. Для цього весь комплекс робіт було подано у вигляді укрупненого мережевого графіка, що охоплює підготовчі, фундаментні, зведення надземної частини, монтаж перекриттів, покрівельні, інженерні та оздоблювальні процеси. Для кожної роботи задавалися її код, найменування, попередники, параметри тривалості за підходом PERT, зона виконання, пріоритетність, а також часові характеристики логістичного забезпечення.

Першу групу вихідних даних становлять параметри будівельних робіт, які визначають структуру мережево-календарної моделі. До них належать тривалості робіт, їх технологічні залежності, а також логічні зв’язки між окремими етапами будівництва. Саме ці дані використовуються для формування мережевого графіка, визначення критичного шляху та розрахунку загальної тривалості реалізації проєкту. Для зручності подальшого аналізу вони подаються у вигляді окремої таблиці.

Таблиця 4.1 – Вихідні параметри будівельних робіт укрупненої програмної моделі

Код роботи	Найменування роботи	Попередники	Оптимістична тривалість, дн.	Найбільш імовірна тривалість, дн.	Песимістична тривалість, дн.
W1	Підготовчі роботи і розчищення території	–	5	11	17
W2	Вертикальне планування та земляні роботи	W1	10	21	32
W3	Улаштування фундаментних плит	W2	8	16	24
W4	Монтаж фундаментних блоків і гідроізоляція	W3	12	23	34
W5	Зворотна засипка та підготовка основи	W4	4	8	12
W6	Цегляна кладка надземної частини	W5	70	98	126
W7	Монтаж плит перекриття, маршів і майданчиків	W6	42	69	96
W8	Покрівельні роботи	W7	12	19	26

W9	Вікна, двері та санітарно-тех нічні системи	W7	30	51	72
W10	Внутрішні та зовнішні оздоблювальні роботи	W8, W9	56	78	100

Поряд із характеристиками робіт до складу вихідних даних включено ресурсне забезпечення. Для кожного ресурсу задавалися його ідентифікатор, найменування, одиниця виміру, доступна кількість, вартість одиниці, площа складу на одиницю, добова пропускна здатність, ставка витрат зберігання та точка дозамовлення. Окремо задавалися потреби кожної роботи в ресурсах, що дозволяло пов’язати календарний графік виконання робіт із логістичними параметрами постачання і складування. Такий підхід забезпечує можливість оцінювання не лише тривалості, а й навантаження на складську інфраструктуру, а також потенційних конфліктів у забезпеченні робіт матеріалами.

Наступну групу становлять сценарні профілі постачальників, які в межах даного дослідження розглядаються не як конкретні суб’єкти господарювання, а як типізовані моделі постачання з різними логістичними характеристиками. Для кожного профілю задавалися термін поставки, коефіцієнт надійності, транспортні витрати на одиницю ресурсу, мінімальна та максимальна партії, а також коефіцієнт маршрутного ризику. Така параметризація дала змогу формалізувати різні організаційно-логістичні умови забезпечення об’єкта без прямої залежності від індивідуальних комерційних пропозицій окремих підприємств і використовувати їх у процедурі багатокритеріальної оптимізації.

Таблиця 4.2 – Вихідні параметри будівельних робіт укрупненої програмної моделі

Код ресурсу	Найменування ресурсу	Одиниця виміру	Кількість для об’єкта
R1	Фундаментні плити	шт	198
R2	Фундаментні блоки	шт	288
R3	Цегляна кладка надземної частини	$м^3$	2180,08
R4	Плити перекриття	шт	504
R5	Сходові марші	шт	56
R6	Сходові майданчики	шт	56
R7	Покрівельні матеріали	$м^2$	475,2
R8	Віконно-дверні заповнення	$м^2$	авторське агрегування
R9	Матеріали для інженерних і оздоблювальних робіт	ум. од. / компл.	авторське агрегування

У таблиці 4.2 наведено основні ресурсні позиції, використані в укрупненій програмній моделі. Значення для фундаментних плит, фундаментних блоків, цегляної кладки, плит перекриття, сходових маршів, сходових майданчиків і покрівельних матеріалів прийнято за даними таблиці 3.1 пояснювальної записки до

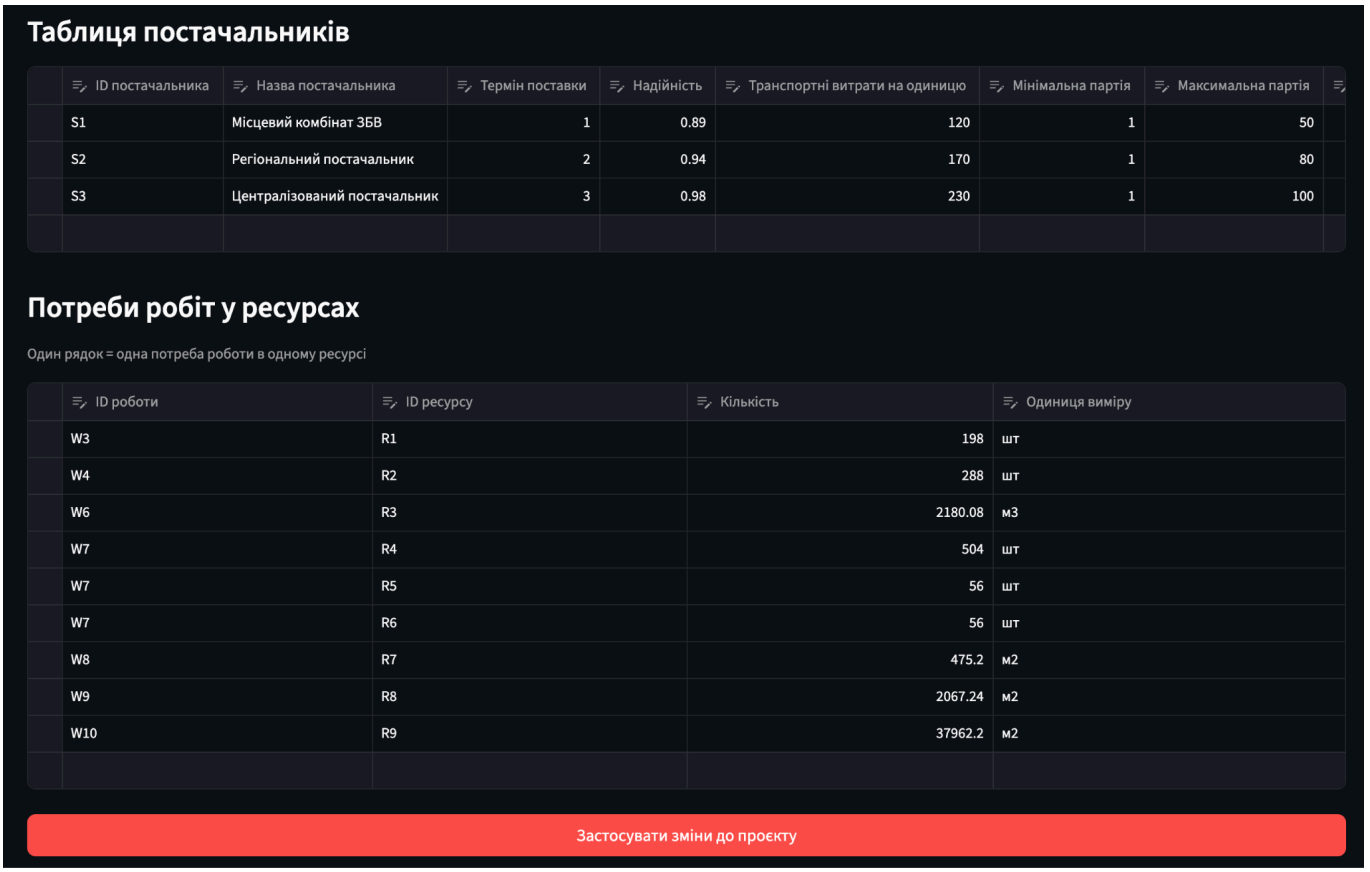
курсового проєкту. Частина завершальних ресурсних позицій подана в агрегованому вигляді з метою узгодження детального опису об’єкта з укрупненою структурою програмної моделі.

Окремо було сформовано систему обмежень будівельного майданчика, яка відображає практичні умови реалізації проєкту. До неї включено максимальну складську площу, обмеження щодо кількості паралельних доставок за день, обмеження доступності ресурсів, прийняті в межах програмної моделі, а також вимоги до збереження технологічної послідовності виконання робіт. Саме ця група параметрів дозволяє перевіряти допустимість кожного сформованого сценарію та відокремлювати практично реалізовні альтернативи від формально недопустимих.

Таблиця 4.3 – Сценарні профілі постачальників

Код постачальника	Характеристика профілю	Термін поставки, дн.	Коефіцієнт надійності	Транспортні витрати на одиницю, грн	Мінімальна партія	Максимальна партія	Коефіцієнт маршрутного ризику
S1	Локальний постачальник	1	0,89	120	1	50	0,18
S2	Регіональний постачальник	2	0,94	170	1	80	0,10
S3	Централізований постачальник	3	0,98	230	1	100	0,05

Профілі постачальників у межах даного дослідження подано не як конкретні суб’єкти господарювання, а як типізовані сценарні моделі постачання з різними логістичними характеристиками, що використовуються для проведення обчислювального експерименту.



Таблиця постачальників

ID постачальника	Назва постачальника	Термін поставки	Надійність	Транспортні витрати на одиницю	Мінімальна партія	Максимальна партія
S1	Місцевий комбінат ЗБВ	1	0.89	120	1	50
S2	Регіональний постачальник	2	0.94	170	1	80
S3	Централізований постачальник	3	0.98	230	1	100

Потреби робіт у ресурсах

Один рядок = одна потреба роботи в одному ресурсі

ID роботи	ID ресурсу	Кількість	Одиниця виміру
W3	R1	198	шт
W4	R2	288	шт
W6	R3	2180.08	м3
W7	R4	504	шт
W7	R5	56	шт
W7	R6	56	шт
W8	R7	475.2	м2
W9	R8	2067.24	м2
W10	R9	37962.2	м2

Застосувати зміни до проєкту

Рисунок 4.2 - Введення вхідних даних про постачальників та потреби у ресурсах

Наведені вихідні дані безпосередньо відповідають структурі математичної моделі, сформованої у підрозділі 3.1: перелік робіт задає множину I, ресурси – множину R, постачальники – множину S, часові періоди – множину T, а просторові обмеження майданчика – параметри місткості та пропускної здатності логістичних вузлів.

Таблиця 4.4 – Обмеження будівельного майданчика

Параметр	Значення	Одиниця виміру	Походження / примітка
Максимальна складська площа	889,52	м²	За техніко-економічними показниками будгенплану та таблицею 5.1 пояснювальної записки
Максимальна кількість паралельних доставок за день	2	доставок/ день	Прийнято в програмній моделі як логістичне обмеження майданчика

WACC	0,15	частка	Прийнято в програмному експерименті
Адміністративні витрати на одне замовлення	500	грн/ замовлення	Прийнято в програмному експерименті
Розмір популяції NSGA-II	24	особин	Параметр обчислювального експерименту
Кількість поколінь NSGA-II	20	поколінь	Параметр обчислювального експерименту
Поріг допустимості рішення	5,0	ум. од. порушення	Толеранс, прийнятий у програмній реалізації для класифікації допустимих рішень; узгоджується з ідеєю м’яких/динамічних штрафів у моделі

У програмному випробуванні поєднано два джерела вихідних даних: фактичні параметри об’єкта, робіт і частини ресурсних позицій, отримані з курсового проєкту та пояснювальної записки, а також сценарні профілі постачальників і параметри обчислювального експерименту, введені для реалізації багатокритеріальної організаційно-логістичної оптимізації.

Таким чином, сформований набір вихідних даних охоплює три взаємопов’язані компоненти: параметри робіт, ресурсно-логістичні характеристики та систему обмежень майданчика. Сукупне використання цих даних у програмному модулі створює основу для побудови альтернативних організаційно-логістичних сценаріїв і подальшого оцінювання їх ефективності за критеріями часу, витрат, надійності та збалансованості.

На основі наведених вихідних даних у програмному модулі було проведено послідовне випробування запропонованої організаційно-логістичної моделі. Його зміст полягав у перетворенні початкового набору характеристик будівельного об’єкта на систему альтернативних сценаріїв виконання робіт, які оцінювалися за багатокритеріальним підходом.

На першому етапі випробування формувався укрупнений мережевий графік будівництва, який відображав технологічну послідовність робіт, їх взаємозв'язки та часові параметри. Для кожної роботи використовувалися оцінки тривалості за підходом PERT, що дозволяло врахувати варіативність її виконання в оптимістичному, найбільш імовірному та песимістичному варіантах. На основі цих даних визначався критичний шлях і загальна тривалість реалізації проєкту в межах мережево-календарного розрахунку.

На другому етапі до календарної структури проєкту додавалися параметри ресурсного та логістичного забезпечення. Для кожної роботи враховувалися її потреби в ресурсах, доступність матеріалів, характеристики постачання та обмеження будівельного майданчика. Це дозволяло перейти від суто календарного опису будівництва до організаційно-логістичної моделі, у якій часові параметри узгоджуються з умовами постачання, складування і пропускної здатності логістичних вузлів.

На третьому етапі формувалися альтернативні сценарії реалізації проєкту. Для цього в програмному модулі використовувався алгоритм NSGA-II, який давав змогу варіювати параметри забезпечення робіт, профілі постачальників, дні доставок і пов'язані з ними логістичні характеристики. Кожна згенерована альтернатива проходила перевірку на допустимість за системою просторових, ресурсних і технологічних обмежень.

```
app.py > ...
98
99
100  def get_best_feasible_solution(nsga2_result):
101      feasible = [
102          ind for ind in nsga2_result.pareto_front
103          if ind.violations is not None
104          and ind.violations.total_violation <= FEASIBILITY_TOLERANCE
105          and ind.objectives is not None
106      ]
107      if not feasible:
108          return None
109
110      return min(feasible, key=lambda x: x.objectives.total_time)
```

Рисунок 4.3 – Фрагмент програмної реалізації вибору рекомендованої альтернативи

На четвертому етапі для кожного сценарію обчислювалися цільові показники ефективності. До них віднесено загальну тривалість реалізації проєкту, сукупні логістичні витрати, показник надійності забезпечення робіт та показник ресурсної збалансованості. Сукупна оцінка за цими критеріями дозволяла сформувати множину Pareto-ефективних альтернатив, серед яких відбиралися найбільш доцільні з точки зору практичної реалізації [70; 71; 75; 96].

Завершальний етап випробування полягав у формуванні результатів, зручних для подальшого аналізу. Програмний модуль забезпечував візуалізацію мережевого графіка, визначення критичного шляху, побудову Pareto-фронту, відображення динаміки поколінь алгоритму NSGA-II та вибір рекомендованої альтернативи [60; 89; 96; 97]. Таким чином, випробування підтвердило можливість використання розробленої моделі не лише як засобу розрахунку, а і як інструменту підтримки прийняття організаційно-логістичних рішень у цивільному будівництві [111; 112].

Практична реалізація випробування запропонованої моделі здійснювалася у вигляді програмного модуля, розробленого мовою Python [115; 116; 117]. У межах даного дослідження програмний модуль розглядається як інструментальна основа для перевірки працездатності математичної моделі та алгоритмічного підходу до багатокритеріальної оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві [83; 84; 96; 111]. Така реалізація забезпечила можливість перейти від теоретичної постановки задачі до її обчислювального випробування на конкретному будівельному об’єкті.

Функціонально програмний модуль об’єднує кілька взаємопов’язаних блоків. Перший блок забезпечує введення та редагування вихідних даних, що охоплюють перелік робіт, їх технологічні зв’язки, параметри тривалості, характеристики ресурсного забезпечення, сценарні профілі постачальників та обмеження будівельного майданчика. Другий блок реалізує мережево-календарний розрахунок, у межах якого формується укрупнений сітьовий графік, визначається критичний шлях і загальна тривалість реалізації проєкту. Третій блок відповідає за логістичну частину моделі, тобто врахування поставок ресурсів, складських обмежень, параметрів постачальників та пов’язаних із ними ризиків.

Окреме місце в програмному модулі займає блок багатокритеріальної оптимізації, у якому реалізовано адаптований алгоритм NSGA-II (рис. 4.4). На його основі формуються альтернативні сценарії організації виконання робіт і забезпечення їх ресурсами. Кожен сценарій оцінюється за системою критеріїв, що включає тривалість реалізації проєкту, сукупні логістичні витрати, показник надійності та показник ресурсної збалансованості. Паралельно з цим здійснюється перевірка системи обмежень, що дозволяє відокремлювати допустимі рішення від формально недопустимих.

Результати випробування відображаються у вигляді набору аналітичних представлень, що підвищують наочність і зручність інтерпретації. Програмний модуль забезпечує побудову мережевого графіка, виведення ключових показників мережево-календарного розрахунку, формування таблиці альтернатив, відображення Pareto-фронту та вибір рекомендованого сценарію. Така форма подання результатів дозволяє не лише оцінити окреме рішення, а й проаналізувати простір можливих компромісів між часовими, вартісними, надійнісними та ресурсними характеристиками.

Отже, програмний модуль у межах даного дослідження виконує не лише розрахункову, а й аналітичну функцію. Його використання дозволяє реалізувати обчислювальне випробування запропонованої моделі, одержати множину альтернативних сценаріїв та обґрунтувати вибір найбільш доцільного організаційно-логістичного рішення для досліджуваного будівельного об’єкта.

```
752  with tab4:
753      st.subheader("NSGA-II оптимізація")
754
755      current_project = st.session_state.project_data
756      validation_result = validate_project(current_project)
757
758      col_a, col_b, col_c = st.columns(3)
759      with col_a:
760          nsga_population_size = st.number_input(
761              "Розмір популяції NSGA-II",
762              min_value=2,
763              value=int(current_project.optimization.population_size),
764              step=1,
765              key="nsga_population_size",
766          )
767      with col_b:
768          nsga_generations = st.number_input(
769              "Кількість поколінь NSGA-II",
770              min_value=1,
771              value=int(current_project.optimization.generations),
772              step=1,
773              key="nsga_generations",
774          )
775      with col_c:
776          nsga_seed_ratio = st.number_input(
777              "Частка ініціалізації",
778              min_value=0.0,
779              max_value=1.0,
780              value=0.25,
781              step=0.05,
782              key="nsga_seed_ratio",
783          )
784
785      if st.button("Запустити NSGA-II", type="primary", use_container_width=True):
786          if not validation_result.is_valid:
787              st.error("Неможливо запустити NSGA-II: проєкт не пройшов валідацію.")
788              for err in validation_result.errors:
789                  st.write(f"- {err}")
790          else:
791              with st.spinner("Виконується багатокритеріальна оптимізація..."):
792                  result = run_nsga2(
793                      project=current_project,
794                      population_size=int(nsga_population_size),
795                      generations=int(nsga_generations),
796                      seed_ratio=float(nsga_seed_ratio),
797                      random_seed=current_project.optimization.random_seed,
798                  )
799                  st.session_state.nsga2_result = result
800
801              st.success("NSGA-II завершено.")
802
803      nsga2_result = st.session_state.nsga2_result
```

Рисунок 4.4 – Фрагмент програмної реалізації запуску багатокритеріальної оптимізації

У результаті проведеного обчислювального експерименту було підтверджено працездатність запропонованої організаційно-логістичної моделі та програмного модуля, розробленого для її реалізації. На основі вихідних даних, наведених у таблицях 4.1–4.3, програма забезпечила побудову укрупненого мережевого графіка, виконання мережево-календарного розрахунку, перевірку системи обмежень та формування множини альтернативних сценаріїв реалізації проєкту.

На першому етапі було отримано результат мережево-календарного розрахунку для еталонного логістичного сценарію. Це дозволило визначити загальну тривалість реалізації проєкту, критичний шлях і склад критичних робіт. Відображення сітьового графіка в інтерфейсі програми дало змогу візуально простежити структуру укрупненої моделі, логіку зв’язків між роботами та місце завершальної ланки в загальному календарному контурі будівництва.

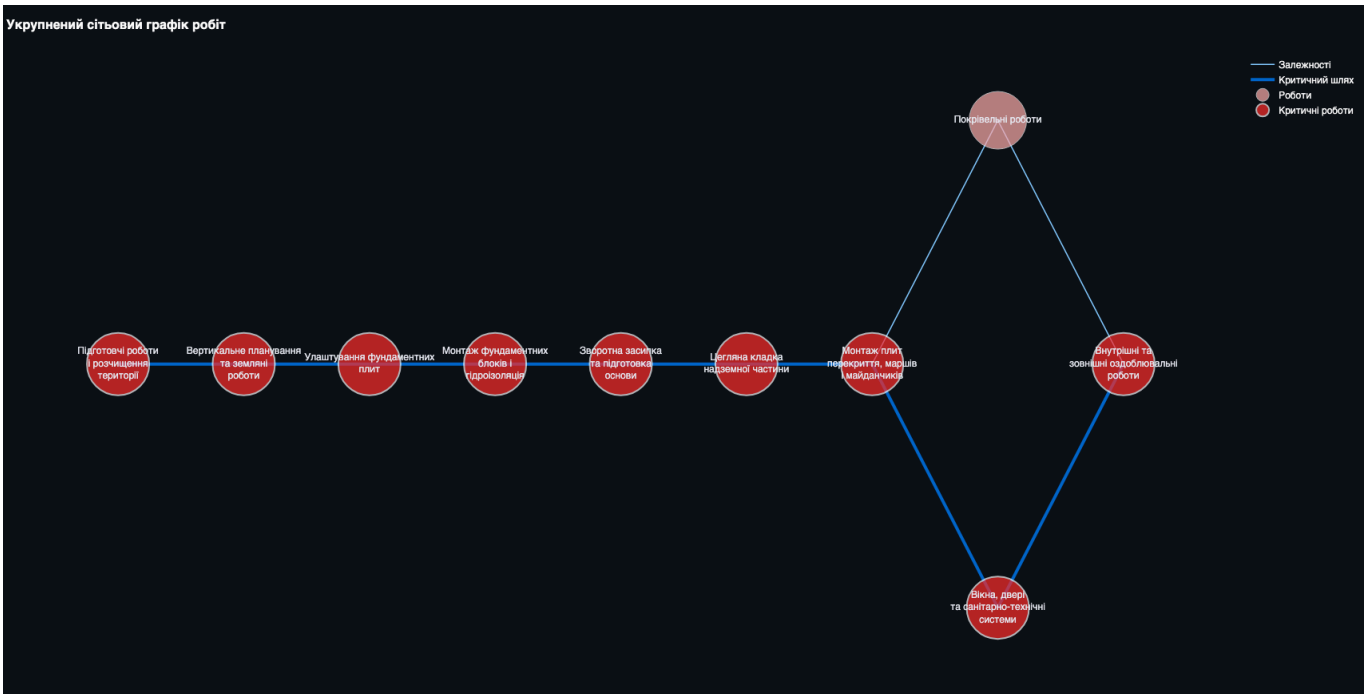


Рисунок 4.5 – Сітьовий графік укрупненої програмної моделі

Після виконання мережево-календарного розрахунку в програмному модулі було визначено ключові показники еталонного логістичного сценарію, зокрема тривалість реалізації проєкту, сукупні логістичні витрати, показник надійності та показник ресурсної збалансованості. Цей етап є важливим, оскільки він формує базу

для подальшого переходу від фіксованого календарно-логістичного опису до багатокритеріального пошуку альтернатив.

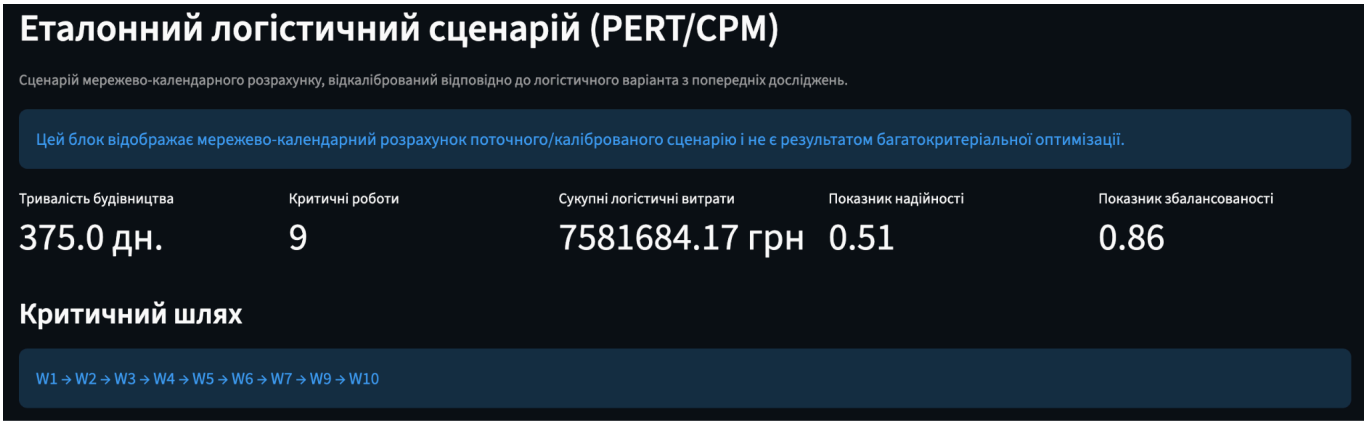


Рисунок 4.6 – Інтерфейс програмного модуля з результатами мережево-календарного розрахунку та ключовими показниками сценарію

На наступному етапі було виконано багатокритеріальну оптимізацію з використанням алгоритму NSGA-II. У ході оптимізації генерувалися альтернативні сценарії організації робіт і ресурсного забезпечення, які відрізнялися параметрами логістичного обслуговування, графіками доставок та профілями постачальників. Для кожної альтернативи програма автоматично виконувала розрахунок цільових показників та перевірку допустимості за системою обмежень.

У результаті роботи алгоритму було сформовано множину Pareto-ефективних альтернатив, які відображають компроміси між тривалістю реалізації проєкту, сукупними логістичними витратами, надійністю забезпечення та ресурсною збалансованістю. Наявність такої множини підтверджує, що модель не обмежується побудовою одного жорстко фіксованого рішення, а забезпечує простір управлінського вибору між кількома практично доцільними сценаріями.

	Тип	Тривалість, дн.	Витрати, грн	Надійність	Збалансованість	Порушення
0	Найкраще за часом	381.91	7257551.01	0.85	0.88	1.72
1	Найкраще за вартістю	381.91	7257551.01	0.85	0.88	1.72
2	Найкраще за надійністю	382.11	7258214.21	0.85	0.88	1.72
3	Найкраще за збалансованістю	382.11	7258214.21	0.85	0.88	1.72

Рисунок 4.7 – Pareto-фронт альтернатив, отриманих у результаті багатокритеріальної оптимізації

Окремо в програмному модулі було реалізовано відображення динаміки поколінь алгоритму NSGA-II, що дозволило простежити зміну найкращих допустимих значень критеріїв у процесі пошуку. Аналіз динаміки поколінь показав, що після появи допустимих рішень алгоритм виходить на стабільну область пошуку, у межах якої найкращі значення критеріїв практично не змінюються. Це свідчить про збіжність алгоритму до стійкої множини альтернатив і підтверджує його придатність для розв’язання поставленої задачі.

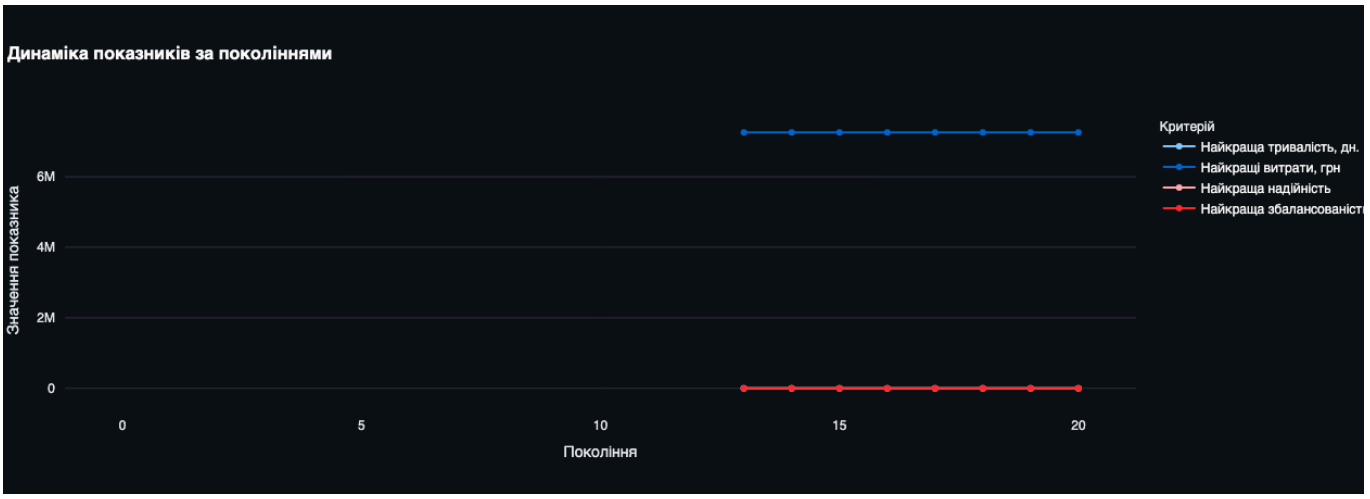
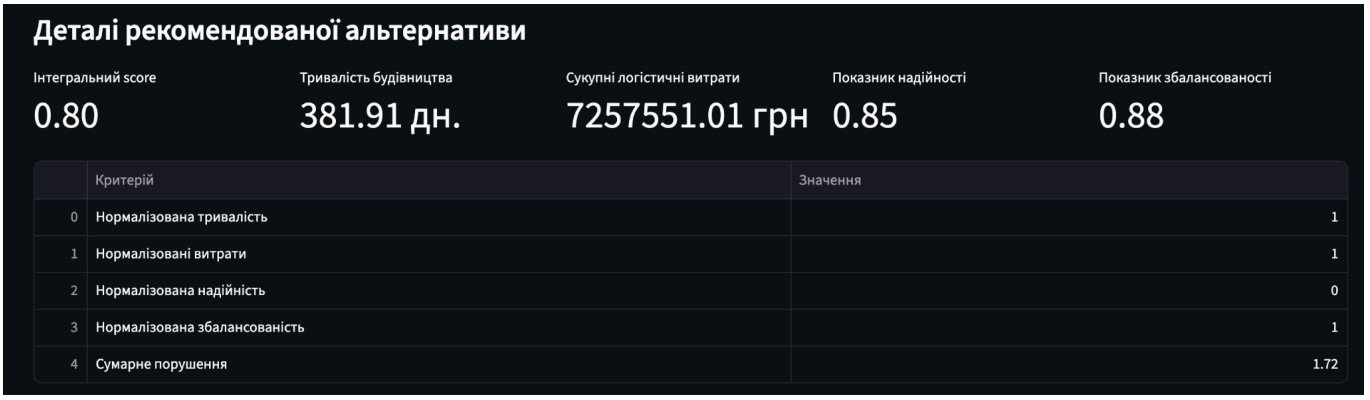


Рисунок 4.8 – Динаміка зміни найкращих допустимих значень критеріїв за поколіннями алгоритму NSGA-II

Завершальним результатом випробування стало формування рекомендованої альтернативи, яка відповідає умовам допустимості та характеризується прийнятним співвідношенням між часовими, вартісними, надійнісними та ресурсними параметрами. У програмному модулі така альтернатива подається у вигляді інтегрованого набору показників, доповненого інформацією про послідовність робіт, критичний шлях, призначення постачальників і графік доставок. Це дає можливість використовувати результат не лише для аналітичної оцінки, а й як основу для формування практичного організаційно-логістичного рішення.



Деталі рекомендованої альтернативи

Інтегральний score	Тривалість будівництва	Сукупні логістичні витрати	Показник надійності	Показник збалансованості
0.80	381.91 дн.	7257551.01 грн	0.85	0.88

	Критерій	Значення
0	Нормалізована тривалість	1
1	Нормалізовані витрати	1
2	Нормалізована надійність	0
3	Нормалізована збалансованість	1
4	Сумарне порушення	1.72

Рисунок 4.9 – Рекомендована альтернатива, сформована програмним модулем

З методичної точки зору важливо, що програмний модуль дозволяє поєднати три рівні результатів: мережево-календарний опис сценарію, багатокритеріальний

аналіз альтернатив і вибір рекомендованого рішення. Отримані результати підтверджують, що запропонована модель може бути використана як інструмент підтримки прийняття організаційно-логістичних рішень у цивільному будівництві.

Отже, проведене випробування підтвердило працездатність запропонованої моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів та можливість її практичної реалізації у вигляді програмного модуля. На основі сформованих вихідних даних, що характеризують будівельні роботи, ресурсне забезпечення, сценарні профілі постачальників і систему обмежень майданчика, було виконано мережево-календарний розрахунок, побудовано множину альтернативних сценаріїв та здійснено їх багатокритеріальне оцінювання [70; 89; 96; 113]. Отримані результати засвідчили, що розроблений програмний модуль дозволяє не лише формалізувати процес організаційно-логістичного планування, а й сформувати практично придатну основу для подальшого порівняння традиційного підходу та запропонованої оптимізаційної моделі [83; 107; 111; 112].

4.2. Порівняльна оцінка ефективності традиційного підходу та запропонованої моделі оптимізації

Після випробування запропонованої моделі на досліджуваному будівельному об’єкті доцільно здійснити порівняльну оцінку отриманих результатів із базовим традиційним підходом до організації будівництва [62; 74]. Метою такого порівняння є кількісне визначення ефекту від застосування організаційно-логістичної моделі та встановлення ступеня її наближення до еталонного логістичного сценарію, сформованого на основі мережево-календарного розрахунку [60; 89; 111].

У межах даного дослідження розглядаються три сценарії організації будівництва. Перший сценарій відповідає традиційній моделі, прийнятій за результатами попередніх розрахунків, у якій загальна тривалість реалізації об’єкта становить 395 днів. Другий сценарій є еталонним логістичним варіантом,

сформованим у межах мережево-календарного підходу та відображеним у програмному модулі у вкладці результатів PERT/CPM; для нього тривалість реалізації об’єкта становить 375 днів [59-61; 89]. Еталонний логістичний сценарій у цьому порівнянні не розглядається як окрема управлінська модель, а використовується як розрахунковий орієнтир для перевірки того, наскільки оптимізаційна модель наближається до кращого календарно-логістичного варіанта за умови врахування додаткових обмежень [89-91]. Третій сценарій відповідає найкращому допустимому рішенню, отриманому в результаті багатокритеріальної оптимізації за алгоритмом NSGA-II, і характеризує результат роботи розробленої програмної моделі.

Такий підхід до порівняння є методично доцільним, оскільки дозволяє оцінити запропоновану модель одразу у двох площинах. З одного боку, визначається її ефект відносно традиційного підходу до організації будівництва, а з іншого – встановлюється ступінь наближення до логістично вдосконаленого еталонного сценарію. У результаті це дає змогу не лише оцінити факт скорочення тривалості будівництва, а й проаналізувати, наскільки отримане оптимізаційне рішення є практично прийнятним за вартісними, надійнісними та логістичними характеристиками.

Для забезпечення наочності результати порівняння доцільно подати у вигляді зведеної таблиці, яка охоплює тривалість будівництва, сукупні логістичні витрати, показник надійності, показник збалансованості та величину відхилення між сценаріями.

Таблиця 4.5 – Порівняння показників традиційного, еталонного логістичного та оптимізованого сценаріїв

Показник	Традиційна модель	Еталонний логістичний сценарій	Оптимізована модель
Тривалість будівництва, днів	395.00	375.00	381.91
Відхилення від традиційної моделі, днів	0.00	-20.00	-13.09

Відхилення від еталонного логістичного сценарію, днів	+20.00	0.00	+6.91
Сукупні логістичні витрати, грн	–	7 581 684.17	7 257 551.01
Показник надійності	–	0.51	0.8460
Показник збалансованості	–	0.86	0.8815

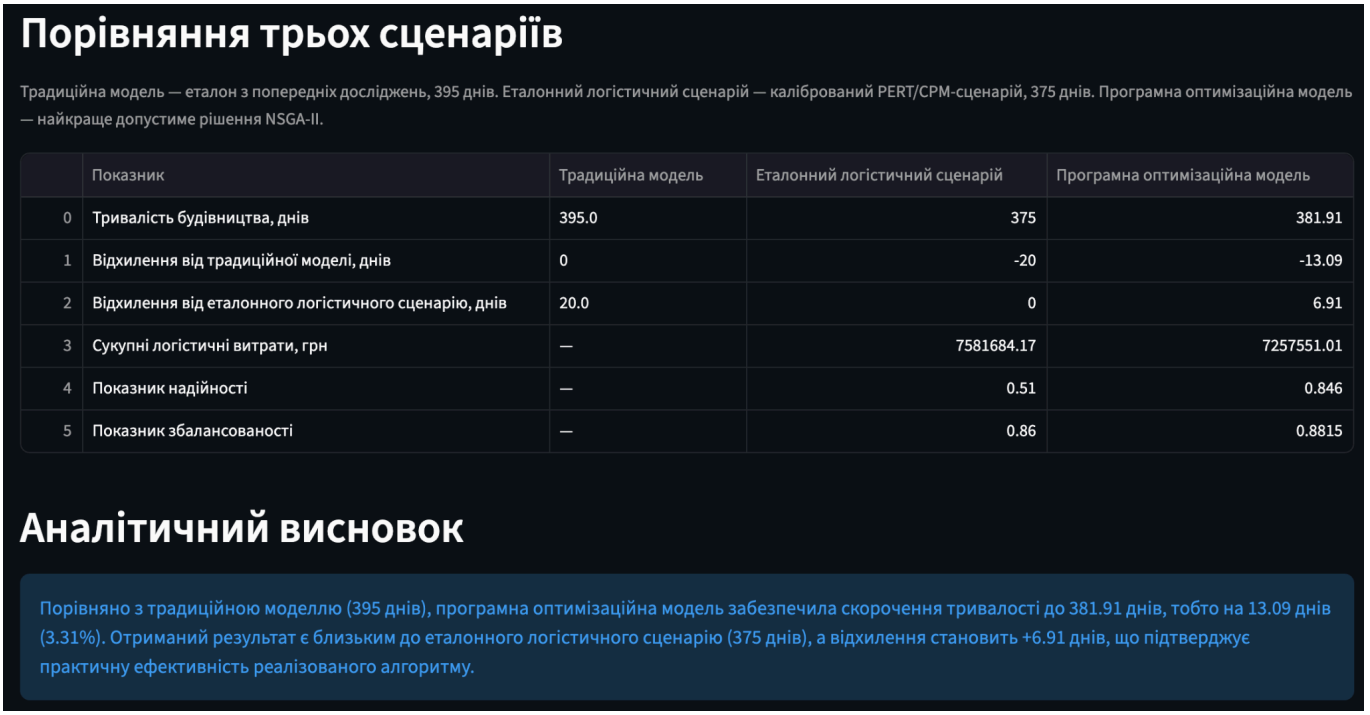
Наведені в таблиці 4.5 результати свідчать, що застосування розробленої програмної моделі забезпечує покращення організаційно-логістичних параметрів реалізації будівельного проєкту порівняно з традиційним підходом. Якщо для традиційної моделі тривалість будівництва становить 395 днів, то для найкращого допустимого рішення, отриманого за результатами багатокритеріальної оптимізації, цей показник зменшується до 381,91 дня. Таким чином, скорочення тривалості реалізації об’єкта становить 13,09 дня, або приблизно 3,31 %.

Разом із цим оптимізований сценарій не повністю збігається з еталонним логістичним варіантом, для якого в межах мережево-календарного розрахунку отримано тривалість 375 днів. Відхилення між цими двома сценаріями становить 6,91 дня. Такий результат є методично очікуваним, оскільки еталонний логістичний сценарій відображає калібрований мережево-календарний варіант, тоді як оптимізована модель здійснює пошук допустимого рішення в умовах формалізованих ресурсних, просторових і логістичних обмежень. Отже, програмна оптимізаційна модель не просто відтворює календарний сценарій, а формує практично реалізовну альтернативу в межах прийнятої системи критеріїв і обмежень.

Важливим результатом є також зміна вартісних і якісних характеристик сценарію. Для еталонного логістичного варіанту сукупні логістичні витрати становлять 7 581 684,17 грн, тоді як для оптимізованого рішення – 7 257 551,01 грн. Це свідчить про зменшення витрат на 324 133,16 грн. Одночасно спостерігається зростання показника надійності з 0,51 до 0,8460, а показника збалансованості – з 0,86 до 0,8815. Отже, знайдена оптимізаційна альтернатива характеризується не

лише скороченням строків порівняно з традиційною моделлю, а й більш сприятливим співвідношенням між витратами, ризиками та ресурсною узгодженістю.

З практичної точки зору це означає, що запропонована модель дозволяє сформувати організаційно-логістичне рішення, яке є кращим за традиційний підхід за часовим критерієм і водночас забезпечує вищий рівень організаційної керованості процесу. При цьому певне відставання від еталонного логістичного сценарію за тривалістю не слід трактувати як недолік моделі, оскільки воно є наслідком жорсткішого врахування формалізованих обмежень у межах програмного пошуку допустимих альтернатив.



Порівняння трьох сценаріїв

Традиційна модель — еталон з попередніх досліджень, 395 днів. Еталонний логістичний сценарій — калібрований PERT/CPM-сценарій, 375 днів. Програмна оптимізаційна модель — найкраще допустиме рішення NSGA-II.

	Показник	Традиційна модель	Еталонний логістичний сценарій	Програмна оптимізаційна модель
0	Тривалість будівництва, днів	395.0	375	381.91
1	Відхилення від традиційної моделі, днів	0	-20	-13.09
2	Відхилення від еталонного логістичного сценарію, днів	20.0	0	6.91
3	Сукупні логістичні витрати, грн	—	7581684.17	7257551.01
4	Показник надійності	—	0.51	0.846
5	Показник збалансованості	—	0.86	0.8815

Аналітичний висновок

Порівняно з традиційною моделлю (395 днів), програмна оптимізаційна модель забезпечила скорочення тривалості до 381.91 днів, тобто на 13.09 днів (3.31%). Отриманий результат є близьким до еталонного логістичного сценарію (375 днів), а відхилення становить +6.91 днів, що підтверджує практичну ефективність реалізованого алгоритму.

Рисунок 4.10 – Інтерфейс програмного модуля з результатами порівняльної оцінки сценаріїв

Отже, проведена порівняльна оцінка підтвердила, що запропонована організаційно-логістична модель забезпечує покращення результатів реалізації будівельного проєкту порівняно з традиційним підходом. За результатами обчислювального експерименту встановлено, що найкраще допустиме рішення, сформоване в межах багатокритеріальної оптимізації, скорочує тривалість

будівництва з 395 до 381,91 дня, тобто на 13,09 дня. Одночасно спостерігається зниження сукупних логістичних витрат і підвищення показників надійності та ресурсної збалансованості порівняно з еталонним логістичним сценарієм мережево-календарного розрахунку. Отримані результати свідчать, що розроблена модель не лише формує альтернативні організаційно-логістичні сценарії, а й дозволяє обґрунтовано обирати практично доцільні рішення в умовах часових, ресурсних і просторових обмежень будівельного майданчика. Це підтверджує прикладну цінність запропонованого підходу для вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено практичну апробацію запропонованої моделі оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві на основі даних реального будівельного об’єкта. Для цього було сформовано вихідні дані укрупненої програмної моделі, що охоплюють параметри робіт, ресурсне забезпечення, сценарні профілі постачальників та систему обмежень будівельного майданчика. На цій основі в середовищі розробленого програмного модуля реалізовано мережево-календарний розрахунок, перевірку обмежень, багатокритеріальну оптимізацію та вибір рекомендованої альтернативи.

У ході випробування підтверджено працездатність програмної реалізації та можливість використання розробленої моделі як інструменту підтримки прийняття організаційно-логістичних рішень. Програмний модуль забезпечив побудову укрупненого сітьового графіка, визначення критичного шляху, формування множини Pareto-ефективних альтернатив і відображення динаміки пошуку допустимих рішень у процесі роботи алгоритму NSGA-II. Це засвідчило, що модель придатна не лише для фіксованого мережево-календарного аналізу, а й для пошуку альтернативних сценаріїв реалізації будівельного проєкту з урахуванням часових, вартісних, надійнісних і ресурсних характеристик.

Порівняльна оцінка результатів показала, що запропонована оптимізаційна модель забезпечує покращення параметрів реалізації будівельного проєкту порівняно з традиційним підходом. Якщо для базового традиційного сценарію тривалість будівництва становить 395 днів, то найкраще допустиме рішення, отримане в результаті багатокритеріальної оптимізації, дає тривалість 381,91 дня, що означає скорочення строку на 13,09 дня. Водночас оптимізований сценарій виявився близьким до еталонного логістичного варіанта мережево-календарного розрахунку, для якого тривалість становить 375 днів, але відрізняється від нього через більш жорстке врахування системи формалізованих обмежень у програмному пошуку.

Крім скорочення строку реалізації проєкту, оптимізований сценарій характеризується зниженням сукупних логістичних витрат, а також підвищенням

показників надійності та ресурсної збалансованості порівняно з еталонним логістичним сценарієм. Це свідчить про те, що розроблена модель не зводиться лише до скорочення календарної тривалості, а дозволяє формувати організаційно-логістичні рішення, які є більш стійкими й узгодженими в умовах обмеженого простору, ресурсної залежності та варіативності постачання.

Отримані результати підтверджують прикладну цінність запропонованого підходу для вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва. Запропонована модель та її програмна реалізація можуть використовуватися як аналітичний інструмент для оцінювання альтернативних сценаріїв, підтримки вибору доцільного варіанта організації постачання і виконання робіт, а також для підвищення обґрунтованості управлінських рішень у системі будівельного виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у вдосконаленні організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок використання логістичного інструментарію, багатокритеріального математичного моделювання та програмної підтримки прийняття організаційно-логістичних рішень. Отримані результати дозволяють підвищити узгодженість будівельних робіт, постачання ресурсів, використання простору будівельного майданчика та вибору раціональних управлінських сценаріїв в умовах ресурсної, інфраструктурної та організаційної нестабільності.

1. У результаті аналізу теоретико-методичних засад організації цивільного будівництва встановлено, що традиційне календарно-ресурсне планування не завжди забезпечує належний рівень узгодженості між строками виконання робіт, постачанням матеріально-технічних ресурсів, готовністю фронтів робіт, складською місткістю майданчика та пропускною здатністю логістичних вузлів. Обґрунтовано доцільність переходу від переважно календарного підходу до організаційно-логістичного бачення будівельного процесу, у межах якого матеріальні, трудові, інформаційні та просторові потоки розглядаються як взаємопов’язані елементи єдиної системи управління.

2. Досліджено роль логістичного інструментарію в організації цивільного будівництва та визначено, що його використання дає змогу підвищити ритмічність будівельного потоку, зменшити простої, уникати перевантаження майданчика, узгоджувати постачання з фактичною готовністю робіт і формувати більш обґрунтовані рішення щодо розміщення, подачі та використання ресурсів. Показано, що логістика у цивільному будівництві має розглядатися не лише як допоміжна функція постачання, а як інструмент координації організаційних процесів.

3. Визначено систему факторів, що впливають на стабільність логістичних ланцюгів у цивільному будівництві. До них віднесено макроекономічні, інфраструктурні, енергетичні, кадрові, просторово-організаційні та

інформаційно-координаційні фактори. Встановлено, що ці фактори безпосередньо впливають на тривалість операцій, вартість логістичного забезпечення, надійність постачання, доступність ресурсів, пропускну здатність логістичних вузлів і можливість своєчасного запуску будівельних робіт.

4. Сформовано параметричне подання організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва. Виокремлено часовий, вартісний, ресурсний, просторовий, ризиковий і кадровий блоки параметрів. Це дозволило перейти від описового аналізу факторів до формалізованого подання предметної області, яке стало основою для подальшої математичної постановки задачі оптимізації.

5. Обґрунтовано систему критеріїв оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. До основних критеріїв віднесено тривалість виконання робіт, сукупні логістичні витрати, надійність забезпечення ресурсами та ресурсну збалансованість. Доведено, що зазначені критерії є взаємопов’язаними та частково конфліктними: скорочення строків може підвищувати витрати, зростання надійності може потребувати додаткових буферів, а надмірна ресурсна концентрація може створювати просторові й організаційні обмеження. Це обґрунтовує необхідність застосування багатокритеріального підходу.

6. Розроблено багатокритеріальну математичну модель організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва. Модель враховує технологічну послідовність робіт, потребу в ресурсах, вибір каналів постачання, часові вікна доставки, складську місткість майданчика, пропускну здатність логістичних вузлів, доступність ресурсів і готовність операцій до включення в оперативний план. На відміну від спрощеного календарного підходу, запропонована модель дозволяє одночасно враховувати часові, вартісні, ресурсні, просторові та ризикові параметри будівельного процесу.

7. Адаптовано алгоритмічний підхід на основі NSGA-II для розв’язання багатокритеріальної задачі організаційно-логістичної оптимізації. Запропонований підхід передбачає формування початкової популяції альтернатив, оцінювання рішень за системою критеріїв, перевірку обмежень, недоміноване сортування, розрахунок crowding distance, застосування операторів кросоверу та мутації, а також формування

множини Парето-ефективних альтернатив. Це дозволяє отримувати не одне формально оптимальне рішення, а набір допустимих компромісних сценаріїв для подальшого управлінського вибору.

8. Розроблено логіку програмної реалізації запропонованої моделі у вигляді розрахункового модуля на Python. Програмний модуль забезпечує формування вихідних даних, перевірку їх коректності, параметризацію робіт і ресурсів, розрахунок цільових функцій, перевірку системи обмежень, формування альтернативних сценаріїв, побудову Парето-множини та порівняння результатів традиційного й оптимізаційного підходів. Така реалізація підтверджує можливість практичного використання запропонованої моделі як аналітичного інструменту підтримки організаційно-логістичних рішень.

9. Проведено розрахункову апробацію запропонованої моделі на основі даних цивільного будівельного об’єкта. У межах апробації порівняно традиційний підхід до організації будівельного процесу з оптимізаційним сценарієм, сформованим за допомогою програмної реалізації моделі. Встановлено, що оптимізований сценарій дозволив скоротити тривалість реалізації проєкту з 395 до 381,91 дня, зменшити сукупні логістичні витрати з 7 581 684,17 грн до 7 257 551,01 грн, підвищити показник надійності забезпечення ресурсами з 0,51 до 0,8460 та покращити ресурсну збалансованість з 0,86 до 0,8815.

10. Отримані результати підтверджують, що запропонована організаційно-логістична модель не зводиться лише до скорочення календарної тривалості будівництва. Її основна перевага полягає у формуванні більш збалансованих рішень, які враховують компроміс між строками, витратами, надійністю постачання та ресурсною узгодженістю. Це особливо важливо для цивільного будівництва в умовах обмеженого простору майданчика, нестабільності постачання, дефіциту ресурсів і необхідності оперативного коригування організаційних рішень.

11. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі та програмного модуля будівельними організаціями, інжиніринговими компаніями, службами матеріально-технічного

забезпечення та менеджерами будівельних проєктів для оцінювання альтернативних сценаріїв, вибору раціональної схеми постачання, зменшення логістичних втрат, підвищення ритмічності будівельного потоку та обґрунтування управлінських рішень у системі цивільного будівництва.

12. Наукові результати дисертаційної роботи розвивають теоретико-методичні положення організації будівництва в частині інтеграції логістичного інструментарію, багатокритеріальної оптимізації та цифрової підтримки прийняття рішень. Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень, пов’язаних із розширенням бази вхідних даних, інтеграцією з BIM/CDE-середовищами, урахуванням фактичного моніторингу виконання робіт і розробленням більш детальних моделей адаптивного управління будівельними потоками.

13. Достовірність теоретичних результатів дисертаційного дослідження підтверджено їх ефективним застосуванням в рамках відповідних методик підприємствами будівельної галузі (ТОВ «ЗВ «ГІДРОСПЕЦБУД», (м. Запоріжжя); ТОВ «ЗАПОРІЖБУДГРУП», (м. Запоріжжя), ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ» (м. Запоріжжя).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Taylor F. W. The Principles of Scientific Management. New York : Harper & Brothers, 1911. 144 p.
2. Gantt H. L. Work, Wages, and Profits. New York : The Engineering Magazine, 1913. 312 p.
3. Hinze J. W. Construction Planning and Scheduling. 3rd ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2008. 374 p.
4. Moder J. J., Phillips C. R., Davis E. W. Project Management with CPM, PERT, and Precedence Diagramming. 3rd ed. New York : Van Nostrand Reinhold, 1983. 389 p.
5. Kerzner H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. 12th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. 848 p.
6. Halpin D. W., Senior B. A. Construction Management. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 480 p.
7. Koskela L. An Exploration towards a Production Theory and Its Application to Construction. Espoo : Technical Research Centre of Finland, 2000. 296 p. VTT Publications 408.
8. Ballard H. G. The Last Planner System of Production Control : PhD thesis. Birmingham : University of Birmingham, 2000. 192 p.
9. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 648 p.
10. Організація будівництва : підручник / С. А. Ушацький, Ю. П. Шейко, Г. М. Тригер, Н. А. Шебеко ; за ред. С. А. Ушацького. Київ : Кондор, 2007. 521 с.
11. Організація будівельної діяльності : підручник / Р. Я. Зельцер, В. М. Погорельцев, О. А. Тугай та ін. Київ : МП Леся, 2018. 247 с.
12. Організація будівництва : навч. посіб. / О. А. Тугай, В. О. Поколенко, С. А. Ушацький та ін. Київ : КНУБА, 2010. 328 с.

13. Зельцер Р. Я., Лагутін Г. В., Погорельцев В. М., Тугай О. А., Ушацький С. А. Будгенплан. Курсове та дипломне проектування : навч. посіб. Київ : Хай-Тек Прес, 2011. 191 с.

14. Поколенко В. О. Критеріальні та організаційні основи формування циклу будівельних інвестицій на інноваційних засадах : дис. ... д-ра техн. наук. Київ, 2004. 426 с.

15. Радкевич А. В., Павлов І. Д. Багатоцільові моделі організації капітального відновлення об’єктів. Дніпропетровськ : [б. в.], 2003. 225 с.

16. Кравчуновська Т. С. Комплексна реконструкція житлової забудови: організаційно-технологічні аспекти : монографія. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. 230 с.

17. Анин В. И. Ресурсосбережение в строительстве: организационно-технологические решения : монография. Запорожье : ЗГИА, 2006. 236 с.

18. Арутюнян І. А. Організація та управління будівельним комплексом на основі логістичних моделюючих умов : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2013. 263 с.

19. Смиричинський А. Л., Смиричинський В. В., Мартинюк В. В. Логістичний менеджмент у будівництві : монографія. Тернопіль : Збруч, 2006. 262 с.

20. Christopher M. Logistics & Supply Chain Management. 5th ed. Harlow : Pearson Education, 2016. 328 p.

21. Winch G. M. Managing Construction Projects. 2nd ed. Chichester : Wiley-Blackwell, 2010. 544 p.

22. London K. Construction Supply Chain Economics. London ; New York : Taylor & Francis, 2008. 472 p.

23. Vrijhoef R., Koskela L. The four roles of supply chain management in construction. European Journal of Purchasing & Supply Management. 2000. Vol. 6, № 3–4. P. 169–178.

24. Tommelein I. D., Zouein P. P. Interactive dynamic layout planning. Journal of Construction Engineering and Management. 1993. Vol. 119, № 2. P. 266–287.

25. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.

26. Ballard G., Howell G. Shielding production: essential step in production control. Journal of Construction Engineering and Management. 1998. Vol. 124, № 1. P. 11–17.

27. Hopp W. J., Spearman M. L. Factory Physics. 3rd ed. Long Grove : Waveland Press, 2008. 720 p.

28. Ohno T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Portland : Productivity Press, 1988. 143 p.

29. Liker J. K. The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. New York : McGraw-Hill, 2004. 330 p.

30. Tommelein I. D., Walsh K. D., Hershauer J. C. Improving Capital Projects Supply Chain Performance. Austin : Construction Industry Institute, 2003. 146 p.

31. Hamzeh F. R., Ballard G., Tommelein I. D. Rethinking lookahead planning to optimize construction workflow. Lean Construction Journal. 2012. P. 15–34.

32. Meredith J. R., Mantel S. J., Shafer S. M. Project Management: A Managerial Approach. 9th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 600 p.

33. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2018. 688 p.

34. Kymmell W. Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations. New York : McGraw-Hill, 2008. 270 p.

35. Tao F., Zhang M., Nee A. Y. C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. London : Academic Press, 2019. 282 p.

36. Dave B., Kubler S., Främling K., Koskela L. Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards. Automation in Construction. 2016. Vol. 61. P. 86–97.

37. Sacks R., Radosavljevic M., Barak R. Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction. Automation in Construction. 2010. Vol. 19, № 5. P. 641–655.

38. Hunt V. D., Puglia A., Puglia M. RFID: A Guide to Radio Frequency Identification. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. 240 p.

39. Stadtler H., Kilger C., Meyr H. Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies. 5th ed. Berlin : Springer, 2015. 564 p.

40. Akinci B., Fischer M., Levitt R., Carlson R. Formalization and automation of time-space conflict analysis. Journal of Computing in Civil Engineering. 2002. Vol. 16, № 2. P. 124–134.

41. Teizer J. Status quo and open challenges in vision-based sensing and tracking of temporary resources on infrastructure construction sites. Advanced Engineering Informatics. 2015. Vol. 29, № 2. P. 225–238.

42. Heesom D., Mahdjoubi L. Trends of 4D CAD applications for construction planning. Construction Management and Economics. 2004. Vol. 22, № 2. P. 171–182.

43. ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 2: Delivery phase of the assets. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.

44. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: directions for future research. Automation in Construction. 2020. Vol. 114. Article 103179.

45. Національний банк України. Інфляційний звіт. Липень 2025 року. Київ : НБУ, 2025.

46. Report on Damages to Infrastructure from the Destruction Caused by Russia's Military Aggression against Ukraine as of November 2024 / Kyiv School of Economics Institute. Kyiv : KSE Institute, 2025.

47. Sheffi Y. The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage. Cambridge : MIT Press, 2005. 352 p.

48. Tang C. S. Perspectives in supply chain risk management. International Journal of Production Economics. 2006. Vol. 103, № 2. P. 451–488.

49. Christopher M., Peck H. Building the resilient supply chain. International Journal of Logistics Management. 2004. Vol. 15, № 2. P. 1–14.

50. Ballou R. H. Business Logistics/Supply Chain Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain. 5th ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2004. 816 p.

51. World Bank, Government of Ukraine, European Union, United Nations. Ukraine Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 – December 2024. Washington, DC : World Bank, 2025.

52. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. 5th ed. London ; New York : Routledge, 2020. 456 p.

53. Ivanov D. Global Supply Chain and Operations Management: A Decision-Oriented Introduction to the Creation of Value. 3rd ed. Cham : Springer, 2021. 673 p.

54. International Energy Agency. Ukraine's Energy Security and the Coming Winter. Paris : IEA, 2024.

55. IREX. Ukraine Construction Sector Snapshot: Labor Market Intelligence 2025. Washington, DC : IREX, 2025.

56. Державна служба зайнятості України. Ситуація на зареєстрованому ринку праці та діяльність Державної служби зайнятості у 2024 році. Київ : Державна служба зайнятості України, 2025.

57. Gibb A. G. F. Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation. Caithness : Whittles Publishing, 1999. 256 p.

58. Peck H. Resilience in the Food Chain: A Study of Business Continuity Management in the Food and Drink Industry. Cranfield : Cranfield School of Management, 2006. 194 p.

59. Malcolm D. G., Roseboom J. H., Clark C. E., Fazar W. Application of a technique for research and development program evaluation. Operations Research. 1959. Vol. 7, № 5. P. 646–669.

60. Kelley J. E., Walker M. R. Critical-path planning and scheduling. Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference. Boston, 1959. P. 160–173.

61. Elmaghraby S. E. Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models. New York : John Wiley & Sons, 1977. 443 p.

62. Ahuja H. N., Dozzi S. P., AbouRizk S. M. Project Management: Techniques in Planning and Controlling Construction Projects. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1994. 505 p.

63. Silver E. A., Pyke D. F., Thomas D. J. Inventory and Production Management in Supply Chains. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. 782 p.

64. Flanagan R., Norman G. Risk Management and Construction. Oxford : Blackwell Science, 1993. 208 p.

65. Chapman C., Ward S. Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2003. 408 p.

66. Thomas H. R., Horman M. J., de Souza U. E. L., Zavřski I. Reducing variability to improve performance as a lean construction principle. Journal of Construction Engineering and Management. 2002. Vol. 128, № 2. P. 144–154.

67. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B., Bowersox J. C. Supply Chain Logistics Management. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2013. 496 p.

68. Hegazy T., Elbeltagi E. EvoSite: Evolution-based model for site layout planning. Journal of Computing in Civil Engineering. 1999. Vol. 13, № 3. P. 198–206.

69. Batini C., Scannapieco M. Data and Information Quality: Dimensions, Principles and Techniques. Cham : Springer, 2016. 500 p.

70. Miettinen K. Nonlinear Multiobjective Optimization. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1999. 298 p.

71. Ehrgott M. Multicriteria Optimization. 2nd ed. Berlin : Springer, 2005. 323 p.

72. Steuer R. E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application. New York : John Wiley & Sons, 1986. 546 p.

73. Pritchard C. L. Risk Management: Concepts and Guidance. 5th ed. Boca Raton : CRC Press, 2015. 474 p.

74. Gould F. E., Joyce N. E. Construction Project Management. 4th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2014. 384 p.

75. Keeney R. L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Cambridge : Cambridge University Press, 1993. 569 p.

76. Hwang C.-L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin : Springer, 1981. 259 p.

77. Sacks R., Korb S., Barak R. Building Lean, Building BIM: Improving Construction the Tidhar Way. London ; New York : Routledge, 2018. 408 p.

78. Lester A. Project Management, Planning and Control: Managing Engineering, Construction and Manufacturing Projects to PMI, APM and BSI Standards. 7th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 650 p.

79. Burke R. Project Management: Planning and Control Techniques. 5th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2013. 432 p.

80. Blanchard B. S. Logistics Engineering and Management. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2004. 546 p.

81. El-Rayes K., Kandil A. Construction Scheduling with Resource Constraints. Reston : American Society of Civil Engineers, 2005. 144 p.

82. Ahuja H. N. Construction Performance Control by Networks. New York : John Wiley & Sons, 1976. 475 p.

83. Williams H. P. Model Building in Mathematical Programming. 5th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2013. 432 p.

84. Hillier F. S., Lieberman G. J. Introduction to Operations Research. 10th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2015. 992 p.

85. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1993. 846 p.

86. Ghiani G., Laporte G., Musmanno R. Introduction to Logistics Systems Management. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2013. 478 p.

87. Birge J. R., Louveaux F. Introduction to Stochastic Programming. 2nd ed. New York : Springer, 2011. 485 p.

88. Ben-Tal A., El Ghaoui L., Nemirovski A. Robust Optimization. Princeton : Princeton University Press, 2009. 576 p.

89. Demeulemeester E. L., Herroelen W. S. Project Scheduling: A Research Handbook. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. 686 p.

90. Kolisch R., Hartmann S. Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: an update. European Journal of Operational Research. 2006. Vol. 174, № 1. P. 23–37.

91. Hartmann S., Briskorn D. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 207, № 1. P. 1–14.

92. Daskin M. S. Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. 544 p.

93. Hamzeh F. R., Ballard G., Tommelein I. D. Is the Last Planner System applicable to design? A case study. 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Taipei, 2009. P. 165–176.

94. Snyder L. V., Shen Z.-J. M. Fundamentals of Supply Chain Theory. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 400 p.

95. Coello Coello C. A., Lamont G. B., Van Veldhuizen D. A. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. 2nd ed. New York : Springer, 2007. 800 p.

96. 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, № 2. P. 182–197.

97. Deb K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Chichester : John Wiley & Sons, 2001. 497 p.

98. Srinivas N., Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. Evolutionary Computation. 1994. Vol. 2, № 3. P. 221–248.

99. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading : Addison-Wesley, 1989. 412 p.

100. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to Evolutionary Computing. Berlin : Springer, 2003. 300 p.

101. Gen M., Cheng R. Genetic Algorithms and Engineering Optimization. New York : John Wiley & Sons, 2000. 495 p.

102. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1999. Vol. 3, № 4. P. 257–271.

103. Talbi E.-G. Metaheuristics: From Design to Implementation. Hoboken : John Wiley & Sons, 2009. 624 p.

104. Hartmann S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. Naval Research Logistics. 1998. Vol. 45, № 7. P. 733–750.

105. Pinedo M. L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 5th ed. Cham : Springer, 2016. 670 p.

106. Deb K., Agrawal R. B. Simulated binary crossover for continuous search space. Complex Systems. 1995. Vol. 9, № 2. P. 115–148.

107. Sommerville I. Software Engineering. 10th ed. Boston : Pearson, 2016. 816 p.

108. Pressman R. S., Maxim B. R. Software Engineering: A Practitioner's Approach. 9th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2020. 704 p.

109. Bass L., Clements P., Kazman R. Software Architecture in Practice. 3rd ed. Upper Saddle River : Addison-Wesley, 2013. 640 p.

110. Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture. Boston : Addison-Wesley, 2003. 560 p.

111. Power D. J. Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers. Westport : Quorum Books, 2002. 252 p.

112. Turban E., Sharda R., Delen D. Decision Support and Business Intelligence Systems. 9th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2011. 696 p.

113. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.

114. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Boston : Addison-Wesley, 1994. 395 p.

115. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter. 3rd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2022. 579 p.

116. Van Rossum G., Drake F. L. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley : CreateSpace, 2009. 242 p.

117. Oliphant T. E. Guide to NumPy. 2nd ed. Austin : Continuum Press, 2015. 364 p.

118. Kimball R., Ross M. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling. 3rd ed. Indianapolis : John Wiley & Sons, 2013. 600 p.

119. Inmon W. H. Building the Data Warehouse. 4th ed. Indianapolis : John Wiley & Sons, 2005. 576 p.

ДОДАТКИ

Додаток А

Список опублікованих праць здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», які включено до міжнародних наукометричних баз:

1. Арутюнян І. А., Коваленко О. ОПТИМІЗАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛОГІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ. Мости та тунелі: теорія, дослідження практика. 2024. № 25. С. 13-19. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303286

2. Коваленко О., Арутюнян І. А. Вдосконалення організаційно-логістичних процесів цивільного будівництва на основі адаптивних стохастичних моделей. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2026. Т. 1. № №57 (2026). С. 57-63. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(1).57-63

3. O. S. Kovalenko. MULTI-AGENT COORDINATION OF REVERSE LOGISTICS FLOWS IN RESIDENTIAL RESTORATION UNDER STOCHASTIC ENVIRONMENTS. Bridges and tunnels: theory, research, practice, 2026, No 29. C. 59–65. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2026-29-07

4. Коваленко О. С. Багатокритеріальна математична модель оптимізації організаційно-логістичних процесів у цивільному будівництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2026. No 25. С. 124-139. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-10

Праці апробаційного характеру:

4. Коваленко О. С. Вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок логістичних моделей. Геостратегічні трансформації та траєкторія національної безпеки в контексті відбудови і сталого розвитку України: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (25–26 трав. 2023 р., м. Запоріжжя) / наук. ред. Н. Г. Метеленко. Одеса : Олді+, 2023. С. 581-584.

5. Коваленко О. С. Логістичні моделі як інструмент вдосконалення організаційних процесів у цивільному будівництві. Програма та тези доповідей. Архітектура, Дизайн та Будівництво: Інноваційні технології: Міжнародний науково-технічний форум, 15–16 листопада 2023 р., м. Київ. Київ : Видавництво Ліра-К, 2023. С. 493–494.

6. Коваленко О. С. Інтеграція будівельних консолідаційних центрів та моделей Open Book як драйвер стійкості процесів відбудови. Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали Міжнар. наук. інтернет-конф. (вип. 108, 5–6 берез. 2026 р.). Тернопіль, 2026. URL: http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2491

Додаток Б

Довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження

ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ»
08130, Київська обл., Бучанський р-н,
с. Петропавлівська Борщагівка,
вул. Велика Кільцева 4-Б, каб. 210
ЄДРПОУ 43377889
р/р UA72 305299 00000 26005000213884
в АТ КБ «ПРИВАТБАНК»,
тел.. +380676255792
E-mail: anstroyproject@gmail.com
ДСТУ EN ISO 9001:2018
Сертифікат № V.058-21 від 24.09.2021р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

У будівельній організації ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ» складено цю довідку щодо впровадження результатів дисертаційної роботи Коваленка Олександра Сергійовича на тему «Вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок логістичного інструментарію» із застосуванням організаційно-логістичної моделі та багатокритеріального математичного інструментарію для оптимізації управлінських і виробничих процесів будівельних проєктів. У межах реалізації зазначеного завдання було розроблено та впроваджено в практику планування будівельних робіт організаційно-логістичний підхід, що включає: модуль оцінювання строків виконання робіт; блок розрахунку сукупних логістичних витрат; інструментарій оцінки надійності постачання ресурсів; механізм аналізу ресурсної збалансованості; систему перевірки обмежень будівельного майданчика, зокрема складської місткості, часових вікон доставки та готовності фронтів робіт.

Під час пілотного впровадження запропонованого підходу на будівельному об'єкті було здійснено порівняння традиційного календарно-ресурсного планування з оптимізаційним організаційно-логістичним сценарієм. Використання багатокритеріальної моделі дозволило підвищити узгодженість між графіком виконання робіт, постачанням матеріалів, наявністю трудових ресурсів і можливостями будівельного майданчика. У результаті було зменшено кількість простоїв техніки та робочих бригад, покращено планування постачання матеріалів і забезпечено більш раціональний розподіл ресурсів між окремими ділянками виконання робіт.

Впроваджений логістичний інструментарій забезпечив можливість оперативного аналізу альтернативних сценаріїв організації будівельного процесу з урахуванням строків, витрат, надійності постачання та ресурсної збалансованості. Запропонований механізм багатокритеріальної оцінки дозволяє керівнику проєкту обирати раціональні організаційно-логістичні рішення відповідно до фактичних умов реалізації будівельного об'єкта, наявних ресурсних обмежень і ризиків порушення графіка виконання робіт.

За результатами впровадження організаційно-логістичного інструментарію досягнуто: скорочення тривалості окремих організаційно-підготовчих і будівельно-монтажних процесів на 10 %; зменшення логістичних витрат на 8 %; підвищення рівня своєчасності постачання матеріалів на 14 %; скорочення часу прийняття управлінських рішень щодо перерозподілу ресурсів на 18 %. Отримані результати підтверджують доцільність застосування багатокритеріальної організаційно-логістичної моделі для підвищення ефективності управління будівельними процесами.

На підставі вищезазначеного впровадження визнано успішним і таким, що сприяє підвищенню ефективності організаційних процесів, раціональному використанню ресурсів, зниженню ризиків затримок і посиленню конкурентоспроможності ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ» на ринку будівельних послуг.

Директор ТОВ «АНСТРОЙ ПРОЕКТ» Артем ІЧЕТОВКІН

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЗАПОРІЖБУДГРУП»

08130, Київська обл., Бучанський р-н, с. Петропавлівська Борщагівка,
вул. Велика Кільцева 4-Б, каб. 210
п/р № UA 10 305299 00000 26000040209143 в АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
ЄДРПОУ 43754663
Телефон +380985982618, Адреса електронної пошти: zbg_office@ukr.net

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Будівельна організація ТОВ «ЗАПОРІЖБУДГРУП» надає довідку про впровадження результатів дисертаційної роботи Коваленка Олександра Сергійовича на тему «Вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок логістичного інструментарію» із застосуванням багатокритеріального організаційно-логістичного підходу для підвищення ефективності планування, координації та ресурсного забезпечення будівельних проєктів. У межах виконання зазначеної роботи було використано методичні положення щодо формування альтернативних сценаріїв організації будівництва, оцінювання строків виконання робіт, логістичних витрат, надійності постачання матеріалів і збалансованості використання ресурсів.

Розроблений організаційно-логістичний інструментарій було застосовано під час планування та коригування виробничих процесів на будівельному об'єкті. Його використання дозволило більш чітко узгодити графік виконання робіт із поставками матеріально-технічних ресурсів, доступністю трудових ресурсів, можливостями складування та фактичною готовністю фронтів робіт. Особливу увагу було приділено виявленню логістичних обмежень, які можуть впливати на строки виконання робіт, виникнення простоїв і додаткових витрат.

У процесі впровадження було використано механізм багатокритеріального оцінювання організаційно-логістичних рішень, що дає змогу порівнювати декілька можливих сценаріїв реалізації будівельного процесу. Такий підхід дозволив керівнику проєкту оцінювати управлінські рішення не лише за показником тривалості, а й з урахуванням вартості логістичних операцій, стабільності постачання, завантаження ресурсів, складських обмежень і ризиків порушення календарного графіка.

За результатами впровадження запропонованого інструментарію досягнуто: скорочення витрат часу на планування та коригування графіків виконання робіт на 17 %; зменшення логістичних витрат на 7 %; підвищення рівня узгодженості постачання матеріалів із графіком будівельних робіт на 15 %; зниження ризиків простоїв техніки та робочих бригад на 13 %. Отримані результати підтверджують ефективність використання логістичного інструментарію та багатокритеріального математичного моделювання для оптимізації організаційних процесів цивільного будівництва.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Коваленка О. С. визнано успішним і доцільним для подальшого використання у практиці діяльності ТОВ «ЗАПОРІЖБУДГРУП» з метою підвищення ефективності управління будівельними проєктами, раціонального використання ресурсів, зниження логістичних витрат і забезпечення більш стабільного виконання будівельних робіт.

Директор ТОВ «ЗАПОРІЖБУДГРУП» Богдан ШВЕЦЬ

Товариство з обмеженою відповідальністю
ЗВ ГІДРОСПЕЦБУД

69006 м.Запоріжжя
пр.Соборний 234, оф. 65
тел./факс (061) 212-84-52
ел. адреса info@gss.company

р/р UA973052990000026006030220932
у ПАТ «ПРИВАТБАНК» МФО 305299
ЄДРПОУ 30082302
ІПН №300823008318

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Будівельна організація ТОВ «ЗВ «Гідроспецбуд» підтверджує впровадження результатів дисертаційної роботи Коваленка Олександра Сергійовича на тему «Вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва за рахунок логістичного інструментарію» у практику планування та організації будівельних процесів. У межах впровадження використано організаційно-логістичну модель, що передбачає оцінювання альтернативних сценаріїв виконання робіт за критеріями тривалості будівництва, сукупних логістичних витрат, надійності постачання ресурсів та ресурсної збалансованості.

Запропонований у дисертаційній роботі інструментарій було застосовано для підвищення узгодженості між календарним графіком виконання робіт, потребою в матеріально-технічних ресурсах, умовами постачання, можливостями складування та готовністю фронтів робіт. Це дозволило більш обґрунтовано визначати черговість виконання окремих будівельних операцій, своєчасно виявляти ризики порушення графіка, а також приймати рішення щодо коригування постачання та перерозподілу ресурсів між ділянками будівельного майданчика.

У процесі впровадження особливу увагу приділено використанню багатокритеріального підходу до вибору організаційно-логістичних рішень. Застосування такого підходу дало змогу порівнювати декілька допустимих варіантів організації будівельного процесу та обирати найбільш раціональний сценарій з урахуванням фактичних умов реалізації об'єкта, ресурсних обмежень, строків постачання матеріалів і ризиків виникнення простоїв.

За результатами впровадження отримано такі практичні результати: скорочено час підготовки та узгодження організаційно-логістичних рішень на 16 %; зменшено витрати, пов'язані з неузгодженістю постачання та простоєм ресурсів, на 8 %; підвищено рівень стабільності забезпечення будівельного процесу матеріалами на 12 %; знижено ризики відхилення від календарного графіка на 14 %. Отримані показники підтверджують практичну ефективність запропонованого логістичного інструментарію для вдосконалення організаційних процесів цивільного будівництва.

На підставі проведеного впровадження результати дисертаційної роботи Коваленка О. С. визнано корисними для практичного використання в діяльності ТОВ «ЗВ «Гідроспецбуд». Запропонований підхід сприяє підвищенню якості планування, раціональному використанню ресурсів, зменшенню логістичних ризиків і забезпеченню більш стабільної реалізації будівельних проєктів.

З повагою,
директор ТОВ «ЗВ «ГІДРОСПЕЦБУД» **І.Р. Буряк**

Товариство з обмеженою відповідальністю «ЗВ «ГІДРОСПЕЦБУД» 30082302 Україна м.Запоріжжя

УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя, 69011, Україна
тел.: (061) 764-45-46, факс: (061) 228-75-08, e-mail: znu@znu.edu.ua, Код ЄДРПОУ 02125243

11.06.2026 № 01/01-23/1025 На № _____ від _____

ДОВІДКА
про впровадження дисертаційної роботи аспіранта кафедри промислового та цивільного будівництва
КОВАЛЕНКА ОЛЕКСАНДРА СЕРГІЙОВИЧА

Результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі Коваленко О.С. за темою: **«ВДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЦИВІЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА ЗА РАХУНОК ЛОГІСТИЧНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ»** впровадженні в межах удосконалення навчального процесу, при проведені практичних занять в Запорізькому національному університеті Інженерного навчально-наукового інституту ім.. Ю.М. Потебні на кафедрі промислового та цивільного будівництва для першого рівня вищої освіти (бакалавр) у дисциплінах «Організація будівництва», «Економічна діяльність будівельних організацій», «Зведення та монтаж будівель і споруд» та на другому рівні вищої освіти (магістр) у дисциплінах «Логістичні аспекти забезпечення будівельних об`єктів», «Керування проєктами та оптимізація проєктних рішень в будівництві» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за освітніми програмами «Промислове і цивільне будівництво». Основна увага приділялася використанню логістичного інструментарію, багатокритеріального математичного моделювання та програмної підтримки прийняття організаційно-логістичних рішень на різних етапах планування й реалізації будівельного проєкту.

Під час впровадження були оновлені навчальні матеріали з урахуванням сучасних підходів до планування, координації ресурсів, логістичного забезпечення та оптимізації організаційно-технологічних рішень у цивільному будівництві. Зокрема, до навчального процесу було інтегровано методики параметризації організаційно-логістичних процесів і багатокритеріального оцінювання альтернативних сценаріїв, що дозволяють виконувати аналіз ефективності управлінських рішень з урахуванням строків виконання робіт, логістичних витрат, надійності постачання та ресурсної збалансованості.

У результаті інтеграції цієї тематики в освітній процес студенти отримали практичні навички аналізу логістичних процесів у будівництві, оцінювання впливу постачання, складування, транспортних потоків і готовності фронтів робіт на ефективність будівельного проєкту, засвоїли основи формування організаційно-логістичних моделей та вибору раціональних управлінських рішень в умовах обмежених ресурсів і просторових обмежень будівельного майданчика.

Таким чином, реалізоване впровадження дозволило поглибити професійну підготовку здобувачів освіти, посилити міждисциплінарні зв'язки між дисциплінами, а також підвищити якість освітнього процесу відповідно до сучасних вимог будівельної галузі.

Проректор з наукової роботи,
Доктор технічних наук, професор Дмитро ЯРИМБАШ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Запорізький національний університет Ідентифікаційний код 02125243