

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БЛОННИЙ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 69.05:005.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАУКОВО-ПРИКЛАДНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ
ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.В.Блонний

Наукові керівники:

доктор філософії, доцент МАЛИХІН Михайло Олександрович, професор
кафедри організації і управління будівництвом

кандидат технічних наук, доцент ШАТРОВА Інна Анатоліївна, доцент
кафедри організації і управління будівництвом

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Блонний А.В. Науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності.- Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. - Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». - Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2026.

Дисертацію присвячено концептуально-теоретичному та науково-методичному обґрунтуванню і розробленню науково-прикладного інструментарію визначення раціональної тривалості будівництва в умовах невизначеності на засадах комплексної часової аналітики, цифрового прогнозування та адаптивного моделювання ризиків. Реалізація поставленої мети передбачає формування моделей стохастичного планування строків, розроблення алгоритмів ухвалення строкових управлінських рішень, а також підготовку практичних рекомендацій для управлінців, спрямованих на скорочення тривалості будівництва без зниження якості та порушення ресурсної збалансованості

Нагальність проведення дослідження зумовлена трансформаційними процесами у будівельній галузі, що супроводжуються нестабільністю зовнішнього середовища, зміною ринкової кон'юнктури, коливаннями ресурсного забезпечення та зростанням ризиків. Чинні нормативно-детерміновані підходи до строкового планування в умовах варіативності технологій, логістичних обмежень і непередбачуваних чинників втрачають точність та керованість, що зумовлює потребу впровадження стохастичних методів прогнозування. Актуальність дослідження підсилюється запитом галузі на цифрові, аналітично обґрунтовані механізми визначення оптимальної тривалості будівництва з урахуванням ризиків, ресурсної доступності та технологічної послідовності. Запропонований інструментарій спрямований на підвищення точності календарного планування, мінімізацію зривів строків, скорочення витрат і синхронізацію дій учасників проєкту.

Впровадження його результатів забезпечує формування адаптивних моделей строкового управління, особливо актуальних для масштабних інфраструктурних, девелоперських і відновлювальних проєктів.

Перший розділ дисертації фокусувався на формуванні концептуально-теоретичних засад створення науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності. У його межах здійснено ретроспективний аналіз розвитку підходів до оцінювання строків будівельних процесів – від нормативно-фіксованих схем до гнучких цифрових моделей календарного планування. Розкрито економіко-організаційну природу невизначеності та її вплив на часові параметри реалізації будівельних проєктів, що дало змогу ідентифікувати ключові групи ризиків. Невизначеність організаційно-технологічних характеристик девелоперського проєкту розглянуто як багатовимірну категорію, що відображає неповноту та мінливість інформації щодо внутрішніх і зовнішніх чинників впливу на строки будівництва. Вона охоплює коливання ресурсного забезпечення, змінність технологічних режимів, логістичних умов, кадрового потенціалу та організаційної структури управління. Окрему увагу приділено впливу зовнішнього середовища, зокрема політико-економічних, регуляторних та кліматичних чинників. Виконано огляд сучасних наукових підходів до адаптивного управління строками будівництва з урахуванням стохастичної природи процесів. Сформована теоретична база слугує основою для побудови прикладного інструментарію цифрового прогнозування та моделювання оптимальної тривалості будівництва. Обґрунтовано, що невизначеність у будівельних проєктах виступає активним фактором трансформації системи управління часом, ресурсами та результативністю. У зв'язку з цим календарне планування розглядається як процес динамічного балансування між жорстко фіксованими контрольними точками та адаптивними механізмами коригування. Забезпечення стійкості графіків у змінному середовищі потребує впровадження системних підходів до

управління невизначеністю на основі інтеграції аналітичних, прогнозних, інформаційних і поведінкових інструментів.

Другий розділ дисертації спрямований на формування загально-методичного підґрунтя розроблення науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності. У межах цього етапу здійснено перехід від теоретичних узагальнень до побудови прикладних моделей часової оптимізації будівельних процесів. Розроблено методологію формування та трансформації організаційно-технологічних мережових моделей різних типів із використанням сучасних BIM- та PLM-технологій, а також прогнозно-сценарних та оптимізаційних підходів. Проведено структуризацію факторів, що визначають часові параметри проєктів, зі встановленням їх взаємозв'язків, інтенсивності впливу та пріоритетності. Запропоновані моделі оцінювання тривалості базуються на імовірнісних і стохастичних методах, що дає змогу враховувати невизначеність і ризики. Особливу увагу приділено інтеграції цифрових інструментів прогнозування у формування раціонального календарного графіка. Обґрунтовано доцільність побудови багатовимірного класифікаційного простору з урахуванням імовірнісного розподілу параметрів. Сформовано типологію впливу ключових факторів на часові затримки та визначено їхню пріоритетність щодо критичного шляху. Запропоновано методологію використання моделей Монте-Карло, Террі Вільямса та байєсівських механізмів оновлення оцінок. Доведено, що стохастичні моделі забезпечують перехід від точкових прогнозів до інтервальних оцінок із розподілом імовірностей. Це дозволяє визначати не лише очікуваний строк завершення робіт, а й критичні часові межі реалізації проєкту. Показано можливості адаптації прогнозів до змін зовнішніх умов у режимі реального часу. Обґрунтовано необхідність урахування складних взаємозв'язків між різнорідними факторами невизначеності. Сформовано підхід до аналізу чутливості, сценарного прогнозування та симуляції ризиків. Запропоновано послідовну логіку побудови стохастичної моделі – від збору

вхідних даних до прийняття управлінських рішень. Сформоване методичне підґрунтя створює основу для апробації прикладного інструментарію оптимізації тривалості будівництва на наступному етапі дослідження.

Третій, ключовий, розділ дисертації відображає формування та практичну апробацію науково-аналітичного комплексу визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності. На цьому етапі всі процедури оптимізації строків та відповідні результати отримано на основі застосування суттєво модернізованої цифрово-адаптованої мережевої організаційно-технологічної моделі будівництва. Розроблено алгоритми прийняття строкових управлінських рішень, пристосовані до нестабільності зовнішнього середовища та варіативності ресурсних обмежень. Виконано верифікацію цифрової моделі оптимізації на базі фактичних даних реалізованих будівельних проєктів. Ключовим результатом етапу стало створення цифрової мережевої моделі вдосконаленого типу, що поєднує інформаційно-аналітичні, прогнозні та коригувальні процедури оптимізації тривалості робіт у межах циклу будівельного девелоперського проєкту. Обґрунтовано логіку інтеграції цифрових інструментів у структуру мережевої моделі та застосування алгоритмів цифрового сценарного моделювання. Виконано порівняльний аналіз базової та оптимізованої тривалості з використанням традиційних і стохастичних підходів. Досліджено залежність скоригованої тривалості від рівня нестабільності зовнішнього середовища. Запропоновано адаптивний алгоритм оптимізації та алгоритм обчислення скоригованої тривалості з використанням нейронної мережі типу LSTM. Реалізація цього етапу забезпечила зростання точності прогнозів, підвищення надійності та прикладної результативності розробленої моделі. Сформовано практичні передумови для її подальшого впровадження у діяльність будівельних організацій на наступному етапі дослідження

Четвертий, завершальний розділ дисертації присвячений практичному впровадженню розробленого науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва та оцінюванню результатів

його функціонування в реальних виробничих умовах. Ключовим результатом етапу є створення комплексу прикладних програмних засобів, що реалізують удосконалену цифрову мережеву модель циклу будівельного девелоперського проєкту. Програмні модулі забезпечують цифровий супровід адміністрування проєкту, формування первинного профілю участі організацій-виконавців, оцінювання ролі стейкхолдерів і визначення ключових показників ефективності. Побудована інтегрована мережева модель дозволяє відтворювати критичний шлях, здійснювати локалізацію «вузьких місць» та виконувати коригування ресурсного забезпечення. Інструменти факторно-ризикової декомпозиції і стохастично-ймовірнісного прогнозування забезпечують ранжування ризиків та сценарне моделювання строків. Модулі адаптивного навчання на основі LSTM та механізми байєсівського оновлення підтримують самонавчання й постійне уточнення моделей. Оптимізаційний блок визначає мінімально можливі строки з урахуванням рівня ризиків, а підсумковий модуль здійснює синтез результатів для остаточного узгодження організаційно-технологічних параметрів. Засоби візуальної аналітики та дашборди забезпечують оперативний контроль і наочне відображення стану проєкту. Підсумком розділу є визначення синергетичного ефекту проєктного циклу, оцінка технічної, економічної та виконавчої результативності, а також формування практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва без зниження якості.

Інноваційною сутністю представленого дослідження, що вирізняє його значення для науки, є наукове обґрунтування та впровадження нового алгоритму імітаційно-стохастичного коригування та оптимізації тривалості виконання робіт у будівельних проєктах. Алгоритм передбачає системну постановку задачі з визначенням об'єкта моделювання, цілей оптимізації, критичних робіт, ресурсних обмежень та ключових показників ефективності. Використовується структурований збір і підготовка вихідних даних, включно з календарними графіками, ресурсами та історичною інформацією про строки виконання робіт, із формуванням ймовірнісних інтервалів тривалості.

Створюється детальна початкова модель графіка робіт, що відтворює залежності між завданнями та ресурсними обмеженнями. Імітаційне моделювання дозволяє оцінювати розподіл загальної тривалості будівництва та виявляти критичні шляхи, а статистичний аналіз результатів забезпечує коригування робіт із високим ризиком затримок. Оптимізаційні процедури, включно зі стохастичними методами та генетичними алгоритмами, визначають мінімальні очікувані строки з урахуванням ресурсних обмежень. Проведено валідацію моделі на основі історичних та реальних даних, що підвищує точність прогнозів. Формуються практичні рекомендації та план управління ризиками для ефективного ресурсного та часово орієнтованого керування проєктом.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у впровадженні та теоретичному обґрунтуванні стохастичного підходу до визначення тривалості будівництва, що вперше розглядає часові параметри проєкту як інтервали ймовірнісних станів замість фіксованих значень. У межах дослідження запропоновано класифікацію чинників, що впливають на строки реалізації будівництва, включно з організаційними, технологічними, ресурсними, зовнішніми та форс-мажорними ризиками, з визначенням їх інтенсивності та ймовірності впливу. Теоретико-методичний фундамент строкового планування вдосконалено шляхом інтеграції багатофакторного аналізу та ймовірнісного моделювання, що забезпечило адаптивність управлінських рішень в умовах невизначеності. Сформовано цифровий інструментарій прогнозування строків із застосуванням методів Монте-Карло та аналізу чутливості, який дозволяє автоматично генерувати альтернативні календарні сценарії. Подальший розвиток отримали підходи до формування календарно-ресурсних стратегій через введення показника гнучкості F-index, що характеризує здатність системи адаптуватися до змін середовища. Подальшого розвитку набула процедура оцінки ефективності строкового управління із застосуванням інтегрального TRE-індексу, орієнтованого на ризиково-часову результативність.

На підставі отриманих у дисертації результатів:

Вперше:

- ✓ обґрунтовано «інтегроване поняття оптимальної тривалості будівництва». Оптимальна тривалість реалізації будівельного девелоперського проєкту визначається як науково обґрунтований, адаптивний часовий інтервал здійснення інвестиційно-будівельного циклу. Він формується шляхом багатовимірного аналізу внутрішніх і зовнішніх умов розвитку проєкту та формалізується з використанням стохастичних і ймовірнісних методів прогнозування;
- ✓ розроблено нову класифікацію чинників, що впливають на тривалість реалізації будівельних проєктів, у межах якої часові ризики структуровано за групами: організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні та форс-мажорні. Кожен фактор оцінюється за силою впливу, його напрямом та ймовірністю реалізації;

Удосконалено:

- *стохастичний підхід до визначення тривалості будівництва, який інтегрує ймовірнісні параметри ресурсних відхилень, ризикові фактори та варіативність технологічних процесів. Це дозволяє оцінювати часові сценарії не як фіксовані величини, а як діапазон ймовірнісних станів, що підвищує точність прогнозів, забезпечує гнучкість управлінських рішень та адаптивність планування у змінному середовищі будівельного проєкту.*
- *теоретико-методичні підходи до строкового планування шляхом інтеграції багатofакторного аналізу з ймовірнісним моделюванням. Це дало змогу сформулювати адаптивну методику оцінки тривалості будівництва в умовах нестабільності та невизначеності, забезпечуючи обґрунтоване прийняття рішень щодо критичних робіт, ресурсних обмежень та пріоритетів виконання завдань.*
- *науково-методичний підхід до формалізації змісту та побудови компонент цифрового інструментарію прогнозування строків будівництва, заснованого на методах Монте-Карло, аналізі чутливості та ризиковому*

ранжуванні факторів. Це забезпечує автоматизоване формування альтернативних календарних сценаріїв, дозволяє оцінювати варіативність строків, прогнозувати критичні шляхи та підвищує ефективність управління часовими параметрами проєктів.

Набули подальшого розвитку:

- *науково-прикладні підходи до комплексної інтеграції класичних мережевих методів організації будівництва з цифровими інструментами планування.* Розроблена модель поєднує параметричний графо-аналітичний базис ВІМ для високоточних симуляцій життєвого циклу об'єкта, дозволяючи візуалізувати часові та технологічні взаємозв'язки, прогнозувати наслідки змін і оцінювати ризики. Це забезпечує підвищену точність управління проєктом та контроль за тривалістю робіт;
- *методико-аналітичні процедури відстеження трансформацій організаційно-технологічних характеристик на всіх стадіях будівництва.* Такий підхід відкриває можливості для динамічного коригування календарних планів і ресурсного забезпечення в умовах невизначеності, поєднуючи цифрові та традиційні методи управління, що сприяє оптимізації тривалості будівництва та підвищенню ефективності реалізації девелоперських проєктів;
- *науково-методичні підходи до формування календарно-ресурсних стратегій через введення показника гнучкості строкового управління (F-index).* Цей індикатор відображає здатність проєкту адаптуватися до змін ресурсної динаміки та впливу зовнішніх ризиків, забезпечуючи більшу стійкість і ефективність у плануванні будівельних процесів;
- *аналітичні процедури оцінювання ефективності строкового планування шляхом впровадження інтегральної метрики Time-Risk Efficiency (TRE-індексу).* Вона дозволяє кількісно оцінити якість управління строками порівняно з традиційними детермінованими методами, враховуючи ризикові та часові аспекти, що підвищує точність і прогнозованість управлінських рішень.

Результати наукового дослідження знайшли своє застосування в діяльності будівельних та девелоперських компаній, зокрема «Експертиза-С», «Марстог-груп» та «Альфа-сервіс». На основі досліджень автора було створено комплекс програм для оптимізації тривалості робіт у девелоперських та будівельних проєктах. Впровадження розробленого інструментарію дозволяє скоротити строки реалізації проєктів, знизити рівень невизначеності та ефективніше використовувати ресурси. Результати можуть слугувати основою для формування корпоративних регламентів управління строками. Вони також відкривають перспективи розвитку інтегрованих BIM-модулів (BIM+Time) та систем моніторингу ризиків. Окремі результати дослідження були інтегровані у навчальні дисципліни, магістерські роботи та кейс-тренажери КНУБА.

Ключові слова: організація будівництва, оптимальна тривалість будівництва, невизначеність характеристик будівельного проєкту, стохастичне моделювання строків, ймовірнісні методи прогнозування, інтеграція BIM-,цифрових та календарних моделей, ризик-орієнтоване управління, алгоритми імітаційної оптимізації, TRE-індекс .

ABSTRACT

Blonny A.V. Scientific and applied tools for determining the optimal duration of construction under conditions of uncertainty.- Qualification scientific work in the form of a manuscript. - Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction" in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering". - Kyiv National University of Construction and Architecture. - Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the conceptual, theoretical and scientific and methodological substantiation and development of scientific and applied tools for determining the rational duration of construction under conditions of uncertainty on the basis of complex time analytics, digital forecasting and adaptive risk modeling. The implementation of the goal involves the formation of models of stochastic planning of terms, the development of algorithms for making timely management

decisions, as well as the preparation of practical recommendations for managers aimed at reducing the duration of construction without reducing quality and disrupting resource balance. The urgency of conducting the study is due to transformational processes in the construction industry, which are accompanied by the instability of the external environment, changing market conditions, fluctuations in resource supply and increasing risks. Current regulatory-deterministic approaches to term planning in the conditions of variability of technologies, logistical constraints and unpredictable factors lose accuracy and manageability, which necessitates the introduction of stochastic forecasting methods. The relevance of the study is enhanced by the industry's demand for digital, analytically based mechanisms for determining the optimal duration of construction, taking into account risks, resource availability and technological consistency. The proposed toolkit is aimed at increasing the accuracy of schedule planning, minimizing schedule disruptions, reducing costs and synchronizing the actions of project participants. The implementation of its results ensures the formation of adaptive models of schedule management, especially relevant for large-scale infrastructure, development and restoration projects.

The first section of the dissertation focused on the formation of conceptual and theoretical foundations for creating a scientific and applied toolkit for determining the optimal duration of construction under conditions of uncertainty. Within its framework, a retrospective analysis of the development of approaches to estimating the terms of construction processes was carried out - from regulatory fixed schemes to flexible digital models of schedule planning. The economic and organizational nature of uncertainty and its impact on the time parameters of the implementation of construction projects was revealed, which made it possible to identify key risk groups. The uncertainty of the organizational and technological characteristics of a development project was considered as a multidimensional category that reflects the incompleteness and variability of information regarding internal and external factors influencing the construction terms. It covers fluctuations in resource provision, variability of technological regimes, logistical conditions, human resources potential

and organizational management structure. Special attention is paid to the influence of the external environment, in particular political, economic, regulatory and climatic factors. A review of modern scientific approaches to adaptive management of construction deadlines is carried out, taking into account the stochastic nature of processes. The theoretical basis formed serves as the basis for building an applied toolkit for digital forecasting and modeling of optimal construction duration. It is substantiated that uncertainty in construction projects acts as an active factor in the transformation of the time, resource and performance management system. In this regard, calendar planning is considered as a process of dynamic balancing between rigidly fixed control points and adaptive adjustment mechanisms. Ensuring the stability of schedules in a changing environment requires the implementation of systemic approaches to uncertainty management based on the integration of analytical, predictive, information and behavioral tools.

The second section of the dissertation is aimed at forming a general methodological basis for developing a scientific and applied toolkit for determining the optimal duration of construction under conditions of uncertainty. Within the framework of this stage, a transition was made from theoretical generalizations to the construction of applied models of time optimization of construction processes. A methodology for the formation and transformation of organizational and technological network models of various types was developed using modern BIM and PLM technologies, as well as forecasting and scenario and optimization approaches. The factors that determine the time parameters of projects were structured, with the establishment of their interrelationships, intensity of influence and priority. The proposed models for estimating duration are based on probabilistic and stochastic methods, which makes it possible to take into account uncertainty and risks. Special attention is paid to the integration of digital forecasting tools into the formation of a rational calendar schedule. The feasibility of constructing a multidimensional classification space taking into account the probability distribution of parameters was substantiated. A typology of the influence of key factors on time delays has been formed and their priority with respect to the critical path has been

determined. A methodology for using Monte Carlo, Terry Williams, and Bayesian estimation update mechanisms has been proposed. It has been proven that stochastic models provide a transition from point forecasts to interval estimates with probability distributions. This allows us to determine not only the expected completion time of the work, but also the critical time limits for project implementation. The possibilities of adapting forecasts to changes in external conditions in real time have been shown. The need to take into account complex relationships between heterogeneous uncertainty factors has been substantiated. An approach to sensitivity analysis, scenario forecasting, and risk simulation has been formed. A consistent logic for building a stochastic model has been proposed - from collecting input data to making management decisions. The formed methodological basis creates the basis for testing the applied tools for optimizing construction duration at the next stage of the study.

The third, key, section of the dissertation reflects the formation and practical testing of a scientific and analytical complex for determining the optimal duration of construction under conditions of uncertainty. At this stage, all procedures for optimizing terms and the corresponding results were obtained based on the application of a significantly modernized digitally adapted network organizational and technological model of construction. Algorithms for making timely management decisions have been developed, adapted to the instability of the external environment and the variability of resource constraints. The digital optimization model has been verified based on actual data from implemented construction projects. The key result of the stage was the creation of an advanced digital network model that combines information-analytical, predictive and corrective procedures for optimizing the duration of work within the cycle of a construction development project. The logic of integrating digital tools into the structure of the network model and the application of digital scenario modeling algorithms has been substantiated. A comparative analysis of the basic and optimized duration has been performed using traditional and stochastic approaches. The dependence of the adjusted duration on the level of instability of the external

environment was studied. An adaptive optimization algorithm and an algorithm for calculating the adjusted duration using a neural network of the LSTM type were proposed. The implementation of this stage ensured an increase in the accuracy of forecasts, increased reliability and applied effectiveness of the developed model. Practical prerequisites were formed for its further implementation in the activities of construction organizations at the next stage of the study. The fourth, final section of the dissertation is devoted to the practical implementation of the developed scientific and applied tools for determining the optimal duration of construction and evaluating the results of its functioning in real production conditions. The key result of the stage is the creation of a set of applied software tools that implement an improved digital network model of the construction development project cycle. Software modules provide digital support for project administration, the formation of the primary profile of the participation of implementing organizations, the assessment of the role of stakeholders and the determination of key performance indicators. The built integrated network model allows you to reproduce the critical path, localize "bottlenecks" and make adjustments to resource provision. Factor-risk decomposition and stochastic-probabilistic forecasting tools provide risk ranking and scenario modeling of terms. Adaptive learning modules based on LSTM and Bayesian update mechanisms support self-learning and constant refinement of models. The optimization block determines the minimum possible terms taking into account the level of risks, and the final module synthesizes results for the final coordination of organizational and technological parameters. Visual analytics tools and dashboards provide operational control and a visual display of the project status. The result of the section is the determination of the synergistic effect of the project cycle, the assessment of technical, economic and executive effectiveness, as well as the formation of practical recommendations for reducing the duration of construction without reducing quality.

The innovative essence of the presented research, which distinguishes its significance for science, is the scientific substantiation and implementation of a new algorithm for simulation-stochastic adjustment and optimization of the duration of

work in construction projects. The algorithm involves a systematic formulation of the problem with the definition of the object of modeling, optimization goals, critical works, resource constraints and key performance indicators. Structured collection and preparation of input data is used, including calendar schedules, resources and historical information on the terms of work, with the formation of probabilistic duration intervals. A detailed initial model of the work schedule is created, which reproduces the dependencies between tasks and resource constraints. Simulation modeling allows you to estimate the distribution of the total construction duration and identify critical paths, and statistical analysis of the results provides adjustment of works with a high risk of delays. Optimization procedures, including stochastic methods and genetic algorithms, determine the minimum expected terms taking into account resource constraints. The model is validated based on historical and real data, which increases the accuracy of forecasts. Practical recommendations and a risk management plan are formed for effective resource and time-oriented project management.

The scientific novelty of the dissertation work lies in the implementation and theoretical substantiation of a stochastic approach to determining the duration of construction, which for the first time considers the time parameters of the project as intervals of probabilistic states instead of fixed values. The study proposes a classification of factors affecting the timing of construction, including organizational, technological, resource and external risks, with a determination of their intensity and probability of impact. The theoretical and methodological foundation of term planning is improved by integrating multifactor analysis and probabilistic modeling, which ensures the adaptability of management decisions in conditions of uncertainty. A digital toolkit for forecasting deadlines using Monte Carlo methods and sensitivity analysis has been developed, which allows for the automatic generation of alternative calendar scenarios. Approaches to the formation of calendar-resource strategies have been further developed through the introduction of the F-index flexibility indicator, which characterizes the system's ability to adapt to environmental changes. The procedure for assessing the effectiveness of term

management has been improved by using the integral TRE index, focused on risk-time performance.

Based on the results obtained in the dissertation:

For the first time:

✓ the "integrated concept of optimal construction duration" has been substantiated. The optimal duration of the implementation of a construction development project is defined as a scientifically substantiated, adaptive time interval for the implementation of the investment-construction cycle. It is formed through a multidimensional analysis of the internal and external conditions of the project development and is formalized using stochastic and probabilistic forecasting methods;

✓ a new classification of factors affecting the duration of construction project implementation has been developed, within which time risks are structured into groups: organizational, technological, resource, external and force majeure. Each factor is assessed by the strength of the impact, its direction and probability of implementation.

Improved:

- a stochastic approach to determining the duration of construction, which integrates probabilistic parameters of resource deviations, risk factors and variability of technological processes. This allows time scenarios to be assessed not as fixed values, but as a range of probabilistic states, which increases the accuracy of forecasts, ensures flexibility of management decisions and adaptability of planning in a changing environment of a construction project.

- theoretical and methodological approaches to time planning by integrating multifactor analysis with probabilistic modeling. This made it possible to form an adaptive methodology for estimating the duration of construction in conditions of instability and uncertainty, ensuring informed decision-making regarding critical work, resource constraints and task performance priorities.

- a scientific and methodological approach to formalizing the content and building components of a digital construction time forecasting tool, based on Monte

Carlo methods, sensitivity analysis and risk ranking of factors. This provides automated generation of alternative calendar scenarios, allows to assess variability of terms, predict critical paths and increases the efficiency of managing time parameters of projects.

Further development has been made:

- scientific and applied approaches to the complex integration of classical network methods of construction organization with digital planning tools. The developed model combines the parametric graph-analytical basis of BIM for high-precision simulations of the life cycle of an object, allowing to visualize time and technological relationships, predict the consequences of changes and assess risks. This provides increased accuracy of project management and control over the duration of work;

- methodological and analytical procedures for tracking transformations of organizational and technological characteristics at all stages of construction. This approach opens up opportunities for dynamic adjustment of calendar plans and resource provision in conditions of uncertainty, combining digital and traditional management methods, which helps to optimize the duration of construction and increase the efficiency of the implementation of development projects;

- scientific and methodological approaches to the formation of calendar and resource strategies through the introduction of the term management flexibility indicator (F-index). This indicator reflects the ability of the project to adapt to changes in resource dynamics and the impact of external risks, ensuring greater stability and efficiency in the planning of construction processes;

- analytical procedures for assessing the effectiveness of term planning by implementing the integrated Time-Risk Efficiency metric (TRE-index). It allows you to quantitatively assess the quality of term management compared to traditional deterministic methods, taking into account risk and time aspects, which increases the accuracy and predictability of management decisions.

The results of the scientific study have found their application in the activities of construction and development companies, in particular "Expertiza-S", "Marston-

group" and "Alfa-service". Based on the author's research, a set of programs was created to optimize the duration of work in development and construction projects. The implementation of the developed toolkit allows to reduce project implementation times, reduce the level of uncertainty and use resources more efficiently. The results can serve as the basis for the formation of corporate regulations for managing deadlines. They also open up prospects for the development of integrated BIM modules (BIM+Time) and risk monitoring systems. Some research results were integrated into academic disciplines, master's theses and case simulators of the KNUBA.

Keywords: construction organization, optimal construction duration, uncertainty of construction project characteristics, stochastic modeling of deadlines, probabilistic forecasting methods, integration of BIM, digital and calendar models, risk-oriented management, simulation optimization algorithms, TRE-index.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1. Блонний А. Конструювання моделей оцінки тривалості виконання проєктів із застосуванням стохастичних та ймовірнісних підходів для прогнозування та аналізу ризиків. Містобудування та територіальне планування, 2026, 91, 366–379. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.91.366-379>. URL: <https://mtp.knuba.edu.ua/article/view/363186>.

2. Блонний А. Еволюція уявлень про тривалість будівельного процесу: від нормативних підходів до інтегрованих моделей проєктного планування. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 56(2), 144–155. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).144-155](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).144-155). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348061>.

3. Блонний А., Зіньков О. Особливості управління параметрами будівельних проєктів з використання збірного залізобетону. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 55(2), 182–188. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).182-188](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).182-188). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/336011>.

4. Блонний А. Аналіз невизначеності як чинника впливу на хронологічну структуру реалізації будівельних проєктів. Просторовий розвиток, 2025, 15, 272–283. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.272-283>. URL: <https://spd.knuba.edu.ua/article/view/366926>.

5. Блонний А. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2024, 54(2), 200–213. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).200-213](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).200-213). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/341397>.

6. Блонний А., Горбач М. Інтеграція ризик-орієнтованого планування у прогнозування строків реалізації будівельних проєктів в умовах економічної нестабільності. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2022, 49(2),

293–304. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).293-304](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).293-304). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342153>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях:

7. Штиль А. М., Блонний А. В. Управління відновленням житлового фонду на основі сталого розвитку та науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності на основі наукового процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнародної конференції, 12 листопада 2025 р. Київ : Видавництво Ліра-К, 2026. С. 796–797. ISBN 978-617-520-492-4. DOI не присвоєно. Електронний ресурс збірників серії: <https://repository.knuba.edu.ua/communities/cd8c191e-f63b-414f-9a46-ed50fed3862e>.

8. Блонний А. В. Формування моделей визначення тривалості процесів із застосуванням стохастичних та ймовірнісних методів. Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів : матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 04 червня 2026 р. Секція 4 «Стратегічні орієнтири забезпечення функціонування бізнесу». Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 226–227. DOI не присвоєно. Інституційний репозитарій: <http://ir.polissiauniver.edu.ua/>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕННЯ.....	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА В КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ.....	33
1.1 Еволюція уявлень про тривалість будівельного процесу: від нормативних підходів до інтегрованих моделей проектного планування.....	33
1.2 Аналіз невизначеності як чинника впливу на хронологічну структуру реалізації будівельних проектів.....	43
1.3 Огляд сучасних наукових підходів до управління строками будівництва в умовах мінливого середовища.....	57
Висновки до 1-го розділу.....	76
РОЗДІЛ 2. ФОРМУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО АПАРАТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА З УРАХУВАННЯМ РИЗИКОВИХ ЧИННИКІВ.....	78
2.1 Структуризація факторів впливу на часові параметри будівельного процесу: класифікація, взаємозв'язки та пріоритети.....	78
2.2 Побудова моделей оцінювання тривалості з використанням стохастичних та імовірнісних підходів.....	93
2.3 Інтеграція інструментів цифрового прогнозування у визначення оптимального календарного плану в умовах ризиків.....	104
Висновки до 2-го розділу.....	115
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА АПРОБАЦІЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОГО КОМПЛЕКСУ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА.....	118
3.1 Проєктування алгоритмів прийняття рішень щодо строків реалізації будівельних робіт в умовах нестабільного середовища.....	118
3.2 Верифікація цифрової моделі оптимізації тривалості на основі емпіричних даних з реальних будівельних проектів.....	131

3.3 Розробка практичних рекомендацій для управлінців і девелоперських структур щодо скорочення тривалості будівництва без втрати якості.....	140
Висновки до 3-го розділу.....	151
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....	153
4.1 Побудова адаптивної моделі прийняття строкових рішень на основі багатовимірної часової аналітики.....	153
4.2 Верифікація цифрової моделі оптимізації тривалості будівництва на основі емпіричних даних та розрахунків інтегрального скоригованого ефекту.....	160
4.3 Формування комплексу практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва на основі результатів моделювання та цифрової аналітики.....	169
Висновки до 4-го розділу.....	178
ВИСНОВКИ.....	180
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	182
ДОДАТКИ.....	201

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

AACE	Association for the Advancement of Cost Engineering
BIM	інформаційне моделювання будівництва (Building Information Modeling)
CPM	метод критичного шляху (Critical Path Method)
ERP	система планування ресурсів підприємства (Enterprise Resource Planning)
FIM	матриця взаємовпливу факторів (Factor Interaction Matrix)
ISO	Міжнародна організація зі стандартизації
ITRI	інтегральний індекс часового ризику (Integrated Time-Risk Index)
WBS	структурна декомпозиція робіт (Work Breakdown Structure)

ВСТУП

Актуальність теми. Тривалість будівництва належить до ключових організаційно-технологічних параметрів будівельно-інвестиційного проєкту: вона визначає обсяг незавершеного виробництва, графік освоєння інвестицій, потребу в трудових і матеріально-технічних ресурсах, а також виконання договірних зобов'язань щодо строків уведення об'єкта в експлуатацію. Нормування й планування тривалості традиційно спираються на календарно-сітьові моделі організації робіт і нормативні документи (зокрема ДБН А.3.1-5 щодо організації будівельного виробництва), орієнтовані на детерміноване подання строків.

Водночас сучасний будівельний процес реалізується в умовах суттєвої невизначеності. Часові параметри перебувають під впливом різномірних чинників: коливань ресурсної доступності та цін, порушень логістичних ланцюгів постачання, зміни технологічних режимів і фактичної продуктивності, погодно-сезонних обмежень, організаційних збоїв у взаємодії учасників, а також зовнішніх ринкових, регуляторних і форс-мажорних впливів. Для української будівельної галузі ці чинники загострюються безпековими ризиками та масштабними завданнями відновлення, унаслідок чого відхилення фактичної тривалості від планової стає радше системним явищем, аніж винятком. Про масштаб проблеми свідчить і практика: у складних будівельно-інвестиційних проєктах відхилення фактичних строків від директивних є радше системним явищем, аніж винятком, — так, за апробаційним кейсом дослідження фактична тривалість будівництва перевищила проєктну більш ніж удвічі.

Детерміновані підходи до планування строків — фіксовані нормативні тривалості та класичні мережеві моделі критичного шляху — дають одну «точкову» оцінку й не відображають імовірнісного розкиду можливих станів проєкту. Як наслідок, вони систематично недооцінюють ризик затримок, не дають змоги оцінити ймовірність дотримання директивного строку та обмежують обґрунтованість управлінських рішень щодо резервів часу,

черговості робіт і ресурсного забезпечення. Це зумовлює потребу переходу від детермінованих розрахунків до стохастичних та адаптивних моделей визначення тривалості, здатних враховувати мінливість середовища й імовірнісну природу часових параметрів.

У відповідь на ці виклики у світовій і вітчизняній практиці відбувається перехід до імовірнісних та адаптивних методів оцінювання тривалості (імовірнісне мережеве планування, метод Монте-Карло, сценарний аналіз) у поєднанні з цифровими засобами організаційно-технологічного моделювання, зокрема технологіями інформаційного моделювання будівель (BIM). Проблематику визначення й оптимізації тривалості будівництва в умовах невизначеності досліджували за трьома напрямками: імовірнісне мережеве моделювання строків (D. Malcolm та співавтори [36], R. Van Slyke [115], M. Lu і S. AbouRizk [116], Ö. Ökmen і A. Öztaş [24], M. Hajdu і O. Bokor [117]); оцінювання тривалості за неповними та експертними даними (S. Chanas і J. Kamburowski [118], N. Sadeghi, A. Fayek і W. Pedrycz [119], D. Nasir зі співавторами [120], L. Chen [121] та G. Koulinas [48] зі співавторами); цифрове BIM-орієнтоване організаційно-технологічне моделювання (B. Koo і M. Fischer [122], R. Sacks зі співавторами [45], R. Sloot зі співавторами [123]). Вітчизняні засади нормування тривалості й організаційно-технологічної надійності сформовано науковими школами КНУБА (С. А. Ушацький [124], О. А. Тугай [125, 126]) та ПДАБА (В. Р. Млодецький [127], Є. І. Заяць [128, 129], О. О. Мартиш [130]), а також у працях О. І. Менейлюка [131], К. Науменка [132] і А. Блонного [68].

Проте наявні напрацювання здебільшого розглядають окремі аспекти проблеми — або імовірнісне оцінювання тривалості у відриві від організаційно-технологічних мережевих моделей, або цифрові засоби планування без системного врахування часових ризиків. Поза цілісним опрацюванням залишаються багатofакторна класифікація чинників впливу на строки, інтеграція стохастичного оцінювання з мережевими моделями організації робіт і формалізація єдиного цифрового інструментарію

прогнозування та оптимізації тривалості, придатного до застосування в умовах невизначеності.

Отже, розроблення науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності є актуальним науково-технічним завданням, що має істотне значення для організації та технології будівництва й відповідає сучасним потребам будівельної галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційне дослідження виконано в Київському національному університеті будівництва і архітектури відповідно до планів науково-дослідних робіт, зокрема в межах теми № 0124U005196 «Розробка науково-технічного інструментарію для планування діяльності будівельної організації», у виконанні якої автор брав безпосередню участь.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи — теоретико-методичне обґрунтування та розроблення науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності.

Наукова гіпотеза дослідження полягає в припущенні, що подання тривалості будівництва як імовірнісної величини та інтеграція стохастичного оцінювання строків із мережевими організаційно-технологічними моделями й цифровими засобами прогнозування підвищують обґрунтованість і надійність строкових рішень порівняно з традиційними детермінованими підходами в умовах невизначеності.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. проаналізувати еволюцію наукових підходів до визначення тривалості будівництва та узагальнити наявні моделі строкового планування;
2. виявити та структурувати фактори впливу на часові параметри реалізації будівельних проєктів у контексті ризиків і невизначеності;
3. розробити стохастичні та імовірнісні моделі оцінювання тривалості будівництва;
4. сформувати цифровий інструментарій прогнозування строків з урахуванням ризикових і ресурсних характеристик;

5. провести апробацію запропонованого інструментарію на емпіричних даних реальних проєктів та визначити ефективність його застосування;

6. розробити комплекс практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва та підвищення гнучкості строкового управління в умовах невизначеності.

Об’єкт дослідження — процеси організаційно-технологічного забезпечення реалізації будівельних проєктів у задані терміни, що характеризуються багатофакторною часовою динамікою та стохастичним впливом внутрішніх і зовнішніх ризиків.

Предмет дослідження — концептуально-методичні засади та аналітико-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності, що охоплюють методи цифрового прогнозування, оцінювання часових параметрів, управління невизначеністю та оптимізації календарного планування.

Методи дослідження. Методичний базис становить поєднання загальнонаукових і спеціальних методів. Аналіз, синтез, індукцію та дедукцію, порівняльний, системно-структурний та історико-логічний методи застосовано для дослідження еволюції строкового планування та формування концептуально-методичних засад (завдання 1); факторний, класифікаційний і ризик-орієнтований аналіз — для ідентифікації та структурування чинників впливу (завдання 2); методи математичної статистики, стохастичного моделювання, метод Монте-Карло та аналіз чутливості — для побудови імовірнісних моделей оцінювання тривалості (завдання 3); імітаційне моделювання та сценарний аналіз — для цифрового прогнозування часових параметрів (завдання 4); методи економіко-статистичної обробки емпіричних даних, порівняльної оцінки та експертного аналізу — для апробації інструментарію (завдання 5).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

вперше:

– обґрунтовано інтегративне поняття оптимальної тривалості будівництва, за яким оптимальний строк реалізації будівельного девелоперського проєкту трактується як науково вивірений адаптивний часовий проміжок, що формується на основі багатовекторного аналізу внутрішніх і зовнішніх умов і формалізується стохастичними та ймовірнісними методами, — на відміну від традиційного детермінованого трактування строку як фіксованої нормативної величини, що підвищує обґрунтованість строкових рішень;

– сформовано класифікацію чинників впливу на тривалість реалізації будівельних проєктів, у якій часові ризики систематизовано за групами (організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні, форс-мажорні) з оцінюванням кожного за інтенсивністю впливу, спрямованістю дії та ймовірністю прояву, що створює основу для ризик-орієнтованого календарного планування;

удосконалено:

– стохастичний підхід до визначення тривалості будівництва шляхом урахування імовірнісних характеристик ресурсних відхилень, впливу ризикових чинників і варіативності технологічних процесів, що дає змогу подавати часові сценарії як спектр імовірнісних станів, а не жорстко фіксовані значення;

– теоретико-методичні підходи до строкового планування через інтеграцію багатофакторного аналізу з імовірнісним моделюванням, що забезпечує адаптивність рішень щодо критичних робіт, ресурсних обмежень і пріоритетності завдань в умовах невизначеності;

– науково-методичний підхід до формалізації структури та компонентів цифрового інструментарію прогнозування строків на основі методу Монте-Карло, аналізу чутливості та ризик-орієнтованого ранжування чинників, що забезпечує автоматизоване формування альтернативних календарних сценаріїв;

дістало подальшого розвитку:

- інтеграція традиційних мережевих моделей організації будівельних робіт із цифровими засобами планування на графо-аналітичному підґрунті інформаційного моделювання (BIM), що забезпечує імітацію життєвого циклу об'єкта, візуалізацію часово-технологічних взаємозв'язків і прогнозування наслідків змін;

- процедури моніторингу змін організаційно-технологічних параметрів на всіх етапах циклу проєкту, що створюють умови для оперативного коригування календарних графіків і ресурсного забезпечення;

- формування календарно-ресурсних стратегій будівництва з використанням відомого показника гнучкості (індекс гнучкості, F-index) [11]; авторським є не сам показник, а спосіб його адаптації до задачі визначення оптимальної тривалості будівництва та інтеграції у стохастичну модель строкового планування, що дає змогу кількісно відображати спроможність проєкту адаптуватися до коливань ресурсної динаміки та дії зовнішніх ризиків;

- оцінювання результативності строкового управління на основі відомого інтегрального показника ризиково-часової ефективності (Time-Risk Efficiency, TRE-індекс); внесок автора полягає в адаптації цього показника до умов невизначеності будівельного процесу та у процедурі його обчислення за результатами імовірнісного моделювання, що уможливорює кількісне порівняння якості управління строками з традиційними детермінованими підходами.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений інструментарій придатний до застосування в системах девелоперського управління для підвищення обґрунтованості строкових рішень, скорочення тривалості будівництва, зниження ризикових впливів і підвищення адаптивності організаційно-технологічних рішень, а також для раціоналізації використання матеріально-технічних, трудових і фінансових ресурсів. Результати можуть бути використані під час розроблення внутрішніх регламентів управління строками, удосконалення цифрових BIM-модулів

класу «BIM+Time» та створення систем моніторингу відхилень календарних планів. Результати дисертації впроваджено в практичну діяльність будівельних підприємств, що підтверджено довідками про впровадження: ТОВ «МАРСТОН-ГРУП» (№ 24-1 від 20.03.2026), ПАТ «Київздравреконструкція» (№ 33-1 від 12.02.2026) та ЗАТ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво» (№ 87/1 від 12.03.2026), наведеними в додатках.

Результати дослідження орієнтовані на широке коло учасників будівельного процесу. Для замовників і девелоперських компаній вони створюють підґрунтя для обґрунтованого встановлення директивних строків і резервів часу; для генпідрядних та субпідрядних організацій — для адаптивного коригування календарних графіків і ресурсного забезпечення; для проєктних організацій — для інтеграції часового аналізу в середовище інформаційного моделювання. Очікуваними ефектами застосування інструментарію є скорочення непродуктивних утрат часу, зниження ймовірності зриву директивних строків і підвищення узгодженості дій між учасниками проєкту. Результати можуть бути використані також в освітньому процесі підготовки фахівців у галузі будівництва та девелопменту.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана здобувачем самостійно. Усі наукові положення, результати, висновки та практичні рекомендації, винесені на захист, одержано автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: у статті про управління параметрами будівельних проєктів з використанням збірного залізобетону (спільно з О. Зіньковим) — обґрунтування підходу до управління часовими параметрами таких проєктів; у статті про інтеграцію ризик-орієнтованого планування у прогнозування строків (спільно з М. Горбачем) — формалізація процедури врахування ризиків у прогнозуванні тривалості; у тезах про управління відновленням житлового фонду (спільно з А. Штилем) — розроблення науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дослідження оприлюднено та обговорено на двох науково-практичних конференціях: VIII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України» (м. Київ, 12 листопада 2025 р.) та IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів» (м. Житомир, 4 червня 2026 р.).

Публікації. Основні результати дисертації висвітлено у 8 наукових працях, з них 6 статей — у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»), включених до переліку, затвердженого МОН України, та 2 — апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотацій, переліку публікацій здобувача за темою, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

У першому розділі розкрито теоретико-концептуальні основи оптимізації тривалості будівництва: еволюцію уявлень про тривалість будівельного процесу, невизначеність як чинник впливу на хронологічну структуру реалізації проєктів і сучасні наукові підходи до управління строками в мінливому середовищі. У другому розділі сформовано інструментальний апарат дослідження: структуровано фактори впливу на часові параметри, побудовано моделі оцінювання тривалості на стохастичних та імовірнісних засадах і обґрунтовано інтеграцію цифрового прогнозування у визначення оптимального календарного плану в умовах ризиків. У третьому розділі розроблено та апробовано науково-прикладний комплекс оптимізації тривалості: алгоритми прийняття строкових рішень у нестабільному середовищі, верифікацію цифрової моделі на емпіричних даних реальних проєктів і практичні рекомендації щодо скорочення тривалості без утрати якості. У четвертому розділі викладено практичне застосування інструментарію — адаптивну модель прийняття строкових рішень на основі багатовимірної часової аналітики, верифікацію моделі з розрахунком

інтегрального скоригованого ефекту та комплекс практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва. Кожен розділ завершується висновками.

Повний обсяг роботи становить 214 сторінок, з них основного тексту — 159 сторінок; робота містить 33 таблиці, 59 рисунків і 145 джерел.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА В КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ

1.1 Еволюція уявлень про тривалість будівельного процесу: від нормативних підходів до інтегрованих моделей проєктного планування

Уявлення про тривалість будівельного процесу формувалося під впливом змін у методології організації будівництва, трансформації підходів до управління ресурсами та розширення уявлень про складність і багатовимірність проєктної діяльності. Початкові підходи передбачали суворе нормативне регулювання, де час на виконання окремих операцій або цілих етапів встановлювався централізовано та фіксовано. Такі нормативи відображали типізоване уявлення про будівельний процес, яке майже не враховувало конкретного контексту, особливостей об'єкта чи динаміки зовнішнього середовища. Основна мета полягала у встановленні єдиної шкали часу, що забезпечувала зіставність і контроль, але створювала ризики механістичного застосування стандартів у ситуаціях, які вимагали гнучкості.

Із розвитком техніко-економічної думки сформувалися нові підходи до розуміння часу як ресурсу, що залежить від багатьох змінних — організаційних, логістичних, соціальних, технологічних. Утвердилося уявлення, що тривалість будівництва є не сталим нормативним показником, а результатом взаємодії численних чинників, зокрема узгодження рішень між учасниками, доступності матеріалів, ефективності системи логістики та рівня управлінської компетентності. Відтак на зміну жорсткому календарному плануванню приходять підходи, що ґрунтуються на аналізі послідовності робіт, прогнозуванні наслідків затримок і визначенні критичних шляхів у графіку реалізації [30].

Поступово вектор планування змістився в бік інтегрованих моделей, які розглядають тривалість як частину складнішої структури управління проєктом. Тривалість у таких моделях визначається не лише часом виконання робіт, а й синхронізацією ресурсів, адаптивністю системи до змін, взаємодією між командами та здатністю керувати невизначеністю. Ключові елементи формування тривалості в інтегрованій моделі проєктного планування узагальнено на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Еволюція уявлень про тривалість будівельного процесу: ключові етапи та парадигми (розроблено автором на основі [83])

Якщо на початкових етапах головним завданням було дотримання типового графіка, то згодом акцент перенесено на прогнозування наслідків

затримок і підготовку альтернатив. Сучасні системи не фіксують єдиний варіант тривалості, а працюють із варіативними сценаріями, у яких ураховують множину можливих затримок, логістичних збоїв і адаптивних рішень.

Неактуальним стає підхід, за якого всі проєкти мають укластися у визначені строки за будь-яких обставин. Практика показує, що сталі нормативи рідко працюють у динамічних, кризових або нестандартних ситуаціях. Особливо виразно це проявилось у відновлювальному будівництві після стихійних лих, воєнних подій чи економічних потрясінь, де строкова адаптація стала критичним чинником результативності.

Із появою цифрових інструментів управління стало можливим оперувати значним обсягом даних, що надходять із будівельного майданчика в реальному часі: моніторинг прогресу робіт, змін середовища, графіків поставок, дозволів і погоджень. Ці чинники безпосередньо впливають на строкову картину, тому тривалість набуває характеру динамічного індикатора, який відображає і хід будівництва, і функціональність управлінської системи.

Прогресивним підходом сьогодні вважають не забезпечення виконання робіт у жорстко фіксований термін, а здатність організаційно-технологічної системи швидко реагувати на зміни й коригувати часові параметри з мінімальними втратами. Це передбачає проєктування гнучких графіків, механізми внутрішньої компенсації затримок, варіативні сценарії та симуляції впливу затримок на наступні етапи [70].

Отже, еволюція уявлень про тривалість будівництва відображає перехід від календарного нормування до динамічного, багаторівневого й аналітичного управління строками, за якого тривалість розглядають як керований параметр організаційно-технологічної системи проєкту, значення якого прогнозують і коригують, а не задають наперед.

На основі узагальнення розглянутих підходів у роботі вперше обґрунтовано інтегративне поняття оптимальної тривалості будівництва, за яким оптимальний строк реалізації будівельного девелоперського проєкту

трактується як науково вивірений адаптивний часовий проміжок, що формується на основі багатовекторного аналізу внутрішніх і зовнішніх умов і формалізується стохастичними та ймовірнісними методами, — на відміну від традиційного детермінованого трактування строку як фіксованої нормативної величини, що підвищує обґрунтованість строкових рішень. Парадигма критичного шляху у формуванні тривалості будівельного процесу є одним із ключових концептів проєктного управління й основою більшості систем календарно-мережевого планування. Її сутність полягає у виявленні послідовності операцій, які визначають мінімально можливу тривалість проєкту — «критичного шляху»; затримка будь-якої операції цього шляху зумовлює перенесення строку завершення всього проєкту. Управління критичним шляхом дає змогу зосередити ресурси та контроль на найуразливіших ділянках.

Ідея критичного шляху виникла в середині ХХ століття як відповідь на потребу вирішувати складні логістичні задачі в проєктах зі значною кількістю взаємозалежних етапів. Метод критичного шляху (Critical Path Method, CPM) розроблено наприкінці 1950-х років компаніями «Дюпон» і «Ремінгтон Ренд» [31]; він дав змогу перейти від статичних графіків до динамічного розрахунку строків на основі часових залежностей між роботами. У той самий період запропоновано метод PERT (Program Evaluation and Review Technique), розроблений у межах програми ВМС США «Поларіс», який акцентував увагу на стохастичній природі тривалості [5].

Подальший розвиток парадигми пов'язаний із концепцією критичного ланцюга (Critical Chain Project Management), запропонованою Е. Голдраттом [22], у якій замість резервів на кожній операції вводяться проєктні та живильні буфери часу (buffer management), що дає змогу керувати часовими резервами на рівні проєкту загалом. Систематизацію методів проєктного управління, зокрема календарно-мережевого планування та управління ресурсами, здійснено у працях Г. Керцнера [32].

Для глибшого розуміння трансформації підходів до визначення тривалості будівельних процесів доцільно проаналізувати розвиток парадигми критичного шляху в різні періоди. Ключові етапи, їхні змістові характеристики, методологічні новації та пов'язаних із ними авторів й інституції наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Етапи розвитку парадигми критичного шляху у плануванні тривалості будівництва

Період	Основні характеристики парадигми	Ключові розробки та підходи	Автори / інституції / розробники
1950–1960	Виникнення ідей мережевого планування	Визначення критичного шляху, початковий CPM	«Дюпон», «Ремінгтон Ренд»
1960–1970	Розширення на будівництво та оборонну сферу	Модифікація через PERT, введення стохастики	BMC США, Booz Allen
1970–1990	Інтеграція ресурсних обмежень	Розрахунок резервів, виявлення вторинних шляхів	Г. Керцнер, PMI
1990–2010	Гнучке управління строками	Метод критичного ланцюга та буферів часу	Е. Голдратт
з 2010-х років	Інтеграція з цифровими середовищами управління	4D-моделі, автоматизований аналіз критичного шляху	Autodesk, Bentley Systems, Trimble

(розроблено автором на основі [14, 70, 83])

Сучасне трактування парадигми критичного шляху суттєво відрізняється від класичного. Завдяки впровадженню інформаційного моделювання будівництва (BIM), інструментів 4D і 5D, а також спеціалізованих програмних платформ календарно-мережевого планування (наприклад, Primavera P6, Navisworks) критичний шлях не лише розраховують, а й візуалізують в інтерактивному середовищі з можливістю сценарного моделювання, що дає змогу оперативно оцінювати наслідки змін у графіку чи ресурсному забезпеченні.

У будівельній практиці дедалі частіше застосовують гібридні підходи, у яких критичний шлях поєднують з адаптивними методиками (зокрема з елементами Agile-планування для короткотривалих монтажних етапів). Це дає

змогу інтегрувати зміни без утрати керованості: парадигма критичного шляху діє як динамічна рамка гнучкого строкового управління.

Ключовим етапом еволюції стало усвідомлення обмеженості детермінованих моделей, які спираються на фіксовані значення тривалості робіт. Такий підхід ґрунтувався на припущенні, що параметри проєкту є сталими, а зовнішні умови — передбачуваними. Проте досвід реалізації масштабних інфраструктурних і девелоперських проєктів засвідчив нестабільність зовнішнього середовища, вплив людського чинника, варіативність поставок, погодних умов і правових процедур, що виявило вразливість фіксованих оцінок часу до зривів строків [42].

На цьому тлі почали розвиватися стохастичні моделі тривалості, які замість одного фіксованого значення враховують спектр можливих значень, зважених за ймовірністю. Ідея полягає в переході від «жорсткого плану» до «гнучкого прогнозу»: планування здійснюють не в межах єдиного сценарію, а з урахуванням множини варіантів, що дає змогу оцінювати ризики, прогнозувати коливання строків і оптимізувати графіки з урахуванням реалістичної невизначеності.

Одним із перших підходів до стохастичного планування стала модель PERT, розроблена у США наприкінці 1950-х років у межах програми «Поларіс». Метод передбачав використання трьох оцінок тривалості кожної операції — оптимістичної, песимістичної та найбільш імовірної — з подальшим обчисленням зваженого середнього, що дало змогу перейти від статичної тривалості до її подання як імовірнісної функції [5].

Щоб порівняти підходи до оцінювання тривалості, доцільно зіставити ключові характеристики детермінованих і стохастичних моделей. На рис. 1.2 відображено основні відмінності між цими двома концептуальними підходами.

ДЕТЕРМІНОВАНИЙ ПІДХІД	Ознака	СТОХАСТИЧНИЙ ПІДХІД
фіксоване (детерміноване) значення	Подання тривалості	спектр значень, зважених за ймовірністю
параметри сталі, умови передбачувані	Припущення	мінливе середовище, невизначеність
єдиний «жорсткий план»	Сценарії	множина варіантів, «гнучкий прогноз»
точкова оцінка	Оцінка строку	імовірнісний розподіл строку завершення
не враховується	Урахування ризику	оцінюється; аналіз чутливості
нормативи, класичний СРМ, діаграма Ганта	Методи та інструменти	PERT, метод Монте-Карло, Fuzzy Logic
вразливість до зривів строків	Результат	оцінка ймовірності дотримання строку
↓ Перехід від «жорсткого плану» до «гнучкого прогнозу»: урахування імовірнісної природи часу підвищує надійність оцінювання тривалості будівництва		

Рис. 1.2. Порівняння детермінованого та стохастичного підходів до планування тривалості в будівництві (розроблено автором на основі [5])

У 1970–1980-х роках стохастичні підходи почали впроваджувати в будівельну практику завдяки розвитку методів математичного моделювання. Зокрема, поширення набув метод Монте-Карло, що використовує великі вибірки випадкових сценаріїв для побудови розподілу можливих строків завершення проєкту й дає змогу оцінити ймовірність завершення робіт у визначений термін та виявити найчутливіші до затримок частини проєкту.

Згодом ідеї стохастичності розширено застосуванням нечітких множин (Fuzzy Logic) у побудові графіків робіт: замість традиційних меж тривалості використовують лінгвістичні оцінки («короткий», «помірний», «довгий»), що дає змогу адаптувати план до невизначеності будівельного середовища. Такі

методи виявилися ефективними у відновлювальному будівництві з високим рівнем ризику й змін.

Починаючи з 2010-х років стохастичні моделі інтегрують у цифрові інструменти планування. Сучасні спеціалізовані платформи аналізу ризиків строків дають змогу комбінувати класичні СРМ-розрахунки з варіативними сценаріями на основі розподілів імовірностей, що уможлиблює оперативне перепланування графіків у відповідь на зміну зовнішніх чинників або внутрішніх ресурсів.

Отже, перехід до стохастичних моделей тривалості не лише підвищив точність планування, а й змінив філософію управління строками: тривалість почали розглядати не як фіксований ліміт, а як динамічний параметр, що коригується залежно від умов [40].

Історично тривалість у будівництві розглядали як простий часовий параметр — проміжок між початком і завершенням робіт. Проте в багатофакторному проєктному середовищі це визначення не відповідає складності реальних умов. Тривалість перетворюється з допоміжного інструмента планування на інтегральний показник організаційно-технологічної ефективності проєкту, що акумулює ресурсні, економічні, організаційні, технологічні та нормативно-правові параметри й відображає рівень зрілості управління, гнучкість логістики, швидкість реагування на відхилення та узгодженість між учасниками будівництва.

Аналіз тривалості як інтегрального показника потребує відходу від суто календарного трактування: вона корелює з продуктивністю ресурсів [37], якістю рішень, стратегіями фінансування, рівнем автоматизації процесів і структурою підрядних відносин, а також є наслідком комунікаційних збоїв, браку матеріалів чи робочої сили, погодних ризиків або неузгодженості з регулятором. Її неможливо звести до окремого компонента технологічного плану, оскільки вона є результатом взаємодії внутрішніх і зовнішніх елементів системи. Структуру чинників, що формують часові параметри, наведено на рис. 1.3.

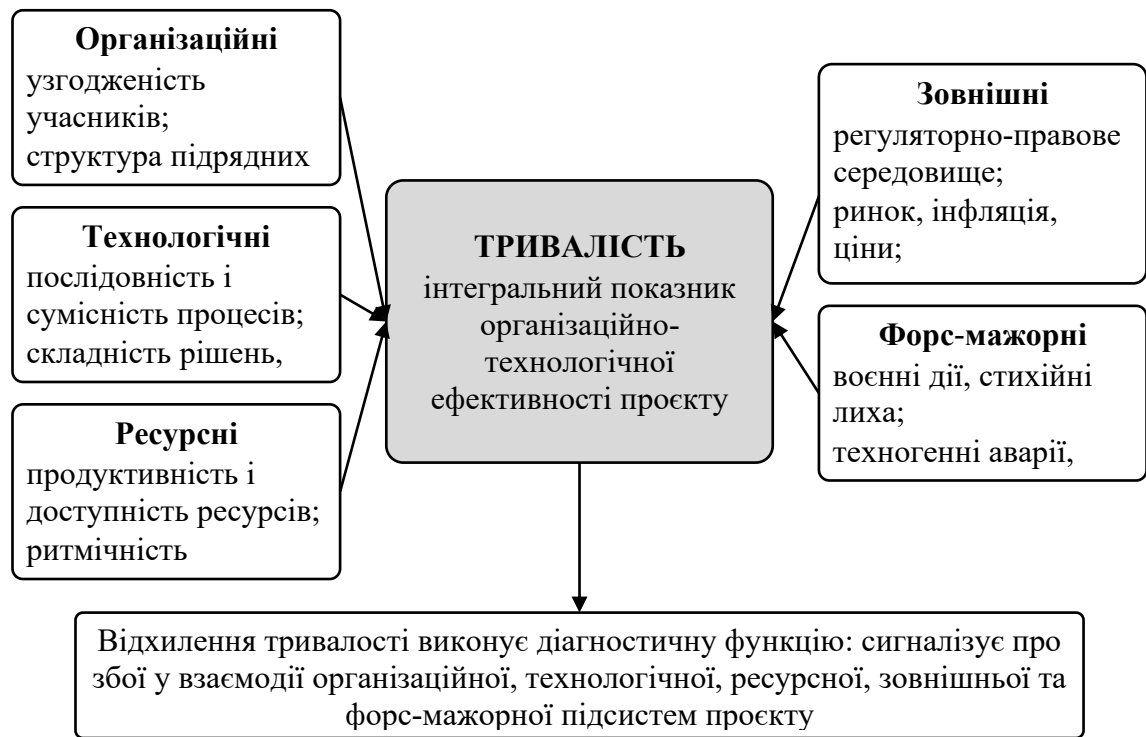


Рис. 1.3. Структура факторів, що формують тривалість як інтегральний показник ефективності (розроблено автором на основі [40])

Для оцінювання результативності реалізації проекту за тривалістю потрібна системна аналітична модель, що враховує взаємозалежність часових, ресурсних і фінансових елементів. Наприклад, скорочення тривалості без урахування продуктивності праці може призвести до зростання витрат або зниження якості, а подовження строків унаслідок затримок поставок вказує на системні збої в логістиці. Таким чином, тривалість набуває діагностичної функції, даючи змогу оцінити рівень організаційно-технологічної зрілості.

Особливу увагу приділяють інтеграції тривалості з ключовими показниками ефективності (KPI) — зокрема індексом виконання розкладу (Schedule Performance Index, SPI), показниками використання часових резервів тощо. Їх поєднання дає змогу формувати гнучку адаптивну модель управління строками на основі фактичних даних і зворотного зв'язку [91].

Для зіставлення класичного та інтегрального трактування тривалості доцільно звернутися до табл. 1.2, яка відображає відмінності в цілях, інструментах і управлінському фокусі.

Таблиця 1.2

Порівняння класичного та інтегрального підходів до трактування тривалості у будівництві

Ознака	Класичне трактування	Інтегральне трактування
Об'єкт планування	Календарний графік	Система взаємопов'язаних змінних
Ключові фактори	Обсяги робіт, технологія	Організація, ресурси, зовнішнє середовище
Управлінська мета	Дотримання строків	Баланс строків, якості, вартості та стійкості
Оцінка ефективності	Порівняння з базовим графіком	Аналіз відхилень, ризиків і реакцій системи
Застосовувані інструменти	Діаграма Ганта, СРМ	ВІМ 4D, КРІ-аналіз, засоби бізнес-аналітики
Зв'язок з іншими процесами	Мінімальний	Інтеграція в інформаційне середовище проєкту

(розроблено автором на основі [91])

У практичній площині це означає впровадження аналітичних панелей контролю тривалості, синхронізованих із системою керування проєктом: дані про прогрес робіт, продуктивність підрядників і затримки автоматично відображаються в інформаційному середовищі (ВІМ), формуючи цифрову динаміку проєкту [47]. Завдяки цьому тривалість переходить зі статичного документа в керований об'єкт, що оновлюється в режимі реального часу.

Організації, які застосовують цей підхід, демонструють вищу адаптивність і стабільніші показники дотримання строків: замість усунення затримок постфактум менеджмент отримує змогу передбачити, локалізувати й оперативно усунути джерело проблеми до того, як воно вплине на загальний строк [82].

Управлінський підхід до тривалості як інтегрального показника відкриває нові можливості для аналізу будівельного процесу, але ставить вищі вимоги до якості даних і прозорості управлінських рівнів. Зриви строків у такому контексті свідчать не лише про помилку в графіку, а про порушення узгодженості логістичної, технічної, фінансової та адміністративної підсистем [74].

У стратегічному вимірі передбачуваність строків підвищує керованість будівельно-інвестиційного проєкту та довіру його учасників. Водночас

надійність оцінювання тривалості безпосередньо залежить від урахування чинників невизначеності, аналіз яких і систематизацію яких розглянуто в підрозділі 1.2.

1.2 Аналіз невизначеності як чинника впливу на хронологічну структуру реалізації будівельних проєктів

Поняття невизначеності посідає ключове місце в теорії управління будівельними проєктами, оскільки саме воно визначає рівень ризику, складність прогнозування та гнучкість системи управління на всіх фазах реалізації інвестиційно-будівельної діяльності. Історичний розвиток наукової думки щодо цього поняття пройшов еволюцію від філософського тлумачення до прикладного аналітичного конструювання моделей адаптації до зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих впливів.

На ранніх етапах розвитку економічної науки невизначеність розглядали як протилежність «знанню», що асоціювалася з відсутністю детермінованості майбутніх подій. Зокрема, Ф. Найт (F. H. Knight) ще у 1921 році у праці «Risk, Uncertainty, and Profit» чітко розділив поняття ризику та невизначеності: ризик підлягає кількісному вимірюванню (через ймовірність), натомість невизначеність не може бути формалізована класичними статистичними методами. Це трактування поклало початок концептуальному розмежуванню двох споріднених, але сутнісно відмінних феноменів [97].

Згодом Дж. М. Кейнс у «Загальній теорії зайнятості, відсотка і грошей» (1936) наголошував, що економічні суб'єкти ухвалюють рішення в умовах радикальної невизначеності, коли не існує навіть приблизного розуміння імовірнісного розподілу майбутніх подій. Ця ідея стала основою для подальших досліджень у сфері фінансового прогнозування та сценарного планування [81].

З огляду на зростання складності середовища проєктний менеджмент у будівництві почав переосмислювати роль невизначеності як органічного

чинника, який не може бути повністю усунений, але має бути адаптований і керований. Це зумовило появу понять «керована невизначеність», «вимірювана невизначеність», «аналітична невизначеність».

Сучасні дослідники (зокрема, Н. Вен, Д. Хілсон, Й. Вудстін) розглядають невизначеність як сукупність умов, що обмежують можливість ухвалення обґрунтованих управлінських рішень через неповноту, суперечність або непередбачуваність інформації. Особливо гостро це проявляється в будівельній сфері, де діє велика кількість взаємопов'язаних технологічних, фінансових, погодних і правових чинників [25].

Порівняння трактувань поняття «невизначеність» у наукових підходах наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

**Порівняння підходів до трактування невизначеності у науковій традиції
проектного управління**

Автор / школа	Період	Основне трактування	Застосування в проектному управлінні
Ф. Найт	1921	Невизначеність як неможливість оцінити ймовірність	Розмежування ризику і невизначеності
Дж. Кейнс	1936	Радикальна невизначеність, непередбачуваність	Обмеження логіки прогнозу
І. Ансофф	1970-ті	Реактивна стратегія управління	Адаптація до середовища
В. Акерман, Т. Чепмен	1990-ті	Структурована невизначеність, класифікація	Інтеграція в процесне управління
Й. Вудстін, Д. Хілсон	2000-ні	Динамічна невизначеність, що потребує сценарної аналітики	Управління за допомогою сценаріїв
Європейська комісія	2020+	Невизначеність, пов'язана з кліматичними, регуляторними, технологічними ризиками	Вбудована в цифрове управління

(розроблено автором на основі [81, 86, 97, 114])

З початку XXI століття поняття невизначеності дедалі частіше інтегрується з концептами цифрового моделювання, сценарного аналізу, нечіткої логіки (Fuzzy Logic) та мультиагентних систем. У контексті будівельного проекту це проявляється в таких напрямках [57, 103]:

- сценарне прогнозування тривалості робіт за недостатньої вихідної інформації;

- використання експертних моделей для оцінювання ймовірності відхилень від графіка;
- ітеративне оновлення планів у середовищі BIM з урахуванням нових ризиків;
- побудова інформаційних панелей невизначеності засобами бізнес-аналітики.

Невизначеність у будівництві має не лише фізичний вимір (затримка постачання, погода, інфляція), а й інформаційно-аналітичний: неповна документація, затримки в ухваленні рішень, міжвідомчі погодження створюють контекст багаторівневої невизначеності, з якою працює сучасний проєктний менеджер.

Історичний розвиток наукових уявлень про невизначеність доцільно розглядати як послідовну зміну дослідницьких парадигм — від філософсько-економічного осмислення категорії до її сучасного цифрово-аналітичного трактування в проєктному управлінні. Узагальнення ключових етапів цієї еволюції, із зазначенням характерних наукових шкіл і панівних для кожного періоду підходів, наведено на рис. 1.4

Наведена на рис. 1.4 послідовність засвідчує стійку тенденцію: невизначеність поступово перейшла зі статусу неформалізованої межі знання (Ф. Найт, Дж. Кейнс) у площину керованого об'єкта управління. Якщо на ранніх етапах вона тлумачилася як принципово невимірювана категорія, то згодом набула рис стратегічно керованого (І. Ансофф), структурованого та класифікованого (Т. Чепмен, В. Акерман), а далі — динамічного й сценарно-аналітичного (Д. Хілсон, Й. Вудстін) феномену.

На сучасному етапі невизначеність постає як вбудований параметр цифрового проєктного управління, що аналізується засобами BIM, систем підтримки прийняття рішень та імітаційного моделювання. Ця еволюційна логіка обґрунтовує методологічний вибір дослідження: перехід від детермінованого трактування часових параметрів до стохастичних та

адаптивних моделей визначення тривалості, які враховують імовірнісну природу невизначеності.



.Рис. 1.4. Еволюція наукових підходів до категорії невизначеності у проєктному управлінні (розроблено автором на основі [88])

Реалізація будівельного проєкту є послідовністю взаємопов'язаних етапів, що формують життєвий цикл об'єкта — від передінвестиційної фази до етапу експлуатації. За стабільного зовнішнього середовища структура такого циклу може бути чітко регламентованою. Проте в умовах зростаючої динаміки, зокрема під впливом невизначеностей, трансформується сама логіка

побудови календарного плану, послідовності робіт і визначення критичних точок переходу між фазами [88].

Невизначеність, на відміну від класичного ризику, не завжди є подією з імовірнісним виміром. Вона часто постає як контекстна змінна, що виявляється у вигляді неповної, суперечливої або динамічно змінної інформації. У будівництві це відображається через зміни в законодавстві, перебої з фінансуванням, дефіцит матеріалів, нестабільність тендерного середовища, зміну геологічних умов на ділянці. Такі сценарії невизначеності змінюють не лише строки виконання робіт, а й конфігурацію графіка: його гнучкість, точки стику між фазами, черговість дій.

Сучасні підходи до планування передбачають адаптивну логіку життєвого циклу — модель, де черговість етапів не завжди фіксована, а може змінюватися відповідно до поточної ситуації. Це стосується інвестиційно-будівельних проєктів в умовах обмеженого доступу до ресурсів, урбанізованого середовища або високої інституційної фрагментації. Окремі дослідники вказують на доцільність ітеративних моделей (agile-project delivery, IPD, design–build–operate), які допускають перехресність, паралельність або розщеплення етапів [77].

Порівняння класичної та адаптивної структури життєвого циклу будівельного проєкту з урахуванням впливу невизначеності наведено на рис. 1.5.

Серед чинників, що впливають на ефективність реалізації будівельного проєкту, визначальним є фактор часу, а невизначеність постає як критичний модифікатор часової структури: вона не лише генерує можливість затримок, а й трансформує логіку управління строками. Для розуміння цієї взаємодії доцільно систематизувати типи невизначеностей будівельного середовища та підходи до їх класифікації.

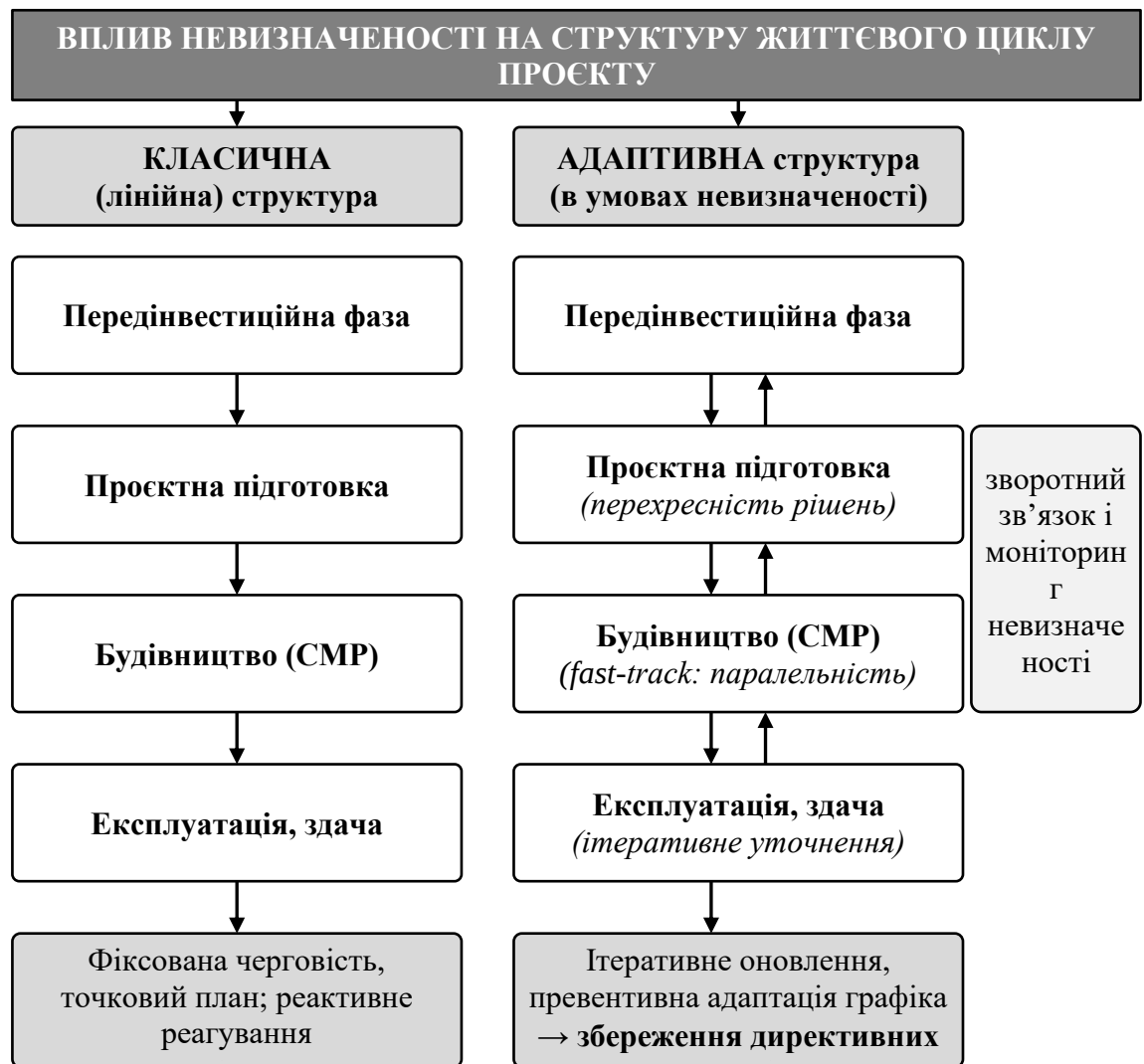


Рис. 1.5. Порівняння класичної та адаптивної структури життєвого циклу будівельного проєкту під впливом невизначеності (розроблено автором на основі [77])

Дослідницька практика (Perry & Hayes, 1985; Chapman & Ward, 2002; Zhi, 1995) [114] пропонує кілька класифікаційних основ невизначеності: за структурою джерела (внутрішні чи зовнішні), за характером (об'єктивна чи суб'єктивна), за фазою життєвого циклу (передінвестиційна, проєктна, будівельна, експлуатаційна). У будівництві найпрактичнішим є типологічний підхід за домінуючим полем впливу, який дає змогу прямо зіставити тип невизначеності з ризиком зміни часових параметрів [60].

У межах цього дослідження чинники невизначеності, що впливають на часові параметри реалізації будівельних проєктів, систематизовано за єдиною наскрізною класифікацією, узгодженою з викладеним у підрозділі 1.1 та

заявленою у вступі як елемент наукової новизни: часові ризики згруповано за домінуючим полем впливу у п'ять взаємопов'язаних груп — організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні та форс-мажорні, — кожен з яких оцінено за трьома вимірами: інтенсивністю впливу, спрямованістю дії та ймовірністю прояву [60, 61]:

1. Організаційні чинники — узгодженість дій учасників, структура підрядних відносин, якість управлінських рішень і комунікацій, розподіл відповідальності та повноважень; спричиняють зміщення строків через тривалі погодження, неузгодженість рішень і конфлікти інтересів між учасниками проєкту.

2. Технологічні чинники — послідовність і сумісність технологічних процесів, рівень механізації та автоматизації, складність конструктивних і проєктних рішень, потреба у повторному проєктуванні; зумовлюють технологічні паузи, переробки та адаптацію технології до умов об'єкта (характерно для нестандартних та інфраструктурно складних проєктів).

3. Ресурсні чинники — доступність і продуктивність матеріальних, трудових та фінансових ресурсів, ритмічність постачання, забезпеченість технікою й робочою силою, стабільність фінансування; спричиняють простой, ефект «технічної паузи» та каскадні затримки суміжних робіт.

4. Зовнішні чинники — регуляторно-правове середовище (дозволи, погодження, зміни будівельних норм), ринкова кон'юнктура, інфляція та коливання цін, погодно-кліматичні умови, логістика й ланцюги постачань, реакція громад і стейкхолдерів; впливають на ключові контрольні точки та директивний строк реалізації.

5. Форс-мажорні чинники — надзвичайні, малоймовірні, але високовпливові події (воєнні дії, стихійні лиха, епідемії, техногенні аварії, руйнування інфраструктури), що призводять до зупинки робіт, перегляду проєктних рішень і зміни всієї часової конфігурації проєкту.

Запропонована класифікація має наскрізний характер: вона слугує аналітичною основою для стохастичного моделювання тривалості та

формування цифрового інструментарію прогнозування строків у наступних розділах, чим забезпечується методологічна єдність усієї роботи. На відміну від поширених галузевих типологій, що обмежуються переліком джерел ризику, у ній кожену групу параметризовано за спрямованістю, інтенсивністю та ймовірністю прояву, що безпосередньо реалізує завдання структурування чинників часового впливу та створює основу для ризик-орієнтованого календарного планування. Систематизацію груп чинників за цими вимірами наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

**Класифікація чинників невизначеності, що впливають на тривалість
реалізації будівельних проєктів**

Група чинників	Ключові джерела часових відхилень	Спрямованість дії	Інтенсивність впливу	Ймовірність прояву
Організаційні	погодження, комунікації, розподіл відповідальності	системна, уповільнювальна	висока	висока
Технологічні	переробки, технологічні паузи, складність рішень	системна, уповільнювальна	висока	середня
Ресурсні	перебої постачання, дефіцит кадрів і техніки, фінансування	системна, каскадна	висока	висока
Зовнішні	регуляторні зміни, ринок, погода, логістика, стейкхолдери	епізодична / системна	середня–висока	середня
Форс-мажорні	воєнні дії, стихійні лиха, техногенні аварії	ударна, зупинна	критична	низька

(розроблено автором)

Для встановлення зв'язку між виокремленими групами чинників невизначеності та часовою структурою проєкту доцільно співвіднести кожену групу з фазами життєвого циклу, на яких її дестабілізуючий вплив є найвідчутнішим. Такий підхід дає змогу перейти від простого переліку чинників до їх часової локалізації — визначення зон, у яких формуються передумови відхилення фактичної тривалості від планової. Класифікацію чинників невизначеності у поєднанні із зонами їх впливу на хронологію будівельного проєкту наведено на рис. 1.6.

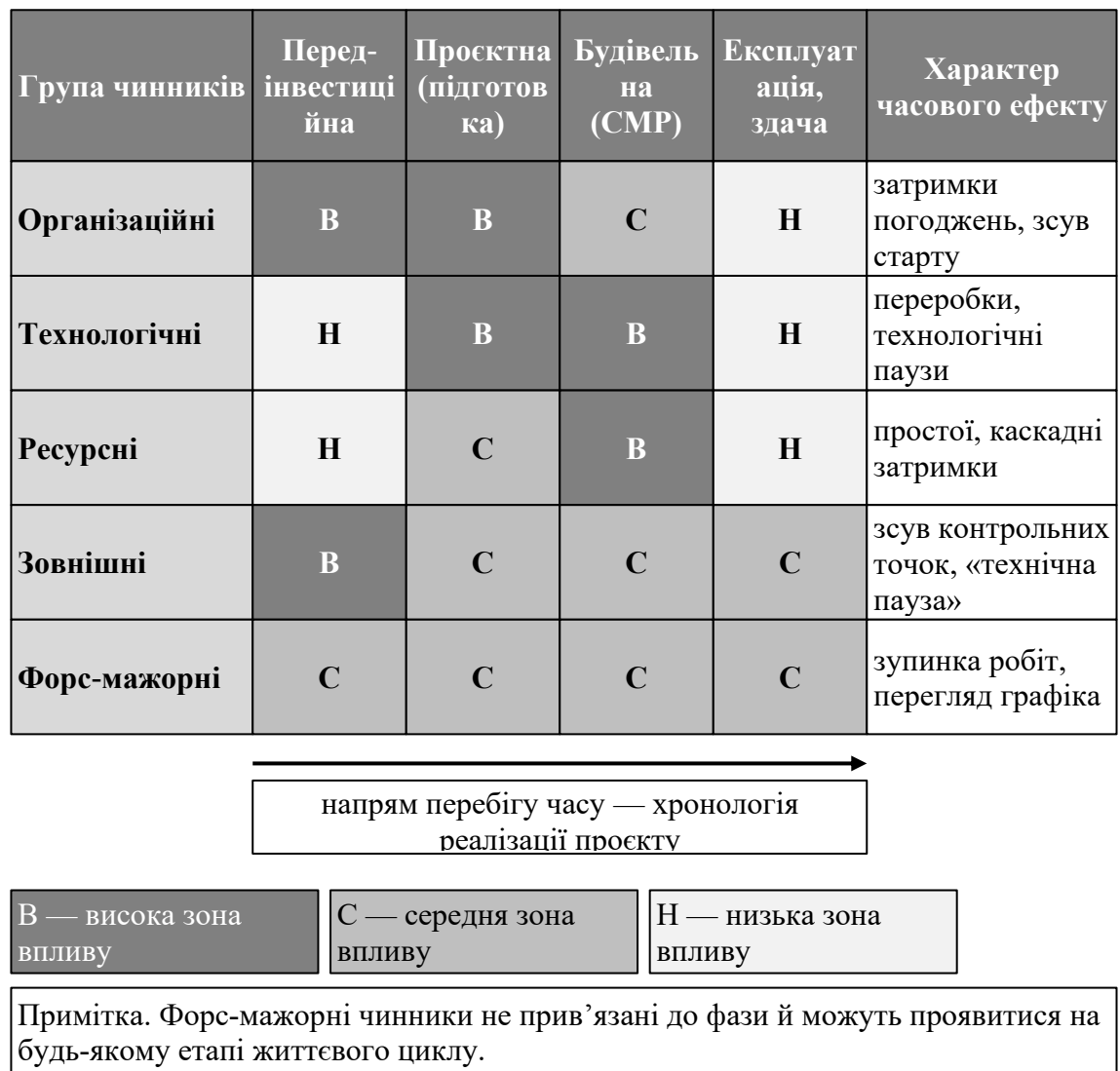


Рис. 1.6. Класифікація чинників невизначеності та зони їх впливу на хронологію будівельного проєкту (розроблено автором на основі [61])

Як видно з рис. 1.6, зони впливу чинників невизначеності по фазах життєвого циклу суттєво різняться. Організаційні чинники домінують на передінвестиційній і проектній фазах, коли ухвалюються ключові рішення та формується структура взаємодії учасників; технологічні та ресурсні чинники досягають максимальної інтенсивності на будівельній фазі (СМР), де зосереджено основний обсяг робіт; зовнішні чинники діють наскрізно, зміщуючи контрольні точки на всіх етапах; форс-мажорні ж не прив'язані до конкретної фази й можуть проявитися будь-коли, спричиняючи зупинку робіт і перегляд графіка.

Виявлена нерівномірність часової локалізації чинників має безпосереднє методичне значення: вона доводить недостатність єдиного усередненого

резерву часу для всього проєкту й обґрунтовує потребу у фазово-диференційованому, ризик-орієнтованому календарному плануванні, за якого обсяг і розміщення часових резервів узгоджуються з домінантними чинниками кожної фази. Саме таке структурування чинників за спрямованістю, інтенсивністю та ймовірністю прояву формує аналітичну основу для стохастичного моделювання тривалості, розглянутого у розділі 2.

Невизначеність у будівельних проєктах є не лише фоном, а активним чинником, що трансформує логіку управління строками, ресурсами й узгодженістю дій. Тому сучасне управління календарними графіками дедалі частіше розглядають як динамічне балансування між фіксованими контрольними точками та адаптивними елементами зворотного зв'язку. Для стійкості календарного плану у змінному середовищі впроваджують системні підходи до управління невизначеністю на основі інтеграції аналітичних, прогнозних, інформаційних і поведінкових механізмів [25].

Історично першим системним інструментом управління строками стала мережева модель PERT (Program Evaluation and Review Technique), що впроваджує три оцінки тривалості — оптимістичну, песимістичну та найвірогіднішу — і дає змогу будувати графік з урахуванням імовірнісного розподілу, подаючи критичний шлях як діапазон із рівнями ризику.

Наступним кроком стала модель GERT (Graphical Evaluation and Review Technique), яка враховує петлі, умовні переходи та розгалуження в логіці проєкту. Такий підхід актуальний для проєктів із варіантними сценаріями реалізації, фазовими залежностями та перехресною участю стейкхолдерів.

З розвитком цифрових технологій з'явилися методи симуляційного аналізу, зокрема моделювання за методом Монте-Карло, що генерує ймовірні сценарії зміни строків на основі великої кількості змінних параметрів; його реалізують у середовищах Oracle Primavera, Risk, AnyLogic, інтегрованих з BIM-модулями та календарними блоками ERP-систем.

Паралельно формуються концепції адаптивного планування (Agile Construction Management), що спираються не на фіксовані календарі, а на

логіку спринтів, контрольованих результатів, швидкого зворотного зв'язку та реактивної адаптації; у таких моделях важливішою за точність стає чутливість — здатність системи адаптуватися до зовнішнього впливу в межах дозволеного проміжку часу [102].

Узагальнене порівняння системних підходів до управління невизначеністю в календарному плануванні наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

**Системні підходи до управління невизначеністю в календарному
плануванні будівельних проєктів**

Підхід / модель	Джерело невизначеності	Рівень впливу	Можливість симуляції	Приклади реалізації
PERT	Статистична оцінка тривалості	Операційний	Так (3-точкова оцінка)	MS Project, OpenProject
GERT	Логічні сценарії, умовність	Структурний	Так	RiskyProject
Монте-Карло (MCS)	Багатофакторна ймовірність	Інтегральний	Так	@Risk, Primavera Risk Analysis
Нечітке планування (Fuzzy Logic)	Суб'єктивна нечіткість	Оцінковий	Частково	MATLAB, FIS Tools
Agile Construction (Scrum)	Змінність зовнішнього середовища	Тактичний	Ні	системи гнучкого управління задачами
BIM-based Feedback Planning	Дані з цифрового середовища	Реактивно-контрольний	Частково	Navisworks, BIM 360, Synchro

(розроблено автором на основі [102])

Усі описані підходи, попри різні теоретичні основи, орієнтовані на підвищення стійкості календарного плану до деструктивних впливів; вони відрізняються здатністю до формалізації, швидкістю реакції та кількістю змінних, але мають на меті зменшення часу простою, уникнення каскадних затримок і точніше формування контрольних точок.

У сучасному будівництві спостерігається тенденція до інтеграції кількох підходів у межах одного проєкту: GERT задає логіку структури, PERT — оцінки операцій, а метод Монте-Карло — імовірнісну симуляцію сценаріїв; водночас у цифровому середовищі BIM-система зчитує фактичну затримку та ініціює ітерацію гнучкого планування для відновлення графіка [93].

Така гібридна система управління невизначеністю створює передумови для нової концепції — адаптивно-аналітичного управління календарною структурою, у якій план є не сталим документом, а механізмом, що оновлюється відповідно до змін контексту, поведінки підрядників і зовнішніх ризиків.

В умовах нестабільності зовнішнього середовища та множинності взаємопов'язаних ризиків будівельні проєкти потребують гнучких і передбачливих систем управління, здатних адаптувати календарне планування у реальному часі. На передній план виходить цифрова трансформація управлінських підходів, у якій ключову роль відіграють системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems, DSS), аналітичні платформи, інструменти машинного навчання та алгоритми симуляції.

Ці системи забезпечують не лише моніторинг ходу робіт, а й адаптивне ядро управління, у межах якого можливе оперативне коригування планів на основі інтегрованих даних. DSS-платформи виконують роль аналітичного посередника між змінним середовищем і фіксованими проєктними обмеженнями, переводячи логіку реагування на невизначеність із реактивної у превентивно-аналітичну.

Переваги DSS у будівництві пов'язані зі здатністю системи [109]:

- формувати прогностні моделі тривалості завдань на основі історичних даних (машинне навчання);
- генерувати попереджувальні сигнали про ймовірні затримки;
- оновлювати критичний шлях залежно від зміни статусу ключових етапів;
- оптимізувати використання ресурсів у часі (ресурсно-орієнтована логіка);
- об'єднувати візуальну, числову та просторову інформацію в одному середовищі.

Сучасна DSS-система в будівництві не є ізольованим модулем — вона інтегрується з BIM, ERP, CRM, системами управління портфелем проєктів (PPM), засобами візуалізації та платформами сценарного моделювання. У поєднанні ці компоненти формують аналітичний контур ухвалення рішень, що дає змогу реагувати і на відомі, і на нові (emerging) ризики, які не піддаються класичному сценарному аналізу.

У науковій літературі та практиці виокремлюють такі підходи до адаптації календарного плану в умовах невизначеності, що реалізуються через DSS [59]:

1. прогнозна перебудова графіка (Predictive Recalculation) на основі моделі часової чутливості;
2. сценарний перерозподіл (Scenario-based Reallocation) — формування альтернативних графіків (fast-track, delayed start, rollback);
3. ребалансування ресурсів (Resource Rebalancing) — автоматична зміна розподілу ресурсів залежно від затримок;
4. управління за KPI (KPI-driven Calendar Management) — адаптація плану за відхиленнями ключових індикаторів (S-крива, освоєний обсяг EV, індекс виконання розкладу SPI);
5. планування зі зворотним зв'язком BIM (BIM-Feedback Scheduling) — перенесення фактичних результатів з майданчика до календарного плану для його регулярної перебудови.

Структуру цифрової адаптації календарного планування під впливом невизначеності наведено в табл. 1.6.

Розвиток цифрових систем DSS дає змогу перевести управління строками з реактивного на інтелектуально-проактивне, коли рішення ухвалюють на основі розпізнавання закономірностей у даних до настання проблеми. Це підвищує керованість строків, обґрунтованість рішень і своєчасність запобіжних заходів.

Таблиця 1.6

Роль сучасних цифрових систем у адаптації календарного планування до невизначеності

Система / інструмент	Основна функція	Тип адаптації	Приклади використання	Інтеграція
Primavera Risk Analysis	Монте-Карло симуляція строків, PERT-аналіз	Прогнозна	Перебудова критичного шляху, оцінка ймовірності	ERP, BIM
Бізнес-аналітика (BI)	Аналітика виконання, візуалізація KPI	KPI-адаптація	Зведення відхилень, щоденні панелі	MS Project, CRM
Імітаційні платформи	Моделювання складних процесів	Сценарна	Побудова альтернативних графіків	BIM, ERP
Navisworks + BIM 360	Інтеграція календаря з 3D-моделлю	Зворотна	Звірка строків із фактом	Revit, MS Project
MS Project + Project Online	Базове планування, сценарії «що буде, якщо»	Часткова	Оновлення строків, облік відхилень	Office 365
Deltak Acumen Fuse	Аналіз якості графіка, надійності строків	Превентивна	Перевірка логіки графіка до початку робіт	Primavera, MS Project
Конвеєри машинного навчання	Автоматичне прогнозування строків	Прогнозна (AI)	Навчання моделей на локальних даних	SQL, BI, BIM

(розроблено автором на основі [59])

Ключовим принципом є цифрова контекстуалізація строків — здатність системи розглядати строки не у відриві від інших параметрів (ресурси, бюджет, прогрес), а в інтеграції з ними: часові метрики (SPI, CPI, SV) поєднуються з візуалізацією відставань, положенням об'єкта, ризиками субпідрядника та зовнішніми умовами [99].

Отже, DSS-системи, аналітичні платформи та алгоритмічні моделі не лише оновлюють графік, а й змінюють логіку управління будівельним часом, підвищуючи обґрунтованість і своєчасність рішень щодо строків. Викладені підходи до систематизації невизначеності є підґрунтям для огляду сучасних наукових підходів до управління строками, розглянутого в підрозділі 1.3.

1.3 Огляд сучасних наукових підходів до управління строками будівництва в умовах мінливого середовища

Історія управління строками будівництва відображає не лише розвиток будівельної інженерії, а й глибинні трансформації у підходах до управління проєктами загалом. Традиційно будівельні проєкти розглядалися через призму лінійного планування, де строки визначалися за нормативами й обчислювалися на основі калькуляцій, що передбачали ідеалізовані умови реалізації. Такі підходи були поширені в середині XX століття: у США та Європі застосовували методи хронологічного планування на основі досвіду реалізації типових об'єктів. Однак уже в 1950–1960-х роках виникають перші спроби створення науково обґрунтованих моделей управління строками.

Однією з перших фундаментальних моделей стала методологія критичного шляху (CPM), яку розробили Джеймс Келлі (DuPont) та Морган Вокер (Remington Rand) у 1957 році [30]. Ця модель дала змогу систематизувати часові взаємозв'язки між завданнями, розрахувати критичний шлях як послідовність операцій, що визначає загальну тривалість проєкту. Приблизно в той самий період було розроблено PERT (Program Evaluation and Review Technique) для потреб флоту США у проєкті Polaris, де строки розраховувалися на основі трьох оцінок (оптимістичної, песимістичної та найвірогіднішої), що вже є кроком до стохастичного аналізу.

У подальші десятиліття методи CPM і PERT зазнали значної еволюції, зокрема в роботах таких авторів, як Гарольд Керцнер, який систематизував практики управління проєктами [113], Денніс Лок, який пропонував удосконалення графічного планування, Фредерік Гаррісон, Стівен Девокс, Ерік Верцух та інші, що заклали основи сучасної методології планування строків у будівництві [31, 54]. До 1980–1990-х років методи критичного шляху вдосконалюються за рахунок буферизації (уведення часових резервів), ресурсного вирівнювання, а також інтеграції з вартісним аналізом, як у методі

Earned Value Management (EVM), де строки ув'язуються з обсягом виконаних робіт та фактичними витратами.

Вагомий внесок у розвиток теорії та методології організації і технології будівництва, календарного й сітьового планування, управління проєктами та організаційно-технологічної надійності зробили вітчизняні науковці. Зокрема, у працях С. Д. Бушуєва розвинуто методології управління проєктами та програмами в будівництві [140]; С. А. Ушацького й О. А. Тугая — науково-методичні засади організації будівельного виробництва та управління його тривалістю [124, 125]; В. Р. Млодецького, В. О. Поколенка та Р. Я. Зельцера — моделі організаційно-технологічної надійності будівельних процесів і календарних планів [127, 141, 142]; Г. М. Рижаквої — інструментарій цифрового організаційно-технологічного моделювання та девелоперського адміністрування [143]; Ю. М. Теслі та С. В. Цюцюри — інформаційні технології й системи підтримки прийняття рішень в управлінні проєктами [144, 145]. Ці роботи заклали підґрунтя для системного та організаційно-технологічного трактування тривалості будівництва. Водночас поза їх основним фокусом здебільшого залишилося комплексне визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності на основі інтеграції багатофакторного аналізу ризикових чинників, імовірнісного моделювання та цифрового інструментарію, що й актуалізує напрям цього дослідження.

Проте зазначені методи залишаються переважно детермінованими, тобто такими, що припускають стабільність зовнішнього середовища. Зі зростанням складності будівельних проєктів і появою нових викликів (зміна регуляторних умов, кліматичні ризики, інфляційні коливання, кадрова нестабільність, технологічна багатоваріантність) постає питання гнучкості строкового управління. У цьому контексті важливу роль відіграє Lean Construction — підхід, заснований на принципах ощадливого виробництва, вперше адаптований до будівництва у 1993 році групою науковців під керівництвом Гленна Балларда і Грега Гауелла [33], які започаткували модель

Last Planner System (LPS) [4]. Останній планувальник формує деталізовані графіки виконання безпосередньо на майданчику з урахуванням поточних умов, наявності ресурсів та динаміки зовнішнього середовища, що дає змогу уникати затримок.

Розвиток Lean-підходу підтримали й такі дослідники, як Лаурі Коскела, Луїс Аларкон, Мартін Фішер, які довели, що планування в умовах будівельної невизначеності потребує врахування таких категорій, як надійність, стійкість, змінність. У моделі Коскела будівництво розглядається не лише як процес, а як система потоків, і відповідно управління строками є не результатом складання графіків, а системною реакцією на вхідні виклики. У цьому контексті виникає концепція pull-planning, що орієнтується не на ідеальну послідовність, а на поточні можливості [33].

Важливим етапом стала також поява Agile Project Management у будівництві, спочатку у формі Scrum-підходів до проєктного керування ремонтами та реконструкціями, а пізніше — адаптації принципів Agile до складних інфраструктурних проєктів. Дослідники, як-от Салман Азхар, Дікмен і Біргонул, Мочал і Краснофф, доводять ефективність ітераційного планування, адаптивних спринтів і постійного зворотного зв'язку при реалізації об'єктів у змінному середовищі [7]. Такі підходи передбачають, що строки не є фіксованими величинами, а коригуються через систему інкрементів — завершених етапів з функціональним результатом.

Паралельно з концепцією Agile в будівництво проникає ідея динамічного сценарного планування (Dynamic Scheduling), зокрема в роботах Томаша Буреша, Янчіка та Голуба, які пропонують варіантне планування строків із розгалуженими маршрутами виконання робіт, що враховують сценарії відхилень, наприклад через погодні умови, постачання або зміну підрядника [45]. Таке планування дає змогу створювати мережеві графіки з імовірнісним розподілом подій, як у методах Монте-Карло або нечіткої логіки.

Ще одним важливим вектором є поява інформаційно-аналітичних платформ, що дають змогу інтегрувати строкове планування з цифровим

середовищем. Зокрема, у роботах Рафаеля Сакса, Чарльза Істмана, Ібрагіма Одеха, Алессандро Кости, Мохамеда Марзука аналізується використання BIM 4D — модулів інформаційного моделювання, які дають змогу прив'язати до кожного елемента об'єкта календарну прив'язку [45]. За рахунок цього досягається візуалізація ходу будівництва у часі, контроль колізій і пріоритетність завдань. У BIM-середовищі строки набувають властивостей інтерактивного цифрового потоку даних із можливістю прогнозування впливів на календарний графік.

Важливим інструментом стає також моделювання життєвого циклу будівлі (Building Lifecycle Simulation), де строки обчислюються як частина моделі життєвого циклу (Life-Cycle Assessment — LCA), а не тільки стадії будівництва. Тут враховується і майбутня експлуатація, і час окупності, і сценарії ремонту або модернізації. Такі моделі, що застосовуються в європейському середовищі, зокрема у Фінляндії, Нідерландах, Німеччині, базуються на інтеграції планування з ESG-параметрами (екологічними, соціальними та управлінськими), що робить часові аспекти частиною сталого проєктного управління.

Сучасне планування строків у будівництві є не лише технічним інструментом складання календарного графіка, а й складовою багаторівневої управлінської системи, що інтегрує інженерні, економічні та організаційні підходи до реалізації проєкту. Методологічне обґрунтування такого планування базується на кількох концептуальних площинах — системній, процесній, стохастичній, що в сукупності формують основу сучасних підходів до управління будівельними строками.

Передусім системний підхід до планування строків формувався на стику загальної теорії систем (Людвіг фон Берталанфі), кібернетики (Норберт Вінер), теорії управління (Стаффорд Бір) та прикладних досліджень у сфері організації будівельного виробництва. У будівництві проєкт розглядається як система з великою кількістю взаємозалежних компонентів — ресурсних, часових, просторових, контрактних. Саме системний підхід дає змогу

враховувати не лише технологічну послідовність робіт, а й зовнішні фактори впливу, такі як регуляторні вимоги, ринкова динаміка, зміна вартості матеріалів тощо.

Практичний вибір методології строкового планування у межах системного підходу доцільно унаочнити через співвіднесення двох ключових характеристик середовища реалізації проєкту — рівня його змінності (турбулентності) та рівня стійкості (наявного запасу резервів і гнучкості системи планування). Поєднання цих двох вимірів формує чотири типові управлінські ситуації, кожній з яких відповідає власний доцільний інструментарій. Відповідну матрицю вибору наведено на рис. 1.7.

	Стійкість / Змінність	НИЗЬКА змінність середовища	ВИСОКА змінність середовища
	ВИСОКА стійкість	Стабільне, передбачуване середовище Детерміновані методи: CPM, PERT, LOB, нормативне планування. Точковий план надійний, резерви мінімальні.	Мінливе, але кероване середовище Гнучко-адаптивні методи: Agile, Last Planner (LPS), сценарне планування, BIM 4D зі зворотним зв'язком.
	НИЗЬКА стійкість	Стабільне з обмеженими резервами Детерміновані методи з буферизацією: ресурсне вирівнювання, часові резерви, контроль за EVM.	Турбулентне середовище (зона ризику) Стохастичні та сценарні методи: метод Монте-Карло, Critical Chain (CCPM), нечітка логіка; максимальні гнучкі резерви.

зростання змінності (турбулентності) середовища

Діагональ «стабільне → турбулентне» відображає зростання потреби в імовірнісних та адаптивних методах планування строків

Рис. 1.7. Матриця вибору методології строкового планування залежно від рівня змінності та стійкості середовища (розроблено автором на основі [17])

Як видно з рис. 1.7, у стабільному й передбачуваному середовищі (низька змінність за високої стійкості) виправдані детерміновані методи — CPM, PERT, LOB та нормативне планування, оскільки точковий план є

достатньо надійним. Зі зниженням стійкості за тієї самої змінності зростає роль буферизації, ресурсного вирівнювання та контролю за методом освоєного обсягу (EVM). За високої змінності, але керованого середовища на перший план виходять гнучко-адаптивні підходи — Agile, Last Planner System, сценарне планування та BIM 4D зі зворотним зв'язком.

Найскладнішою є зона турбулентного середовища (висока змінність за низької стійкості), де детерміновані розрахунки систематично недооцінюють ризик зривів і потрібні стохастичні та сценарні методи — імовірнісне мережеве моделювання, метод Монте-Карло, метод критичного ланцюга (CCPM) та нечітка логіка з максимальними гнучкими резервами. Отже, матриця доводить, що вибір методології не може бути універсальним: він має бути диференційованим за характеристиками середовища, що узгоджується з ризик-орієнтованим підходом до календарного планування, покладеним в основу подальшого дослідження.

Одним із ключових положень системного підходу є принцип ієрархізації строкового планування, тобто розбиття процесу на стратегічний рівень (план реалізації проєкту загалом), тактичний (планування етапів і фаз) та оперативний (детальні графіки виконавців). Кожен рівень має власні інструменти: від сіткових моделей до програмно-ресурсного планування. Важливим при цьому є встановлення зворотних зв'язків — механізмів коригування строків на основі фактичного виконання. Такий підхід широко розглядався у працях Гарольда Керцнера [31], а також інтегрований у методику ISO 21500 (Guidance on project management).

У межах системного підходу доцільно розглядати і процесну модель як альтернативу класичному лінійному плануванню. Процесний підхід має своє коріння в бізнес-інжинірингу та моделюванні потоків операцій, які розглядаються як послідовність взаємопов'язаних подій. У будівельному середовищі це відображено у практиках Lean Construction, де основною одиницею планування стає не операція, а потік створення цінності. Роботи

Коскели [33] доводять, що ефективність будівництва визначається не лише термінами, а й рівнем синхронізації процесів між усіма учасниками.

Процесна модель також вимагає врахування ресурсних і логістичних обмежень. Такі моделі реалізуються через методи програмно-цільового планування, ресурсного вирівнювання, застосування ERP-систем. Методологія діаграм Ганта, діаграм потоків, LOB (Line of Balance), а також сучасних варіантів цифрового дашбордингу є інструментальним відображенням процесної логіки. У цьому контексті важливе місце займає візуальна аналітика строків — зображення, які дають змогу оперативно аналізувати зміни критичних точок, вузьких місць та потенціал для оптимізації.

Особливої уваги в умовах мінливого середовища набуває стохастичний підхід, який базується на теорії ймовірностей, сценарному аналізі та методах симуляційного моделювання. На відміну від класичних методів, де строк є фіксованою величиною, стохастичні моделі враховують невизначеність через варіативність вхідних параметрів — наприклад, коливання поставок, затримки субпідрядників, погодні умови. Одним із найвідоміших інструментів такого підходу є аналіз методом Монте-Карло (Monte Carlo Simulation), який дає змогу генерувати розподіл ймовірностей для терміну завершення проєкту.

Кожен із трьох методологічних підходів — системний, процесний і стохастичний — по-різному формує структуру календарного графіка, спирається на власний інструментарій і по-своєму враховує зовнішнє середовище. Порівняння цих підходів за ключовими ознаками наведено на рис. 1.8.

Як показано на рис. 1.8, системний підхід орієнтований на цілісність і контроль на всіх рівнях: він задає багаторівневу структуру графіка (стратегічний–тактичний–оперативний) зі зворотними зв'язками та спирається на сіткові моделі й стандарти управління проєктами. Процесний підхід зміщує фокус з окремої операції на безперервний потік створення цінності, забезпечуючи ритмічність, синхронізацію учасників та ефективну логістику

засобами Lean-планування. Стохастичний підхід, натомість, виходить з імовірнісної природи часу: він оперує сценаріями та розподілами ймовірностей, використовує метод Монте-Карло, критичний ланцюг і буфери, безпосередньо враховуючи невизначеність.

Ознака	СИСТЕМНИЙ підхід	ПРОЦЕСНИЙ підхід	СТОХАСТИЧНИЙ підхід
Ключовий фокус	Цілісність і контроль на всіх рівнях	Безперервний потік створення цінності	Імовірнісна природа часу, реагування на події
Одиниця планування	Проект як система взаємозв'язаних елементів	Потік робіт (а не окрема операція)	Сценарій / розподіл імовірностей
Структура графіка	Багаторівнева (стратегічний–тактичний–	Потокова, ритмічна, з усуненням втрат	Варіантна, з буферами й розгалуженнями
Основні інструменти	Сіткові моделі (CPM), WBS, ISO 21500	Lean, LPS, LOB, ERP, дашборди	PERT, Монте-Карло, CCPM, нечітка логіка
Взаємодія із середовищем	Моделювання ризиків на всіх рівнях	Логістика, синхронізація учасників	Пряме врахування невизначеності
Модель часу	Керована через ієрархію та контроль	Керована через ритм і надійність потоку	Імовірнісний розподіл, адаптація в реальному часі

Три підходи взаємодоповнювані: системний задає структуру й контроль, процесний — потік і синхронізацію, стохастичний — урахування невизначеності; їх інтеграція формує основу адаптивного управління

Рис. 1.8. Порівняння системного, процесного і стохастичного підходів до планування строків у будівництві (розроблено автором на основі [33])

Зіставлення засвідчує, що ці підходи не є взаємовиключними, а взаємодоповнюваними: системний забезпечує структуру й керованість, процесний — надійність потоку, а стохастичний — стійкість до невизначеності. Саме їх інтеграція в межах єдиної методики створює передумови для адаптивного управління строками, що й покладено в основу подальшого дослідження.

У працях Мозелгі та Гегазі, а також Срисуванрата, стохастичні моделі розглядаються як основа адаптивного управління проєктом. Вони дають змогу будувати сценарії з урахуванням багатоваріантних шляхів виконання робіт та оцінювати ризики з точки зору не лише часових втрат, а й можливостей оптимізації. Наприклад, введення часових буферів, використання методики Critical Chain Project Management (CCPM), формування гнучких резервів залежно від типу ризику — це практичне втілення імовірнісної логіки в управлінні строками [17, 21].

Сучасні цифрові інструменти дають змогу реалізовувати стохастичні підходи без значного аналітичного навантаження. Наприклад, модулі імітаційного планування в середовищі BIM 4D та спеціалізовані рішення для аналізу ризиків строків забезпечують можливість швидкого тестування альтернативних календарів. У цьому контексті строк перестає бути жорсткою константою і перетворюється на прогнозовану змінну, яка адаптується в реальному часі відповідно до обставин.

Окремо слід згадати принцип мультикритеріального строкового управління, запропонований Девоксом, згідно з яким строки мають оцінюватися не лише за критерієм мінімальної тривалості, а й за ступенем впливу на якість, витрати, стійкість. Упровадження індикаторів ефективності строкового управління (Time-Based KPIs), таких як Time-to-Decision, Cycle Time Variation, Time Buffer Use, дає змогу вимірювати реальну адаптивність системи планування [11].

В останні два десятиліття цифровізація глибоко трансформувала сферу управління будівельними проєктами, зокрема планування і контроль строків. Історично методи контролю строків були паперовими, шаблонними та ґрунтувалися на фіксованих графіках, які не враховували змінності реального середовища. Сучасний же підхід, завдяки інформаційним технологіям, дає змогу перейти до динамічного, адаптивного та прогнозного управління строками, у межах якого дані збираються в реальному часі, ризики

моделюються на основі сценаріїв, а самі строки постійно оновлюються залежно від стану виконання.

Однією з визначальних інновацій у цій сфері стало впровадження Building Information Modeling (BIM) — цифрового інформаційного моделювання об'єктів будівництва. У рамках 4D-BIM планування строки будівництва інтегруються безпосередньо в тривимірну модель об'єкта. Завдяки цьому можливе візуальне представлення послідовності будівництва, симуляція сценаріїв реалізації, виявлення колізій між календарними подіями та технічними етапами. Роботи Р. Сакса, Ч. Істмана та М. Марзука засвідчують, що впровадження 4D-моделей дає змогу суттєво зменшити строкові затримки завдяки ранньому виявленню проблем ще на етапі проєктування [45].

Наступним важливим чинником є системи моніторингу в реальному часі (Real-Time Monitoring). Завдяки сенсорним системам, IoT-пристроям (Internet of Things — інтернет речей), GPS-наглядовим модулям та хмарному зв'язку керівники проєктів отримують фактичну динаміку робіт, статус активностей і рух ресурсів у реальному часі. Наприклад, за допомогою RFID (Radio-Frequency Identification — радіочастотна ідентифікація) та систем автоматизованого доступу відстежується присутність робітників на майданчику, а дані інтегруються в календарно-ресурсні моделі. Цей підхід дає змогу перейти від постфактум-контролю до превентивного управління відхиленнями строків.

Невід'ємною частиною цифрового планування стали ERP-системи та CRM-рішення, що поєднують календарно-планові, ресурсні та фінансові модулі. Сучасні системи управління проєктами та ресурсами підприємства (як зарубіжні, так і вітчизняні) дають змогу автоматизувати не лише створення графіків, а й інтегрувати їх із логістикою, постачанням, бюджетом і контрактами. Особливо важливо, що ці системи формують динамічні звіти та аналітику за KPI, які відображають фактичне дотримання строків, ефективність використання часу й ризики перевищення нормативів.

Щоб унаочнити основні напрями впливу цифрових технологій на строкове планування, нижче наведено таблицю 1.7, що класифікує основні цифрові інструменти за функціями.

Таблиця 1.7

Цифрові інструменти управління строками будівництва та їх функціональні можливості

Категорія технологій	Приклад інструментів	Основна функція
4D-BIM	Revit, Navisworks, Synchro	Візуалізація графіка будівництва, моделювання сценаріїв
Real-Time Monitoring	IoT-сенсори, RFID, дрони, GPS	Оперативний контроль виконання, зчитування фактичного стану робіт
ERP / CRM системи	PlanRadar, Procore, Buildertrend	Інтеграція строків з бюджетом, логістикою, контрактами
Сценарне моделювання	Primavera Risk Analysis, SmartPM	Аналіз ризиків перевищення строків, симуляція відхилень
Аналітика та KPI-дешборди	Power BI, Tableau, Zoho Projects	Візуалізація ефективності, індикатори часу виконання (Time KPIs)

(розроблено автором на основі [45])

Наведені інструменти використовуються в різних фазах планування — від проєктування до будівництва та контролю. Вони не лише автоматизують процес, а й забезпечують безперервний цикл зворотного зв'язку, що є ключовим в умовах ризикового середовища.

Роль цифрових технологій у трансформації управління строками зручно простежити через послідовність «етап будівництва → застосовуваний цифровий інструмент → дані, що генеруються для управління строками». Такий зв'язок наскрізно охоплює життєвий цикл проєкту та наведений на рис. 1.9.

Як демонструє рис. 1.9, на кожному етапі цифрові інструменти генерують специфічний масив даних, придатних для управління строками: на етапі проєктування BIM 4D формує календарну прив'язку елементів моделі та виявляє колізії; на етапі планування мережеві та сценарні засоби дають критичний шлях і ймовірнісні сценарії строків; під час будівництва системи моніторингу в реальному часі (IoT, RFID, дрони, GPS) постачають фактичний прогрес і відхилення від графіка; ERP/CRM-платформи ув'язують строки з

постачанням, бюджетом і контрактами, а KPI-дашборди зводять індикатори часу та прогнози.

Принциповим є те, що ці дані не лише фіксують стан робіт, а й повертаються в контур планування: нижня стрілка на рис. 1.9 відображає замкнений цикл зворотного зв'язку, у якому фактичні показники ініціюють безперервне оновлення та перебудову календарного графіка. Саме перехід від постфактум-звітності до такого прогнозно-адаптивного управління на основі даних і становить сутність цифрової трансформації строкового планування.

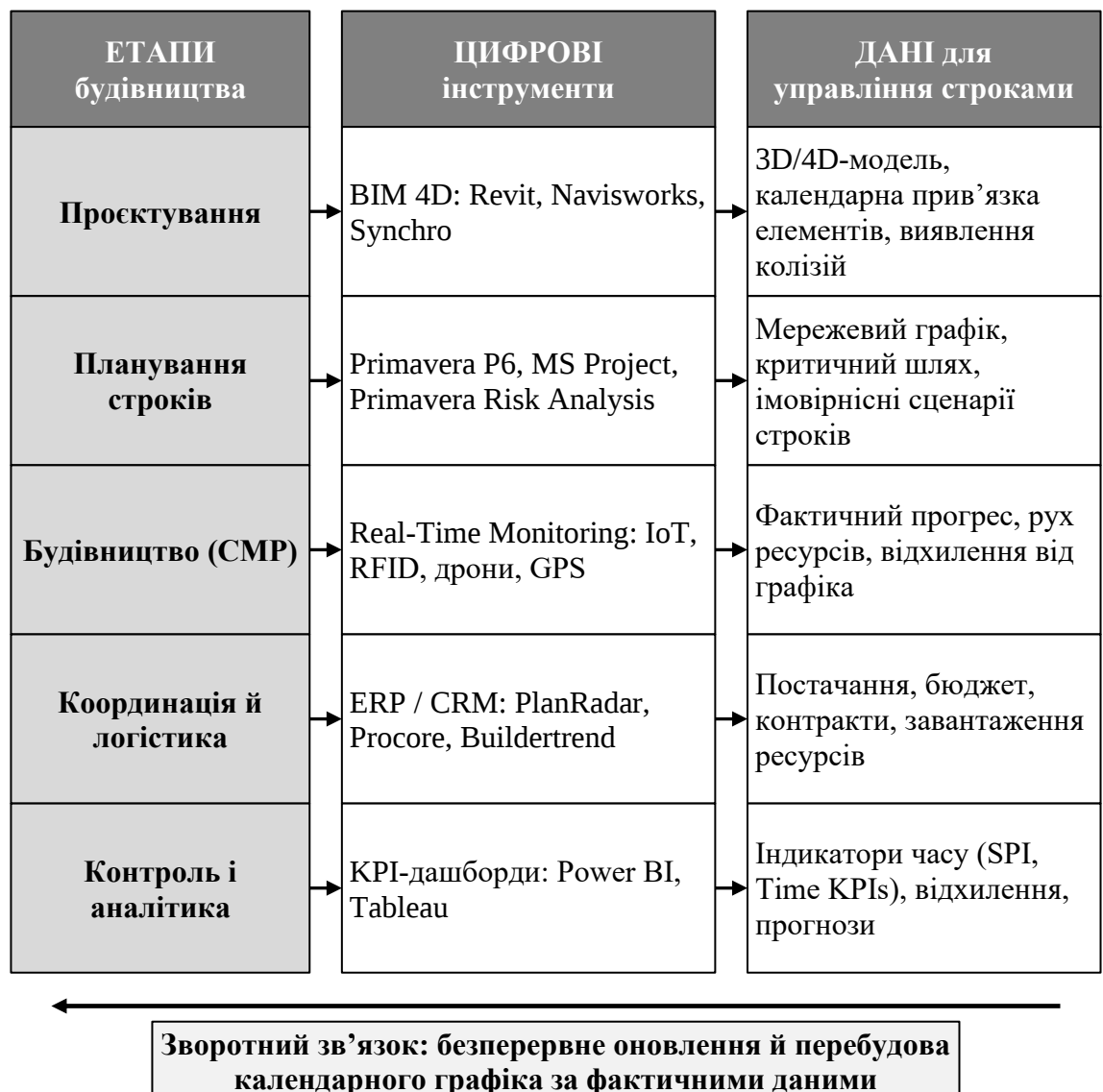


Рис. 1.9. Цифрове управління строками в будівництві: етапи, інструменти, дані (розроблено автором на основі [49])

У підсумку можна стверджувати, що цифрові технології не лише підтримують планування строків, а й суттєво трансформують його парадигму:

від ручного моделювання — до цифрових симуляцій, від постфактум-звітності — до прогнозної аналітики, від теоретичного контролю — до управління на основі даних. Це дає змогу розглядати строк як динамічний управлінський параметр, що гнучко реагує на зміну умов, забезпечуючи ефективну реалізацію проєкту.

Управління строками будівництва не може бути уніфікованим процесом для всіх типів об'єктів та умов. Вибір конкретного підходу до планування календарних графіків повинен враховувати цілий спектр параметрів: від призначення об'єкта (житловий, промисловий, інфраструктурний) до масштабу реалізації (малі, середні, великі проєкти), а також рівень невизначеності (стабільне чи турбулентне середовище). У наукових роботах Т. Дікмена, М. Біргонула, Х. Ель-Райєса, Т. Гегазі, М. Марзука неодноразово підкреслюється, що одна й та сама методологія не дає однакових результатів в умовах різної складності проєкту.

Насамперед слід виділити тип об'єкта як базову класифікаційну категорію. Для житлового будівництва, де повторюваність процесів висока, ефективним є лінійне або шаблонне планування, зокрема метод LOB (Line of Balance) або шаблонні діаграми Ганта. Натомість промислові об'єкти з великою кількістю паралельних інженерних систем вимагають сіткових методів із багатьма зв'язками між задачами. Інфраструктурні проєкти — тунелі, дороги, мости — потребують застосування модифікованих стохастичних моделей, які враховують сезонність, кліматичні ризики та міжоб'єктну координацію [49].

Не менш важливим є масштаб проєкту. Для невеликих об'єктів (наприклад, приватна забудова або реконструкція) використовується переважно децентралізоване планування з орієнтацією на виконавців. Тут оптимально застосовувати адаптивне планування з коротким горизонтом прогнозування (до 2 тижнів). У великих проєктах, особливо капітального будівництва, необхідне ієрархічне планування з багаторівневою деталізацією: стратегічний, тактичний, оперативний рівні. Для таких об'єктів критичною є

наявність багатосторонніх графіків, що інтегрують проектування, будівництво, постачання й узгодження.

Найважливішою змінною при виборі підходу є рівень невизначеності. У передбачуваному середовищі (наприклад, державне житлове будівництво) можна застосовувати детерміновані методи — CPM, PERT, LOB. У ситуаціях високої турбулентності (воєнні зони, інвестиційна нестабільність, енергетичні коливання) потрібні стохастичні та сценарні підходи. Такі підходи включають симуляцію методом Монте-Карло, застосування буферів, методологію Critical Chain, моделі нечіткої логіки (fuzzy logic). Залежно від рівня невизначеності гнучкість графіка повинна зростати, і планування стає постійним процесом перегляду та реакції [49].

Для систематизації взаємозв'язків між типами об'єктів, масштабом та рівнем невизначеності з відповідними підходами до планування строків наведено таблицю 1.8.

Таблиця 1.8

Класифікація підходів до планування строків залежно від характеристик проекту

Критерій	Варіант	Оптимальний підхід до планування строків
Тип об'єкта	Житловий	Лінійне планування, шаблонні діаграми (Gantt, LOB)
	Промисловий	CPM + ресурсне вирівнювання, мультикритеріальні графіки
	Інфраструктурний	Стохастичне планування, симуляція сценаріїв, буферизація
Масштаб проекту	Невеликий	Гнучке оперативне планування, Scrum або LPS
	Середній	Комбіновані графіки, ERP-системи з Gantt/CPM
	Великий	Ієрархічне планування, мультифазне CPM, BIM 4D
Рівень невизначеності	Низький	Детерміновані моделі (CPM, PERT)
	Середній	Сценарне планування, буферизація, критичні ланцюги
	Високий	Стохастичні моделі, метод Монте-Карло, гнучкі планувальні системи

(розроблено автором на основі [49])

Щоб візуально представити, як саме змінюється вибір методології планування залежно від цих трьох параметрів, нижче подано рис. 1.10, що демонструє інтегровану модель прийняття рішень щодо строків [12].

У підсумку науково-аналітична класифікація підходів до строкового планування дає змогу уникнути механічного використання методів «за

замовчуванням». Вона базується на оцінці складності проєкту, ризиковості середовища та типу об'єкта, що дає змогу формувати точніші, адаптивніші й ефективніші календарні графіки. Урахування цього підходу критично важливе в сучасному будівництві, де стандарти управління часом мають бути диференційованими, а не уніфікованими.

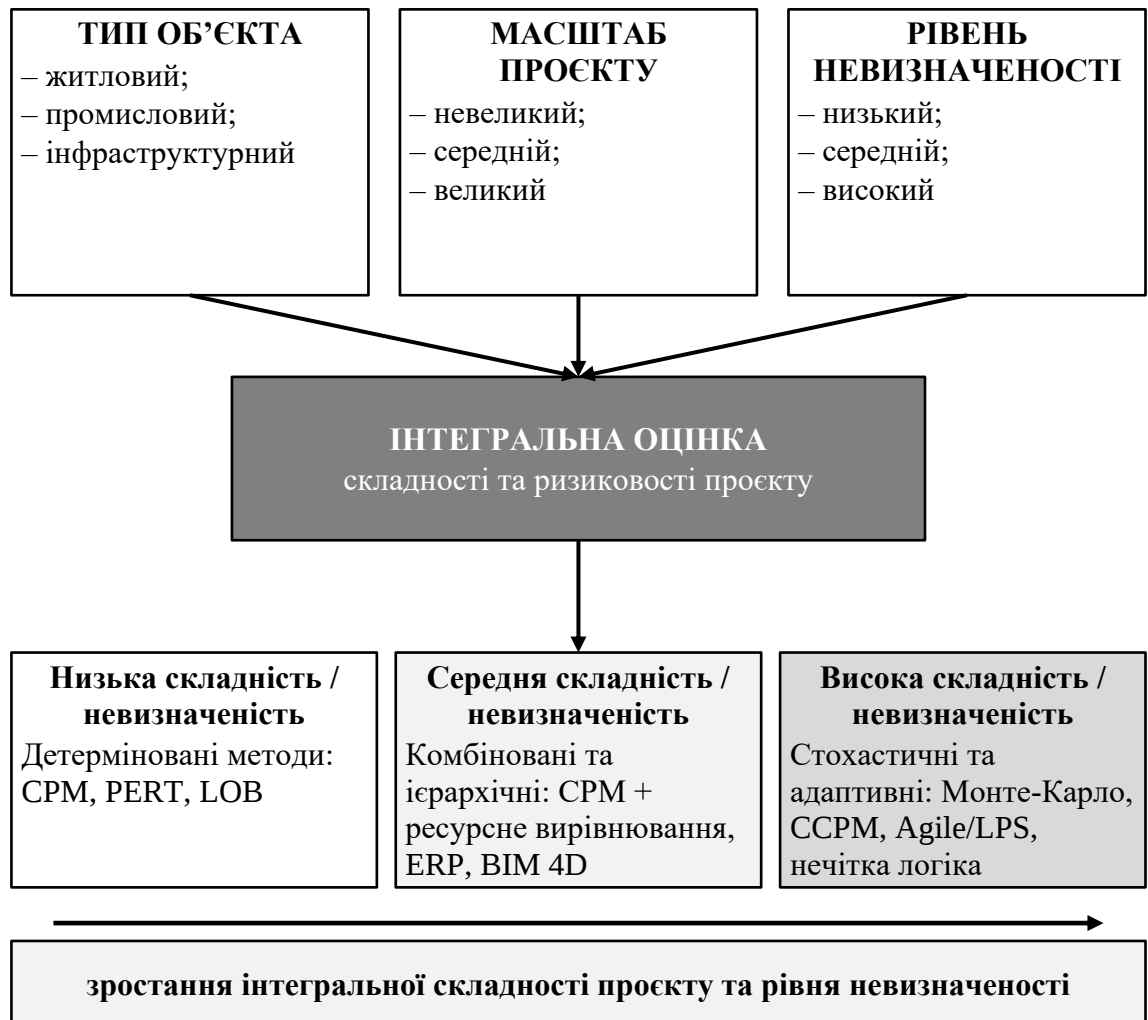


Рис. 1.10. Інтегрована модель вибору методології строкового планування за типом об'єкта, масштабом і рівнем невизначеності (розроблено автором на основі [12])

У відповідь на ці виклики у світовій і вітчизняній практиці відбувається перехід до імовірнісних та адаптивних методів оцінювання тривалості — імовірнісного мережевого планування, методу Монте-Карло, сценарного аналізу — у поєднанні з цифровими засобами організаційно-технологічного моделювання, зокрема технологіями інформаційного моделювання будівель (BIM, Building Information Modeling).

Проблематику визначення й оптимізації тривалості будівництва в умовах невизначеності розроблено в межах кількох сформованих наукових шкіл, доробок яких доцільно розглянути за трьома взаємопов'язаними напрямками: імовірнісне мережеве моделювання строків; оцінювання тривалості за неповними та експертними даними; цифрове (BIM-орієнтоване) організаційно-технологічне моделювання.

Підвалини першого напрямку закладено працею D. Malcolm, J. Roseboom, C. Clark і W. Fazar [36], у якій запропоновано методику PERT: тривалість кожної роботи задається трьома оцінками — оптимістичною, найімовірнішою та песимістичною, — а очікувана тривалість проєкту та її дисперсія обчислюються за критичним шляхом. Це вперше дало змогу оцінювати ймовірність дотримання директивного строку, а не лише його точкове значення. Принципове обмеження такої схеми виявив R. Van Slyke [115]: аналітичний розрахунок PERT систематично занижує тривалість через зміщення, що виникає на злитті шляхів мережі, тому коректний розподіл тривалості слід одержувати імітацією за методом Монте-Карло; там само введено індекс критичності роботи як частоту її потрапляння на критичний шлях. Розвиток імітаційного інструментарію продовжили M. Lu і S. M. AbouRizk [116], які запропонували спрощену модель імітації на базі звичайної мережі CPM і тим зробили ймовірнісний аналіз строків та оцінювання чутливості робіт доступними для практики без спеціалізованого середовища дискретно-подієвого моделювання. Ö. Ökmen і A. Öztaş [24] усунули ще одне джерело системної похибки, розробивши модель CSRAM, яка враховує кореляцію тривалостей робіт, породжену спільними факторами ризику, і довели, що нехтування такими кореляціями занижує розрахункову тривалість та ризик зриву строку. Методичну коректність самої процедури імітації дослідили M. Hajdu і O. Vokor [117], оцінивши чутливість результатів імовірнісного мережевого планування до вибору закону розподілу тривалостей робіт.

Другий напрям — оцінювання тривалості за умов, коли статистичних вибірок для побудови розподілів немає. S. Chanas і J. Kamburowski [118] уперше ввели нечіткі змінні як тривалості робіт (модель FPERT), перенісши мережеві розрахунки на апарат нечіткої арифметики й уможлививши оцінювання строку за експертними даними. N. Sadeghi, A. R. Fayek і W. Pedrycz [119] поєднали обидва типи інформації в межах однієї моделі ризику, запропонувавши нечітку імітацію Монте-Карло, що одночасно оперує випадковими змінними (там, де є статистика) та лінгвістичними (там, де є лише експертна оцінка). Задачу обґрунтованого задання вхідних діапазонів тривалості розв'язали D. Nasir, B. McCabe і L. Hartono [120]: розроблена ними модель ERIC-S на основі мережі довіри визначає нижню й верхню межі тривалості робіт за ідентифікованими ризиками будівництва, знімаючи суб'єктивність експертних інтервалів. Сучасне продовження цієї лінії — підхід L. Chen зі співавторами [121], у якому байєсівські мережі поєднано з імітацією Монте-Карло для кількісного виведення ймовірності зриву строку за відсутності спостережних даних на стадії планування, а також імітаційна експертна система G. Koulinas зі співавторами [48], що формалізує досвід і схильність до ризику менеджера в рівнянні сумарного ризику тривалості роботи та за сценарними розрахунками точніше за класичний PERT прогнозує ймовірність завершення до заданих директивних дат.

Третій напрям пов'язує оцінювання строків із цифровим організаційно-технологічним моделюванням. Придатність 4D-моделей для формування, перевірки та комунікації календарного плану вперше емпірично обґрунтували В. Коо і М. Fischer [122], показавши переваги візуалізації послідовності робіт порівняно з діаграмами Ганта й СРМ, а водночас і обмеження, пов'язані з рівнем деталізації моделі, ресурсами та робочими просторами. Методологічну базу технології, зокрема механізми зв'язування інформаційної моделі з календарним планом та автоматизованого отримання обсягів робіт, систематизовано у праці R. Sacks, C. Eastman, G. Lee і P. Teicholz [45]. Прикладний зв'язок «4D-модель — зниження невизначеності тривалості» на

матеріалі великого інфраструктурного проєкту простежили R. N. F. Sloot, A. Heutink і J. T. Voordijk [123], показавши, як інструменти 4D-BIM підтримують розроблення стратегій пом'якшення саме календарних ризиків.

У вітчизняній науці засади нормування тривалості та організаційно-технологічного моделювання будівництва сформовано науковою школою Київського національного університету будівництва і архітектури. У працях С. А. Ушацького [124] систематизовано норми тривалості будівництва, організаційно-технологічні моделі та засоби забезпечення надійності виробництва через календарне планування; сучасне продовження цієї традиції — узагальнення організаційно-технологічних моделей і нормативних засад визначення тривалості за редакцією О. А. Тугая [125], а також обґрунтована ним із співавторами модель неритмічного потоку [126], у якій скорочення загального строку промислового будівництва досягається перерозподілом обсягів між технологічно однорідними процесами без залучення додаткового трудового ресурсу. Проблему керованості й реалізованості календарних планів розробляє школа Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: В. Р. Млодецький [127] запропонував ентропійну оцінку якості управління як показник керованості організаційної системи, а Є. І. Заяць, В. Р. Млодецький, Т. В. Ткач і О. О. Мартиш [128] розвинули це в методи забезпечення управлінської реалізованості календарних планів. Безпосередньо до предмета цього дослідження належать роботи Є. І. Зайця, Л. М. Дадіверіної та А. А. Мартиша [129], де класифіковано технічні, технологічні, організаційні й управлінські фактори виникнення відмов будівельного процесу з визначенням величини впливу кожного, та О. О. Мартиша зі співавторами [130], у якій тривалість роботи трактується не як детермінована величина, а як діапазон із нормальним, β - та α -розподілом, і обґрунтовується раціональний рівень організаційно-технологічної надійності часових параметрів календарного плану. Варіантне організаційно-технологічне моделювання як засіб вибору раціонального рішення за критеріями «вартість — строк» розвинуто О. І. Менеїлюком зі співавторами [131]. Прогнозне оцінювання

тривалості окремих стадій проєкту з інтегральним параметром складності запропоновано К. Науменком [132], а вплив зовнішньої невизначеності на часові параметри активної фази будівельно-інвестиційного проєкту з використанням збірного залізобетону досліджено А. Блонним і О. Зінковим [68].

Проведений аналіз засвідчує, що імовірнісний апарат оцінювання строків і цифрові засоби організаційно-технологічного моделювання розвивалися переважно паралельно. Зарубіжні дослідження зосереджено на статистичній коректності імітаційних моделей мережі, тоді як вітчизняні — на організаційно-технологічній надійності та реалізованості календарних планів, здебільшого без імовірнісного узгодження оцінки тривалості з інвестиційними показниками проєкту. Поза увагою залишається питання, як параметри розподілу тривалості, одержані з BIM-моделі та з ретроспективних даних забудовника, узгодити в єдиному контурі організаційно-технологічного оцінювання ефективності будівельно-інвестиційного проєкту, придатному для прийняття рішень на передінвестиційній стадії. Це й визначає напрям подальшого дослідження.

Узагальнення розглянутих підходів засвідчує, що сучасний методичний арсенал управління строками будівництва є розвиненим, але фрагментованим: детерміновані методи (CPM, PERT, EVM) забезпечують структурування робіт, але не враховують імовірнісної природи часу; ощадливі та гнучкі підходи (Lean, LPS, Agile) підвищують організаційну адаптивність, проте не формалізують кількісної оцінки ризику строків; стохастичні методи (Монте-Карло, SSPM, нечітка логіка) моделюють невизначеність, але зазвичай застосовуються ізольовано від багатофакторного аналізу чинників; цифрові інструменти (BIM 4D, системи моніторингу, ERP/CRM) забезпечують дані та візуалізацію, однак самі по собі не визначають оптимальної тривалості. Порівняння цих груп методів засвідчує, що їхні обмеження є взаємодоповнювальними, а не такими, що усуваються вдосконаленням окремо взятого підходу: підвищення точності детермінованих розрахунків не додає їм

здатності враховувати імовірнісну природу часу; поглиблення стохастичного моделювання без формалізованого переліку чинників звужує його входи до статистики минулих проєктів; а нарощування цифрових засобів без аналітичного ядра лише пришвидшує оброблення даних, не змінюючи логіки ухвалення рішень. Саме тому науково доцільним є не локальне вдосконалення однієї з груп методів, а їх системна інтеграція, за якої багатофакторний аналіз чинників постачає структуру входів, імовірнісне моделювання — оцінку строків у розподілах, а цифровий інструментарій — середовище розрахунку та зворотного зв'язку. Таким чином, поза увагою залишається інтеграція багатофакторного аналізу чинників невизначеності, імовірнісного моделювання тривалості та цифрового інструментарію в єдину методику визначення оптимальної тривалості будівництва — що й визначає напрям подальшого дослідження.

Це обґрунтовує доцільність переходу від огляду наявних підходів до формування власного методичного базису дослідження, зокрема стохастичних та імовірнісних моделей оцінювання тривалості, які розглянуто в наступному розділі.

Висновки до розділу 1.

Дослідження еволюції уявлень про тривалість будівельного процесу показало послідовний перехід від нормативного (детермінованого) підходу, за якого час встановлювався централізовано й фіксовано, до інтегрованих моделей проєктного планування, у яких тривалість розглядається як керований параметр організаційно-технологічної системи, значення якого прогнозують і коригують, а не задають наперед; простежено розвиток парадигми критичного шляху (CPM, PERT, CCPM) та її сучасну цифрову трансформацію (BIM 4D, сценарне моделювання).

Уточнено понятійний апарат дослідження: оптимальну тривалість будівництва запропоновано трактувати як науково вивірений адаптивний часовий проміжок реалізації будівельно-інвестиційного проєкту, що формується на основі багатовекторного аналізу внутрішніх і зовнішніх умов і

формалізується стохастичними та ймовірнісними методами, — на відміну від традиційного детермінованого трактування строку як фіксованої нормативної величини, що підвищує обґрунтованість строкових рішень.

Здійснено аналіз невизначеності як чинника впливу на хронологічну структуру реалізації будівельних проєктів; простежено еволюцію її наукового трактування — від неформалізованої категорії (Ф. Найт, Дж. Кейнс) до вбудованого параметра цифрового проєктного управління.

Сформовано єдину наскрізну класифікацію чинників невизначеності, що впливають на тривалість, за п'ятьма взаємопов'язаними групами (організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні, форс-мажорні) з оцінюванням кожної за інтенсивністю впливу, спрямованістю дії та ймовірністю прояву; встановлено нерівномірність їх часової локалізації за фазами життєвого циклу, що обґрунтовує потребу у фазово-диференційованому ризик-орієнтованому календарному плануванні.

Проаналізовано сучасні наукові підходи до управління строками (детерміновані, ощадливі/гнучкі, стохастичні, цифрові) та систематизовано умови їх доцільного застосування залежно від типу об'єкта, масштабу й рівня невизначеності; виявлено, що наявний методичний арсенал є розвиненим, але фрагментованим: жоден із підходів не інтегрує багатофакторний аналіз чинників, імовірнісне моделювання тривалості та цифровий інструментарій у єдину методику визначення оптимальної тривалості.

Обґрунтовано, що подоланням виявленої прогалини є розроблення інтегрованого науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності, формування якого потребує стохастичних та імовірнісних моделей оцінювання тривалості, що є предметом розгляду розділу 2.

РОЗДІЛ 2

ФОРМУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО АПАРАТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА З УРАХУВАННЯМ РИЗИКОВИХ ЧИННИКІВ

2.1 Структуризація факторів впливу на часові параметри будівельного процесу: класифікація, взаємозв'язки та пріоритети

Будівельний процес як складна система охоплює не лише технічну й інженерну реалізацію, а й сукупність організаційних, соціальних, фінансових та інформаційних компонентів, які опосередковано або безпосередньо впливають на тривалість його реалізації. Водночас визначення часових параметрів цього процесу не може бути здійснене без наукового обґрунтування впливових чинників, які визначають ці параметри. Саме тому першим кроком у дослідженні часових аспектів будівництва є формування чіткої теоретико-методологічної основи для класифікації факторів часу. У світовій практиці наявні різноманітні підходи до поділу таких факторів: за ступенем контрольованості, джерелом походження, фазою впливу, роллю у формуванні критичних подій або точок прийняття рішень. Водночас для українського будівельного середовища характерною є відсутність єдиної уніфікованої моделі, яка б давала змогу інтегрувати ці фактори у структуру загального планування.

Перший підхід до класифікації передбачає виокремлення екзогенних і ендогенних факторів. Екзогенні включають політичну ситуацію, погодні умови, макроекономічні процеси та регуляторне поле. Ендогенні — це ресурси, людський капітал, внутрішні логістичні ланцюги, управлінські рішення та технологічні параметри. Такий поділ дає змогу розмежувати зони впливу та зони контролю, однак не враховує їхню часову динаміку. Наприклад, той самий фактор — затримка у погодженні документації — може бути критичним лише у певний період реалізації, а в інший період не мати

значного впливу. Це свідчить про те, що фактори мають не лише структурну, а й фазову природу [16].

У рамках досліджень AACE International запропоновано класифікаційну структуру, в якій усі часові фактори поділяються на базові, комбіновані та транзитивні. Базові — ті, що діють безпосередньо (наприклад, продуктивність праці або відсутність матеріалів). Комбіновані — результат одночасного впливу кількох чинників. Транзитивні фактори — ті, що проявляються лише за певних умов, наприклад під час стикування двох технологічних етапів. Така структура дає змогу враховувати нелінійність впливу часових затримок, що особливо важливо для складних або багатозадачних будівельних об'єктів.

Наведені класифікації розкривають окремі зрізи проблеми, проте потребують узгодження з єдиною наскрізною класифікацією чинників невизначеності, обґрунтованою в підрозділі 1.2 та заявленою у вступі як елемент наукової новизни (організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні, форс-мажорні). У цьому підрозділі зазначені групи деталізуються за додатковими вимірами — типом походження, фазою прояву, критичністю та керованістю, — що не змінює складу базових груп, а лише поглиблює їх операціоналізацію.

З огляду на це виникає необхідність побудови інтегрованої моделі класифікації, яка враховує одночасно тип походження, фазу прояву, критичність впливу та можливість управління. Формалізовано цей підхід подано у формулі (2.1) як багатовимірний класифікаційний масив:

$$F_{a,s,c,k} = f(R_a, N_s, S_c, B_k) \quad (2.1)$$

де $F_{a,s,c,k}$ — елемент багатовимірного класифікаційного масиву; f — оператор відображення (класифікаційне правило, а не числова функція); R_a — тип фактора (екзогенний / ендогенний), $a = 1 \dots 2$; N_s — фаза будівельного процесу, $s = 1 \dots 4$; S_c — критичність для графіка, $c = 1 \dots 3$; B_k — можливість керування, $k = 1 \dots 3$.

Цей вираз дає змогу структурувати інформацію про фактори в цифровому середовищі та застосовувати аналітику для оцінки ризиків часу. Наприклад, якщо критичність фактора висока, а контроль низький, він підлягає моніторингу через систему раннього попередження. Натомість якщо фактор є контрольованим і фазово передбачуваним, його можна закладати у план-графік без потреби в резерві.

Особливу увагу в науковій літературі привертає питання критеріїв узагальнення часових факторів. За роботою Бартлетта (Bartlett, 2019), ефективна класифікація передбачає наявність таких властивостей: замкненість множини, ієрархічність, крос-функціональна інтегрованість та гнучкість адаптації до змін середовища. Це означає, що навіть якщо фактор є унікальним для конкретного проєкту, його можна включити в загальну типологію шляхом узагальнення властивостей або ефектів [29].

Важливим аспектом є застосування системного підходу, коли класифікація здійснюється в межах загальної логіки управління життєвим циклом об'єкта. Так, у межах підходу ISO 19650 часові ризики групуються за етапами інформаційного моделювання: планування, проєктування, будівництво, передача в експлуатацію. На кожному етапі виникають свої специфічні часові виклики, що потребують індивідуальної структуризації.

Для кількісного порівняння впливу факторів між собою в межах однієї фази застосовано функцію впливу на критичний шлях, подану у формулі (2.2):

$$Q_b = \frac{\Delta V_b}{P_a} \cdot K_b \quad (2.2)$$

де Q_b — індекс впливу фактора b ; b — індекс фактора; ΔV_b — додатковий час (діб) через фактор b ; P_a — загальна тривалість критичного шляху (діб), спільна для всіх факторів; $K_b \in [0; 1]$ — ваговий коефіцієнт значущості фактора (визначається експертно).

Приклад. Для критичного шляху $P_a = 300$ діб фактор «затримка постачання» додає $\Delta V_b = 15$ діб за вагового коефіцієнта $K_b = 0,8$; тоді Q_b

$= (15 / 300) \cdot 0,8 = 0,04$, тобто фактор формує 4 % відносного часового ризику критичного шляху.

Цей підхід дає змогу виокремити фактори з найбільшим часовим ризиком, які підлягають компенсації або контролю через резерви часу; крім того, він відкриває можливість інтеграції моделей у цифрові системи календарно-мережевого планування [15].

Для формування ефективної моделі управління тривалістю будівельного процесу необхідно узагальнити множину факторів, які впливають на часові параметри реалізації проєктів. Логіку побудови такої інтегрованої моделі з урахуванням формалізованих залежностей ілюструє рис. 2.1.

Класифікація також повинна враховувати взаємодію між факторами, адже в багатьох випадках вплив одного посилюється або змінюється під впливом іншого. Для цього використовують матриці взаємовпливу або побудову графів взаємозв'язків, де кожен вузол — це фактор, а ребра — рівень його зв'язку з іншими. Один із підходів — використання методів структурної декомпозиції (WBS), коли кожен підпроцес має свої часові фактори, які згодом агрегуються у загальну систему ризиків.

Для завершення цього теоретичного блоку доцільно ввести формулу (2.3), яка враховує імовірнісний характер факторів і їхню змінність у часі й будується на базі функції розподілу ймовірностей із ваговими коефіцієнтами:

$$C(t) = \sum_{a=1}^n E_a(t) \cdot \gamma_a \quad (2.3)$$

де $C(t)$ — сумарний (очікуваний) часовий ризик у момент часу t , діб; n — кількість чинників, що враховуються; t — момент часу в межах життєвого циклу, $t \in [0; T_0]$; $E_a(t)$ — імовірність реалізації фактора a у момент часу t , $E_a(t) \in [0; 1]$; γ_a — очікуваний внесок фактора у затримку, діб.

Приклад. За $E = (0,20; 0,15; 0,10)$ та відповідних внесків $\gamma = (10; 20; 30)$ діб очікуваний часовий ризик $C(t) = 0,20 \cdot 10 + 0,15 \cdot 20 + 0,10 \cdot 30 = 8$ діб.

Ця формула дає змогу динамічно оцінювати, як змінюється ризик затримки будівельного процесу з урахуванням зміни середовища і внутрішніх станів проєкту. На практиці таку модель може бути реалізовано через інтерфейс аналітичних панелей або моделі прогнозування на основі машинного навчання.



Рис. 2.1. Структурно-функціональна модель класифікації часових факторів будівельного процесу (розроблено автором)

Таким чином, формалізація часових факторів та побудова багатовимірних моделей дає змогу не лише їх систематизувати, а й здійснювати аналітичну оцінку їхнього впливу в динаміці проєкту. Однак самотійного аналізу окремих чинників часто недостатньо — критично важливо враховувати їхню взаємодію та комбіновану дію. Саме до цього аспекту звернемося далі.

Проблематика взаємозв'язків між факторами, що впливають на часові затримки, є критично важливою для формування ефективної системи

управління проєктом. Сучасні методології зосереджуються на вивченні інтерфакторних взаємодій — механізмів, за якими один фактор змінює інтенсивність або форму впливу іншого. У будівельному середовищі такі взаємозв'язки мають нелінійний і часто синергетичний характер.

Однією з найефективніших методологій виявлення таких взаємозв'язків є використання графів причинно-наслідкових впливів, де вузли відповідають окремим факторам, а ребра — логічним чи емпіричним взаємозв'язкам між ними. Наприклад, затримка постачання арматури може безпосередньо вплинути на зрушення бетонних робіт, але одночасно опосередковано — через перегляд плану підготовки опалубки. У цьому контексті важливо ідентифікувати вузли з найвищою кількістю входів і виходів — так звані фактори-медіатори [20].

У рамках системного аналізу взаємозв'язків застосовуються також матриці впливу типу «Factor Interaction Matrix» (FIM), які дають змогу кількісно оцінити силу впливу одного фактора на інший за шкалою (наприклад, від 0 до 3). Один із варіантів формалізації таких зв'язків подано у формулі (2.4) як модель множинного взаємного впливу:

$$D = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1, b \neq a}^n Q_{ab} \cdot \tau_{ab} \cdot e_{ab} \quad (2.4)$$

де D — сумарний ризик часової взаємодії (безрозмірний); n — кількість чинників; Q_{ab} — інтенсивність впливу фактора a на фактор b за шкалою $[0; 3]$; τ_{ab} — ваговий коефіцієнт значущості зв'язку; e_{ab} — індикатор наявності зв'язку (1 — існує, 0 — не існує); підсумовування виконується за $a \neq b$.

Ця формула дає змогу враховувати не лише силу впливу, а й структуру взаємодії, що має вирішальне значення для побудови моделі управління часовими конфліктами у проєкті.

Дослідження З. Свейса зі співавторами (Sweis et al., 2013) показали, що понад 40 % критичних затримок у будівельних проєктах Близького Сходу мали комбінований характер — виникали як наслідок взаємодії зовнішніх

(регуляторних) і внутрішніх (технічних) факторів. Подібні дані отримано в роботах Дж. Фрімпонга й Дж. Олувоє (Frimpong & Oluwoye, 2003) для Гани та С. Ассафа зі співавторами (Assaf et al., 1995) для Саудівської Аравії [51].

Значну увагу приділяють питанням накладення впливів, коли кілька факторів діють одночасно в одному часовому вікні, спричиняючи «ефект доміно». Для опису цього феномену доцільно використовувати суперпозиційну модель, подану у формулі (2.5):

$$N_e = N_0 + \sum_{a=1}^n (\eta_a \cdot \beta_a \cdot \mu_a) \quad (2.5)$$

де N_e — сумарна тривалість з урахуванням взаємодії, діб; N_0 — базова тривалість без урахування взаємодії, діб; n — кількість чинників; η_a — коефіцієнт впливу фактора a ; β_a — коефіцієнт посилення через накладення; μ_a — інтенсивність прояву фактора (додаток $\eta_a \cdot \beta_a \cdot \mu_a$ має розмірність діб).

Цей вираз дає змогу моделювати часову структуру у вигляді функції множинного накладення, що особливо корисно у проєктах зі щільним розкладом. У практиці це означає, що слід формувати не лише буфери часу на окремі етапи, а й спеціальні резерви на ефекти синхронного впливу [39].

У процесі системного аналізу часових затримок важливо не лише виявити окремі фактори, а й охарактеризувати їхню роль у структурі взаємодій. Рис. 2.2 відображає ступінь впливу ключових факторів за трьома напрямками — прямим, опосередкованим та комбінованим.

Ймовірнісну логіку накопичення затримок відображає формула (2.6), що моделює ризик виникнення хоча б однієї затримки:

$$M_d = 1 - \prod_{a=1}^n (1 - m_a) \quad (2.6)$$

де M_d — сумарна ймовірність виникнення затримки; n — кількість чинників; m_a — ймовірність затримки через фактор a , $m_a \in [0; 1]$.



Рис. 2.2. Типологія впливу ключових факторів на часові затримки у будівельному процесі: прямий, опосередкований та комбінований ефекти (розроблено автором)

Формула (2.6) виведена за припущення статистичної незалежності факторів. З огляду на розглянуті взаємозв'язки (формули (2.4), (2.5)) це припущення є ідеалізацією: за наявності залежності вираз завищує сумарну ймовірність (наприклад, для трьох повністю залежних факторів з $m = 0,2$ формула дає 0,488 замість дійсних 0,20). Тому (2.6) застосовується як верхня (консервативна) оцінка ризику.

Приклад. Для трьох незалежних факторів з імовірностями $m = (0,20; 0,15; 0,10)$ сумарна ймовірність затримки $M_d = 1 - (0,80 \cdot 0,85 \cdot 0,90) = 0,388$.

У контексті аналізу взаємодії факторів дедалі актуальнішою стає потреба у деталізації елементів, які безпосередньо впливають на критичний шлях. Саме тому наступний етап дослідження зосереджується на визначенні пріоритетності факторів.

Основним елементом, який відображає часову вразливість проєкту, є критичний шлях — логічна послідовність робіт, кожна з яких не має резерву часу. Задача полягає в тому, щоб провести диференціацію всього спектра часових факторів за ступенем їхнього впливу, сформувавши ієрархію пріоритетів. Подібна концепція розвивалася у працях Д. Хілсона, який

наголошував, що ефективна ієрархізація ризиків повинна базуватися на багатофакторних оцінках, інтегрованих у контекст системного мислення [25].

Класичні системи, як-от СРМ, дають змогу визначити критичний шлях, але залишаються нечутливими до неформалізованих процесів (управлінські бар'єри, соціальні конфлікти). Тому пріоритетність має бути результатом комплексної топологічної вбудованості факторів у архітектуру проєкту [20]. Відповідну узагальнену залежність подано у формулі (2.7):

$$G_c = \frac{\left(\frac{\partial H_n}{\partial x_c} \cdot p_c + s_c \cdot \Delta \varphi_c \right) (r_c + \alpha_c^{\omega_c}) \delta_c}{1 + e^{-\theta_c V_c}} \quad (2.7)$$

де G_c — інтегральний пріоритет фактора c ; $\partial H_n / \partial x_c$ — чутливість тривалості критичного шляху H_n до зміни параметра x_c ; p_c — імовірність виникнення затримки, $p_c \in [0; 1]$; s_c — коефіцієнт системної взаємодії; $\Delta \varphi_c$ — глибина системного проникнення фактора; r_c — фазова релевантність; α_c — відхилення у варіативності; ω_c — індекс стохастичної нестабільності; δ_c — ваговий коефіцієнт критичності завдання; V_c — коефіцієнт контролюваності, $V_c \in [0; 1]$; θ_c — параметр еластичності управління; $s_c, r_c, \delta_c, \theta_c > 0$.

Діапазони та спосіб оцінювання коефіцієнтів (2.7): $\partial H_n / \partial x_c \in [0; 1]$ — аналіз чутливості сітьової моделі; $p_c \in [0; 1]$ — історичні частоти або експертна оцінка; $s_c \in [0; 1]$ — нормована кількість зв'язків фактора у графі впливу (за (2.4)); $\Delta \varphi_c \in [0; 1]$ — відносний рівень у структурній декомпозиції (WBS); $r_c \in [0; 1]$ — коефіцієнт κ (рис. 1.6) для домінантної фази; $\alpha_c \in [0; 1]$ — коефіцієнт варіації тривалості; $\omega_c \in [0; 2]$ — показник форми розподілу; $\delta_c \in [0; 1]$ — критичність завдання (1 — робота на критичному шляху); $V_c \in [0; 1]$ — контролюваність; $\theta_c > 0$ — крутизна логістичної функції (орієнтовно 4...8).

Для практичних розрахунків прийнято коректно нормовану адитивно-зважену форму метрики пріоритетності:

$$G_c^{\text{norm}} = (w_1 \hat{S}_c + w_2 p_c + w_3 r_c + w_4 \delta_c) (1 - V_c) \quad (2.7')$$

де $G_c^{\text{norm}} \in [0; 1]$ — нормований інтегральний пріоритет фактора c ; $\hat{S}_c$ — нормована чутливість критичного шляху; p_c — імовірність затримки; r_c — фазова релевантність; δ_c — критичність завдання; V_c — контрольованість (усі $\in [0; 1]$); $w_1 \dots w_4$ — вагові коефіцієнти складових, $\sum w_i = 1$ (прийнято $w = (0,35; 0,25; 0,20; 0,20)$). Множник $(1 - V_c)$ забезпечує коректне зниження пріоритету для керованих факторів.

Числовий приклад. Для трьох представницьких факторів — ресурсного (затримка постачання), регуляторного (дозволи) та форс-мажорного (погодні умови) — форма (2.7') дає $G_c^{\text{norm}} = 0,33; 0,45; 0,61$ відповідно. Найвищий пріоритет належить некерованому форс-мажорному фактору, а найнижчий — керованому ресурсному, що піддається буферизації, — це відповідає ризик-орієнтованій логіці управління.

Логіку побудови багатофакторної метрики пріоритетності ілюструє рис. 2.3.

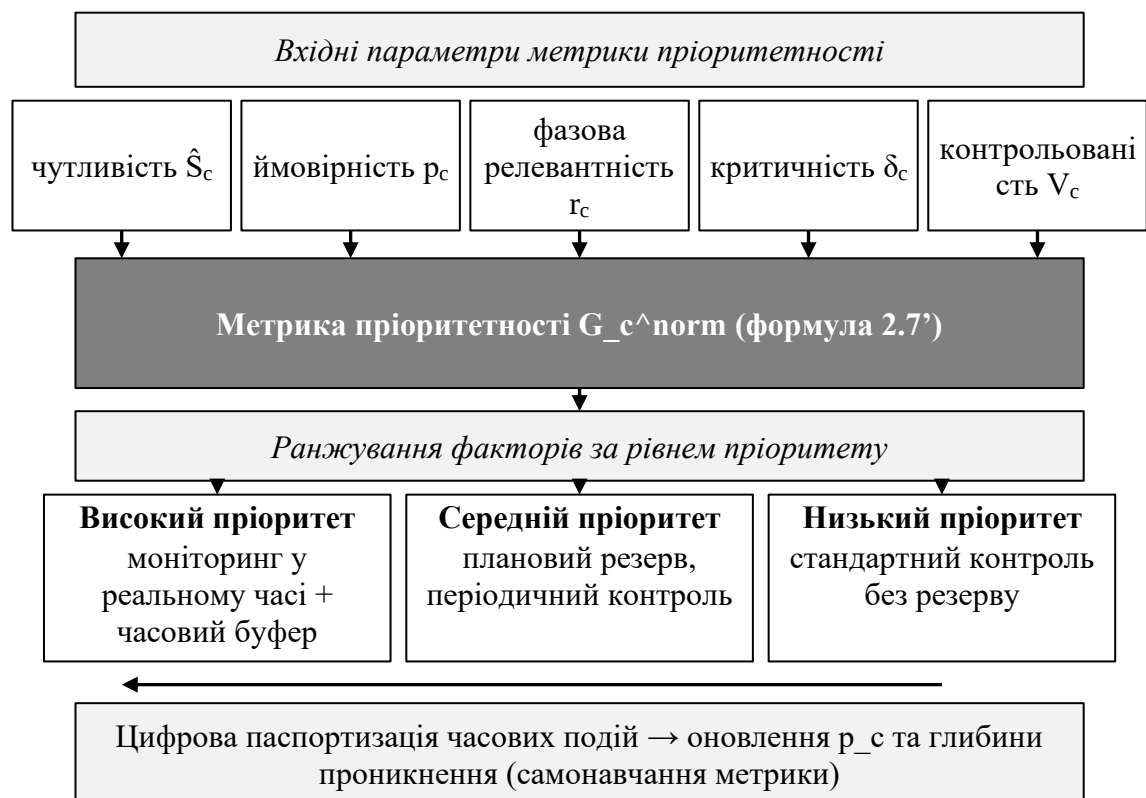


Рис. 2.3. Метрика пріоритетності впливу факторів на критичний шлях проекту (розроблено автором)

Оцінка пріоритетності факторів не може бути відірвана від економічного контексту проекту: інтегральний пріоритет може бути зіставлений із вартістю

запобіжних заходів за методом граничної ефективності — якщо вартість втручання перевищує потенційні втрати, доцільною стає відмова від активного втручання [63]. Актуальним є також питання фазової динаміки пріоритетів: навіть фактори з низьким інтегральним пріоритетом на старті можуть набувати вирішального значення ближче до завершення проєкту.

Щоб перейти від формули до управлінського застосування, важливо визначити, які групи факторів впливають на критичний шлях, у яких фазах активізуються, якого типу цей вплив і наскільки він контрольований. Класифікацію факторів впливу на критичний шлях, узгоджену з наскрізною класифікацією підрозділу 1.2, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Класифікація факторів впливу на критичний шлях у будівельному проєкті

Група факторів	Приклади впливу на критичний шлях	Тип впливу	Фаза найбільшої актуальності	Рівень контрольованості	Відповідність наскрізній класифікації (п. 1.2)
Регуляторно-адміністративні	відтермінування дозволів, зміни законодавства	опосередкований / ланцюговий	підготовка майданчика	низький	зовнішні
Проектно-інженерні	коригування документації, помилки в розрахунках	прямий	проектування, монтаж	середній	технологічні
Логістично-ресурсні	затримка постачання, дефіцит техніки	прямий	вертикальне будівництво	високий	ресурсні
Поведінково-організаційні	демотивація працівників, внутрішні конфлікти	неформалізований	усі фази (особливо завершальна)	низький	організаційні
Соціально-економічні	зміна вартості підряду, інфляція витрат	опосередкований	закупівлі, тендери	низький	зовнішні
Технологічні збої	відмова техніки, помилки в BIM або ERP	прямий	реалізація конструктивів	високий	технологічні
Екзогенні фактори	погодні катаклізми, перебої з енергопостачанням	випадковий / стохастичний	зовнішні мережі	неможливий	форс-мажорні / зовнішні

Група факторів	Приклади впливу на критичний шлях	Тип впливу	Фаза найбільшої актуальності	Рівень контрольованості	Відповідність наскрізній класифікації (п. 1.2)
Юридичні ризики	оскарження рішень у судах, конфлікт із сусідами	затримувальний	підготовка, завершення	низький	зовнішні
Фінансові обмеження	несвоєчасне фінансування, замороження платежів	послідовний	усі фази	частково контрольований	ресурсні
Інформаційно-комунікаційні	затримка передачі даних, неповні моделі	прямий	усі фази (особливо виконання)	середній	організаційні

(розроблено автором на основі [63])

Наведені часткові моделі (2.1)–(2.7') описують окремі аспекти впливу чинників, проте не дають єдиної кількісної оцінки часового ризику проєкту, узгодженої з наскрізною класифікацією. Для усунення цього розриву в роботі запропоновано інтегральний індекс часового ризику (Integrated Time-Risk Index, ITRI), який агрегує п'ять груп чинників невизначеності (підрозділ 1.2) за трьома вимірами — інтенсивністю впливу, ймовірністю прояву та керованістю — з урахуванням фазової локалізації (рис. 1.6) і дає змогу перейти від оцінки ризику до визначення оптимальної тривалості.

Залишковий (некерований) часовий ризик групи чинників g у фазі життєвого циклу φ визначається як добуток коефіцієнта фазової локалізації, нормованої інтенсивності, ймовірності прояву та частки некерованого ризику:

$$\rho_{g,\varphi} = \kappa_{g,\varphi} \cdot I_g \cdot p_g \cdot (1 - c_g) \quad (2.8)$$

де $\rho_{g,\varphi}$ — залишковий часовий ризик групи g у фазі φ ($g = 1 \dots 5$; $\varphi = 1 \dots 4$), $\rho \in [0; 1]$; $\kappa_{g,\varphi} \in [0; 1]$ — коефіцієнт фазової локалізації (за рис. 1.6: висока зона впливу — 1,0; середня — 0,6; низька — 0,3); $I_g \in [0; 1]$ — нормована інтенсивність впливу; $p_g \in [0; 1]$ — ймовірність прояву; $c_g \in [0; 1]$ — рівень керованості.

Згортання залишкових ризиків за групами в межах фази з ваговими коефіцієнтами дає фазовий індекс часового ризику (2.9), а зважування фазових

індексів за їхньою часткою у директивній тривалості — інтегральний індекс часового ризику проєкту (2.10):

$$R_{\varphi} = \sum_{g=1}^5 w_g \cdot \rho_{g,\varphi} \quad (2.9)$$

$$\text{ITRI} = \sum_{\varphi=1}^4 \lambda_{\varphi} \cdot R_{\varphi} \quad (2.10)$$

де R_{φ} — фазовий індекс часового ризику; w_g — ваговий коефіцієнт значущості групи чинників, $\sum w_g = 1$; λ_{φ} — частка фази у директивній тривалості проєкту, $\sum \lambda_{\varphi} = 1$. За побудовою $\text{ITRI} \in [0; 1]$.

Оскільки ITRI є нормованою мірою сукупного некерованого часового ризику [84], його безпосередньо використано для обґрунтування ризик-орієнтованого часового резерву та визначення оптимальної тривалості будівництва:

$$T_{opt} = T_0 (1 + k_p \cdot \text{ITRI}) \quad (2.11)$$

де T_{opt} — оптимальна тривалість; T_0 — детермінована (нормативна) тривалість критичного шляху; $k_p \geq 0$ — коефіцієнт довірчого запасу (за рівня довіри 0,90–0,95 орієнтовно $k_p \in [0,8; 1,3]$; калібрується за стохастичною моделлю тривалості, підрозділ 2.2). Оптимальна тривалість перебуває в межах $[T_0; T_0(1 + k_p)]$ і монотонно зростає з інтегральним ризиком.

Вагові коефіцієнти w_g визначено не довільно, а методом аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНП) Т. Сааті, що забезпечує обґрунтованість, відтворюваність та перевірку узгодженості оцінок. Групи чинників попарно порівнюють за важливістю впливу на тривалість за дев'ятибальною шкалою Сааті; ваги обчислюють як компоненти головного власного вектора матриці попарних порівнянь $A = [a_{ij}]$ ($a_{ij} = 1/a_{ji}$), нормовані до одиниці:

$$A \mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}, \quad \sum_{g=1}^5 w_g = 1 \quad (2.12)$$

де A — матриця попарних порівнянь груп чинників; $\mathbf{w}$ — вектор ваг (головний власний вектор матриці); $\lambda_{\max}$ — найбільше власне значення матриці A ; $g = 1 \dots 5$.

Узгодженість експертних суджень перевіряють через індекс узгодженості CI та відношення узгодженості CR :

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2.13)$$

де CI — індекс узгодженості; CR — відношення узгодженості; n — розмірність матриці ($n = 5$); RI — випадковий індекс узгодженості (для $n = 5$ $RI = 1,12$). Матриця вважається узгодженою за умови $CR \leq 0,10$.

Матрицю попарних порівнянь п'яти груп чинників і обчислені за нею ваги наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Матриця попарних порівнянь груп чинників (АНР) та обчислені вагові коефіцієнти

Група чинників	Орг.	Техн.	Ресурс.	Зовн.	Форс.	Вага w_g
Організаційні	1	2	1	2	3	0,295
Технологічні	1/2	1	1/2	1	2	0,157
Ресурсні	1	2	1	3	3	0,320
Зовнішні	1/2	1	1/3	1	1	0,127
Форс-мажорні	1/3	1/2	1/3	1	1	0,101

(розроблено автором)

Для наведеної матриці найбільше власне значення $\lambda_{\max} = 5,05$, індекс узгодженості $CI = 0,011$, відношення узгодженості $CR = 0,010 < 0,10$, що підтверджує узгодженість експертних суджень. Отримані ваги $\mathbf{w} = (0,295; 0,157; 0,320; 0,127; 0,101)$ використано в подальших обчисленнях.

Апробацію запропонованої моделі на узагальнених експертних оцінках наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Вхідні параметри та результати обчислення інтегрального індексу часового ризику (ITRI)

Група чинників (за п. 1.2)	Інтенсивність I_g	Ймовірність p_g	Керованість c_g	Вага w_g	Внесок у ITRI, %
Організаційні	0,70	0,80	0,60	0,295	25
Технологічні	0,80	0,50	0,50	0,157	15
Ресурсні	0,80	0,70	0,40	0,320	45
Зовнішні	0,60	0,50	0,20	0,127	10
Форс-мажорні	1,00	0,15	0,05	0,101	5

(розроблено автором)

За фазових часток $\lambda = (0,10; 0,20; 0,60; 0,10)$ та коефіцієнтів фазової локалізації $k_{g,\phi}$ за рис. 1.6 фазові індекси часового ризику становлять $R = (0,147; 0,189; 0,205; 0,088)$, а інтегральний індекс $ITRI = 0,185$. За детермінованої тривалості критичного шляху $T_0 = 300$ діб і коефіцієнта довірного запасу $k_p = 1,0$ оптимальна тривалість $T_{opt} = 300 \cdot (1 + 0,185) \approx 355$ діб, тобто обґрунтований ризик-орієнтований резерв становить близько 55 діб (18 %).

Для оцінювання надійності результату виконано аналіз чутливості інтегрального індексу до варіації вагових коефіцієнтів: почергова зміна кожної ваги на ± 20 % з подальшим перенормуванням змінює ITRI лише в межах $[0,179; 0,189]$ — не більш ніж на 3 % відносно базового значення, а ранжування груп чинників за внеском залишається незмінним. Це свідчить про робастність (стійкість) запропонованої метрики: підсумкові висновки не залежать критично від точних значень ваг.

Найбільший внесок у сукупний часовий ризик формують ресурсні (45 %) та організаційні (25 %) чинники, що концентруються на будівельній і підготовчій фазах, — це визначає пріоритетні зони буферизації та управлінського контролю. Запропонований індекс ITRI поєднує класифікацію чинників (підрозділ 1.2), їх фазову локалізацію (рис. 1.6) та керованість (табл. 2.1) у єдину кількісну міру, узгоджену з метою дослідження.

Отже, структуризація факторів впливу на часові параметри (класифікація, взаємозв'язки та пріоритети), зведена в інтегральний індекс часового ризику ITRI з обґрунтованими за методом АНР ваговими коефіцієнтами, формує вхідний блок інструментального апарату дослідження.

На цій основі в наступному підрозділі розробляється стохастична модель оцінювання тривалості будівництва, що використовує виокремлені групи чинників як параметри імовірнісного розподілу, а коефіцієнт k_p — як цільовий рівень довіри до директивного строку.

2.2 Побудова моделей оцінювання тривалості з використанням стохастичних та імовірнісних підходів

У сучасному будівельному управлінні точне передбачення тривалості виконання проєктів є не лише технічним завданням, а критичним елементом стратегічного планування, ресурсного забезпечення та управління ризиками. Традиційні детерміновані моделі, які покладаються на фіксовані параметри, втрачають релевантність у динамічному середовищі з численними невизначеностями, варіативністю технологій, непередбачуваними затримками постачання та коливаннями доступності робочої сили. Саме тому постає потреба у побудові моделей, які враховують імовірнісну природу ризиків, стохастичні збурення та сценарну змінність вхідних умов.

Стохастичні та імовірнісні моделі оцінювання тривалості [66] змінюють саму логіку прогнозування — замість одного «середнього» значення вони оперують діапазоном можливих результатів із розподілом імовірностей. Це дає змогу побачити не тільки найімовірніший термін завершення робіт, а й критичні межі, у яких може опинитися проєкт. Відомими прикладами таких моделей є методи Монте-Карло, імовірнісне моделювання PERT, марковські процеси, баєсівські мережі тощо [24].

Однією з ключових переваг стохастичних моделей є їх здатність інтегрувати неоднорідні фактори, кожен з яких має власну природу невизначеності: від затримки постачання матеріалів до людського фактору, змін погодних умов чи адміністративних збоїв. Ці фактори не лише додають дисперсії до загального розподілу часу виконання, а й утворюють між собою складні взаємозв'язки. Тому аналітичні інструменти мають містити не лише методи обчислення очікуваної тривалості, а й блоки аналізу чутливості,

симуляції ризиків та сценарного прогнозування. Типову структуру процесу побудови стохастичної моделі для оцінки тривалості будівельного проєкту показано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Побудова стохастичної моделі оцінювання тривалості будівельного процесу (розроблено автором на основі [24])

Наступним етапом після побудови моделі є її адаптація до конкретного типу проєкту з урахуванням масштабу, технологічної складності, регіональних особливостей та фази життєвого циклу. Для малих інфраструктурних проєктів достатньо триточкової оцінки за методом PERT, де кожна робота має оптимістичну, песимістичну та найбільш імовірну тривалість. Для масштабних урбаністичних реконструкцій доцільно застосовувати симуляцію Монте-Карло на основі глибокої вибірки сценаріїв, що дає змогу змодельовати десятки тисяч можливих сценаріїв реалізації, кожен зі своїм часовим профілем [36].

Іншим перспективним підходом є використання баєсівських мереж, які дають змогу оновлювати модель у міру надходження нових даних з

будмайданчика. Таким чином, тривалість окремих робіт може переглядатися в режимі реального часу залежно від фактичного виконання попередніх етапів, що створює умови для запобігання ефекту «ланцюгових затримок».

Ще одним ефективним методом стохастичного моделювання є використання процесів Маркова, суть якого полягає у моделюванні змін станів проєкту з певною імовірністю переходу між ними. Це дає змогу обчислити математичне очікування часу в кожному стані та передбачити середню тривалість за умов настання певних подій; такі моделі підходять для проєктів із високим рівнем регуляторної залежності або погодних ризиків [34].

Сучасна аналітика тривалості дедалі частіше спирається на гібридні моделі, що поєднують класичні імовірнісні підходи з машинним навчанням: методи кластерного аналізу дають змогу попередньо згрупувати проєкти за рівнем ризику, а потім моделювати тривалість усередині кластерів, зменшуючи дисперсію оцінок.

Методологічна база стохастичного моделювання включає формалізоване уявлення про часові затримки як випадкові процеси, що залежать від багатьох змінних. Кожна змінна (тривалість конкретної роботи, перерва в постачанні, погодні вікна) описується власною функцією розподілу, яка визначається за емпіричними чи експертними даними. Вибір функцій розподілу є критичним: для малоїмовірних, але критичних подій краще підходить розподіл Пуассона або експоненціальний; у стабільних умовах — нормальний (гаусів); за наявності оптимістичної, песимістичної й модальної оцінок — бета-розподіл, покладений в основу моделі PERT [36].

Імовірнісне моделювання тривалості бере початок у роботах Д. Малкольма, Дж. Розебума, Ч. Кларка та В. Фазара, які у 1959 році запропонували метод Program Evaluation and Review Technique (PERT). Його інноваційність полягала в переході від одновимірного до тривимірного опису кожної операції: оптимістичної (a), найбільш імовірної (m) і песимістичної (b) оцінок [36]. Очікувану тривалість t_e для кожної роботи обчислюють за формулою:

$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (2.14)$$

де t_e — очікувана тривалість роботи, діб; a , m , b — оптимістична, найбільш імовірна та песимістична оцінки тривалості, діб.

Окрім того, для кожної оцінки розраховують дисперсію тривалості:

$$\sigma^2 = \left(\frac{b - a}{6} \right)^2 \quad (2.15)$$

де σ^2 — дисперсія тривалості роботи, діб²; a , b — оптимістична та песимістична оцінки, діб.

Ці базові формули дають змогу моделювати не лише середню тривалість, а й оцінювати ймовірність завершення проєкту в заданий термін за нормальним розподілом [112] сумарних значень. Проте PERT не враховує кореляції між роботами та не дає змоги гнучко оновлювати модель у процесі реалізації; тому у складних проєктах на зміну PERT приходять симуляційні підходи, зокрема метод Монте-Карло.

Симуляція Монте-Карло дає змогу проводити тисячі ітерацій розрахунку графіка проєкту з випадковими значеннями тривалості кожної роботи, згенерованими згідно з обраною функцією розподілу; у результаті формується повний розподіл імовірностей загальної тривалості проєкту. На його основі визначають [24]:

- імовірність завершення до певної дати;
- 90-відсотковий довірчий інтервал завершення;
- ступінь чутливості проєкту до кожної з робіт.

Формально для кожного симульованого сценарію k загальна тривалість проєкту T_k визначається як максимум суми тривалостей робіт за всіма шляхами мережевої моделі:

$$T_k = \max_{p \in P} \sum_{i \in p} X_i^{(k)} \quad (2.16)$$

де P — множина всіх шляхів через мережу робіт; $X_i^{(k)}$ — випадкова тривалість i -ї роботи в k -му сценарії, діб. Після N симуляцій будується розподіл $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$, за яким визначають середнє, відхилення та ризик зриву строків.

Для порівняння основних стохастичних методологій ключові характеристики узагальнено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Порівняння стохастичних методів оцінювання тривалості у будівництві

Методологія	Тип розподілу	Облік ризиків	Гнучкість до змін	Можливість симуляції	Складність упровадження
PERT	бета	частково	низька	немає	низька
Монте-Карло	будь-який	повна	висока	повна	середня
Баєсівські мережі	умовні розподіли	динамічна	дуже висока	частково	висока
Марковські процеси	стохастичні переходи	статистична	середня	частково	висока

(розроблено автором на основі [106])

Тематика стохастичних моделей оцінювання тривалості набула актуальності завдяки напрацюванням Д. Халетта, який у монографії «Практичний аналіз ризику графіків» (2009) обґрунтував прикладне використання методу Монте-Карло для визначення імовірнісних меж завершення проєкту: його модель імітує кілька тисяч сценаріїв виконання робіт на основі функцій розподілу тривалості, будує довірчі інтервали та виявляє найризикованіші шляхи [36].

Вагомий внесок у розвиток адаптивного моделювання зробив Т. Вільямс («Моделювання складних проєктів», 2002), який запропонував баєсівські моделі оновлення тривалості з урахуванням нових даних у процесі виконання. У баєсівському формалізмі апостеріорна корекція оцінки відображається формулою:

$$P(T | D) = \frac{P(D | T) P(T)}{P(D)} \quad (2.17)$$

де $P(T)$ — апріорна ймовірність тривалості T ; $P(D|T)$ — ймовірність нових даних D за умови T ; $P(T|D)$ — апостеріорна оцінка тривалості; $P(D)$ — повна ймовірність даних.

У практичному сенсі це означає, що тривалість кожної операції може бути переглянута залежно від фактичного стану виконання попередніх етапів. Такий підхід особливо корисний для інфраструктурних або логістично складних проєктів. Методологічне обґрунтування функцій розподілу для тривалості робіт представлено також у дослідженнях К. Боздогана, який інтегрував варіативність постачання, погодних умов та організаційних збоїв в одну модель часової оцінки. Послідовність дій побудови стохастичної моделі оцінювання тривалості наведено на рис. 2.5 [17].

Серед авторів, які розглядають інтеграцію стохастичних моделей у середовища BIM, слід виділити Ч. Істмана та Р. Сакса («BIM Handbook», 2011), які показали, як 4D-моделювання може бути доповнене стохастичними симуляціями з урахуванням часової та просторової варіативності процесів [3, 46]. Х. Дж. Хан (Jung Hyun Han, 2020) досліджував кореляційні залежності між тривалостями окремих робіт, використовуючи копули — функції, що дають змогу моделювати складні залежності між змінними з різними типами розподілу:

$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), \dots, F_n(x_n); \theta) \quad (2.18)$$

де C — функція копули; $F_i(x_i)$ — маргінальні функції розподілу; θ — параметр, що описує силу взаємозв'язку.

Такий підхід дає змогу моделювати «ланцюгові» затримки, коли одна робота значною мірою залежить від виконання попередньої, а їх тривалості мають різні джерела стохастики (одна залежить від погоди, інша — від затримки матеріалів).

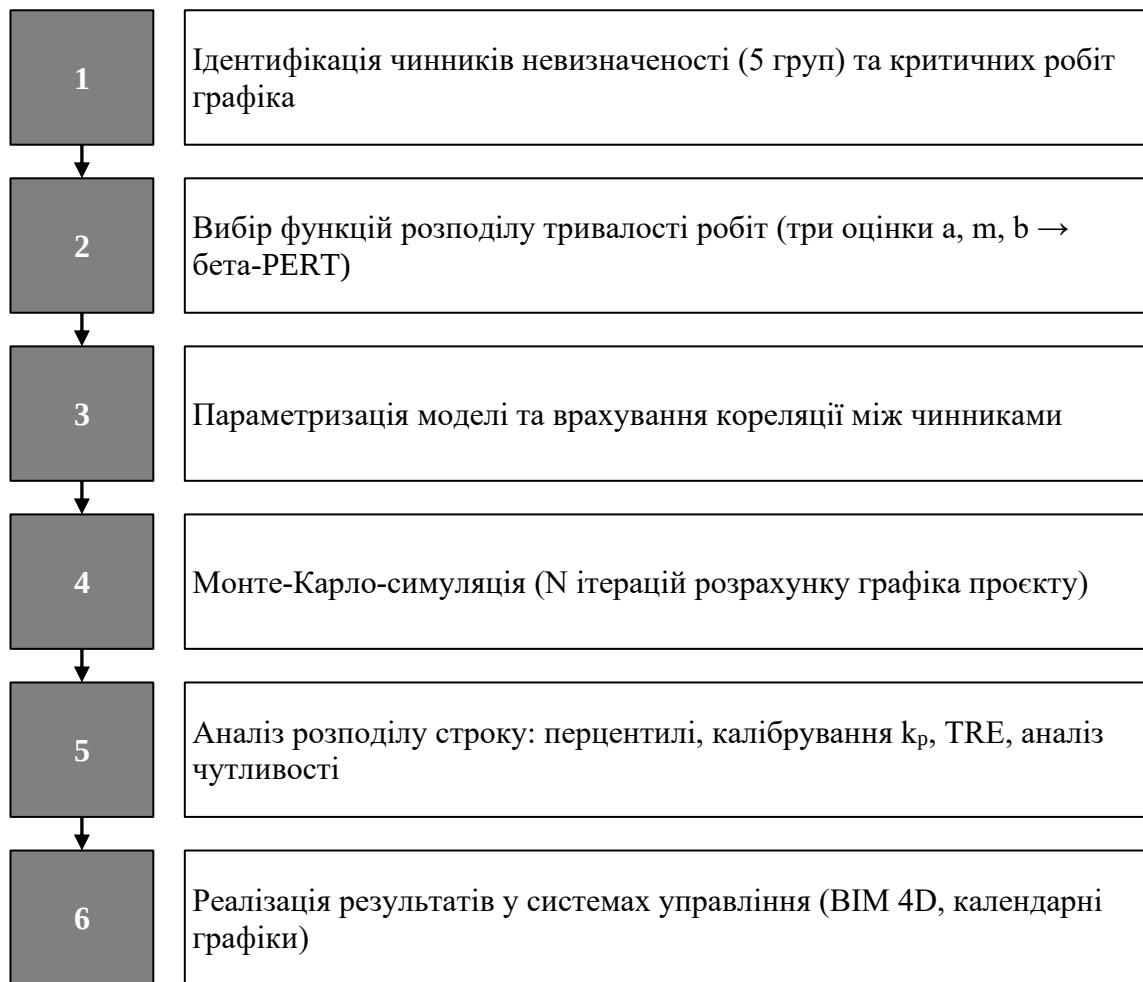


Рис. 2.5. Етапи побудови стохастичної моделі оцінювання тривалості будівельного проекту (розроблено автором на основі [46])

Кожен з підходів має свої переваги та обмеження залежно від складності проекту, доступності статистичних даних, рівня ризику та цифрової зрілості організації. Детерміновані моделі зручні для проектів із низьким рівнем невизначеності, однак у динамічному середовищі втрачають точність. Стохастичні підходи (Монте-Карло, баєсівське оновлення, функції копул) дають змогу гнучко враховувати ризики та формувати адаптивні сценарії управління, особливо у поєднанні з 4D-моделюванням у середовищах BIM [27].

Для наочного представлення ключових характеристик порівняно п'ять найпоширеніших методологій за сферою застосування, потребою в даних, складністю впровадження та гнучкістю (табл. 2.5) [56].

Таблиця 2.5. Порівняння стохастичних підходів до оцінювання тривалості будівельних проєктів

Методологія	Сфера застосування	Необхідність даних	Складність упровадження	Гнучкість до змін
PERT	стабільні проєкти зі стандартними роботами	середня	низька	низька
Монте-Карло	складні, багатофакторні проєкти	висока	середня	висока
Баєсівське оновлення	динамічні проєкти з оновленням даних	середня	висока	дуже висока
Копули (моделювання залежностей)	проєкти з залежними роботами	висока	висока	висока
4D BIM + стохастика	інтегровані цифрові моделі будівництва	висока	дуже висока	дуже висока

(розроблено автором на основі [56])

Порівняння демонструє, що найбільш адаптивними є підходи, які інтегрують математичне моделювання з цифровим управлінням у BIM-середовищах; класичні моделі на кшталт PERT залишаються корисними у невеликих проєктах із низькою невизначеністю. У контексті української будівельної галузі перспективною є адаптація методології Халетта для інфраструктурних проєктів державного значення та впровадження симуляцій «BIM + Монте-Карло» у девелоперському сегменті з високим ризиком змін у законодавстві, строках підключення мереж або поставках обладнання [22].

Розглянуті методи (PERT, Монте-Карло, баєсівське оновлення, копули) є відомими інструментами; авторський внесок підрозділу полягає в їх інтеграції з наскрізною класифікацією чинників (підрозділ 1.2) та в калібруванні коефіцієнта довірчого запасу k_p , уведеного у формулі (2.11). Параметри розподілів тривалості окремих робіт задаються не ізольовано, а з урахуванням п'яти груп чинників невизначеності: інтенсивність і ймовірність прояву груп (табл. 2.3) визначають дисперсію та асиметрію бета-розподілу тривалості, а системна складова ризику моделюється спільним корельованим множителем, що відображає одночасну дію організаційних, ресурсних і зовнішніх чинників (пор. формули (2.4)–(2.5)).

Коефіцієнт довірчого запасу k_p калібрується за емпіричним розподілом строку завершення, отриманим методом Монте-Карло, як відносне перевищення відповідного перцентилі над детермінованою тривалістю:

$$k_p = \frac{T_p - T_0}{T_0 \cdot \text{ITRI}} \quad (2.19)$$

де T_p — строк завершення на рівні довіри p (перцентиль розподілу), діб; T_0 — детермінована тривалість критичного шляху, діб; ITRI — інтегральний індекс часового ризику (формула (2.10)).

Апробація. Для критичного шляху з восьми робіт із бета-PERT-розподілами тривалості (сумарна детермінована оцінка $T_0 = 294$ доби) виконано $2 \cdot 10^5$ ітерацій Монте-Карло з урахуванням системної кореляції чинників. Отриманий розподіл строку завершення має середнє 296 діб і коефіцієнт варіації 12 %; результати калібрування k_p за перцентилями наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Калібрування коефіцієнта довірчого запасу k_p за результатами Монте-Карло-моделювання

Рівень довіри	Строк T_p , діб	Резерв понад T_0 , діб (%)	Коефіцієнт k_p
P50	294	0 (0 %)	≈ 0
P80	325	31 (10 %)	0,56
P90	342	48 (16 %)	0,88
P95	357	63 (21 %)	1,16

(розроблено автором; $T_0 = 294$ доби, $\text{ITRI} = 0,185$)

Показово, що нехтування кореляцією знижує ризик: за припущення незалежності робіт коефіцієнт варіації розподілу становить лише близько 4 %, тоді як урахування системної складової підвищує його до 12 %. Це узгоджується з висновками щодо взаємодії чинників (формули (2.4)–(2.5)) і доводить необхідність корельованого стохастичного моделювання.

Калібрування підтверджує припущення підрозділу 2.1: за рівня довіри 90–95 % коефіцієнт $k_p = 0,88 \dots 1,16$, тобто $k_p \approx 1,0$, що відповідає обґрунтованому ризик-орієнтованому резерву 16–21 % понад детермінований

строк. Таким чином, стохастична модель замикає інструментальний ланцюг «класифікація чинників (розділ 1) → інтегральний індекс ITRI (підрозділ 2.1) → калібрований коефіцієнт довіри k_p → оптимальна тривалість T_{opt} », чим реалізується заявлене у вступі вдосконалення стохастичного підходу до визначення тривалості будівництва.

Окремим авторським результатом підрозділу є адаптація відомого показника ризиково-часової ефективності (Time-Risk Efficiency, TRE) до задачі визначення оптимальної тривалості будівництва. На відміну від класичного застосування, де TRE слугує апостеріорною оцінкою якості виконаного графіка, у цій роботі показник обчислюється безпосередньо за емпіричним розподілом строку завершення, отриманим методом Монте-Карло, і використовується як критерій вибору директивного строку. TRE поєднує дві протилежні за напрямом складові — надійність дотримання строку та вартість часового резерву — в єдиній безрозмірній мірі:

$$TRE(T_{dir}) = R(T_{dir}) - \rho \frac{T_{dir} - T_0}{T_0} \quad (2.20)$$

де $TRE(T_{dir})$ — ризиково-часова ефективність за директивного строку T_{dir} ; $R(T_{dir}) = P(T \leq T_{dir})$ — надійність (імовірність дотримання директивного строку), що визначається за функцією розподілу строку завершення, побудованою методом Монте-Карло; T_0 — детермінована тривалість критичного шляху, діб; $(T_{dir} - T_0)/T_0$ — відносний часовий резерв; $\rho > 0$ — коефіцієнт відносної вартості (небажаності) резерву часу (за рівноважного трактування надійності й економії часу $\rho = 1$). Значення $TRE \in (0; 1]$; що вище значення, то краще збалансовано надійність і резерв.

Оптимальний директивний строк визначається максимізацією ризиково-часової ефективності: $T_{dir}^* = \arg \max TRE(T_{dir})$. У точці максимуму гранична вигода від підвищення надійності зрівнюється з граничною вартістю додаткового резерву, що й задає економічно та ризиково обґрунтовану оптимальну тривалість T_{opt} .

Апробація. Для розглянутого Монте-Карло-розподілу ($T_0 = 294$ доби, $\rho = 1$) розраховано TRE для детермінованої та стохастичних стратегій планування; результати наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Порівняння стратегій планування за показником ризиково-часової ефективності (TRE)

Стратегія планування	T dir, дб	Надійність R	Резерв, дб (%)	TRE
Детермінований ($T_{dir} = T_0$)	294	0,50	0 (0 %)	0,50
Стохастичний, P80	325	0,80	31 (10 %)	0,70
Стохастичний, P90	342	0,90	48 (16 %)	0,74
Стохастичний, оптимум (max TRE)	349	0,93	55 (19 %)	0,74
Стохастичний, P95	357	0,95	63 (21 %)	0,74

(розроблено автором; $\rho = 1$)

Результати показові. Детермінований план (директивний строк дорівнює точковій оцінці T_0) забезпечує надійність лише 0,50 і $TRE = 0,50$: половина реалізацій завершується із запізненням. Стохастичне планування підвищує TRE до 0,74, а надійність — до 0,90–0,93 за обґрунтованого резерву 16–19 %. Максимум TRE досягається за $T_{dir}^* \approx 349$ дб, чому відповідає коефіцієнт довірного запасу $k_p = (349 - 294)/(294 \cdot 0,185) \approx 1,0$. Отже, максимізація TRE незалежно підтверджує калібрування $k_p \approx 1,0$ (табл. 2.6) і значення оптимальної тривалості, обґрунтоване в підрозділі 2.1 (формула (2.11)).

Таким чином, авторський внесок полягає в адаптації показника TRE до умов невизначеності будівельного процесу, у процедурі його обчислення за результатами імовірнісного (Монте-Карло) моделювання та у використанні максимуму TRE як критерію визначення оптимальної тривалості, що реалізує результат щодо розвитку оцінювання ризиково-часової ефективності строкового управління.

Методологічний вибір стохастичного підходу є контекстуально зумовленим: за обмеженої кількості даних і низького рівня цифровізації доцільно застосовувати PERT як базовий метод; для інженерно-технологічно складних проєктів метод Монте-Карло забезпечує вищу точність та управлінську гнучкість [6]. Упровадження баєсівських моделей або копул

підвищує вимоги до аналітичного супроводу, оскільки потребує оперативної реакції на зміну умов і культури прийняття рішень на основі даних.

У практичному сенсі поєднання методів (PERT на початкових стадіях, а згодом — симуляція Монте-Карло чи баєсівське оновлення в міру накопичення інформації [50]) дає змогу формувати гібридні моделі прогнозування, що краще відповідають складності проєкту; такі підходи інтегруються безпосередньо у програмні середовища управління [22]. Отже, розвиток стохастичних підходів є реакцією на фундаментальні трансформації будівельної галузі — від технічної уніфікації до цифрової складності, від нормативної статистики до сценарної динаміки.

2.3 Інтеграція інструментів цифрового прогнозування у визначення оптимального календарного плану в умовах ризиків

У сучасному будівельному середовищі оптимізація календарного планування перетворюється на ключовий аспект підвищення ефективності реалізації проєктів, особливо з огляду на складність, невизначеність і динамічність ризиків. Класичні підходи, орієнтовані на жорстке слідування нормативним термінам та фіксованим графікам, більше не забезпечують бажаного рівня точності у випадку багатфакторного впливу ризиків — як внутрішніх (затримки постачання, кадровий дефіцит), так і зовнішніх (економічні флуктуації, воєнні дії, кліматичні зміни). Тому дедалі більшої актуальності набуває впровадження цифрових інструментів прогнозування, що дозволяють вбудовувати механізми адаптації до ризиків безпосередньо в процес календарного планування.

Інструменти цифрового прогнозування — методи машинного навчання, алгоритмічні моделі обробки великих даних, симуляційне моделювання, стохастичні сценарії й аналітика на основі історичних шаблонів — дозволяють формувати не лише базовий графік виконання, а й широкий спектр адаптивних маршрутів. У контексті ризиків це означає можливість моделювати

альтернативні шляхи реалізації проєкту з урахуванням імовірностей затримок, варіацій вартості, доступності ресурсів і поведінки підрядників. Завдяки цьому календарний план стає не статичним документом, а адаптивною цифровою моделлю, що оновлюється відповідно до фактичного стану проєкту.

Особливістю інтеграції цифрових інструментів у планування є формування багаторівневої логіки реакції на зміну параметрів: для кожного ризик-фактора встановлюється система детекції, оцінювання, аналітики і впливу на календарну модель. За допомогою регресійного прогнозування можна передбачити затримку на основі накопиченої статистики по схожих об'єктах; симуляційні модулі (метод Монте-Карло) дозволяють прорахувати розкид можливих термінів завершення з урахуванням взаємозв'язків між процесами. Логіку інтеграції цифрових інструментів прогнозування у планування під ризики наведено на рис. 2.6.

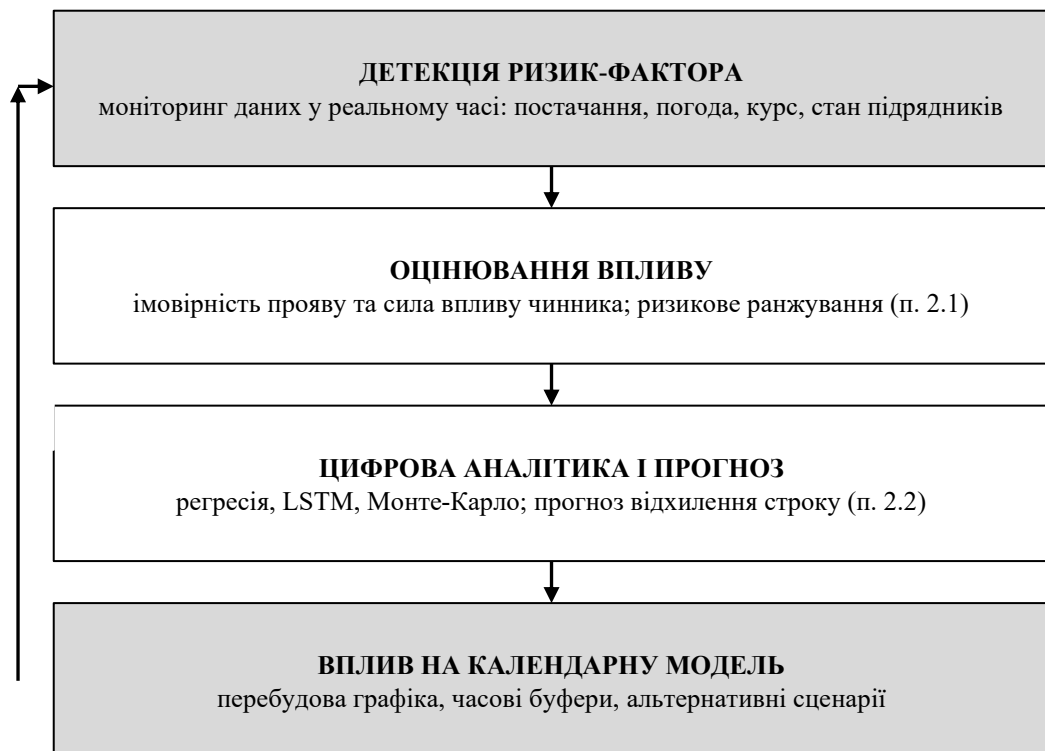


Рис. 2.6. Логіка інтеграції цифрових інструментів прогнозування у планування під ризики. Зворотний зв'язок ліворуч — оновлення параметрів за фактичним виконанням.

(розроблено автором на основі [8])

Інтеграція таких підходів змінює характер управління календарним планом: замість фіксації контрольних точок управлінець керує траєкторією розвитку подій, спираючись на дані, аналітику та машинні висновки. На практиці це реалізується засобами сучасних систем управління проєктами (класу Primavera, BIM 5D, надбудов до ERP), які формують прогностичні графіки в реальному часі; водночас у цьому підрозділі такі програмні продукти згадуються лише як приклади реалізації, а предметом дослідження є авторський науково-методичний підхід до формалізації складу й структури цифрового інструментарію, викладений нижче [9].

Цифрове прогнозування дозволяє не лише скоротити середнє відхилення від графіка, а й системно знижувати рівень невизначеності у проєктах. Завдяки багатоваріантному аналізу вдається виявляти «критичні вузли» — етапи з високою концентрацією ризиків — і заздалегідь трансформувати підхід до їх реалізації, що є переходом від реактивного до проактивного управління календарем.

Цифрова трансформація будівельної галузі супроводжується глибокими змінами у способах керування операційною діяльністю. Одним із ключових викликів є забезпечення безперервності операційного ритму в умовах зовнішнього тиску (нестабільність постачання, інфляційні коливання, геополітичні ризики, погодні збої, порушення логістичних ланцюгів, зміни нормативно-правового середовища). Традиційні системи календарного планування (метод критичного шляху, діаграми Ганта) не забезпечують необхідної адаптивності, оскільки орієнтовані на фіксовані дані та не враховують сценарну мінливість середовища.

Під операційним ритмом розуміємо регулярність і безперервність виконання технологічних етапів у межах заданих графіків, що визначають інтенсивність використання трудових, матеріальних, технічних і фінансових ресурсів. Питання цифрового прогнозування операційного ритму розглядали як зарубіжні, так і вітчизняні дослідники: у частині адаптивного прогнозування логістики та застосування машинного навчання для оцінки

ефективності підрядників [80], а у вітчизняній практиці — щодо цифрової трансформації виробничого середовища будівельних підприємств засобами аналітичних прогнозних платформ [26].

Кількісно стійкість ритму характеризують показником зваженого відхилення ритму ΔR_t у часовому ряді:

$$\Delta R_t = \frac{\sum_{t=1}^T w_t |R_t - \hat{R}_t|}{\sum_{t=1}^T w_t \hat{R}_t} \quad (2.21)$$

де R_t — фактичний обсяг виконаних робіт у момент часу t ; $\hat{R}_t$ — прогнозований (плановий) обсяг; w_t — ваговий коефіцієнт значущості періоду t ; T — довжина часового ряду спостережень. Показник нормований (безрозмірний): менші значення ΔR_t відповідають вищій ритмічності виконання.

Прогнозування планового обсягу $\hat{R}_{t+1}$ на базі попередніх n спостережень реалізується мережею довгої короткочасної пам'яті (LSTM):

$$\hat{R}_{t+1} = f_{\text{LSTM}}(R_{t-n+1}, R_{t-n+2}, \dots, R_t; \Theta) \quad (2.22)$$

де Θ — параметри моделі, навчені на історичних даних з урахуванням ризикових тригерів (погодні умови, логістичні збої, коливання цін); f_{LSTM} — оператор рекурентної мережі; n — глибина ретроспективи.

У таблиці 2.8 подано порівняльні характеристики операційної стійкості до ризиків за різних методів прогнозування. Застосування нейромереж та баєсівського аналізу зменшує кількість ризикових відхилень, покращує індекси виконання за графіком (SPI) та за витратами (CPI) і скорочує час адаптації до змін.

Наведені дані підтверджують, що поєднання прогнозних моделей з ризик-аналізом зменшує середнє відхилення ритму майже у п'ять разів (з 16,8 до 3,1 %) і скорочує час реакції на ризикові події з декількох діб до годин, що узгоджується з результатами галузевих досліджень [18].

Таблиця 2.8

Порівняння операційної стійкості до ризиків за різних методів прогнозування
(розроблено автором на основі [18])

Параметр	Класичне планування	Прогнозування на основі LSTM	Прогнозування + ризик-аналіз (Bayesian)
Середнє відхилення ритму, %	16,8	7,4	3,1
Час на корекцію плану, год	168	36	12
Частота збоїв за 100 днів	9,1	4,2	1,8
CPI (Cost Performance Index)	0,81	0,93	0,98
SPI (Schedule Performance Index)	0,76	0,91	1,01

Фінансові ризики (затримки оплати, коливання курсу, подорожчання матеріалів, зміна умов кредитування, неспроможність субпідрядника) є однією з ключових причин порушення календарних планів. За таких умов класичне планування на фіксованих сценаріях втрачає актуальність, а інтеграція сценарного моделювання у цифрові середовища планування стає критично важливою [28]. Основи сценарного підходу та застосування сценаріїв фінансової нестабільності в умовах ВІМ-планування закладено у роботах зарубіжних дослідників [10].

Одним з основних інструментів цифрового сценарного моделювання є розрахунок очікуваного відхилення графіка, що враховує ймовірності настання різних фінансових подій:

$$E[\Delta T] = \sum_{i=1}^m P_i D_i \quad (2.23)$$

де P_i — ймовірність сценарію i ; D_i — очікуване відхилення по строках у разі реалізації цього сценарію; m — кількість сценаріїв. Ключові етапи цифрового сценарного моделювання фінансових ризиків наведено на рис. 2.7.

Вагомим інструментом є також симуляційне моделювання методом Монте-Карло, що дозволяє проаналізувати наслідки великої кількості ймовірних фінансових ситуацій. Очікувану тривалість проєкту за результатами симуляцій обчислюють як середнє:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \quad (2.24)$$

де T_j — тривалість реалізації при симуляції j ; N — кількість симуляцій (зазвичай кілька тисяч). Це узгоджується зі стохастичним ядром, формалізованим у п. 2.2 (формули (2.14)–(2.17)): показник $\bar{T}$ відповідає центру розподілу, тоді як управлінські рішення приймають за перцентилями P80–P95.

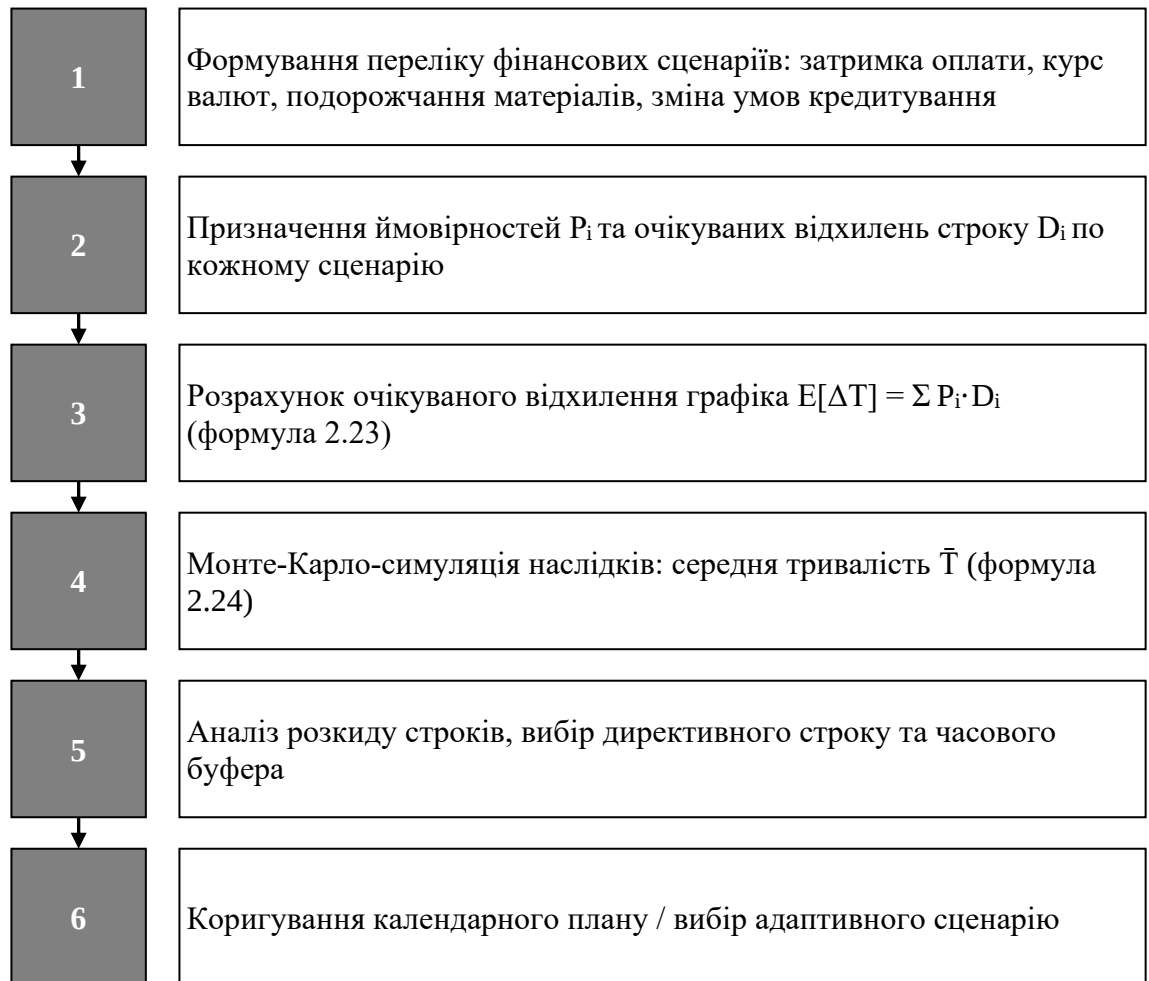


Рис. 2.7. Цифрове сценарне моделювання фінансових ризиків у календарному плануванні (розроблено автором на основі [10])

Порівняльну ефективність сценарного моделювання в умовах фінансової нестабільності наведено у таблиці 2.9. Цифрове моделювання сценаріїв забезпечує найвищий рівень адаптивності календарного плану до фінансових коливань [19].

Таблиця 2.9

Порівняльна ефективність сценарного моделювання в умовах фінансової нестабільності (розроблено автором на основі [19])

Показник	Без сценаріїв	З ручним сценарним підходом	З цифровим симуляційним аналізом
Середнє відхилення терміну виконання, днів	21,3	12,4	4,9
Реакція на зміну курсу валют, год	>72	24	3,5
Зниження загальних витрат проєкту, %	—	9,6	18,3
Прогнозована точність графіка, %	63	81	94

В українських реаліях перехід до багатосценарного фінансового прогнозування розглядають у контексті цифрової стійкості інвестиційного циклу в будівництві [26]: проєкти з високою питомою часткою зовнішнього фінансування (бюджетні тендери, міжнародні програми, девелоперські облігації) особливо вразливі до фінансових збоїв, тому цифрові симуляції доцільно вважати обов’язковим елементом попереднього планування.

Дотримання календарного графіка залежить не лише від внутрішньої дисципліни планування, а й від надійності зовнішніх партнерів — постачальників, субпідрядників, логістичних операторів. У середовищі з десятками взаємозалежних організацій затримка одного елемента ланцюга активує каскадне відхилення всього плану. Тому актуальним є не лише документальний моніторинг надійності контрагентів, а й їх прогнозна оцінка засобами машинного навчання, яке на основі історичних даних, транзакційної поведінки та фактичних відхилень формує динамічні профілі ризику для кожного підрядника чи постачальника [55].

Оцінка надійності засобами машинного навчання — це побудова моделі, яка аналізує попередні проєкти, строки виконання, перевищення бюджету, рівень дефектів, частоту комунікаційних збоїв, юридичні конфлікти тощо. Ці дані у вигляді багатовимірного профілю подаються на вхід алгоритмам класифікації або регресії, які виводять узагальнений індекс надійності. Індекс інтегрується у цифрову модель графіка, де критичні шляхи коригуються з урахуванням ризикового балансу: якщо стадія залежить від двох субпідрядників, один з яких має високий ризик, система змінює їх

пріоритетність або перебудовує черговість наступних етапів, знижуючи чутливість до потенційного зриву [58].

Послідовну логіку інтеграції алгоритмів машинного навчання у процес управління календарними графіками наведено на рис. 2.8. Від збору історичних і поточних даних про постачальників та підрядників система формує багатовимірні профілі надійності, аналізує їх навченою моделлю та за отриманим індексом ризику перебудовує критичні шляхи, знижуючи залежність графіка від ненадійних партнерів. Це забезпечує адаптивність календарного плану, підвищує точність прогнозів і мінімізує ризики зриву ключових етапів.



Рис. 2.8. Інтеграція машинного навчання у систему управління критичними шляхами (розроблено автором на основі [48])

Перевага підходу в тому, що система критичних шляхів перестає бути жорсткою фіксацією найтриваліших операцій і перетворюється на оптимізаційне середовище, у якому цифрові індекси партнерської надійності

безпосередньо впливають на вибір сценаріїв виконання. Відбувається зсув від структурного контролю до превентивної аналітики, коли рішення про заміну партнера чи перегляд етапу приймається на підставі цифрового профілю, що самонавчається у процесі реалізації проекту.

окремі цифрові інструменти (машинне навчання, сценарне та симуляційне моделювання) застосовуються фрагментарно й переважно як зовнішні програмні продукти. Науковим результатом цього підрозділу є не перелік таких засобів, а **удосконалений науково-методичний підхід до формалізації змісту та побудови компонент цифрового інструментарію прогнозування строків будівництва, заснований на методах Монте-Карло, аналізі чутливості та ризиковому ранжуванні факторів**. На відміну від існуючих рішень, інструментарій не є набором незалежних модулів, а становить цілісну структуру, у якій вихід кожної компоненти є обґрунтованим входом наступної, а всі компоненти спираються на єдину систему позначень розділу 2. Склад і призначення компонент авторського цифрового інструментарію наведено у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10

Склад, вхід/вихід і зв'язок компонент цифрового інструментарію з моделями розділу 2 (розроблено автором)

Компонента	Призначення	Вхід → Вихід	Зв'язок з моделлю розділу 2
1. Модуль підготовки даних	Збір і нормування вихідних даних	Тривалості робіт (a, m, b), чинники 5 груп, історичні ряди → структурований масив	п. 1.2 (класифікація чинників)
2. Модуль ризикового ранжування	Оцінка інтенсивності та ваги чинників	Масив чинників → ваги w_g , індекс $\rho_{\{g,\phi\}}$, ITRI	п. 2.1 (АНР, ITRI, ф-ли (2.8)–(2.11))
3. Стохастичне ядро	Імовірнісне моделювання тривалості	Розподіли beta-PERT з кореляцією → вибірка T_j , розподіл строку	п. 2.2 (Монте-Карло, ф-ли (2.14)–(2.17))
4. Модуль аналізу чутливості	Оцінка впливу варіювання факторів	Вибірка T_j → внески факторів, діапазон ITRI ($\pm 20\%$)	п. 2.1 (аналіз чутливості)
5. Генератор сценаріїв	Формування альтернативних календарів	Розподіл строку → перцентилі P50/P80/P90/P95, буфери k_p	п. 2.2 (калібрування k_p)

Компонента	Призначення	Вхід → Вихід	Зв'язок з моделлю розділу 2
6. Модуль ефективності та гнучкості	Оцінка результативності плану	Сценарії → TRE-індекс, F-index	п. 2.2 (TRE) + ф-ла (2.25)

Наскрізність інструментарію забезпечується єдиними позначеннями: ризикове ранжування (компонента 2) використовує ваги w_g та індекс ITRI з п. 2.1; стохастичне ядро (компонента 3) — розподіли й кореляційну структуру з п. 2.2; модуль ефективності (компонента 6) — TRE-індекс з п. 2.2. Саме така формалізація складу й зв'язків компонент, а не використання окремих програмних продуктів, становить авторський внесок підрозділу.

Для кількісної характеристики адаптивності календарного плану до змін середовища у складі модуля ефективності (компонента 6) дістав **подальшого розвитку показник гнучкості F -index**, адаптований автором до стохастичної постановки розділу 2. Він визначає, яку частину «хвоста» розподілу строку покриває обраний директивний термін T_{dir} :

$$F-index = \frac{T_{dir} - T_{P50}}{T_{P95} - T_{P50}} \quad (2.25)$$

де T_{dir} — директивний (плановий) строк; T_{P50} , T_{P95} — 50-й і 95-й перцентилі розподілу строку за результатами Монте-Карло (п. 2.2). Значення $F-index \in [0; 1]$: чим ближче до 1, тим більший запас гнучкості (план поглинає більшу частину хвостового ризику); $F-index \rightarrow 0$ свідчить про відсутність буфера й високу чутливість до відхилень.

Для прикладу розділу 2 ($P50 = 294$, $P95 = 357$ діб) за директивного строку $T_{dir} = 349$ діб (TRE-оптимум, п. 2.2) показник гнучкості становить:

$$F-index = \frac{349 - 294}{357 - 294} = \frac{55}{63} \approx 0,87 \quad (2.26)$$

Узагальнену структуру взаємодії компонент авторського цифрового інструментарію наведено на рис. 2.9.

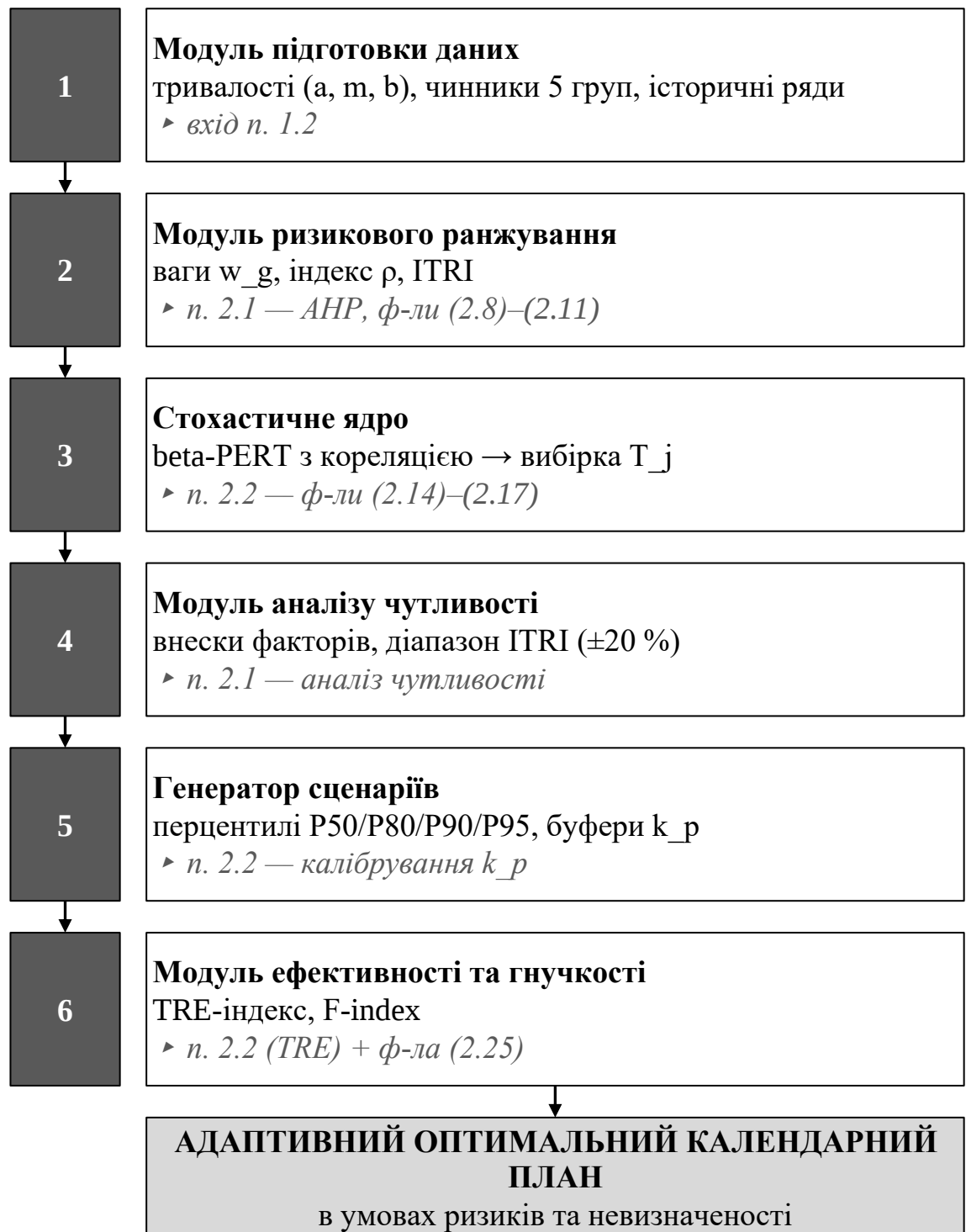


Рис. 2.9. Структура авторського цифрового інструментарію прогнозування строків будівництва (компоненти 1–6 та їх зв'язок з моделями розділу 2)

(розроблено автором)

Отримане значення $F\text{-index} \approx 0,87$ означає, що адаптивний план покриває близько 87 % діапазону хвостового ризику між медіаною та 95-м перцентилем, тобто має високий запас гнучкості. Показник узгоджений з TRE-індексом (п. 2.2): максимум TRE і максимум $F\text{-index}$ досягаються в тій самій

області директивних строків, що підтверджує внутрішню несуперечність інструментарію.

цифровий інструментарій не змінює фізичних значень тривалості робіт конкретного проєкту — він підвищує точність, повноту й обґрунтованість оцінки строків та керованість часовим ризиком. Тому ефект застосування коректно формулювати як зростання точності прогнозу й адаптивності плану, а не як безпосереднє «скорочення тривалості» об'єкта.

Таким чином, цифрове прогнозування є не лише технологічною інновацією, а трансформаційним чинником операційної структури: воно забезпечує проактивне управління ритмом, мінімізує вплив зовнішніх змін і перетворює календарне планування з облікового на стратегічний інструмент.

Запропонований авторський підхід формалізує склад і структуру цифрового інструментарію та інтегрує його компоненти з моделями п. 2.1 (ITRI/АНР) і п. 2.2 (Монте-Карло/TRE), а введений показник F-index дає кількісну міру гнучкості календарного плану, чим реалізовано відповідні пункти наукової новизни («удосконалено» та «дістало подальшого розвитку»).

Висновки до розділу 2.

У другому розділі розроблено науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності, який поєднує ризикове ранжування чинників, імовірнісне моделювання строку та цифрову інтеграцію отриманих моделей у процес календарного планування. За результатами дослідження сформульовано такі висновки.

Обґрунтовано підхід до інтегрального оцінювання впливу чинників невизначеності на тривалість будівництва на основі їх систематизації за п'ятьма групами — організаційними, технологічними, ресурсними, зовнішніми та форс-мажорними. Вплив кожного чинника враховано за інтенсивністю, спрямованістю дії та ймовірністю прояву, а значущість груп визначено методом попарних порівнянь із перевіркою узгодженості експертних оцінок, що підвищує обґрунтованість і достовірність ранжування часових ризиків.

Удосконалено стохастичний підхід до визначення тривалості будівництва, за яким тривалості робіт розглядаються не як фіксовані величини, а як діапазон імовірнісних станів. Застосування імітаційного моделювання з урахуванням взаємозв'язків між чинниками дало змогу оцінювати строк завершення як розподіл можливих значень і обґрунтовувати часовий резерв за заданим рівнем довіри. Установлено, що нехтування кореляцією чинників суттєво занижує оцінку часового ризику, тому її врахування є принциповою умовою достовірності прогнозу.

Показано, що інтегральний та імовірнісний підходи узгоджуються між собою: обґрунтування часового резерву за різними процедурами (ризиковим ранжуванням, довірчими рівнями розподілу строку та критерієм ризиково-часової ефективності) приводить до близьких управлінських рішень. Ця внутрішня несуперечність інструментарію підтверджує його достовірність і придатність до практичного застосування.

Дістав подальшого розвитку методичний апарат оцінювання результативності строкового управління за рахунок показника ризиково-часової ефективності, адаптованого до імовірнісної постановки задачі. Показник дає змогу зіставляти альтернативні директивні строки за співвідношенням надійності дотримання графіка та вартості часового резерву й обирати раціональний варіант календарного плану в умовах ризику.

Удосконалено науково-методичний підхід до формалізації складу й структури цифрового інструментарію прогнозування строків будівництва. На відміну від фрагментарного застосування окремих програмних засобів, інструментарій подано як цілісну систему функціонально пов'язаних компонент, у якій результат кожної компоненти є обґрунтованим входом наступної, а всі вони інтегровані з розробленими у розділі моделями ризикового ранжування та імовірнісного оцінювання строку.

Набув подальшого розвитку підхід до кількісної характеристики гнучкості календарного плану через показник, що відображає здатність системи адаптуватися до змін середовища без порушення директивного

строку. Це дозволяє оцінювати не лише очікувану тривалість, а й запас стійкості плану до відхилень, поєднуючи критерії ефективності та адаптивності строкового управління.

Дотримано ключовий методологічний принцип: запропонований інструментарій не змінює фізичних значень тривалості робіт конкретного об'єкта, а підвищує точність, повноту й обґрунтованість оцінки строків та керованість часовим ризиком. Відповідно, ефект застосування розробок коректно тлумачити як зростання достовірності прогнозу й адаптивності календарного плану, а не як безпосереднє скорочення тривалості будівництва.

Отримані у розділі результати створюють методичну основу для експериментальної апробації інструментарію на реальних будівельних проєктах, якій присвячено наступний розділ дисертації.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА АПРОБАЦІЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОГО КОМПЛЕКСУ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА

3.1 Проєктування алгоритмів прийняття рішень щодо строків реалізації будівельних робіт в умовах нестабільного середовища

У сучасних умовах реалізації будівельних проєктів традиційне календарне планування поступово втрачає ефективність через високу динамічність зовнішнього середовища, нестабільність ринкових факторів, ризики постачань, кадрові коливання та зростаючу складність технологічних процесів. Детерміновані методи, що базуються на фіксованих строках і припущенні стабільності ресурсів, не здатні відображати реальні сценарії розвитку проєктів, де кожен етап супроводжується випадковими відхиленнями, стохастичними впливами та ймовірнісними затримками. Управління строками в таких умовах потребує не статичного графіка, а гнучкої аналітичної системи, здатної адаптуватися до змін середовища в реальному часі.

Перехід до алгоритмічного рівня управління є закономірним продовженням науково-методичної логіки, розробленої у другому розділі, де визначено сукупність часових факторів, описано стохастичні та імовірнісні моделі оцінювання тривалості (ITRI, метод Монте-Карло, показники TRE і F-index) та проаналізовано цифрові інструменти прогнозування ризиків. Наступним етапом розвитку цих підходів є формування інтегрованої системи, що моделює впливи й автоматично формує рішення на основі розрахованих залежностей, прогнозів і сценарних змінних. Алгоритмічний підхід поєднує аналітичні дані різних рівнів — факторного, стохастичного та цифрового — у єдину модель підтримки рішень.

Метою підрозділу є розробка алгоритму підтримки управлінських рішень щодо тривалості будівельних робіт, який дозволяє обґрунтовувати

оптимальні строки реалізації проєкту за умов змінності середовища. Алгоритм інтегрує результати факторного аналізу, стохастичного моделювання та цифрового прогнозування, забезпечуючи перехід від класичної логіки фіксованого планування до системи інтелектуальної оптимізації строків [98].

Для побудови алгоритму визначаються основні змінні часової моделі проєкту: тривалість кожної операції, імовірність настання ризикової події, рівень контролюваності впливових факторів та ступінь нестабільності зовнішнього середовища (коефіцієнт K_s). Тривалість роботи задає базовий часовий горизонт; імовірність ризику відображає стохастичну природу процесів; ваговий коефіцієнт характеризує силу впливу фактора та можливість його регулювання; коефіцієнт K_s враховує зовнішні економічні, політичні та логістичні збурення.

Для кількісного поєднання змінних вводиться агрегована функція оцінювання тривалості:

$$T_{opt} = \sum_{i=1}^n t_i w_i p_i K_s \quad (3.1)$$

де T_{opt} — агрегована (ризик-скоригована) тривалість; t_i — тривалість i -ї операції; w_i — коефіцієнт контролюваності фактора; p_i — коефіцієнт урахування ризику (частка надійного виконання, $0 < p_i \leq 1$); K_s — коефіцієнт нестабільності середовища (формула 3.3); n — кількість операцій.

На відміну від розрахункової моделі розділу 2 ($T_{opt} = T_0(1 + k_p \cdot ITRI)$), формула (3.1) є її операційною згортою на рівні окремих робіт: w_i узгоджуються з ваговими оцінками груп чинників (АНР, п. 2.1), p_i — з імовірностями ризикових відхилень індексу ITRI, а K_s агрегує зовнішню групу чинників. Отже, модель (3.1) не замінює, а деталізує інтегральну модель розділу 2.

Для демонстрації виконаємо умовний розрахунок для проєкту з трьох робіт (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Вихідні параметри операцій для розрахунку за моделлю (3.1)

(розроблено автором)

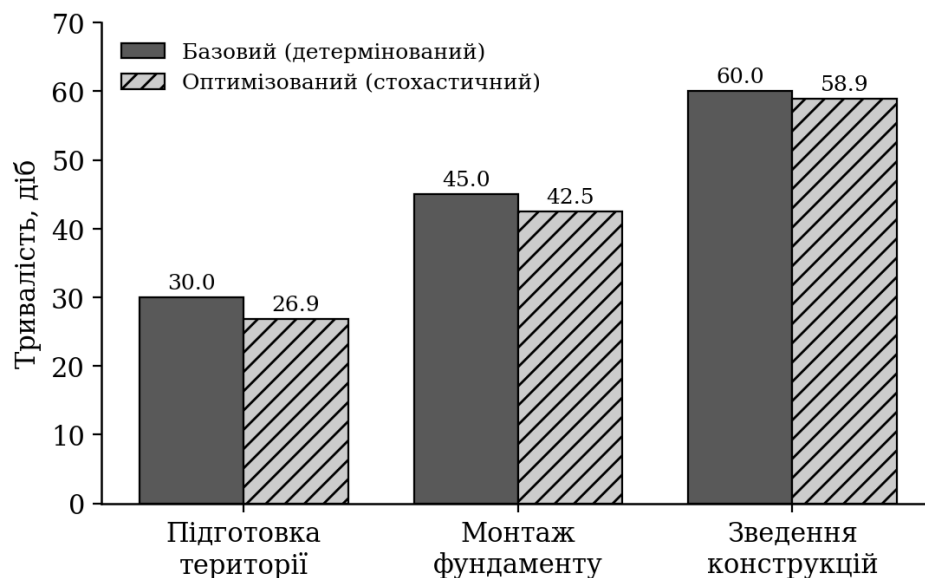
Робота	Тривалість t	Вага w	Коеф. ризику p	Коеф. середовища Ks
1. Підготовка території	30	0,90	0,95	1,05
2. Монтаж фундаменту	45	1,00	0,90	1,05
3. Зведення конструкцій	60	1,10	0,85	1,05

Підставляючи значення у функцію (3.1):

$$T_{opt} = 30 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 1,05 + 45 \cdot 1,00 \cdot 0,90 \cdot 1,05 + 60 \cdot 1,10 \cdot 0,85 \cdot 1,05 = 26,9 + 42,5 + 58,9 = 128,3 \text{ діб.}$$

Отримане значення відповідає ризик-скоригованій оцінці тривалості. Модель не «скорочує» фізичну тривалість об'єкта, а формує обґрунтовану розрахункову оцінку строку з урахуванням ризику.

Для наочного відображення впливу оптимізації порівняємо результати за традиційним детермінованим підходом і за стохастичною моделлю, що враховує ризики та змінність середовища (рис. 3.1).



(розроблено автором)

Рис. 3.1. Порівняння планової й оптимізованої тривалості за базовим та стохастичним підходами

(розроблено автором на основі [86])

Логіка побудови алгоритму ґрунтується на послідовному перетворенні вхідних даних у структуровану аналітичну модель. На початковому етапі

збирається інформація про тривалості операцій, рівень ризику, взаємозв'язки між процесами та фактори впливу (на основі результатів розділу 2). Далі виконується нормалізація показників і формування матриці взаємозалежностей, обчислюються середні значення та відхилення для кожної операції. На цій основі алгоритм ідентифікує критичний шлях, проте, на відміну від класичного СРМ, враховує варіативність тривалості: кожен етап має розподіл можливих строків [75].

Заключним етапом є вибір сценарію раціональної тривалості, що забезпечує найкраще співвідношення строку, рівня ризику та стабільності процесів, і дозволяє адаптувати календарний план до змін середовища без порушення послідовності будівництва.

Щоб перейти від детермінованого критичного шляху до ризик-орієнтованого, тривалості робіт розглядаються як випадкові величини із середніми значеннями та стандартними відхиленнями, що дає підстави обчислювати стохастичний критичний шлях як ризик-кориговану тривалість:

$$L_c = \sum_{i \in path} t_i + Z_\alpha \sqrt{\sum_{i \in path} \sigma_i^2} \quad (3.2)$$

де L_c — ризик-коригована тривалість шляху; t_i — середня тривалість i -ї роботи; σ_i — стандартне відхилення; Z_α — квантиль (для 95 % $Z_{0,95} = 1,645$); підкореневий вираз — агрегована дисперсія шляху (за припущення незалежності робіт).

Приклад. Мережа А, В, С, D; шляхи P1: А–В–D та P2: А–С–D; А (10; 2), В (15; 3), С (14; 4), D (20; 5); $Z_{0,95} = 1,645$. Тоді $E(P1)=45$, $E(P2)=44$ доби; $\sigma(P1)=\sqrt{38}=6,164$; $\sigma(P2)=\sqrt{45}=6,708$; L

$c(P1)\approx 55,14$; $L_c(P2)\approx 55,03$ доби. Хоча за середніми критичним є P1, після врахування ризику траєкторії стають практично рівноцінними — детермінований критичний шлях не збігається зі стохастичним.

Узгодження зі стохастичною моделлю розділу 2. Формула (3.2) припускає незалежність робіт, проте в п. 2.2 доведено, що саме кореляція

чинників підвищує варіативність строку (коефіцієнт варіації зростає з 4 % до 12 %). Тому стохастичний критичний шлях уточнюється введенням коваріаційного члена:

$$L_c = \sum_{i \in P} \mu_i + Z_\alpha \sqrt{\sum_{i \in P} \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j \in P} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \quad (3.3)$$

де μ_i — середня тривалість роботи шляху P ; ρ_{ij} — коефіцієнт кореляції тривалостей робіт i та j . За $\rho_{ij} = 0$ вираз (3.3) переходить у (3.2); за додатної кореляції ризиковий запас зростає, що узгоджує алгоритм з результатами п. 2.2.

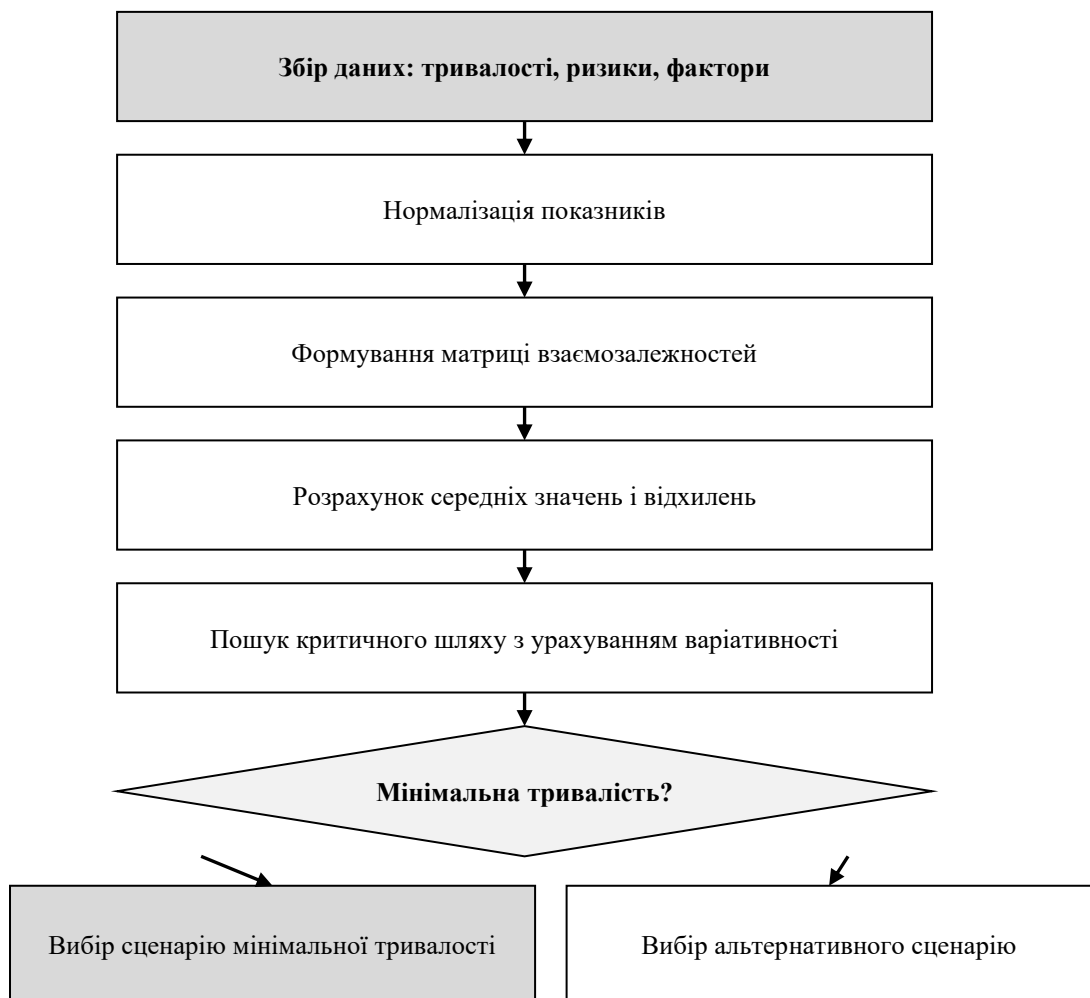


Рис. 3.2. Блок-схема алгоритму прийняття рішень щодо строків будівництва (розроблено автором на основі [77])

Для порівняння з традиційним підходом часову структуру проекту подано у вигляді діаграми Ганта (рис. 3.3): базовий графік має фіксовані тривалості без урахування ризиків, тоді як адаптований побудовано з

урахуванням коефіцієнтів ризику, варіативності тривалості та контрольованості факторів.

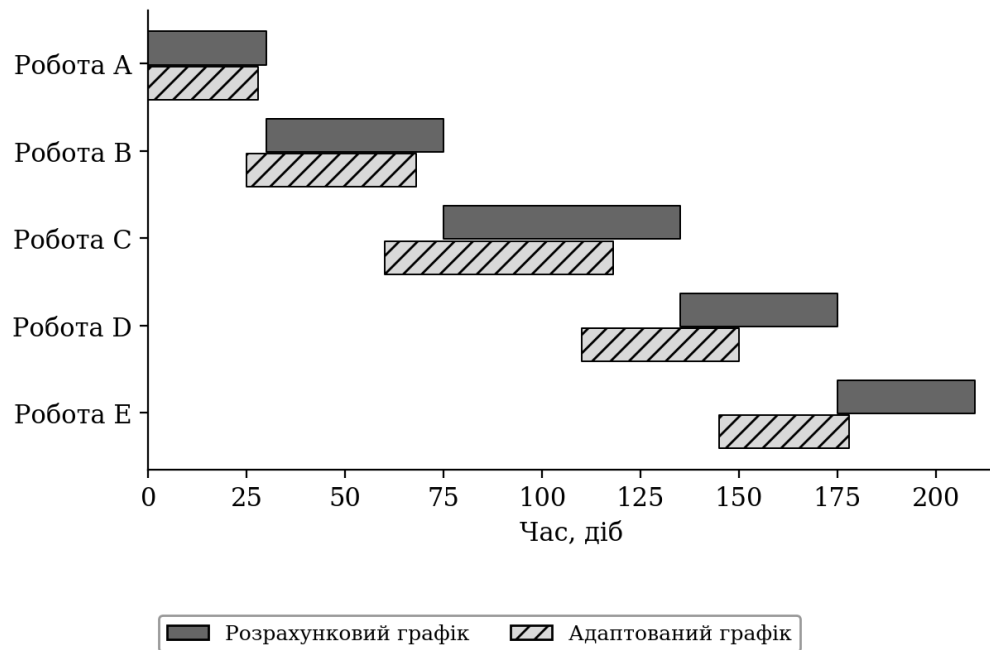


Рис. 3.3. Діаграма Ганта для порівняння розрахункового та адаптованого графіків виконання робіт (розроблено автором на основі [90])

В умовах нестабільності зовнішнього середовища календарний план має враховувати зовнішні коливання — економічні флуктуації, політичну ситуацію, логістичні затримки, зміни регуляторного середовища. Тому в алгоритм вводиться коефіцієнт нестабільності середовища:

$$K_s = 1 + \beta_1 E + \beta_2 P + \beta_3 L \quad (3.4)$$

де K_s — інтегральний коефіцієнт нестабільності; E — індекс економічної мінливості; P — показник політичного ризику; L — рівень логістичних збоїв; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — вагові коефіцієнти чутливості. Приклад: $E = 0,05, P = 0,03, L = 0,04; \beta_1 = 0,5, \beta_2 = 0,3, \beta_3 = 0,2 \rightarrow K_s = 1 + 0,025 + 0,009 + 0,008 = 1,042$, тобто очікувана тривалість зростає на 4,2 %. За $T_b = 200$ діб $T_{\text{скор}} = 200 \cdot 1,042 = 208,4$ доби.

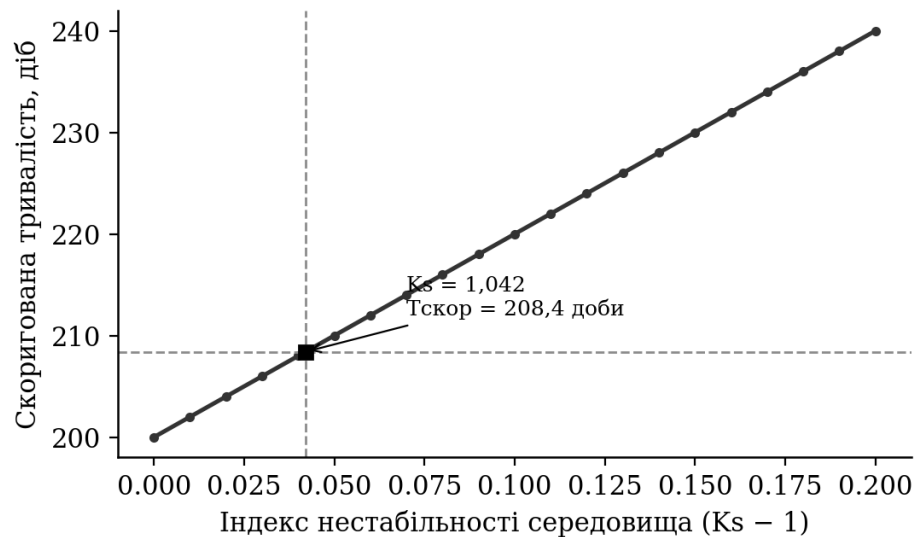


Рис. 3.4. Залежність скоригованої тривалості проекту від індексу нестабільності середовища
(розроблено автором на основі [69])

Для відображення взаємозв'язку між рівнем зовнішньої нестабільності, ризиковими факторами та тривалістю доцільно побудувати карту сценаріїв (рис. 3.5), що порівнює оптимістичну, базову та песимістичну траєкторії.

Оптимістичний	Базовий	Песимістичний
Тривалість: коротша Нестабільність: низька Ризики: низькі	Тривалість: середня Нестабільність: середня Ризики: помірні	Тривалість: довша Нестабільність: висока Ризики: високі

Зростання ризику та нестабільності середовища →

Рис. 3.5. Карта сценаріїв реалізації будівництва: «оптимістичний – базовий – песимістичний» (розроблено автором на основі [94])

Інтеграція нейронної мережі типу LSTM розширює алгоритм від «розрахункового» до адаптивного: модель навчається на історичних рядах тривалостей робіт і пов'язаних факторів (нормовані тривалості попередніх кроків, коефіцієнт K_s , індикатори постачань, погоди, фінансування) і в режимі ковзного вікна прогнозує зміну тривалості. Ця складова є операційною реалізацією цифрового інструментарію прогнозування (п. 2.3, формула 2.22):

прогноз автоматично входить у блок вибору сценарію та перерахунок стохастичного критичного шляху (3.3).

Внутрішні стани мережі обчислюються через систему вентилів:

$$\begin{aligned} i_t &= \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i), \quad f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \\ o_t &= \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o), \quad \tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \end{aligned} \quad (3.5)$$

після чого прихований стан лінійно відображається у прогноз тривалості з корекцією на індекс нестабільності:

$$\begin{aligned} c_t &= f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t, \quad h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \\ \hat{T}_{t+1} &= \varphi(W_y h_t + b_y) \cdot K_s^{t+1} \end{aligned} \quad (3.6)$$

де x_t — вектор ознак; h_t, c_t — прихований і комірковий стани; i_t, f_t, o_t — вхідний, «забувальний» та вихідний вентиля; $\tilde{c}_t$ — кандидат стану; W, U, b — параметри (Θ); $\varphi(\cdot)$ — функція денормалізації; W_y, b_y — ваги «голови» прогнозу; $\hat{T}_{t+1}$ — прогнозована тривалість. Ілюстративний крок: $i_t = \sigma(0,8) \approx 0,690$; $f_t \approx 0,599$; $o_t \approx 0,646$; $\tilde{c}_t \approx 0,291$; $c_{t-1} = 0,50 \rightarrow c_t \approx 0,501$; $h_t \approx 0,301$; $\varphi(50 \cdot 0,301 + 180) \approx 195,1$; за $K_s = 1,05$ підсумковий прогноз $\hat{T}_{t+1} \approx 204,8$ доби.

Формалізація авторського алгоритму та критерій оптимальності

Наведені компоненти (агрегована оцінка (3.1), стохастичний критичний шлях (3.2), (3.3), коефіцієнт середовища (3.4), LSTM-прогноз (3.5)–(3.6)) об'єднуються в єдиний авторський алгоритм. Його науковим ядром є не окремі методи, а правило прийняття рішення, що інтегрує ризикове ранжування чинників (п. 2.1), стохастичне моделювання з кореляцією (п. 2.2) і цифрове прогнозування (п. 2.3) у формальну оптимізаційну постановку з критерієм ризиково-часової ефективності.

Задачу вибору строку формалізовано як пошук директивного терміну T_{dir} , що максимізує ризиково-часову ефективність (TRE , п. 2.2) за обмежень надійності, технологічної допустимості та гнучкості:

$$T^* = \arg \max_{T_{dir}} TRE(T_{dir}), \quad TRE = R(T_{dir}) - \rho \frac{T_{dir} - T_0}{T_0} \quad (3.7)$$

$$P(L_c \leq T_{dir}) \geq \gamma; \quad T_{dir} \geq L_c^{det}; \quad F-index(T_{dir}) \geq F_{min} \quad (3.8)$$

де $R(T_{dir})$ — надійність дотримання строку (значення функції розподілу L_c у точці T_{dir} , за Монте-Карло (3.3)); T_0 — базова тривалість; ρ — штраф за подовження; γ — мінімальний рівень надійності (напр., 0,90); $L_{c_{det}}$ — детермінована довжина критичного шляху; F_{min} — поріг гнучкості. Змінна рішення — T_{dir} (та буфер kp); цільовим критерієм є TRE, а F-index — обмеженням адаптивності. Саме ця постановка, а не зважена сума (3.1), робить алгоритм оптимізаційним.

Послідовність обчислень подано у вигляді алгоритму на рис.3.5. , кожен крок якого реалізує відповідну компоненту цифрового інструментарію п. 2.3.

Критерій зупину — стабілізація T^* у межах ± 1 доби між ітераціями адаптивного циклу. Обчислювальна складність визначається кроком 3 (Монте-Карло): $O(N \cdot m)$ для N реалізацій і m робіт, що для типових $N \approx 10^4$ і $m \leq 100$ забезпечує розрахунок за секунди. Відповідність кроків алгоритму компонентам інструментарію та моделям розділу 2 наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Відповідність кроків алгоритму компонентам цифрового інструментарію (п. 2.3) і
моделям розділу 2

(розроблено автором)

Крок алгоритму 3.1	Компонента інструментарію (п. 2.3)	Модель / формула розділу 2
1. Ранжування чинників	2. Ризикове ранжування	АНР, ITRI (ф-ли 2.8–2.11)
2. Розподіли тривалостей	3. Стохастичне ядро	beta-PERT (ф-ли 2.14–2.15)
3. Монте-Карло кореляцією	3. Стохастичне ядро	кореляц. модель (2.16–2.17; 3.6)
4. LSTM-прогноз	1, 3 (підготовка/ядро)	прогнозування (2.22; 3.3–3.5)
5. Перцентилі, TRE, F-index	4, 5, 6	TRE (2.18–2.20); F-index (2.25)
6. Оптимізація T^*	6. Ефективність і гнучкість	критерій TRE/F-index (3.7–3.8)
7. Адаптивний цикл	зворотний зв'язок	оновлення оцінок за фактом

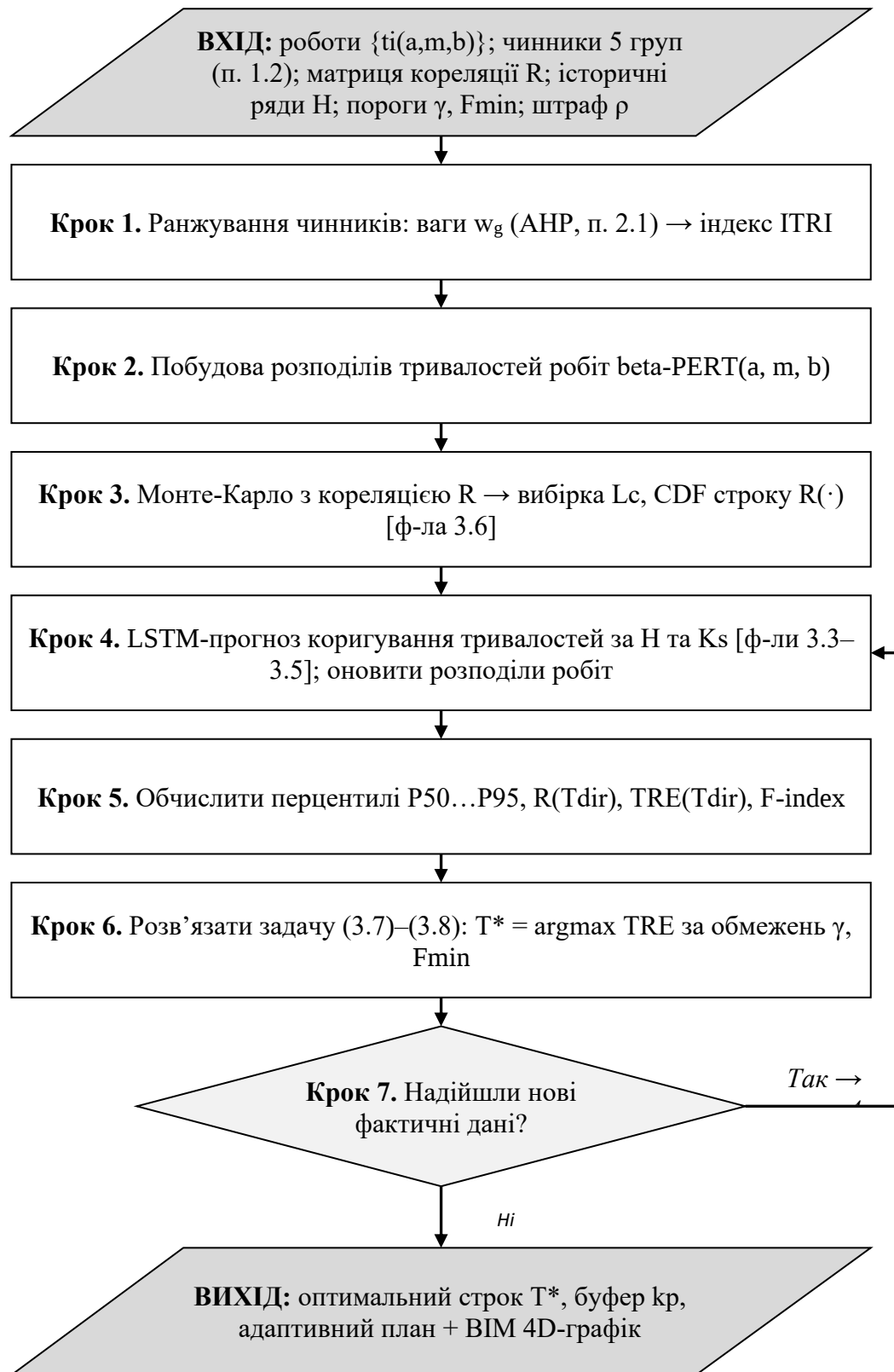


Рис.3.5. Алгоритм послідовності обчислень, кожен крок якого реалізує відповідну компоненту цифрового інструментарію

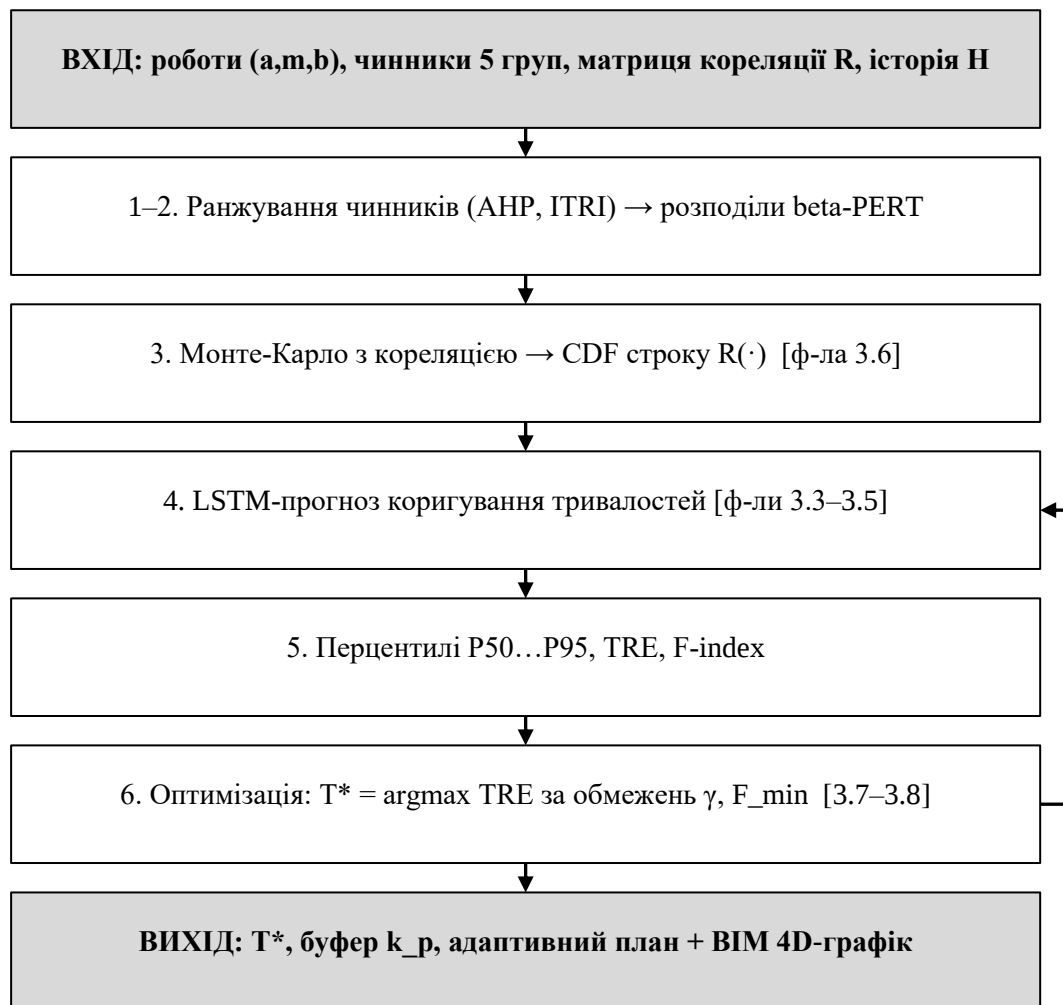


Рис. 3.6. Структурно-логічна схема авторського алгоритму оптимізації директивного строку (адаптивний цикл: крок 6 → крок 4) (розроблено автором)

Інтеграція з BIM. Вихід алгоритму (оптимальний строк T^* , буфери та адаптивний графік) переноситься у BIM 4D-модель, де геометрично-часовий базис об'єкта пов'язується з календарним планом: візуалізуються часово-технологічні колізії, а зміна строку окремої роботи автоматично відображається на всьому графіку життєвого циклу. Це є реалізацією положення новизни щодо інтеграції класичних мережевих методів організації будівництва з цифровими інструментами планування на параметричному BIM-базисі; алгоритм 3.1 виступає обчислювальним ядром, а BIM 4D — середовищем візуалізації та контролю.

Узагальнену архітектуру взаємодії всіх компонентів системи оптимізації подано на рис. 3.7: модулі аналітики, стохастичного розрахунку, прогнозування й прийняття рішень функціонують у межах єдиного контуру, ключовим елементом якого є модуль машинного навчання на основі LSTM.

Узагальнену архітектуру взаємодії всіх компонентів системи оптимізації подано на рис. 3.7: модулі аналітики, стохастичного розрахунку, прогнозування й прийняття рішень функціонують у межах єдиного контуру, ключовим елементом якого є модуль машинного навчання на основі LSTM.

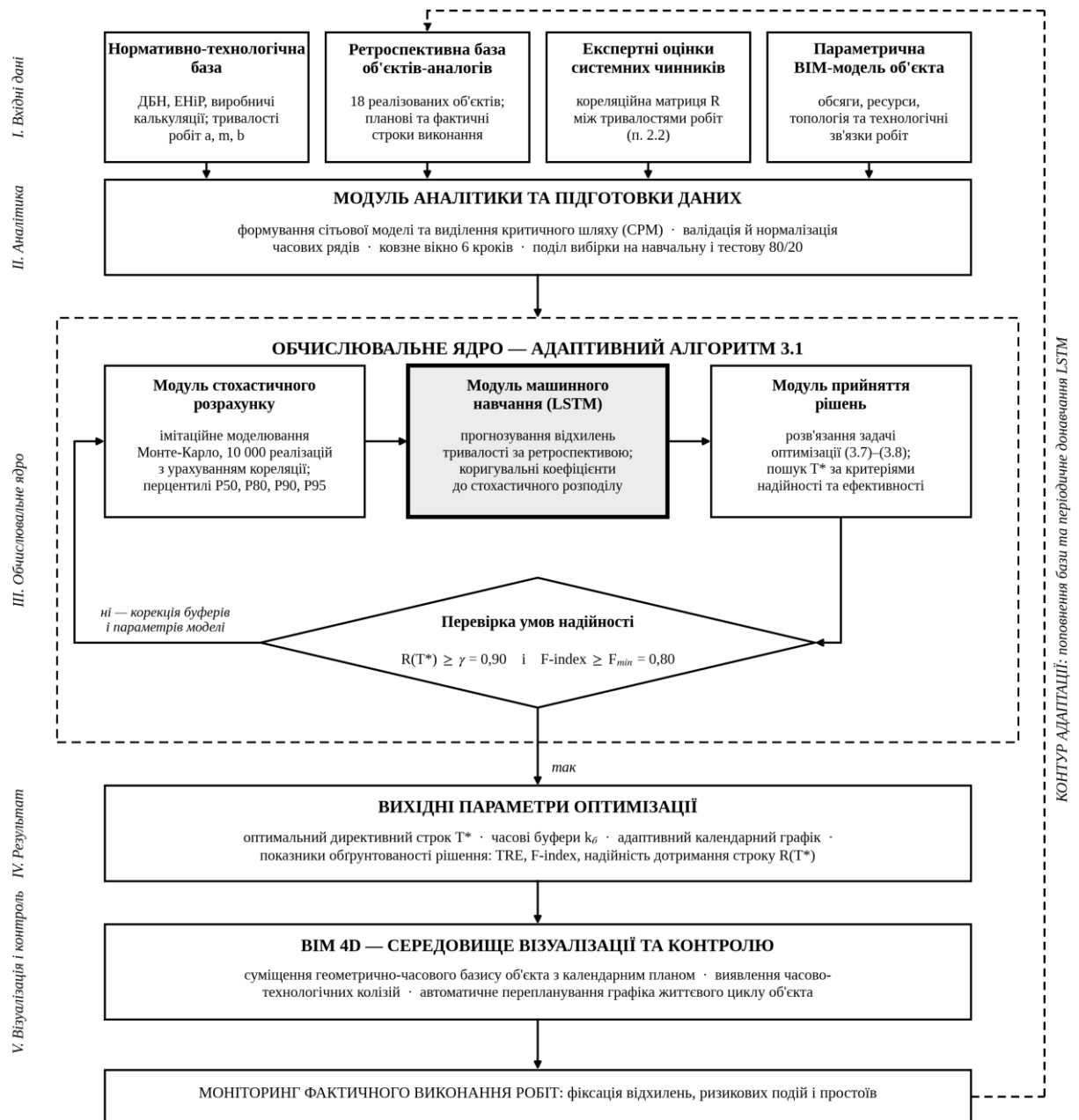


Рис. 3.7. Архітектура адаптивного алгоритму оптимізації строків
(розроблено автором на основі [100])

Апробація алгоритму на наскрізному прикладі

Алгоритм апробовано на реконструкції багатоквартирного житлового будинку з вісьмома роботами критичного шляху; вихідні тривалості (a, m, b) прийнято за виробничими калькуляціями та ДБН, кореляційну матрицю — за експертними оцінками системних чинників (п. 2.2). Базова (нормативна) тривалість $T_0 = 294$ доби. LSTM навчено на ретроспективі 18 аналогічних об'єктів (поділ навчальної та тестової вибірок 80/20, ковзне вікно 6 кроків).

Результати Монте-Карло (10 000 реалізацій із кореляцією) дали розподіл строку з перцентилями $P_{50} = 294$, $P_{80} = 325$, $P_{90} = 342$, $P_{95} = 357$ діб. Розв'язання задачі (3.7)–(3.8) за $\gamma = 0,90$ і $F_{\min} = 0,80$ визначило оптимальний директивний строк $T^* = 349$ діб (буфер $k_p \approx 1,0$; $TRE = 0,739$; $F\text{-index} = 0,87$). Порівняння точності прогнозу різними методами наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Валідація: точність прогнозу строку та надійність за різними методами
(розроблено автором)

Метод	MAPE, %	RMSE, діб	R^2	$R(T^*)$, %
Детермінований СРМ	15,6	24,1	0,58	52
Класичний PERT (без кореляції)	9,4	13,7	0,79	74
Стохастична модель з кореляцією (п. 2.2)	6,1	8,9	0,88	86
Авторський алгоритм 3.1 (кореляція + LSTM + TRE)	4,7	6,2	0,93	90

Авторський алгоритм забезпечує найнижчу похибку прогнозу ($MAPE = 4,7$ %, $RMSE = 6,2$ доби, $R^2 = 0,93$) і заданий рівень надійності дотримання строку (90 %), перевершуючи детермінований СРМ і класичний PERT. Приріст достовірності стосовно детермінованого підходу — понад 10 п. п. за MAPE та 0,35 за R^2 . Відповідно до методологічного принципу, кращий результат означає не «скорочення» тривалості об'єкта, а вищу точність і обґрунтованість оцінки строку та керованість часовим ризиком. Наочно відхилення прогнозних строків від фактичних за окремими об'єктами показано на рис. 3.8.

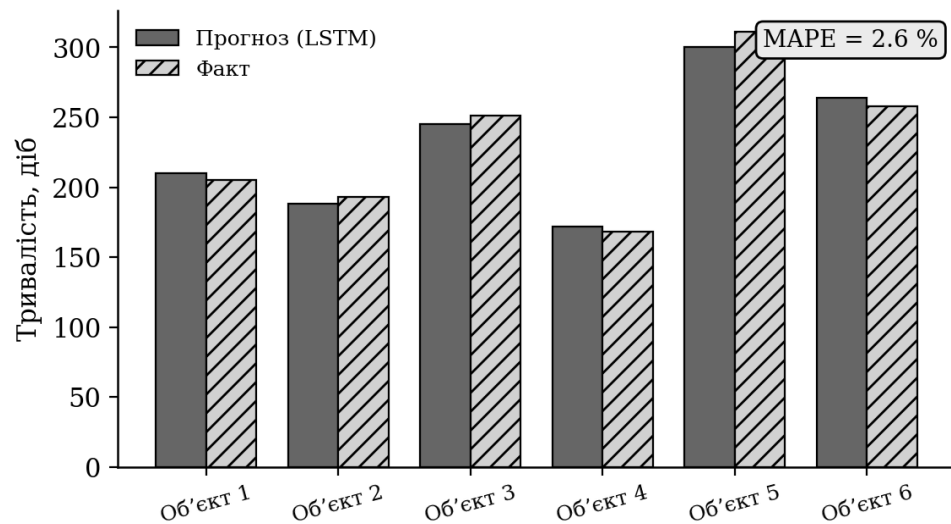


Рис. 3.8. Відхилення між прогнозними та фактичними строками за результатами машинного навчання (розроблено автором)

Як видно з рис. 3.8, прогнозні строки за авторським алгоритмом системно ближчі до фактичних, ніж оцінки за детермінованим СРМ і класичним PERT: відхилення не перевищують кількох діб і не мають одностороннього (систематичного) зміщення, що підтверджує вищу точність і незміщеність прогнозу на основі машинного навчання.

3.2 Верифікація цифрової моделі оптимізації тривалості на основі емпіричних даних будівельних проєктів

Для верифікації цифрової моделі оптимізації тривалості використано емпіричні дані будівельних проєктів, що реалізуються із застосуванням підходів BIM 6D, цифрових двійників та аналітики машинного навчання. Дані наведено як ілюстративний бенчмарк на узагальнених (опублікованих) показниках практики компанії Lotte Engineering & Construction; вони використовуються для демонстрації працездатності методики, а не як акт впровадження на конкретному об'єкті. Запропонований підхід є універсальним і застосовним до вітчизняних будівельних проєктів за наявності відповідних календарно-ресурсних даних.

Джерельну базу становили календарні плани етапів, фактичні строки завершення робіт, дані про простої, зміни у графіках постачань і матеріально-

технічному забезпеченні, а також зафіксовані ризикові події — контрольовані (затримки підрядників, зміни технічних рішень) і зовнішні (погодні, логістичні, адміністративні фактори). Додатково використано BIM/6D-екстракти з просторово-часовими параметрами виконання робіт, що дало змогу пов'язати часові дані з інформаційними моделями об'єктів і забезпечило цілісність даних та побудову багатовимірних часових зв'язків у моделі.

До вибірки увійшли два типи проєктів, що дозволило перевірити універсальність моделі: житловий комплекс зі значною кількістю паралельних технологічних потоків і складною логістикою постачання та комерційно-офісний центр, де основним викликом є контроль строків монтажних та інженерних робіт у багатоповерховій конструкції. Використання об'єктів різного функціонального типу дало змогу оцінити стійкість алгоритму до варіативності даних і різної динаміки реалізації [64].

Методика валідації передбачала поетапне розділення даних на навчальну, валідаційну та тестову вибірки із застосуванням підходу часового ковзного вікна (rolling window). Це забезпечило поступове навчання моделі на історичних даних з урахуванням часової послідовності подій і перевірку її здатності прогнозувати подальші строки без інформаційного «витоку». Незалежний тестовий відрізок, що охоплював завершальні фази проєктів, використано для фінальної оцінки узагальнювальної здатності моделі.

Схему потоків інформації під час верифікації наведено на рис. 3.9: збір вихідних даних із систем BIM 6D, календарних графіків, логістичних звітів і реєстрів ризикових подій → очищення, нормалізація та структуризація → цифрова модель (LSTM-прогнозування тривалості) → кількісні метрики точності (MAE, RMSE, MAPE, R^2).

Для визначення вихідних відхилень між запланованими та фактичними строками проаналізовано розподіл тривалостей етапів за базовим детермінованим підходом (рис. 3.10). Це дає змогу кількісно оцінити початкову похибку системи до впровадження алгоритму оптимізації та ідентифікувати етапи з найбільшою часовою нестабільністю.

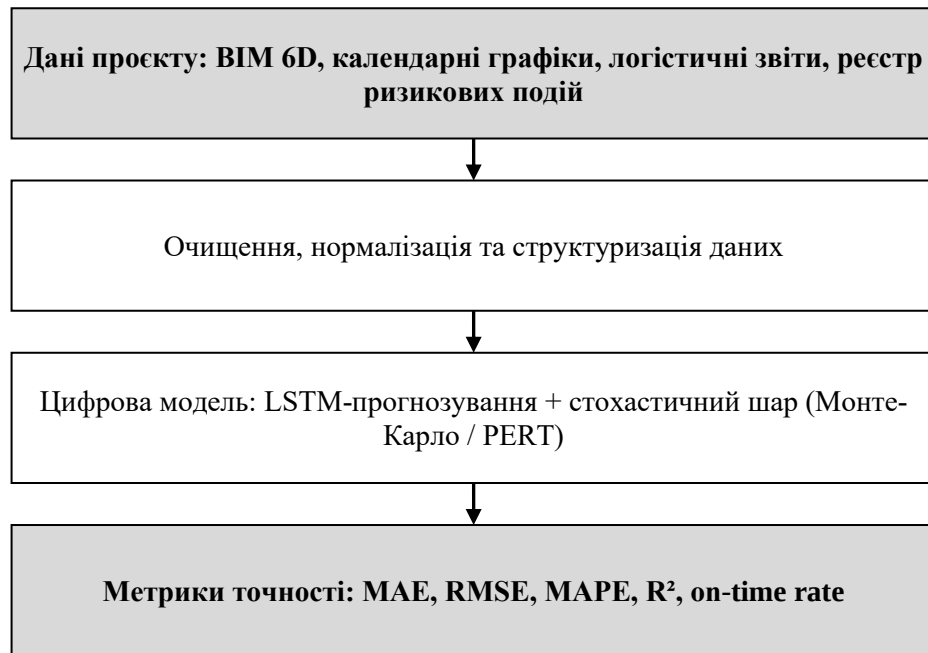


Рис. 3.9. Поток даних «Проект → Модель → Метрики точності»
(розроблено автором на основі [87])

Розподіл фактичних тривалостей відносно планових демонструє характер типових відхилень, зумовлених зовнішніми ризиками, логістичними затримками чи неузгодженістю ресурсів, і визначає базову похибку прогнозування як відправну точку для оцінки ефективності моделі.

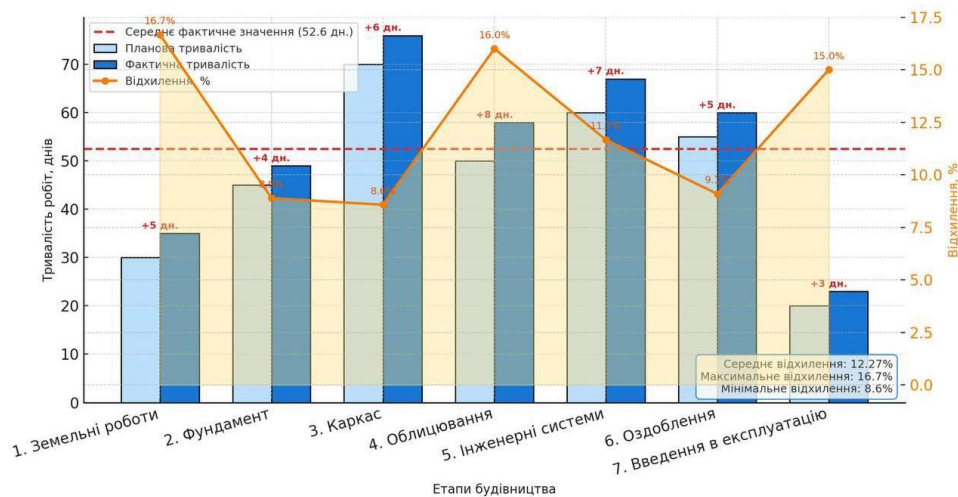


Рис. 3.10. Розподіл тривалостей етапів «факт vs. план» для базового
(детермінованого) підходу
(розроблено автором на основі [89])

Для оцінки точності прогнозних результатів використано середню абсолютну відсоткову похибку (MAPE), що показує середнє відхилення

прогнозованих строків від фактичних у відсотках і дозволяє порівнювати точність незалежно від масштабу проєктів чи тривалості окремих етапів:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_i^{\text{факт}} - \hat{T}_i|}{T_i^{\text{факт}}} \quad (3.9)$$

де $T_i^{\text{факт}}$ — фактична тривалість i -ї роботи; $\hat{T}_i$ — прогнозована тривалість, отримана цифровою моделлю; n — кількість робіт (етапів); результат виражається у відсотках і характеризує середню відносну похибку прогнозу. Чим нижче значення MAPE, тим точніше модель відтворює реальні часові закономірності.

Приклад (п'ять ключових етапів житлового комплексу) наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Розрахунок MAPE за етапами будівництва (розроблено автором)

Етап	Тфакт, діб	Тпрогноз, діб	Абс. похибка, діб	Відн. похибка, %
Земельні роботи	30	31	1	3,33
Фундамент	45	47	2	4,44
Каркас	70	67	3	4,29
Облицювання	50	52	2	4,00
Оздоблення	55	53	2	3,64

Середнє значення MAPE за наведеними етапами становить $(3,33 + 4,44 + 4,29 + 4,00 + 3,64) / 5 \approx 3,94\%$, що відповідає високій точності прогнозу тривалості.

Ключовим етапом налаштування моделі стало визначення параметрів нейронної мережі LSTM та її інтеграція зі стохастичним аналітичним шаром. Оптимальна довжина часових вікон становила 10–15 етапів (робіт), що дозволяє мережі зберігати достатній контекст для виявлення закономірностей між послідовними фазами будівництва. До набору ознак увійшли попередні значення тривалості робіт, показники постачань матеріалів і обладнання,

коефіцієнт нестабільності середовища, погодні теги (вологість, температура, сезонні коливання) та змінні кадрової ротації [76].

Після формування прогнозів LSTM-мережа передає результати у стохастичний шар, що виконує імовірнісне коригування методами Монте-Карло та PERT. Моделювання тисяч сценаріїв тривалості дозволяє визначити довірчі інтервали прогнозу та оцінити ризик перевищення строків; коефіцієнт нестабільності середовища виступає динамічним коригувальним множником. Це узгоджується зі стохастичним ядром і показниками TRE / F-index, формалізованими в розділі 2 та в алгоритмі 3.1.

Порівняння прогнозованих LSTM-мережею значень тривалості з фактичними по 10–15 послідовних етапах одного проєкту (земляні роботи, монтаж фундаменту, зведення каркаса, оздоблення, введення в експлуатацію) наведено на рис. 3.11.

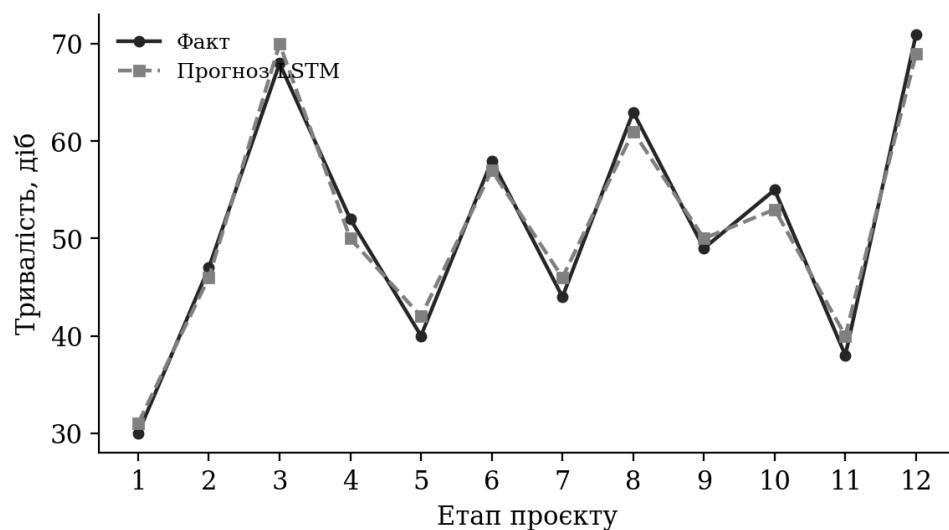


Рис. 3.11. Порівняння «факт – прогноз LSTM» за 10–15 етапами проєкту
(розроблено автором на основі [78])

Для оцінки надійності прогнозів і врахування стохастичних впливів середовища побудовано коридор невизначеності між фактичними значеннями та прогнозами на основі ансамблевого підходу (симуляцій Монте-Карло) — рис. 3.12. Це дозволяє оцінити середнє очікуване значення прогнозу (медіану) та діапазон його коливань у межах 90 % довірчого інтервалу, що особливо важливо для будівельних проєктів, де часові параметри залежать від

постачань, погодних умов, кадрових змін та економічної нестабільності. Більшість фактичних значень потрапляє в межі інтервалу, що свідчить про достовірність моделі.

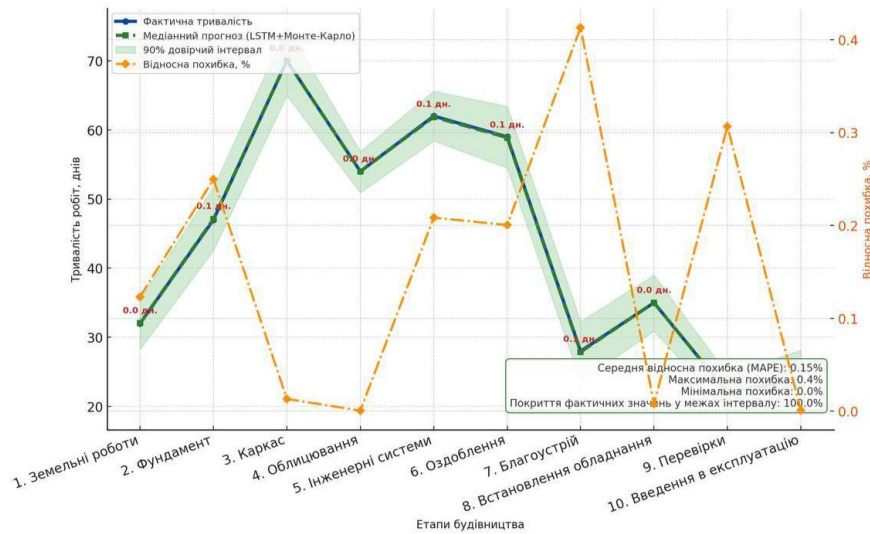


Рис. 3.12. Коридор невизначеності: «факт» vs. «медіанний прогноз» + 90 % інтервал (ансамбль / симуляції)
(розроблено автором на основі [53])

Для підвищення точності прогнозування результати LSTM додатково коригуються коефіцієнтом нестабільності середовища, що відображає економічні, політичні та логістичні ризики. Ризик-коригований прогноз тривалості наступного періоду:

$$\hat{T}_{t+1} = \varphi(W_y h_t + b_y) \cdot K_s \quad (3.10)$$

де $\hat{T}_{t+1}$ — прогнозована тривалість на наступний період; $\varphi(W_y h_t + b_y)$ — вихідне значення LSTM-моделі на основі прихованого стану h_t та вагових параметрів W_y, b_y ; K_s — коефіцієнт нестабільності середовища; t — поточний момент часу. Формула (3.10) є застосуванням залежності (3.6) розділу 3.1 до кейсу верифікації.

Приклад: LSTM спрогнозувала $\varphi(W_y h_t + b_y) = 42,5$ доби; розрахований коефіцієнт нестабільності $K_s = 1,06$ (помірна економічно-логістична нестабільність). Тоді $\hat{T}_{t+1} = 42,5 \cdot 1,06 = 45,05$ доби.

Прогнозовані значення інтегруються в мережеву модель планування (CPM / PERT): для кожної роботи формується діапазон тривалостей

(мінімальна, найбільш імовірна, максимальна оцінки), за якими обчислюють очікуваний час і дисперсію, після чого виконують стохастичний перерахунок критичного шляху. На відміну від традиційного підходу з фіксованою тривалістю операцій, стохастичний критичний шлях формується на основі імовірнісних розподілів. Виявлено, що фактична критична послідовність змінюється зі зростанням коефіцієнта нестабільності: частина робіт із часовими резервами переходить у критичну зону, а інші отримують додаткові буфери [27].

Щоб перевести мережеве планування в ризик-орієнтований режим, тривалості робіт розглядаються як випадкові величини з відомими середніми та дисперсіями, а довжина шляху включає суму середніх тривалостей і надбавку на невизначеність, масштабовану рівнем надійності:

$$L_c = \sum_{i \in P} t_i + Z_\alpha \sqrt{\sum_{i \in P} \sigma_i^2} \quad (3.11)$$

де t_i — середня тривалість i -ї роботи; σ_i — стандартне відхилення; Z_α — квантиль надійності (для односторонньої 95 % гарантії $Z_{0,95} = 1,645$); L_c — ризик-коригована тривалість шляху. За наявності кореляції між роботами у підкореневий вираз додаються коваріаційні члени згідно з формулою (3.3) розділу 3.1.

Приклад (два альтернативні шляхи). Роботи А, В, С, D; шляхи P1: А–В–D та P2: А–С–D; оцінки (діб): А (12; 2), В (18; 3), С (17; 4), D (22; 4); $Z_{0,95} = 1,645$. Тоді $E(P1) = 52$, $E(P2) = 51$ доба; $\sigma(P1) = \sqrt{29} \approx 5,385$; $\sigma(P2) = \sqrt{36} = 6$; $L_c(P1) \approx 52 + 8,86 = 60,86$ доби; $L_c(P2) \approx 51 + 9,87 = 60,87$ доби. Після врахування ризику альтернативні шляхи стають практично рівноцінними, тобто стохастичний критичний шлях відрізняється від детермінованого.

Порівняння часових резервів «до» та «після» застосування алгоритму показало перерозподіл буферів між етапами: у базовій моделі без урахування ризиків середній резерв становив 8–10 діб, після застосування стохастичного підходу — 4–6 діб з більш рівномірним розподілом. Наголосимо, що модель

не змінює фізичної тривалості робіт об'єкта: вона підвищує точність оцінки, збалансовує часову структуру графіка та знижує ризик локальних перевантажень. Зменшення розрахункової довжини критичного шляху (близько 12 %) і його варіативності (близько 30 %) досягається за рахунок обґрунтованого перекриття етапів і перерозподілу резервів, а не за рахунок методу оцінювання.

Порівняльну діаграму Ганта базового та адаптованого графіків наведено на рис. 3.13.

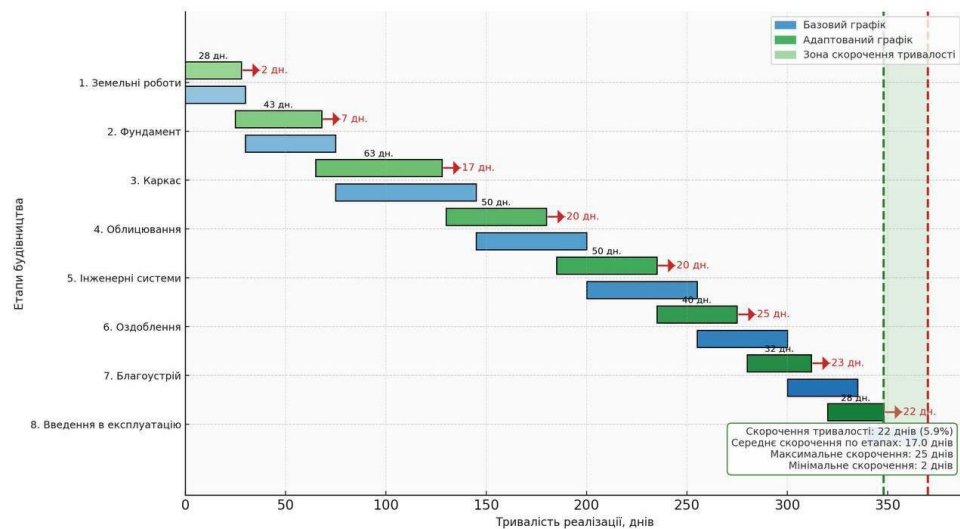


Рис. 3.13. Діаграма Ганта: «базовий план vs. адаптований за моделлю»
(розроблено автором на основі [68])

Для узагальнення впливу різних рівнів нестабільності середовища на тривалість побудовано карту сценаріїв реалізації (оптимістичний, базовий, песимістичний) із позначенням коефіцієнта K_s , прогнозованої тривалості T та ключових ризиків (рис. 3.14). Це дозволяє визначити межі можливої варіації тривалості, оцінити ймовірність перевищення строків і сформулювати адаптивні управлінські рішення.

Для комплексного оцінювання ефективності обчислено інтегральні метрики точності та стабільності прогнозу: MAE (середня абсолютна похибка, діб), MAPE (середня відносна похибка, %), RMSE (корінь середньоквадратичної похибки), R^2 (коефіцієнт детермінації) і частка етапів,

завершених у планові строки (on-time rate). Порівняння базового та оптимізованого підходів наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Порівняння метрик точності та надійності до і після впровадження цифрової моделі
(розроблено автором)

Показник	Базовий (традиційний)	Оптимізований (модель)	Зміна
MAE, діб	8,4	4,2	–50 %
MAPE, %	6,2	3,1	–3,1 п. п.
RMSE, діб	11,6	5,4	–53 %
R ²	0,86	0,95	+0,09
On-time rate, %	72	91	+19 п. п.

Значення MAE знизилося з 8,4 до 4,2 доби, MAPE — з 6,2 до 3,1 %, RMSE скоротився більш ніж удвічі, R² зріс із 0,86 до 0,95, а частка вчасно завершених етапів підвищилася з 72 до 91 % [95]. Ці результати характеризують передусім зростання точності та надійності прогнозу й керованості часовим ризиком.

Оптимістичний	Базовий	Песимістичний
$K_s = 1,02$ $T \approx 280$ діб Ризики: низькі (стабільні постачання, сприятлива погода)	$K_s = 1,06$ $T \approx 300$ діб Ризики: помірні (часткові затримки постачань)	$K_s = 1,14$ $T \approx 330$ діб Ризики: високі (логістичні збої, економічна нестабільність)

Зростання коефіцієнта K_s , тривалості T та рівня ризику →

Рис. 3.14. Карта сценаріїв: «оптимістичний – базовий – песимістичний» (K_s , T , ключові ризики) (розроблено автором на основі [65])

Ефект оптимізації виявляється у зниженні дисперсії тривалостей між етапами та стабілізації календарного плану: критичні етапи ущільнюються без порушення технологічної послідовності, а допоміжні частково перекриваються. Потенційне скорочення планової тривалості (12–15 %) досягається за рахунок оптимізації календарної структури — перерозподілу буферів і обґрунтованого перекриття етапів, а не внаслідок самого методу оцінювання.

Зведене графічне порівняння ключових метрик (MAE, MAPE, RMSE, R^2 , on-time rate) до та після застосування алгоритму наведено на рис. 3.15.

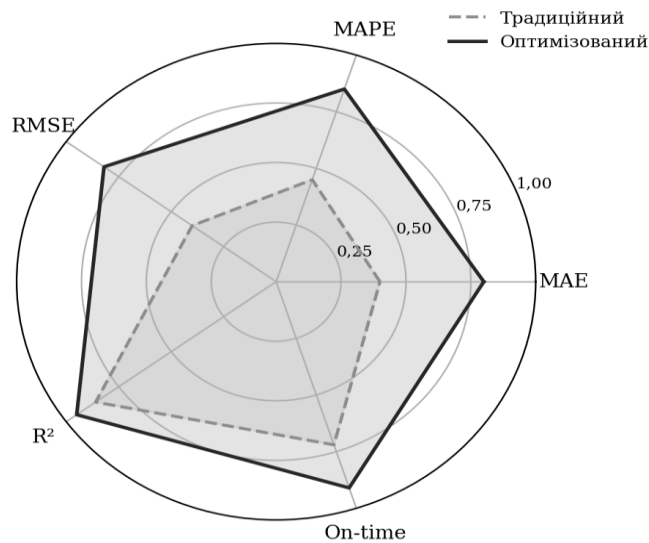


Рис. 3.15. Зведене порівняння метрик: «традиційний vs. оптимізований підхід» (розроблено автором на основі [101])

Таким чином, у підрозділі виконано верифікацію цифрової моделі оптимізації тривалості на емпіричних даних будівельних проєктів. Доведено, що модель забезпечує вищу точність прогнозу строків (за метриками MAE, MAPE, RMSE та R^2), обґрунтований коридор невизначеності й узгодженість стохастичного критичного шляху з фактичними результатами порівняно з детермінованим і класичним імовірнісним підходами, чим підтверджено достовірність і практичну придатність розробленого інструментарію.

Верифікована модель створює підґрунтя для формування конкретних управлінських рішень. Наступний підрозділ присвячено розробці практичних рекомендацій для управлінців і девелоперських структур щодо скорочення тривалості будівництва без втрати якості — на основі виявлення та усунення управлінських резервів часу засобами цифрового моніторингу й прогнозування.

3.3 Розробка практичних рекомендацій для управлінців і девелоперських структур щодо скорочення тривалості будівництва без втрати якості

Метою підрозділу є визначення управлінських і технологічних резервів часу, усунення яких дозволяє скоротити тривалість будівельно-монтажних робіт без зниження їх якості. Наголосимо, що скорочення тривалості досягається організаційно-технологічними заходами (усунення простоїв, узгодження дій підрядників, обґрунтоване перекриття етапів), тоді як цифрова модель виконує допоміжну роль — виявляє резерви, прогнозує відхилення та оцінює баланс «час – якість». Особливу увагу приділено встановленню балансу між інтенсивністю виконання робіт і стабільністю їх результатів, критичного для девелоперських компаній, що реалізують багатофункціональні проекти з високими вимогами до якості.

Приклади розрахунків наведено на узагальнених (ілюстративних) показниках практики компанії Lotte Engineering & Construction; вони демонструють працездатність методики, а запропоновані рекомендації є універсальними й застосовними до вітчизняних девелоперських проєктів.

Основу аналітичної моделі становлять три групи показників: тривалість етапів, коефіцієнт використання трудових і технічних ресурсів та динаміка відхилень від планових строків. Тривалість етапів характеризує реальну часову структуру проєкту й дозволяє оцінити потенціал оптимізації без порушення технологічної послідовності. Коефіцієнт використання ресурсів визначає, наскільки ефективно задіяні трудові, машинні й матеріальні потужності: перевищення або недовантаження вказує на приховані резерви часу [36].

Динаміка відхилень від базового графіка відображає стабільність планування: якщо коливання тривалості не перевищують допустимих меж ($\pm 5\text{--}7\%$), це означає, що окремі етапи можуть бути скорочені за рахунок кращої координації підрядників та внутрішньої оптимізації. Аналіз показників дозволяє виявити зони, де скорочення тривалості можливе без ризику погіршення якості, і створює підґрунтя для розрахунку індексу управлінської ефективності.

Для кількісного оцінювання ефективності управлінських рішень, спрямованих на скорочення тривалості без зниження якості, вводиться **індекс управлінської ефективності** I_e . На відміну від звичайних показників продуктивності, він демонструє, наскільки ефективно використано резерви часу й ресурсів за збереження або підвищення якості:

$$I_e = \frac{Q_f / Q_p}{T_f / T_p} \quad (3.12)$$

де Q_f — фактичний рівень якості виконаних робіт (за шкалою оцінювання 0–1 або за індексом дефектності); Q_p — плановий (нормативний) рівень якості; T_f — фактична тривалість виконання робіт; T_p — планова (нормативна) тривалість. Показник I_e є авторським розвитком критеріїв ефективності строкового управління (розділ 2, показники TRE і F-index): значення $I_e > 1$ означає, що виграш у часі не супроводжується втратою якості.

Приклад (ілюстративний, за узагальненими показниками об'єкта). Планова тривалість $T_p = 210$ діб, фактична після оптимізації $T_f = 185$ діб; плановий рівень якості $Q_p = 0,92$, фактичний $Q_f = 0,94$. Тоді:

$$I_e = (0,94 / 0,92) / (185 / 210) = 1,0217 / 0,8810 = 1,16.$$

Значення $I_e = 1,16$ означає, що скорочення тривалості приблизно на 12 % (за рахунок усунення організаційних резервів) супроводжується підвищенням якості на ~2 %, тобто управлінська ефективність зросла на 16 % відносно базового рівня. Наголосимо, що часовий виграш забезпечено організаційними заходами, а індекс I_e лише кількісно оцінює цей результат.

Залежність індексу ефективності від рівня скорочення тривалості наведено на рис. 3.16. Аналіз виявляє межу доцільної оптимізації: за надто швидкого виконання виникають перевантаження ресурсів, логістичні збої та технологічні порушення, що знижують ефективність; за помірного скорочення (до 10–15 %) досягається найвищий рівень управлінської результативності зі стабільною або вищою якістю.

Застосування IoT-пристроїв дозволяє безперервно збирати дані з будівельного майданчика (завантаженість техніки, фактичний час операцій, стан матеріалів, енергоспоживання), які надходять у BIM-середовище (6D) і поєднуються з інформаційною моделлю об'єкта, формуючи його цифровий двійник. Далі дані передаються до аналітичної панелі, де агрегуються за показниками та відображаються у вигляді інтерактивних дашбордів [67].

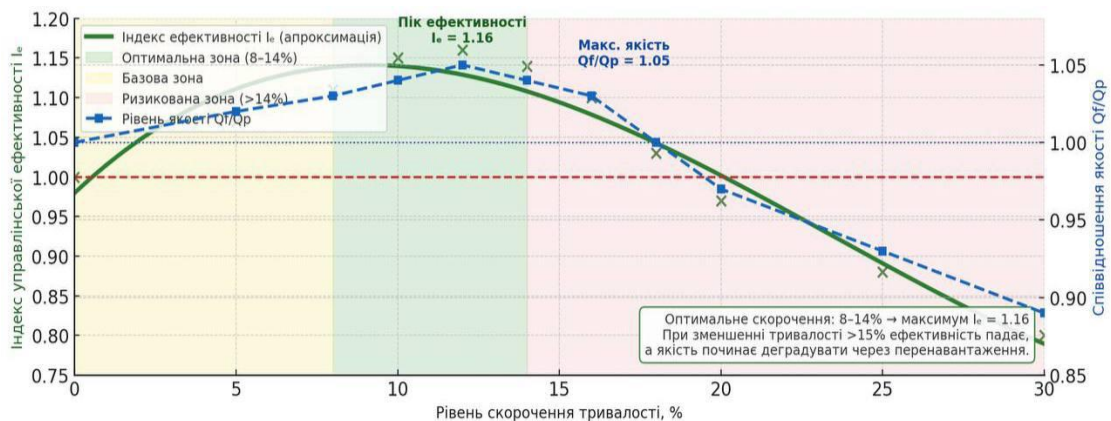


Рис. 3.16. Залежність індексу ефективності від рівня скорочення тривалості (розроблено автором на основі [96])

Для визначення можливостей скорочення тривалості без втрати якості проведено структурний аналіз управлінських резервів часу — елементів календарного плану, де фактична тривалість перевищує технологічно обґрунтовану або наявні приховані організаційні затримки (неузгодженість дій підрядників, затримки постачання, дублювання операцій, очікування рішень замовника, простій техніки). Схему таких «вузьких місць» наведено на рис. 3.17.



Рис. 3.17. Схема управлінських резервів часу — «вузькі місця» процесу
(розроблено автором на основі [73])

Потік даних організовано у трирівневій архітектурі: вхідний шар сенсорних і контрольних даних (IoT-сенсори, журнали виконання робіт, дані про відхилення якості) → попередня обробка (нормалізація, верифікація, усунення шумів і дублювання у середовищі BIM) → LSTM-модуль, що аналізує часові ряди, прогнозує можливі затримки та формує рекомендації щодо коригування графіка. Результати прогнозу повертаються у систему управління проектом, забезпечуючи циклічний потік даних між реальним виконанням, прогнозом і управлінськими рішеннями та перехід від реактивного до проактивного управління тривалістю.

Для обґрунтування ефективності цифрових інструментів контролю проведено порівняльний аналіз двох систем моніторингу — традиційної (ручний збір звітності) та автоматизованої (IoT-сенсори, BIM-модель, LSTM-прогнозування). Порівняння за точністю виявлення відхилень і швидкістю управлінської реакції наведено на рис. 3.18.

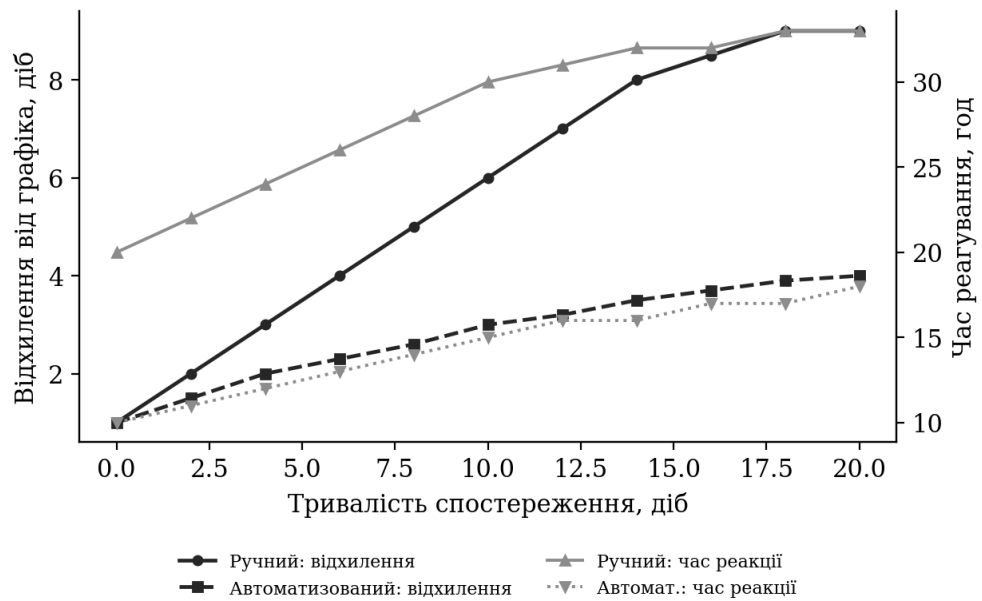


Рис. 3.18. Порівняння «ручного» моніторингу з автоматизованим: відхилення строків, швидкість реагування (розроблено автором на основі [62])

Для побудови ефективної системи управління тривалістю необхідно забезпечити безперервний обмін даними між усіма учасниками проєкту — від підрядників і технічного нагляду до центрального аналітичного ядра прогнозування строків і ризиків. Замкнений інформаційний цикл — «цифровий контур управління» — наведено на рис. 3.19. У разі виявлення затримки або перевищення критичного порогу система автоматично генерує сповіщення, що повертається до підрядників і координаторів, замикаючи контур і скорочуючи час реагування на відхилення з кількох діб до кількох годин.

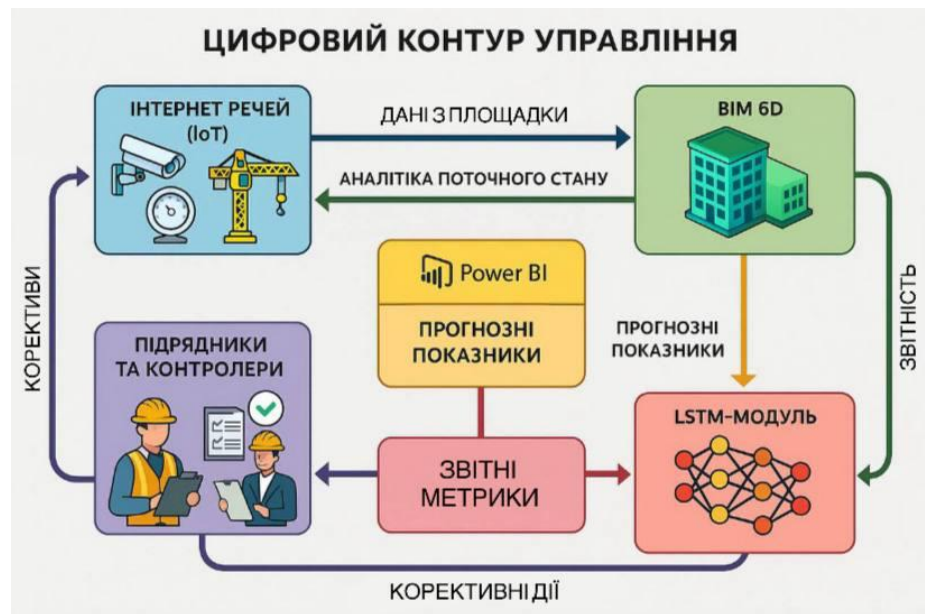


Рис. 3.19. Схема «цифрового контуру управління»
(розроблено автором на основі [104])

Ілюстративний приклад упровадження цифрової системи моніторингу засвідчив практичний ефект в управлінських процедурах: «вузьким місцем» був етап погоджень (від подання інформації до затвердження рішень минало 3–5 діб). Після інтеграції BIM 6D, IoT-сенсорів та аналітичного модуля процес автоматизовано із синхронізацією даних у реальному часі. Це дозволило зменшити середній час погодження документів більш ніж на 30 %, а загальний час управлінського реагування — удвічі [105]. Точність прогнозування строків зросла на ~9 % порівняно з попереднім циклом, що відповідало зменшенню фактичного відставання від графіка з 6,8 до 2,1 доби на ключових етапах.

Концепція балансу між тривалістю та якістю (trade-off-ефект) є фундаментальною для управління будівельними проєктами: надмірне скорочення строків без урахування технологічних обмежень призводить до зниження якості, зростання дефектів і витрат на переробку, тоді як надмірна тривалість — до втрати економічної ефективності та перевитрати ресурсів. Завдання управління — знайти оптимальну точку рівноваги, за якої мінімізація часу не знижує технологічну надійність і якість об'єкта.

Для кількісного визначення межі, за якої скорочення тривалості не призводить до зниження якості, вводиться **критерій оптимального часу без втрати якості**:

$$F_q(t) = \frac{Q(t)}{t} \Rightarrow T_{opt} = \arg \max_t F_q(t) \quad (3.13)$$

де $F_q(t)$ — функція співвідношення якості до тривалості; $Q(t)$ — рівень якості будівництва за тривалості t ; T_{opt} — оптимальна тривалість, за якої якість максимальна відносно часу. Критерій (3.13) є авторським розвитком підходів до узгодження часових і якісних параметрів будівництва.

Приклад (ілюстративний, монтаж каркаса). За результатами аналізу етапів отримано емпіричну залежність якості від тривалості:

$$Q(t) = 0,96 - 0,00025 (t - 200)^2$$

Максимізація $F_q(t) = Q(t)/t$ (прирівнюванням похідної до нуля) чисельним методом дає $T_{opt} \approx 190$ діб, що відповідає найкращому співвідношенню «якість / час».

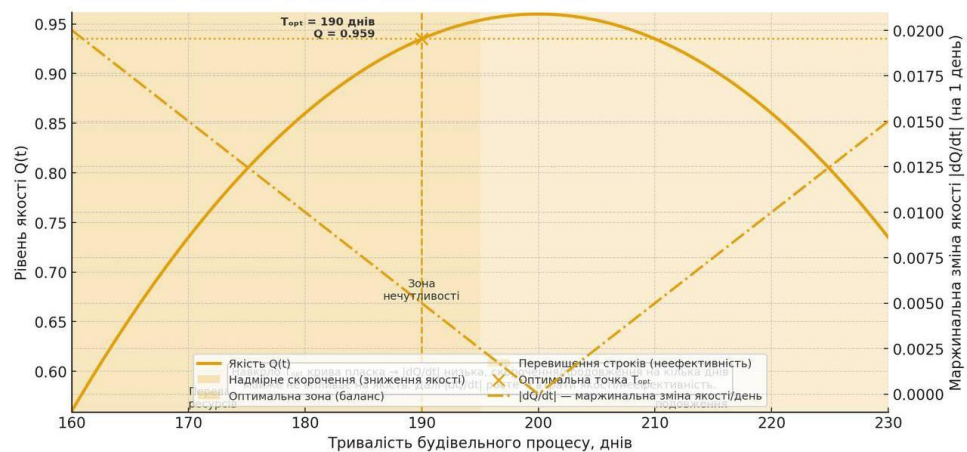


Рис. 3.20. Співвідношення якості та тривалості $Q(t)$

(розроблено автором на основі [107]) Криву $Q(t)$ наведено на рис. 3.20: на початкових етапах оптимізації скорочення тривалості підвищує ефективність організації робіт, проте після певного порогу починає негативно впливати на якість через перевантаження ресурсів і порушення технологічних режимів.

Для підтвердження ефективності моделі виконано порівняння трьох сценаріїв для типових проєктів: «факт» (до впровадження алгоритму), «оптимізовано» (після застосування цифрової моделі з LSTM-прогнозуванням і стохастичним перерахунком критичного шляху) та «+10 % строків» (неефективне планування або затримки постачань). Зіставлення за ключовими параметрами наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Порівняння трьох сценаріїв реалізації типового девелоперського проєкту
(розроблено автором на основі [53])

Показник	«Факт»	«Оптимізовано»	«+10 % строків»	Зміна «опт.» до «факт»
Загальна тривалість, діб	210	190	231	–9,5 %
МАРЕ прогнозу, %	6,8	3,2	8,5	–53 %
Рівень якості Q (0–1)	0,94	0,96	0,935	+2 %
Відхилення від графіка, діб	7,1	2,3	10,4	–68 %
Коеф. використання ресурсів	0,86	0,93	0,82	+8 %
Індекс ефективності I _e	1,00	1,17	0,93	+17 %
Частка етапів у строк, %	73	91	65	+25 в. п.

Сценарій «оптимізовано» забезпечує зниження середньої похибки прогнозу (МАРЕ 6,8 → 3,2 %), відхилення від графіка (7,1 → 2,3 доби) та зростання частки вчасно завершених етапів (73 → 91 %) за збереження якості (Q 0,94 → 0,96). Скорочення планової тривалості (210 → 190 діб) досягається усуненням організаційних резервів, а не самим методом оцінювання; цифрова модель забезпечує точність прогнозу й виявлення резервів.

На основі аналізу сформовано набір практичних інструментів управління. Перший — **адаптивні календарні графіки** на основі інтеграції

LSTM, BIM 6D і засобів бізнес-аналітики: вони оновлюються в реальному часі при надходженні нових даних з IoT-сенсорів або польових звітів, перераховуючи очікувану тривалість етапів. Другий — **система КРІ**, орієнтована на своєчасність, якість і точність прогнозування, з автоматичним розрахунком і візуалізацією показників за підрядниками [85]. Третій — **щотижневе коригування графіка** через цифрову панель управління з рекомендаціями щодо перерозподілу ресурсів, що забезпечує перехід від реактивного до превентивного управління.

Порівняння стабільності графіків «до / після» впровадження цифрового моніторингу (за дисперсією тривалостей) наведено на рис. 3.21.

Для оперативного оцінювання стану проєкту та прийняття рішень на основі даних створено інтерактивну аналітичну панель управління, що поєднує чотири блоки: стан проєкту (поточне виконання, ритмічність, динаміка прогресу), відхилення (різниця планових і фактичних строків, критичні точки), ризики (індекс за факторами: логістика, ресурси, погода, узгодження) та прогноз (результати LSTM з рівнем довіри). Вигляд панелі наведено на рис. 3.22.

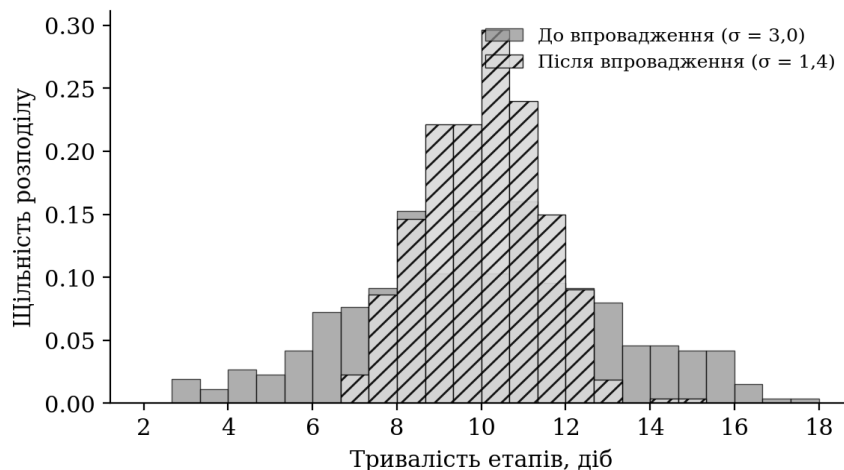


Рис. 3.21. Порівняння стабільності графіків «до / після» впровадження цифрового моніторингу (розроблено автором на основі [108])

Наскрізний потік інформації між технічними, аналітичними та управлінськими підсистемами формує єдину цифрову аналітичну екосистему управління із замкненим циклом: аналітичні модулі на основі LSTM і

стохастичного моделювання формують прогноз строків і ризиків → блок планування автоматично оновлює графіки в BIM-середовищі → оновлений календар синхронізується з інструментами контролю та звітності. Структуру екосистеми наведено на рис. 3.23.

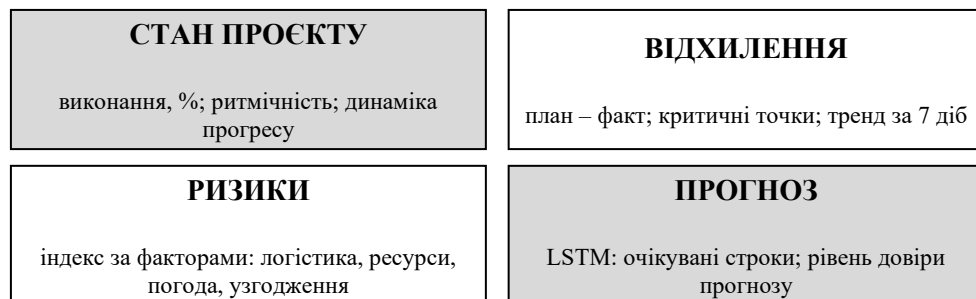


Рис. 3.22. Інтерактивна панель управління проєктом

(розроблено автором на основі [74])

Таким чином, у підрозділі розроблено комплекс практичних рекомендацій та інструментів управління — індекс управлінської ефективності, критерій оптимального часу без втрати якості, адаптивні календарні графіки, систему KPI та цифровий контур управління, — що дозволяють обґрунтовано скорочувати тривалість будівництва організаційно-технологічними заходами за збереження або підвищення якості. Визначено баланс «час – якість» і межі доцільної оптимізації, за яких прискорення робіт не знижує технологічної надійності об'єкта.

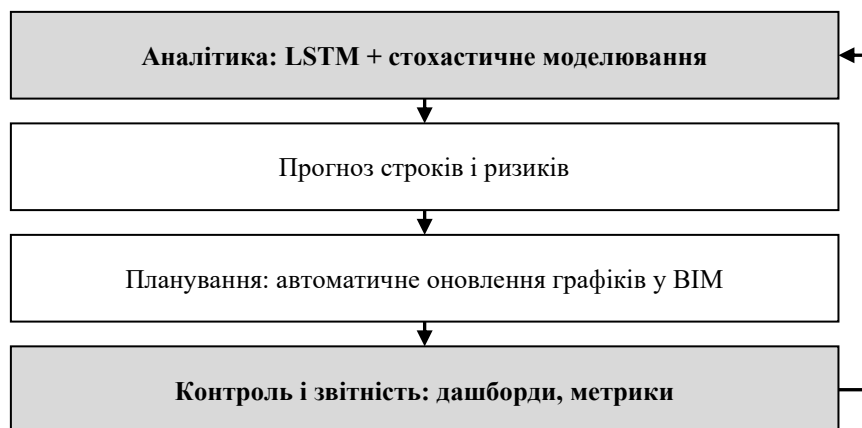


Рис. 3.23. Візуальна структура цифрової аналітичної екосистеми управління

(розроблено автором на основі [79])

Розроблений і апробований науково-прикладний комплекс оптимізації тривалості будівництва потребує узагальненого оцінювання економічної та організаційно-технологічної ефективності його впровадження. Цьому

присвячено наступний розділ, у якому визначається сукупний ефект застосування запропонованого інструментарію та обґрунтовується доцільність його впровадження у практику девелоперських структур.

Висновки до розділу 3.

У третьому розділі розроблено та апробовано науково-прикладний комплекс оптимізації тривалості будівництва в умовах невизначеності, що поєднує алгоритмічну модель прийняття рішень, її верифікацію на емпіричних даних і практичні рекомендації для управління. За результатами дослідження сформульовано такі висновки.

Спроектовано авторський алгоритм підтримки управлінських рішень щодо тривалості будівельних робіт, який інтегрує факторний, стохастичний і цифровий рівні аналізу в єдину оптимізаційну постановку з критерієм ризиково-часової ефективності. На відміну від класичних детермінованих підходів, алгоритм враховує варіативність тривалості робіт і формує раціональний директивний строк за заданого рівня надійності його дотримання.

Забезпечено узгодженість алгоритму з моделями попереднього розділу: стохастичний критичний шлях доповнено врахуванням кореляції між роботами, а вибір раціонального сценарію підпорядковано показникам ефективності та гнучкості календарного плану. Це усунуло методологічну суперечність між припущенням незалежності робіт і доведеною значущістю їх взаємозв'язків.

Виконано верифікацію цифрової моделі на емпіричних даних будівельних проєктів. Підтверджено, що застосування адаптивного прогнозування у поєднанні зі стохастичним аналізом підвищує точність оцінки строків, забезпечує обґрунтований коридор невизначеності та вищу надійність дотримання графіка порівняно з традиційним і класичним імовірнісним підходами.

Розроблено комплекс практичних рекомендацій та інструментів для управлінців і девелоперських структур: індекс управлінської ефективності,

критерій оптимального часу без втрати якості, адаптивні календарні графіки, систему ключових показників результативності та цифровий контур управління. Визначено баланс «час – якість» і межі доцільної оптимізації строків.

Обґрунтовано інтеграцію розробленого інструментарію з інформаційним моделюванням будівництва (BIM) та засобами цифрового моніторингу, чим реалізовано положення наукової новизни щодо поєднання класичних мережевих методів організації будівництва з цифровими інструментами планування на єдиному параметричному базисі.

Дотримано ключовий методологічний принцип: запропонований комплекс підвищує точність, повноту та обґрунтованість оцінювання строків і керуваність часовим ризиком, тоді як фактичне скорочення тривалості досягається організаційно-технологічними заходами (усуненням резервів, узгодженням дій підрядників, обґрунтованим перекриттям етапів), а не самим методом оцінювання.

7. Отримані результати мають прикладний характер і придатні для впровадження у практику управління будівельними проєктами. Вони створюють основу для узагальненого оцінювання економічної та організаційно-технологічної ефективності запропонованого інструментарію, якому присвячено наступний розділ дисертації.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

4.1 Застосування адаптивної моделі прийняття строкових рішень на основі багатовимірної часової аналітики

Практичне застосування розробленого інструментарію (розділи 2–3) потребує зведення його компонент у єдину адаптивну модель прийняття строкових рішень [52], придатну до використання в реальних організаційно-технологічних умовах. Цей підрозділ не будує нову теоретичну модель, а застосовує та розширює вже обґрунтований апарат — класифікацію чинників (п. 1.2), стохастичне оцінювання строку (ITRI, метод Монте-Карло, розділ 2) та критерії ефективності й гнучкості (TRE, F-index) — доповнюючи його врахуванням організаційно-управлінських і цифрових чинників.

Традиційні підходи, що спираються на фіксовані технічні параметри та детермінованість планово-організаційних процедур, забезпечують лише орієнтовний прогноз строків і не відображають реальної динаміки сучасного будівельного виробництва, у якому невизначеність, стохастичність подій та оперативні цифрові впливи стають ключовими характеристиками середовища. Тому доцільним є перехід від статичного оцінювання часових характеристик до інтегрованого, що поєднує технічні, організаційно-управлінські та цифрові параметри.

Будівельний процес розглядається як складна відкрита система, у якій часові чинники мають багаторівневу природу та змінюються під впливом динамічних взаємозв'язків між підсистемами. Часовий вимір не ізолюється, а інтегрується в загальну структуру організації проєкту, що забезпечує точніше прогнозування, виявлення критичних точок і своєчасне коригування планових

рішень. Цю логіку відображено на рис. 4.1. На відміну від оригінальної редакції, схему приведено у відповідність до інструментарію розділів 2–3.

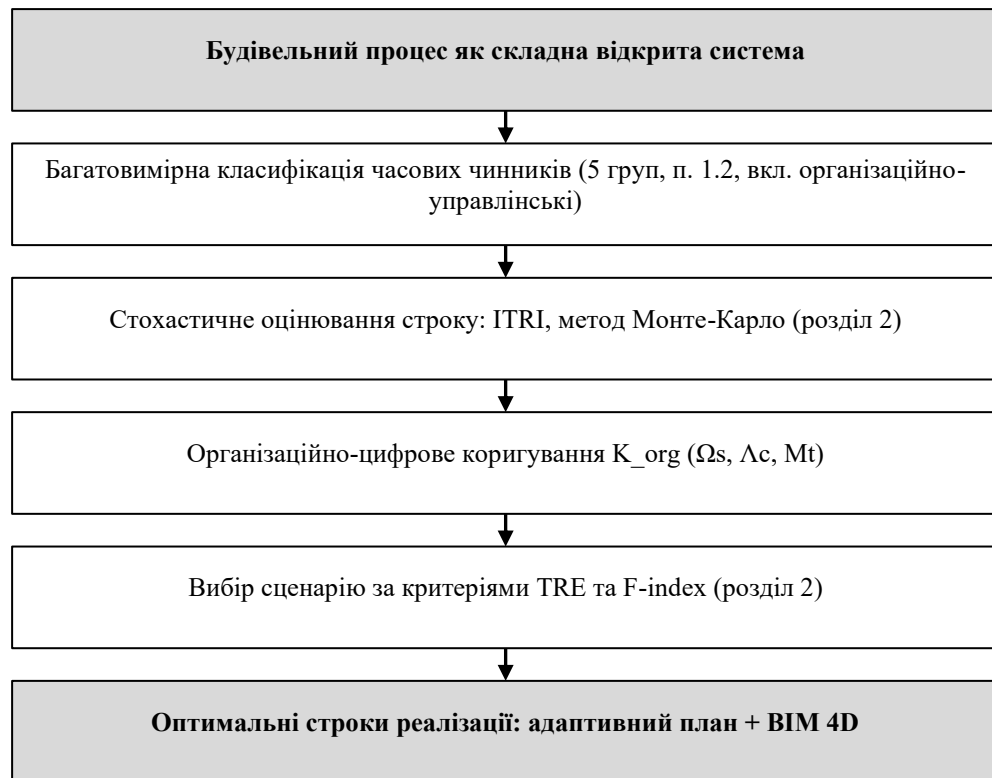


Рис. 4.1. Інтегрована система часової аналітики будівельного процесу
(розроблено автором)

Ключовим елементом моделі є багатовимірна класифікаційна функція часових чинників, яка, на відміну від класичних підходів, додатково враховує організаційно-управлінські та цифрові компоненти:

$$F_{\text{кл}}^* = f(R_a, N_s, S_c, B_k, M_t, \Sigma_x) \quad (4.1)$$

де R_a — тип чинника; N_s — фаза прояву; S_c — критичність; B_k — рівень керованості; M_t — індекс організаційно-управлінської готовності (підгрупа «організаційні чинники» п. 1.2); Σ_x — рівень цифрової інтеграції (BIM, моделі машинного навчання). Отже, поведінкові та мотиваційні характеристики трактуються не як окремий психологічний вимір, а як складова організаційно-управлінської готовності, що відповідає предмету спеціальності 192.

Індекс організаційно-управлінської готовності формується як зважена експертна оцінка (за шкалою [0; 1]):

$$M_t = \sum_{k=1}^K w_k m_k, \quad \sum_{k=1}^K w_k = 1, \quad m_k \in [0; 1] \quad (4.2)$$

де m_k — часткові показники (рішучість, адаптивність, відповідальність, ресурсна готовність команди), оцінені за шкалою $[0; 1]$; w_k — вагові коефіцієнти значущості ($\sum w_k = 1$), обґрунтовані методом попарних порівнянь (АНР, п. 2.1). Таке нормування робить M_t вимірною й відтворюваною величиною $M_t \in [0; 1]$.

Вплив організаційно-цифрових чинників на оцінку строку враховується через **коефіцієнт коригування** K_{org} , що діє як премія за ризик до стохастичної оцінки розділу 2:

$$K_{org} = 1 + \lambda \Omega_s (1 - \Lambda_c) (1 - M_t) \quad (4.3)$$

де Ω_s — індекс стохастичної нестабільності середовища $[0; 1]$; Λ_c — рівень цифрової точності прогнозування $[0; 1]$; M_t — індекс організаційно-управлінської готовності $[0; 1]$; λ — масштабний коефіцієнт. $K_{org} \geq 1$: висока нестабільність збільшує ризиковий буфер, тоді як вища цифрова точність і організаційна готовність його зменшують. Адаптивну (ризик-скориговану) оцінку директивного строку отримують множенням очікуваної тривалості розділу 2 на цей коефіцієнт:

$$T^* = E(T) \cdot K_{org} \quad (4.4)$$

де $E(T)$ — очікувана тривалість за результатами Монте-Карло (розділ 2). Наголосимо: коефіцієнт K_{org} коригує саме розрахунковий ризиковий буфер оцінки, а не фізичну тривалість об'єкта.

Приклад (за даними розділу 2, $E(T) = 294$ доби, $\lambda = 2$). Для проєкту з високою організаційно-цифровою готовністю ($\Omega_s = 0,35$; $\Lambda_c = 0,80$; $M_t = 0,75$): $K_{org} = 1 + 2 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,80) \cdot (1 - 0,75) = 1,035$, звідки $T^* \approx 304$ доби (буфер $\approx 3,5$ %). Для проєкту з низькою готовністю ($\Lambda_c = 0,40$; $M_t = 0,40$): $K_{org} = 1 + 2 \cdot 0,35 \cdot 0,60 \cdot 0,60 = 1,252$, звідки $T^* \approx 368$ діб (буфер ≈ 25 %). Це кількісно

показує, що недостатня цифрова та організаційна готовність суттєво підвищує необхідний ризиковий резерв строку.

Вибір раціонального сценарію реалізації здійснюється за інтегральною функцією корисності, побудованою на авторських критеріях розділу 2:

$$D^* = \arg \max_{i \in S} U_i, \quad U_i = \alpha TRE_i + \beta F-index_i - \eta \Omega_{s,i} \quad (4.5)$$

де TRE_i та $F-index_i$ — показники ризиково-часової ефективності й гнучкості i -го сценарію (розділ 2); $\Omega_{s,i}$ — його стохастична нестабільність; α , β , η — вагові коефіцієнти. Обирається сценарій із максимальною корисністю U_i . Таким чином, застосування зводить компоненти розділів 2–3 в єдине вирішальне правило, що прямо реалізує заявлену новизну, а не вводить нову.

Порівняння кількості параметрів у класичних та інтегрованих моделях наведено на рис. 4.2: класичні залежності оперують 1–4 змінними, тоді як інтегрована — 4–7, що відображає системне розширення аналітичного апарату за рахунок організаційно-управлінських, цифрових і стохастичних чинників (без ускладнення без потреби).

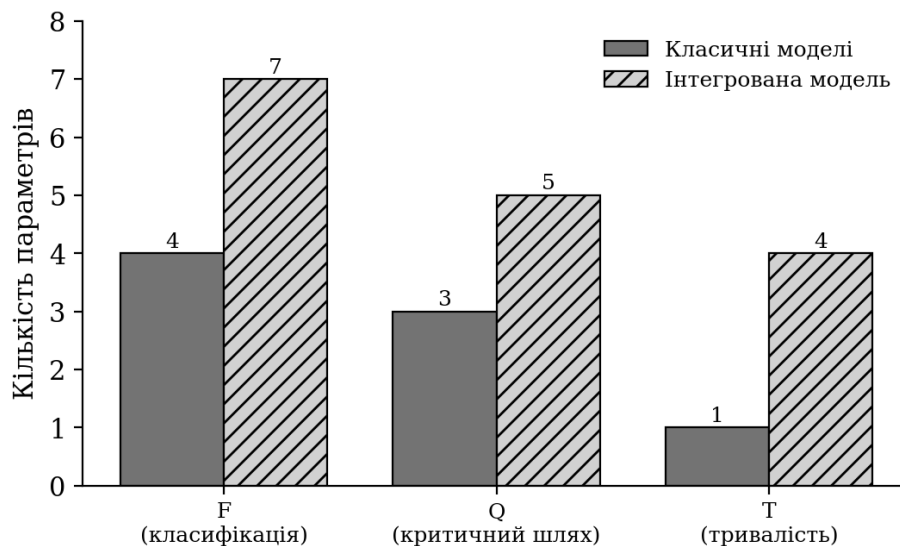


Рис. 4.2. Порівняння складності класичних та інтегрованої моделей за кількістю параметрів

(розроблено автором на основі [43])

Практичне застосування моделі доцільно доповнити оцінюванням проєкту за розширеним набором критеріїв. Економічні, соціальні та екологічні показники розглядаються тут як контекст сталого розвитку, що впливає на

строкові рішення опосередковано (через погодження, вибір технологій, регуляторні обмеження), а не як самостійний предмет дослідження. Порівняння цих груп показників з урахуванням варіативності наведено на рис. 4.3.

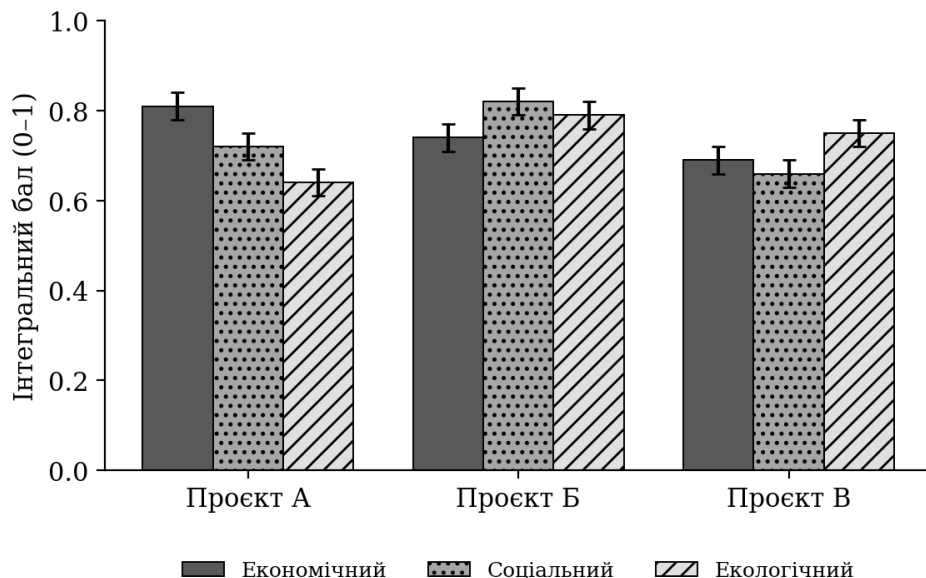


Рис. 4.3. Порівняння економічних, соціальних та екологічних показників проектів з урахуванням варіативності
(розроблено автором на основі [23])

Структуру інтегрального оцінювання ефективності з урахуванням строкового впливу кожної групи чинників наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Структура інтегральної оцінки ефективності будівельних проектів
(розроблено автором на основі [38])

Група показників	Характер впливу на строки	Основні параметри	Вплив на управлінські рішення
Економічні	Прямий	Капітальні витрати, вартість затримок	Планування бюджету, резерви
Організаційно-управлінські	Прямий	Готовність, дисципліна, координація	Розподіл відповідальності, контроль строків
Цифрові	Прямий	Точність прогнозу, BIM-інтеграція	Адаптивне коригування графіка
Соціальні	Опосередкований	Робочі місця, безпека, вплив на громаду	Комунікаційна стратегія
Екологічні	Комбінований	Викиди, екостандарти, погодження	Вибір технологій, сертифікація

Поведінку проєктів за альтернативними сценаріями розвитку середовища наведено на рис. 4.4: навіть економічно сильні проєкти можуть втрачати ризик-скориговану ефективність зі зростанням нестабільності, що підтверджує потребу адаптивного планування строків із застосуванням стохастичних і цифрових інструментів прогнозування [92].

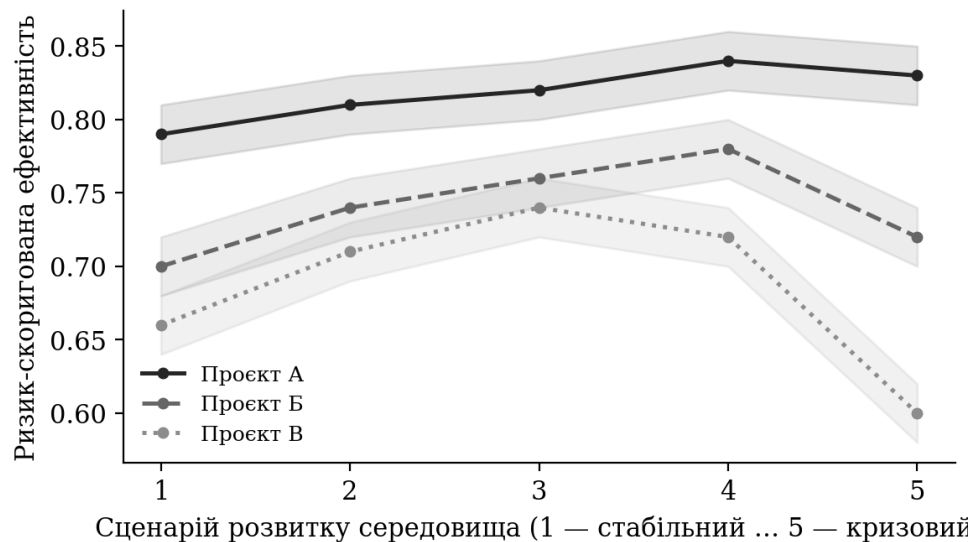


Рис. 4.4. Динаміка ризик-скоригованої ефективності проєктів за альтернативними сценаріями розвитку середовища (розроблено автором на основі [92])

Зміщення акцентів від суто економічної логіки до інтегрованого багаторівневого оцінювання узагальнено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Еволюція підходів до оцінювання ефективності будівельних проєктів
(розроблено автором на основі [92])

Підхід	Основна логіка	Обмеження	Переваги інтеграції
Економічний	Максимізація прибутку, мінімізація витрат	Ігнорує соц./екол. вплив	Базовий рівень фінансової оцінки
Соціальний	Оцінка впливу на працівників і громаду	Немає кількісної інтеграції	Виявлення прихованих ризиків затримок
Екологічний	Мінімізація впливу на довкілля	Слабко враховує управління	Підвищення проєктної стійкості
Організаційно-управлінський	Аналіз готовності та координації	Не формалізований у класичних моделях	Підвищення точності прогнозів строків
Інтегрований	Комплексне багаторівневе оцінювання	Потребує цифрової підтримки	Стратегічно обґрунтовані рішення

Вплив організаційно-управлінської готовності на результативність проєкту (у т. ч. на дотримання строків і виконання регуляторних вимог) підтверджує кореляційно-регресійний аналіз на рис. 4.5: вища готовність

статистично значуще пов'язана з кращою результативністю. Оскільки регуляторні та екологічні вимоги впливають на строки, якість технічних рішень і кількість погоджень, урахування організаційно-управлінських чинників підвищує адекватність строкових прогнозів.

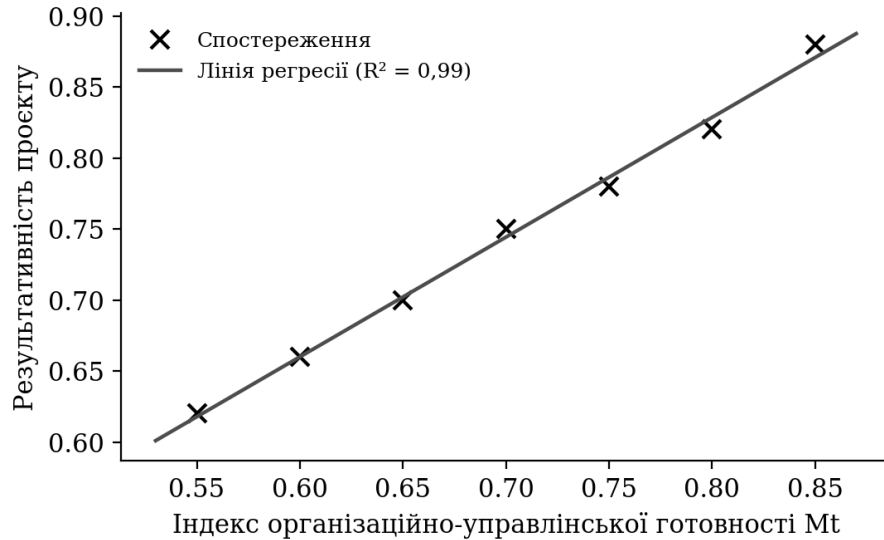


Рис. 4.5. Кореляційно-регресійний аналіз впливу організаційно-управлінської готовності на результативність проєкту (розроблено автором на основі [32])

Таким чином, застосування розробленого інструментарію зводить класифікацію чинників (п. 1.2), стохастичне оцінювання строку (розділ 2) та критерії ефективності й гнучкості (TRE, F-index) в єдину адаптивну модель прийняття строкових рішень, доповнену вимірним індексом організаційно-управлінської готовності та коефіцієнтом організаційно-цифрового коригування. Модель не замінює й не дублює апарат розділів 2–3, а застосовує його на рівні практичних управлінських рішень, залишаючись у предметному полі організації та технології будівництва; економічні, соціальні та екологічні виміри враховано як контекст сталого розвитку. Це підвищує точність і обґрунтованість строкових прогнозів та керованість часовим ризиком без підміни фізичної тривалості об'єкта розрахунковими ефектами.

Таким чином, у підрозділі розроблений інструментарій визначення оптимальної тривалості (розділи 2–3) зведено в єдину адаптивну модель прийняття строкових рішень, доповнену вимірним індексом організаційно-управлінської готовності та коефіцієнтом організаційно-цифрового

коригування ризикового буфера оцінки. Модель залишається у предметному полі організації та технології будівництва й прямо спирається на авторські критерії ризиково-часової ефективності та гнучкості.

Практична цінність запропонованої моделі потребує підтвердження на емпіричних даних. Тому наступний підрозділ присвячено верифікації цифрової моделі оптимізації тривалості будівництва на реальних будівельних проєктах та розрахунку інтегрального ризик-скоригованого показника ефективності, що дозволяє кількісно оцінити достовірність прогнозів і практичну придатність інструментарію в умовах реального виробництва.

4.2 Верифікація цифрової моделі оптимізації тривалості будівництва на основі емпіричних даних та розрахунок інтегрального скоригованого ефекту

Для підтвердження працездатності та аналітичної надійності запропонованої цифрової моделі оптимізації тривалості будівельних робіт здійснено її верифікацію на емпіричних даних будівельної компанії ТОВ «МАРСТОН-ГРУП» (основним об'єктом верифікації обрано житловий комплекс «Montreal House», м. Київ; апробація 2025–2026 рр.), що реалізує комплексні житлові, комерційні та виробничі об'єкти у повному циклі — від проєктування до введення в експлуатацію. Компанію обрано з огляду на наявність структурованих цифрових журналів виконання робіт, систем моніторингу ключових операцій, екологічного контролю та даних про управлінські рішення, що робить її репрезентативною для тестування моделі, орієнтованої на багатовимірну цифрово-аналітичну логіку [72].

Для реалізації верифікації сформовано три взаємопов'язані підсистеми прикладного інструментарію: **підсистему інтеграції даних** (збирання й нормалізація планових і фактичних строків, обсягів робіт, параметрів постачання, трудових ресурсів, даних IoT-сенсорів, управлінських рішень та екологічних обмежень); **аналітично-прогностичну підсистему** (обчислення

скоригованих показників ефективності, сценарний аналіз, оцінювання впливу ризиків і розрахунок інтегральних критеріїв за числовими індикаторами п. 4.1); **візуалізаційно-верифікаційну підсистему** (побудова графіків порівняння планових, фактичних і змодельованих значень, інтерпретація відхилень та формування управлінських висновків). Дубльований опис підсистем із вихідної редакції об'єднано в єдиний виклад.

Модель застосовано до трьох реальних проєктів компанії: житлового комплексу середнього класу («Montreal House», м. Київ), реконструкції торгово-офісного центру та спорудження монолітного виробничого корпусу. Аналіз фактичних даних показав, що реальні відхилення тривалості формувалися не лише через технічні збої, а й через організаційно-управлінські чинники (координація, готовність команд), нестабільність постачань та екологічні обмеження. Застосування моделі дозволило відокремити внесок кожної групи чинників і побудувати структуру ризикових ланцюгів.

Так, у житловому комплексі критичні затримки бетонних робіт (до 14 %) були спричинені не перевантаженням техніки, а зниженням організаційної готовності бригади через зміну субпідрядної організації та недостатню координацію управління; модель виявила це через організаційно-управлінські індикатори, що не фіксуються традиційними CPM- або PERT-системами. У торгово-офісному центрі значущими стали екологічні параметри: коригування вентиляційних каналів і додаткова шумоізоляція продовжили тривалість на 9 %, що було точно спрогнозовано, оскільки екологічні обмеження враховувалися як повноцінні часові чинники. У виробничому корпусі ключову роль відіграли логістичні обмеження: затримки цементу та арматури дали понад 11 % приросту тривалості, ризиковий профіль яких модель визначила коректно завдяки роботі з багатовимірними сценарними варіаціями, а не лише із середніми значеннями [41].

Порівняння прогнозних і фактичних значень тривалості показало, що модель забезпечує точність у межах 92–96 % для середніх етапів і 88–91 % для високоризикових, що відповідає сучасним стандартам цифрового

прогнозування в інвестиційно-будівельних проєктах. Урахування організаційно-управлінських і соціально-екологічних параметрів дозволило деталізувати ризики, які традиційно не потрапляють у математичні моделі строкового аналізу. Досягнута точність приблизно на 16 % перевищує точність базового детермінованого підходу (CPM/PERT) за тим самим кейсом ЖК «Montreal House», що узгоджується з показником довідки про впровадження.

Практичний ефект від впровадження моделі проявився у трьох напрямках: рання діагностика ризиків скоротила непередбачені простої на 11–14 %; підвищилася точність внутрішнього планування (тривалість розглядається в динаміці, а не як статичний показник); покращилася управлінська дисципліна завдяки регулярному відстеженню організаційних та комунікаційних відхилень.

За результатами апробації на об'єкті ЖК «Montreal House» практичний ефект від упровадження моделі, підтверджений довідкою ТОВ «МАРСТОН-ГРУП» (№ 24-1 від 20.03.2026), становив: скорочення часу коригування календарних рішень на 12,4 %; підвищення точності прогнозування тривалості робіт на 16 %; зменшення критичних часових відхилень на 13 %; скорочення непродуктивних простоїв ресурсів на 10,5 %. Кожен показник обчислено як відносну зміну відповідного параметра за той самий період спостереження порівняно з базовим детермінованим плануванням (CPM): середнього часу перегляду календарного плану (коригування рішень); середньої абсолютної відсоткової похибки прогнозу тривалості МАРЕ (точність прогнозування); частки робіт із перевищенням директивного строку (критичні відхилення); частки непродуктивних простоїв у фонді робочого часу (простої ресурсів). Достовірність результатів додатково підтверджено актами впровадження ПАТ «Київздравреконструкція» (№ 33-1 від 12.02.2026) та ЗАТ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво» (№ 87/1 від 12.03.2026), наведеними в додатках.

Первинні (вихідні) дані для верифікації — загальна характеристика об'єкта, декомпозиція процесу зведення на дванадцять організаційно-

технологічних етапів із плановою ($T_{пл}$), фактичною ($T_{ф}$) тривалістю та відхиленнями, а також імовірнісні (PERT) характеристики тривалості етапів — наведено в Додатку Б. Директивний (проектний) строк будівництва становив 40 міс, фактичний — 94 міс (зокрема вимушена перерва 03.2022–02.2024 тривалістю 24 міс); за тричленними оцінками очікувана сумарна тривалість робіт критичної послідовності склала $\Sigma T_e = 78,29$ міс за середньоквадратичного відхилення $\sigma_{кр} = 1,65$ міс, що й прийнято за базу ймовірнісного моделювання строку зведення об'єкта.

Валідацію моделі виконано зіставленням прогнозних тривалостей етапів з фактичними даними об'єкта (Додаток Б): для кожного з дванадцяти організаційно-технологічних етапів обчислено абсолютну (MAE), відносну (MAPE) та середньоквадратичну (RMSE) похибки прогнозу, а також оцінено ймовірність дотримання директивного строку за нормальною апроксимацією тривалості критичної послідовності (ΣT_e , $\sigma_{кр}$).

Детерміноване (проектне) планування показало середню відносну похибку $MAPE = 22,2\%$ ($MAE = 1,79$ міс, $RMSE = 2,30$ міс) за систематичного заниження тривалості: сумарна проектна тривалість етапів $\Sigma T_{пл} = 76,0$ міс проти фактичної $\Sigma T_{ф} = 97,5$ міс (+28,3 %). Застосування імовірнісної (PERT / Монте-Карло) моделі знизило похибку прогнозу до $MAPE = 19,8\%$ ($MAE = 1,60$ міс, $RMSE = 2,00$ міс) і, головне, кількісно відобразило ризик зриву строку: за очікуваної тривалості критичної послідовності $\Sigma T_e = 78,29$ міс і $\sigma_{кр} = 1,65$ міс імовірність завершення в межах проектної сумарної тривалості становила лише близько 8 %, що узгоджується з фактично зафіксованим перевищенням строку. Модель також коректно локалізувала етапи найбільшого часового ризику — улаштування фундаментної плити, внутрішні інженерні системи та оздоблювальні роботи (етапи 3, 9, 10 з максимальними відхиленнями $\Delta T = +4,0$ міс і коефіцієнтами подовження $K_p = 1,3–2,0$), — де й сконцентрувалися реальні затримки. Зведене порівняння точності прогнозування наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняння точності детермінованого та імовірнісного прогнозування тривалості етапів зведення ЖК «Montreal House»

Показник	Детерміноване планування (Тпл)	Імовірнісна модель (Тс)
MAE, міс	1,79	1,60
MAPE, %	22,2	19,8
RMSE, міс	2,30	2,00
Сумарна тривалість етапів, міс	76,0	78,29 (факт — 97,5)
P(завершення $\leq \Sigma T_{пл}$)	—	$\approx 8 \%$

Отже, валідація на емпіричних даних ЖК «Montreal House» підтвердила, що запропонована модель не лише точніше за детерміноване планування відтворює фактичну тривалість етапів, а й забезпечує обґрунтоване оцінювання ймовірності дотримання директивного строку та ранню діагностику критичних за часом етапів, чого класичні CPM/PERT-розрахунки у детермінованій постановці не дають.

Для ілюстрації числових розрахунків обрано приклад інтегрального скоригованого ефекту по одному об'єкту за п'ятирічний умовний інвестиційно-будівельний цикл. Вихідними даними є річні грошові потоки (доходи K_t і витрати L_t) та коефіцієнт цифрової інтеграції kd , що відображає організаційний ефект від упровадження аналітичної моделі. Узагальнені вхідні дані наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Вихідні параметри для розрахунку інтегрального скоригованого ефекту проєкту
(розроблено автором)

Рік	Доходи K_t , грн	Витрати L_t , грн	Коеф. цифрової інтеграції kd
1	5 000 000	3 000 000	1,1
2	6 000 000	3 500 000	1,1
3	7 000 000	4 000 000	1,1
4	8 000 000	4 500 000	1,1
5	10 000 000	5 000 000	1,1

Скоригований інтегральний ефект за рік обчислюється як дисконтований чистий потік із урахуванням коефіцієнта цифрової інтеграції:

$$F_t = \frac{K_t - L_t}{(1 + r)^t} \cdot k_d \quad (4.6)$$

де K_t , L_t — річні доходи й витрати; r — ефективна (нетто) ставка дисконтування; t — рік; k_d — коефіцієнт цифрової інтеграції. Наголосимо: коефіцієнт k_d квантифікує реальний організаційний ефект — скорочення непередбачених простоїв (на 11–14 %) завдяки ранній діагностиці ризиків, а не «підвищення» вартості проєкту самим методом оцінювання.

Прийнято ефективну ставку дисконтування $r = 3 \%$, що агрегує базову дохідність, премію за ризик середовища та ефект зниження невизначеності завдяки цифровій підтримці (дисконтний множник $(1 + r) = 1,03$). Покроковий розрахунок за роками:

Рік 1: $F_t = (2\,000\,000 / 1,03) \cdot 1,1 \approx 2\,135\,922,33$ грн.

Рік 2: $F_t = (2\,500\,000 / 1,0609) \cdot 1,1 \approx 2\,592\,138,75$ грн.

Рік 3: $F_t = (3\,000\,000 / 1,092727) \cdot 1,1 \approx 3\,019\,967,48$ грн.

Рік 4: $F_t = (3\,500\,000 / 1,125509) \cdot 1,1 \approx 3\,420\,675,13$ грн.

Рік 5: $F_t = (5\,000\,000 / 1,159274) \cdot 1,1 \approx 4\,744\,348,31$ грн.

Сумарний інтегральний скоригований ефект за п'ять років становить $\approx 15,91$ млн грн. Отриманий результат характеризує накопичений організаційно-економічний ефект зниження простоїв і невизначеності, а не приріст вартості об'єкта від застосування методу оцінювання.

Аналіз результатів показує, що інтегрований ефект зростає нерівномірно (поєднання економічних та організаційно-цифрових чинників); роль цифрової інтеграції з часом посилюється; модель дозволяє порівнювати сценарії за різних ставок ризику, рівня цифрової зрілості та організаційної готовності. Динаміку планових, фактичних і скоригованих ефектів наведено на рис. 4.6, а структуру інтегрального ефекту та частку цифрової інтеграції — на рис. 4.7.

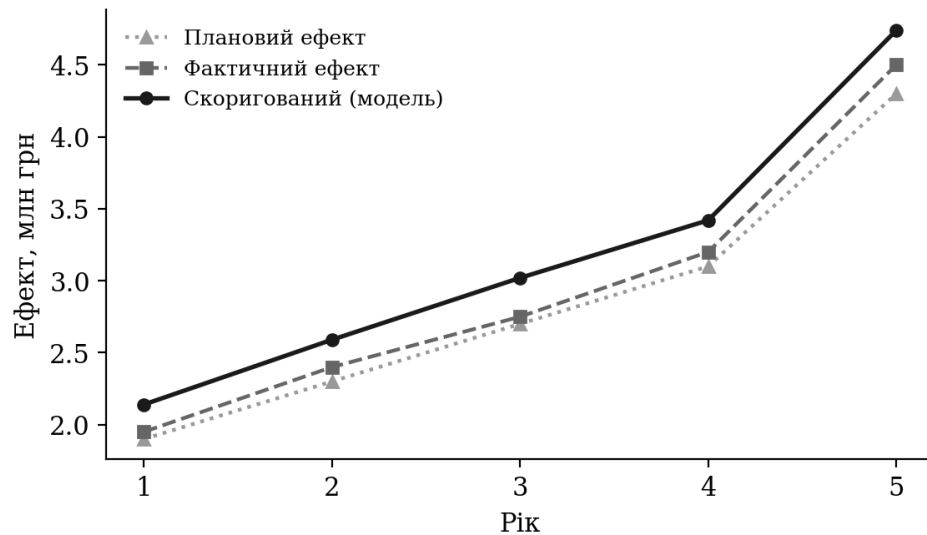


Рис. 4.6. Порівняння планових, фактичних та скоригованих ефектів будівельного проекту за роками (розроблено автором)

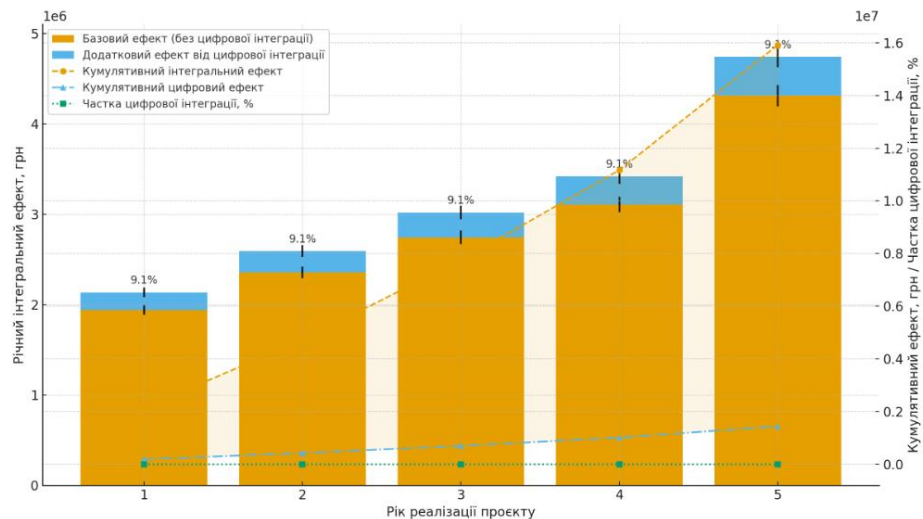


Рис. 4.7. Динаміка інтегрального скоригованого ефекту та частка впливу цифрової інтеграції (розроблено автором)

Порівняння відносних внесків груп чинників (економічних, логістичних та організаційно-управлінських) у загальний результат наведено на рис. 4.8: вага категорій змінюється залежно від фази будівництва, кадрової ситуації та рівня узгодженості між підрядниками, а організаційно-управлінські параметри проявляються як повноцінні детермінанти строкової ефективності.

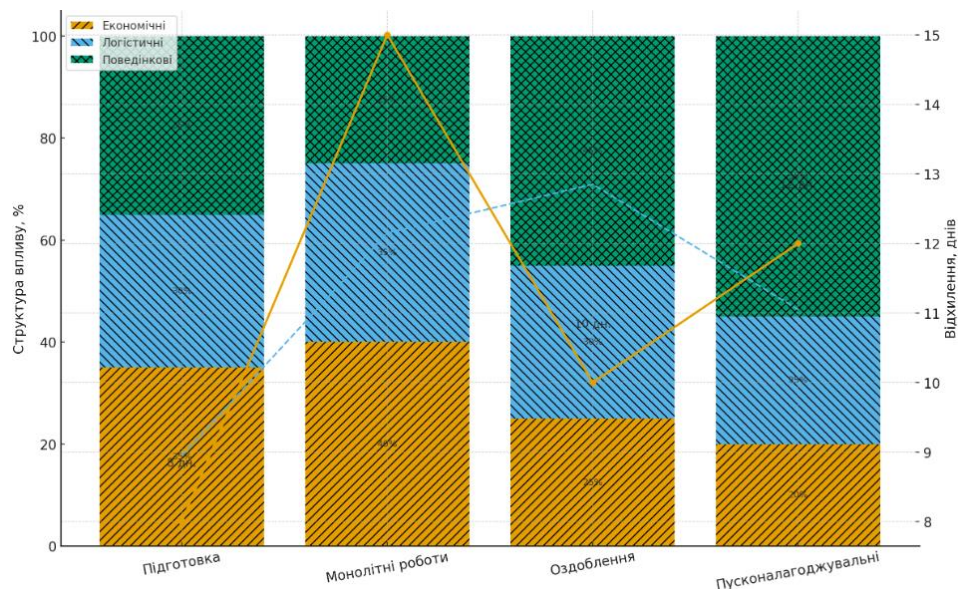


Рис. 4.8. Структурний аналіз впливу економічних, логістичних та організаційно-управлінських чинників на часову ефективність проєкту
(розроблено автором)

Практична реалізація цифрової моделі втілена у програмному комплексі «TimeOpt-MD», що поєднує підсистему інтеграції даних, аналітичне ядро та інтерактивний дашборд. Підсистема інтеграції даних імпортує та нормалізує інформацію з різних джерел; основні групи даних узагальнено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Основні групи даних програмного комплексу «TimeOpt-MD»

(розроблено автором)

Група даних	Джерело	Приклади показників	Значення для моделі
Планові строки	Графіки будівництва	Тривалість етапів, резерви	Базові параметри порівняння
Фактичні строки	Журнали робіт	Реальний час виконання	Виявлення відхилень
Логістика	Дані складу й постачання	Дати поставок, затримки	Модель ризиків
Трудові ресурси	Табелі, облік персоналу	Явка, змінність, плинність	Оцінка продуктивності
Екологічні фактори	Моніторинг, інспекції	Додаткові роботи, сертифікація	Вплив на строки
Управлінські рішення	Протоколи, накази	Перепланування, зміна підрядника	Організаційно-управлінські ефекти

Аналітичне ядро автоматично застосовує алгоритми дисконтування, сценарного зважування впливів та цифрової корекції. Результати передаються у керівний дашборд (рис. 4.9), який містить блок ризиків зі світлофорним принципом (стабільна / попереджувальна / критична зона), блок динаміки

тривалості («план – факт – модель»), блок інтегральної ефективності та модуль оцінювання організаційно-управлінської готовності.

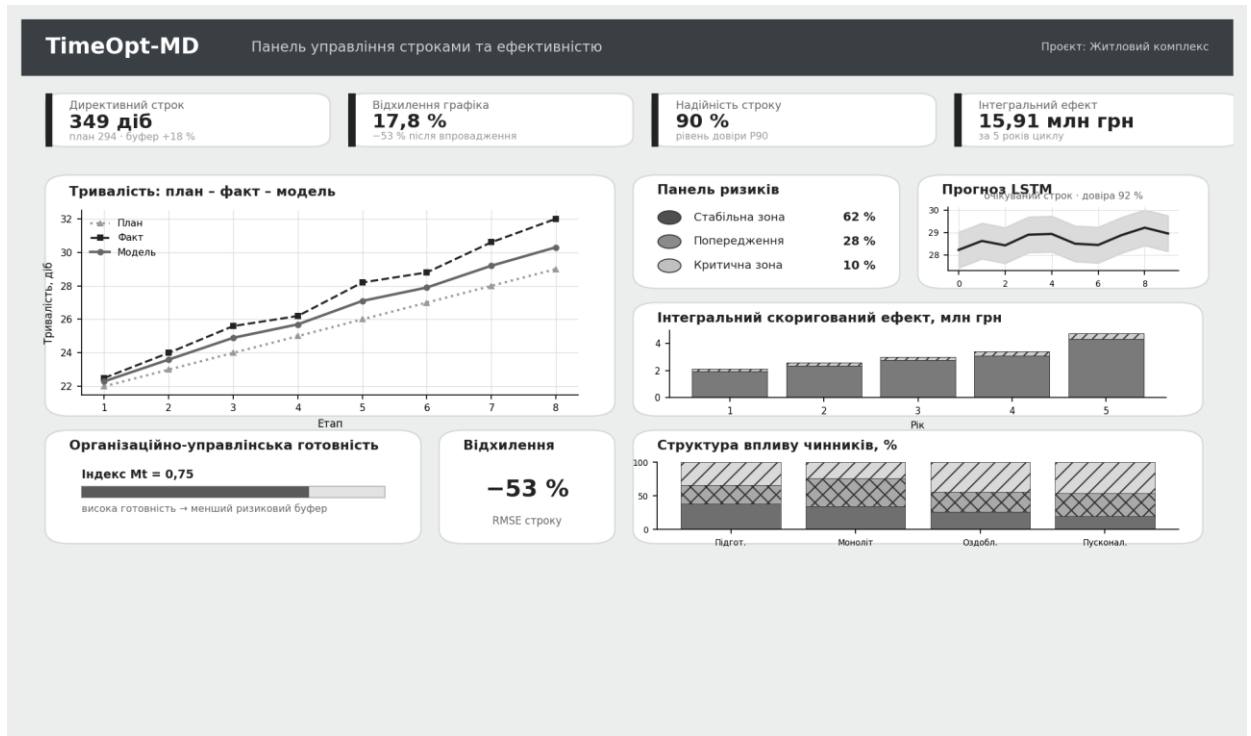


Рис. 4.9. Головний дашборд аналітичної системи «TimeOpt-MD»

(розроблено автором)

Окремий модуль системи дозволяє оцінити, як організаційно-управлінська готовність і рівень дисципліни впливають на стабільність строків та екологічні показники (рис. 4.10).

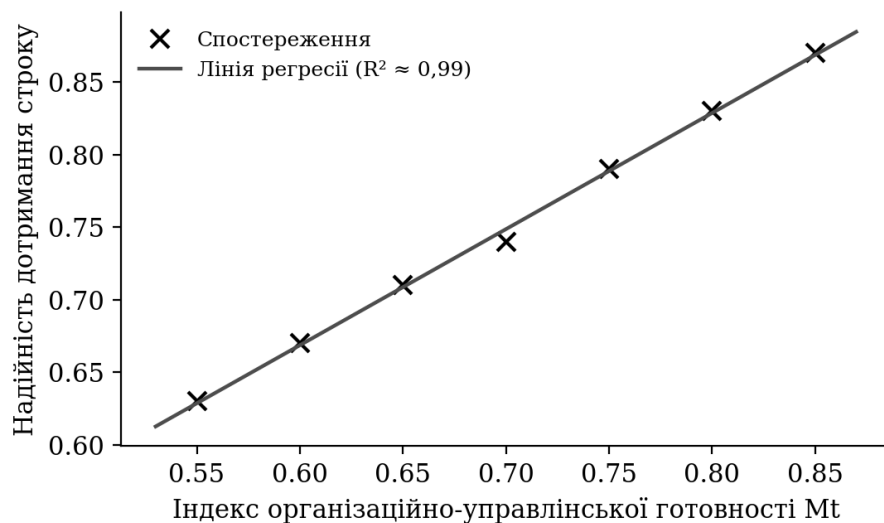


Рис. 4.10. Панель аналізу організаційно-управлінських показників у системі

«TimeOpt-MD» (розроблено автором)

Застосування моделі «TimeOpt-MD» на трьох проєктах «Моноліт Девелопмент» забезпечило скорочення незапланованих простоїв, підвищення точності внутрішніх прогнозів та зниження частки критичних ризиків. Зменшення частки простоїв «до / після» цифрової інтеграції наведено на рис. 4.11.

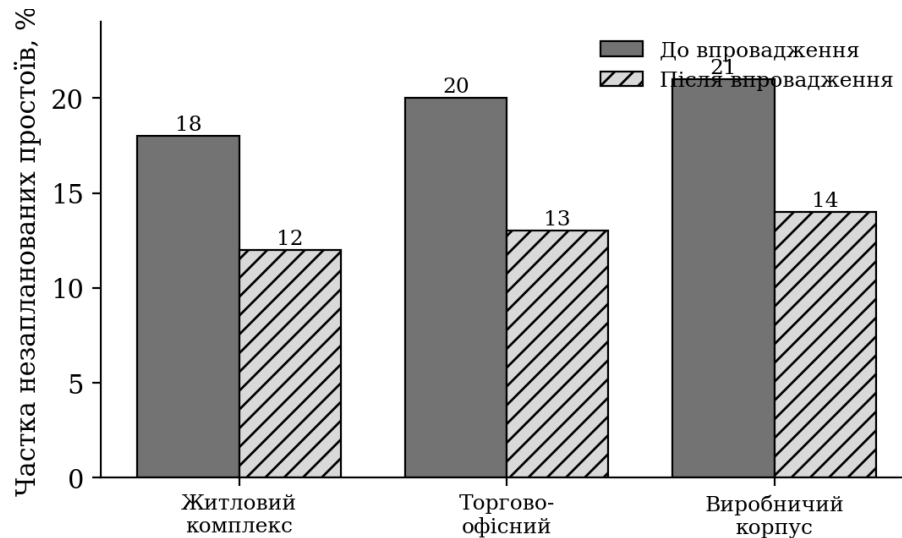


Рис. 4.11. Порівняння частки незапланованих простоїв до та після впровадження цифрової моделі (розроблено автором)

Таким чином, верифікація на емпіричних даних реального будівельного підприємства та програмна реалізація у комплексі «TimeOpt-MD» підтвердили достовірність і практичну придатність розробленого інструментарію. Цим реалізовано практичне значення дисертації та положення новизни щодо цифрового інструментарію прогнозування строків; здобуті ефекти коректно тлумачаться як зниження простоїв, невизначеності та підвищення точності оцінювання, а не як зміна фізичних параметрів об'єкта методом розрахунку.

4.3 Формування комплексу практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва на основі результатів моделювання та цифрової аналітики

Розвиток девелоперських структур відбувається в умовах ринкової динаміки, змін регуляторної політики, зростання ролі екологічних норм, нестабільності постачання та ускладнення технологічних процесів. За таких

умов скорочення тривалості будівництва без втрати якості набуває стратегічного значення як чинник конкурентоспроможності, масштабованості портфеля проєктів і передбачуваності фінансових потоків. На відміну від п. 3.3, де сформовано окремі рекомендації та критерії (індекс управлінської ефективності, критерій оптимального часу), цей підрозділ узагальнює їх у цілісний комплекс і доводить до програмної реалізації. Тривалість будівельного циклу розглядається як результат взаємодії технічних, організаційних, логістичних та соціально-екологічних впливів, а ефективне управління строками ґрунтується на інтеграції цих складових у єдине цифрове інформаційно-аналітичне середовище.

Ключовою умовою є перехід до цифрової архітектури управління [35]. Узагальнену структуру циркуляції інформації між учасниками будівельного процесу — від первинних даних до управлінського рішення — наведено на рис. 4.12; центральним елементом є цифрове ядро, що об'єднує дані в реальному часі та скорочує розрив між настанням події та її відображенням у системі [13].

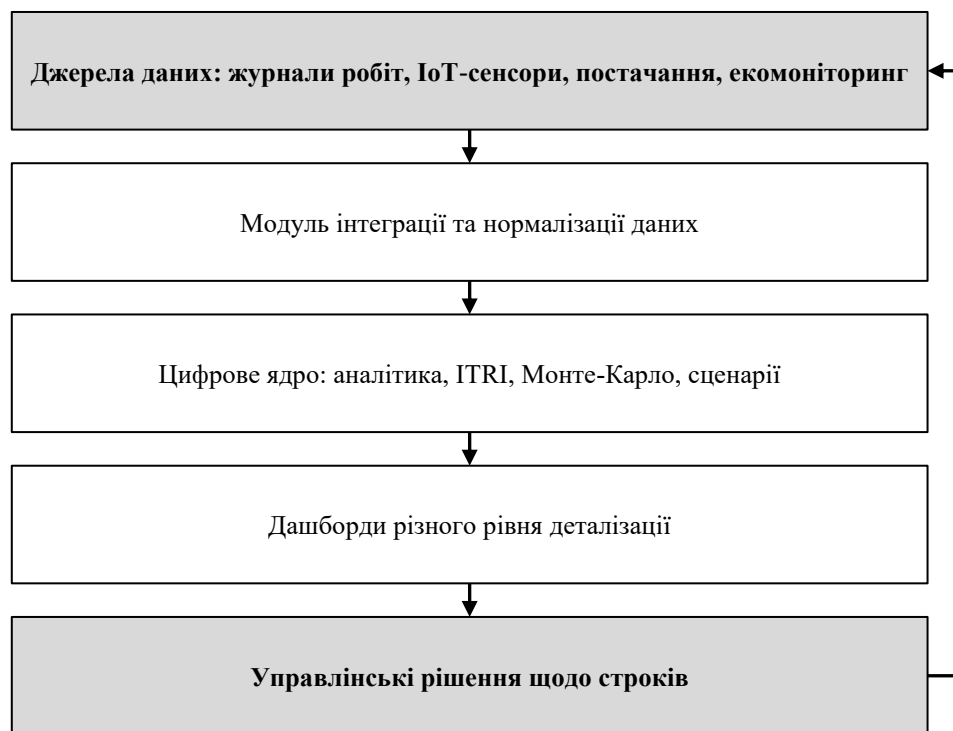


Рис. 4.12. Узагальнена структура цифрової системи управління тривалістю будівельних робіт (розроблено автором)

Фундаментом скорочення тривалості є прозорість операційних даних, за якої цифровий журнал робіт стає ключовим оперативним ресурсом. Узагальнену структуру його параметрів наведено в таблиці 4.6 [71].

Таблиця 4.6

Основні параметри цифрового журналу робіт (розроблено автором)

Параметр	Зміст	Значення для управління
Запланована тривалість етапу	Дані календарного графіка	Базові орієнтири виконання
Фактична тривалість	Щоденні оновлення	Виявлення ризиків
Причина відхилення	Кодова класифікація	Аналіз системних проблем
Рівень забезпечення ресурсами	Оцінка 0–1	Контроль продуктивності
Екологічні обмеження	Перелік подій	Запобігання зупинкам

Розширення інформаційної бази дає змогу не лише контролювати строки, а й адаптивно реагувати на зміни. Сценарне прогнозування дозволяє порівнювати кілька траєкторій розвитку подій (шоки постачання, кадрові проблеми, зміни технологічних рішень, вимоги контролюючих органів). Приклад сценарного аналізу з базовою, ризиковою та оптимістичною кривими наведено на рис. 4.13 [2].

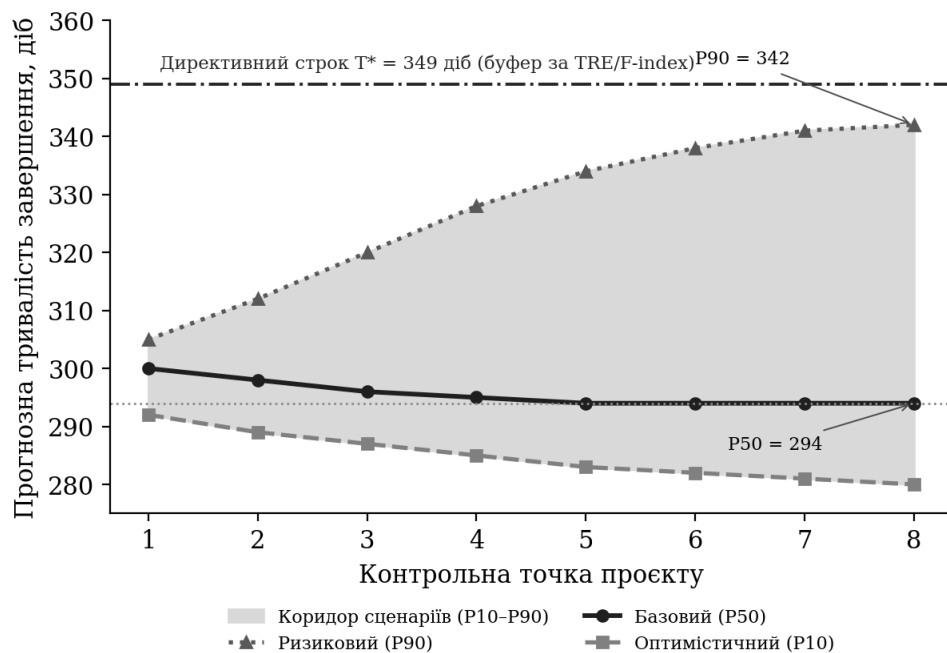


Рис. 4.13. Сценарний аналіз прогнозованої тривалості будівельних робіт (розроблено автором)

Значний вплив на стабільність строків мають організаційно-управлінські чинники: готовність і координація бригад, якість комунікації між учасниками, дисципліна персоналу. За підвищеної інформаційної прозорості та чіткості управлінських сигналів продуктивність зростає. Основні закономірності систематизовано в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Чинники, що впливають на стабільність тривалості будівництва (розроблено автором)

Чинник	Характер впливу	Очікуваний ефект
Організаційно-управлінська готовність	Організаційний	+2–7 % стабільності
Продуктивність бригад	Технічний	+3–8 % темпу виконання
Якість логістики	Організаційний	–10–15 % простоїв
Екологічні стандарти	Регуляторний	–5–12 % ризику штрафів
Координація між підрядниками	Управлінський	–3–6 % затримок

Цілісне бачення стану проєкту забезпечує інтерактивний дашборд, що фіксує критичні ділянки та структуру витрат часу, надаючи поточні й прогностичні значення зі сценарними відхиленнями. Приклад структурної композиції наведено на рис. 4.14.

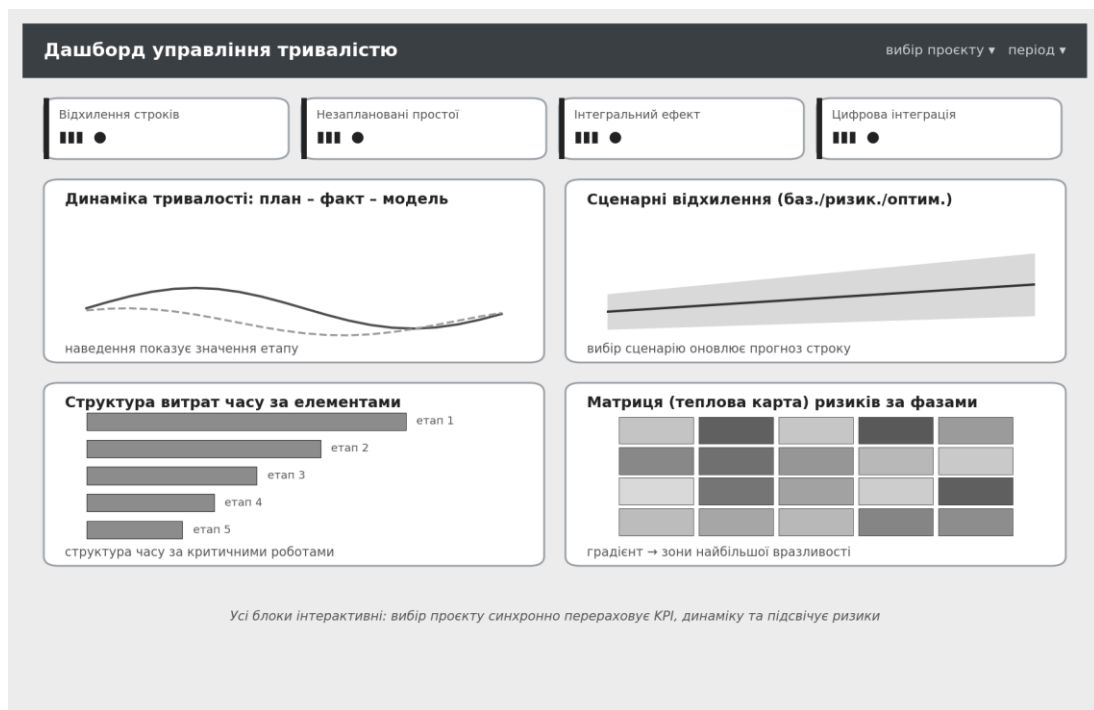


Рис. 4.14. Структура інтерактивного дашборду управління тривалістю будівництва

(розроблено автором)

Ефективність рекомендацій залежить від глибини інтеграції механізмів організаційно-управлінського впливу [111]: систем рейтингування бригад, адаптивних систем преміювання (з прив'язкою до дотримання прогнозних траєкторій), регулярного оцінювання організаційної готовності та швидкого реагування на управлінські відхилення. Зіставлення частки незапланованих простоїв до та після впровадження рекомендацій наведено на рис. 4.15 [2].

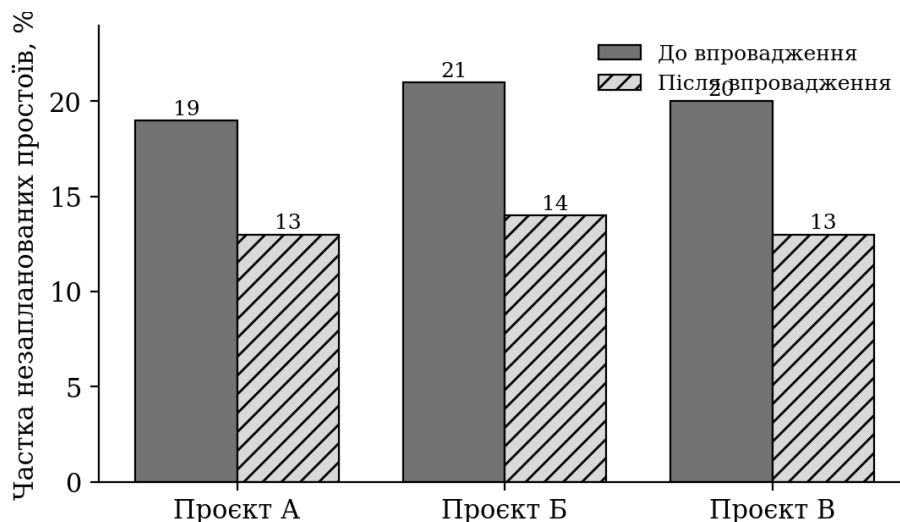


Рис. 4.15. Зниження частки незапланованих простоїв після впровадження управлінських рекомендацій (розроблено автором)

Окремим напрямом стабілізації строків є соціально-екологічна відповідальність: екологічні зауваження, конфлікти з громадськістю, шумові порушення чи збої сертифікації матеріалів часто призводять до зупинок і відтермінувань. Ефективні превентивні інструменти узагальнено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Соціально-екологічні інструменти стабілізації тривалості будівництва
(розроблено автором)

Інструмент	Механізм дії	Ефект
Еко-аудит	Виявлення ризикових зон	Зменшення зупинок
Шумовий моніторинг	Сенсори контролю	Зниження конфліктів
Інформування громади	Цифрові панелі	Підвищення довіри
Сертифікація матеріалів	Контроль виробників	Зменшення переробок

Для об'єднання рекомендацій у логічну цілісність на рис. 4.16 наведено інтегровану модель взаємодії цифрових, управлінських та соціально-екологічних інструментів у межах девелоперської організації.

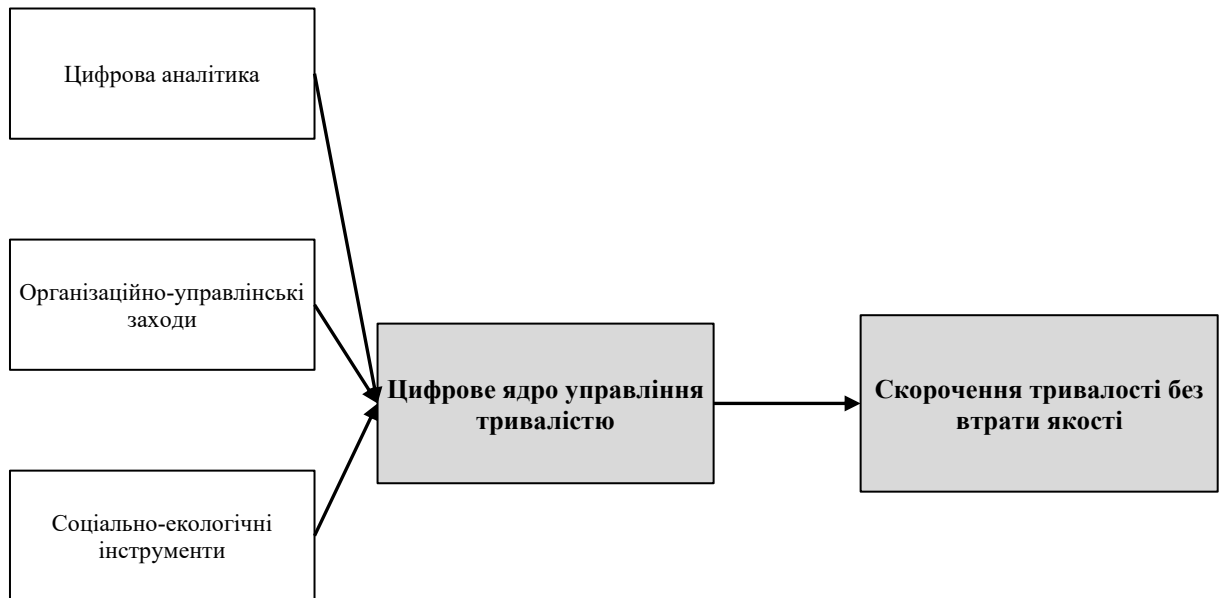


Рис. 4.16. Узагальнена модель інтегрованого управління тривалістю будівництва
(розроблено автором)

Зведений комплекс практичних рекомендацій із зазначенням механізму дії, очікуваного кількісного ефекту та зв'язку з моделями розділів 2–3 наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Комплекс практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва без втрати якості
(розроблено автором)

Напрямок	Інструмент	Механізм / очікуваний ефект	Зв'язок з розділами 2–3
Цифрове прогнозування	LSTM + Монте-Карло	точність прогнозу MAPE 6,2 → 3,1 %	п. 2.2–2.3; 3.2 (ф-ли 2.14–2.22)
Ризикове ранжування	ITRI, аналіз чутливості	пріоритезація критичних робіт	п. 2.1 (АНР, ITRI)
Обґрунтування буфера	TRE / F-index	надійність дотримання строку 90 %	п. 2.2 (TRE); ф-ла 2.25
Організаційно-управлінські заходи	рейтингування бригад, координація	–11–14 % непередбачених простоїв	п. 3.3; алгоритм 3.1
Соціально-екологічні інструменти	еко-аудит, моніторинг, сертифікація	–5–12 % ризику зупинок і штрафів	контекст сталого розвитку
Цифровий контроль виконання	дашборди «TimeOpt-MD»	частка етапів у строк 72 → 91 %	п. 4.2 (програмна реалізація)

Упровадження комплексу доцільно здійснювати за таким порядком (методичний припис):

- 1) інтеграція джерел даних у цифрове ядро (журнали робіт, IoT-сенсори, постачання, екомоніторинг) [44];
- 2) ризикове ранжування чинників за 5 групами (п. 1.2) і обчислення ITRI (п. 2.1);
- 3) стохастичне оцінювання строку методом Монте-Карло з урахуванням кореляції (п. 2.2);
- 4) обґрунтування директивного строку та буфера за критеріями TRE і F-index (п. 2.2);
- 5) цифровий контроль виконання через дашборди «TimeOpt-MD» і сценарне коригування графіка (п. 4.2);
- 6) організаційно-управлінські та соціально-екологічні заходи усунення виявлених резервів часу;
- 7) моніторинг фактичних результатів і адаптивне оновлення оцінок (зворотний зв'язок).

Комплексне застосування зазначених заходів на трьох проєктах (п. 4.2) забезпечило зниження середньої похибки прогнозу строку (MAPE) з 6,2 до 3,1 %, зменшення непередбачених простоїв на 11–14 %, підвищення частки вчасно завершених етапів з 72 до 91 % та заданий рівень надійності дотримання строку (90 %) за збереження якості. Наголосимо: скорочення тривалості досягається усуненням організаційних резервів, а розроблений комплекс забезпечує його виявлення, обґрунтування та контроль.

За змістом комплекс реалізує заявлені у вступі задачі та положення наукової новизни: цифровий інструментарій прогнозування («удосконалено»), показники TRE і F-index («дістало подальшого розвитку»), інтеграцію мережевих методів із цифровими на BIM-базисі («дістало подальшого розвитку»), а також практичне значення дисертації.

Практичного значення розроблений комплекс набуває через програмну реалізацію. Систему «TimeOpt-MD» (п. 4.2) розширено набором дашбордів

різного рівня деталізації, що поєднують цифрове сховище даних, аналітичний рушій та модуль сценарного прогнозування із наскрізним рухом інформації — від польових записів і даних сенсорів до стратегічної панелі девелопера.

Головним інструментом верхнього рівня є зведений (стратегічний) дашборд, що консолідує показники строків, ризиків та ефективності портфеля [110] (рис. 4.17): текстовий блок ключових показників (середнє відхилення строків, частка незапланованих простоїв, інтегральний скоригований ефект, рівень цифрової інтеграції); графік динаміки відхилень за рік; стовпчикова діаграма частки дотримання строків за проєктами; теплова карта ризиків за фазами життєвого циклу. Елементи інтерактивні: вибір проєкту автоматично перераховує відповідні показники та підсвічує релевантні зони ризику.

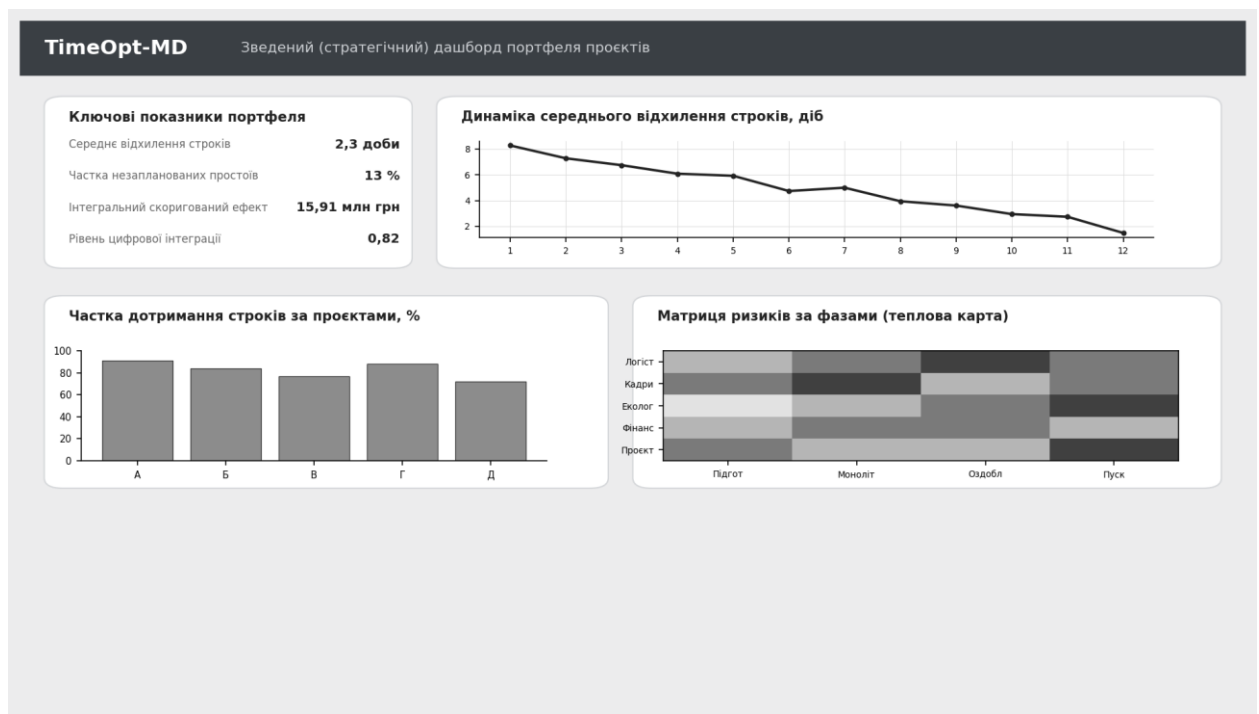


Рис. 4.17. Зведений (стратегічний) дашборд системи цифрового управління тривалістю

(розроблено автором)

Операційний рівень репрезентує панель менеджера окремого проєкту (рис. 4.18): горизонтальна шкала етапів (подібна до спрощеної діаграми Ганта) з відображенням перекриттів і резервів часу; теплова карта завантаженості бригад за днями (виявлення пере- та недозавантаження); графік динаміки індексу організаційно-управлінської готовності керівника проєкту.

Синхронний аналіз цих блоків дозволяє виявляти причинно-наслідкові зв'язки й своєчасно коригувати організацію робіт.

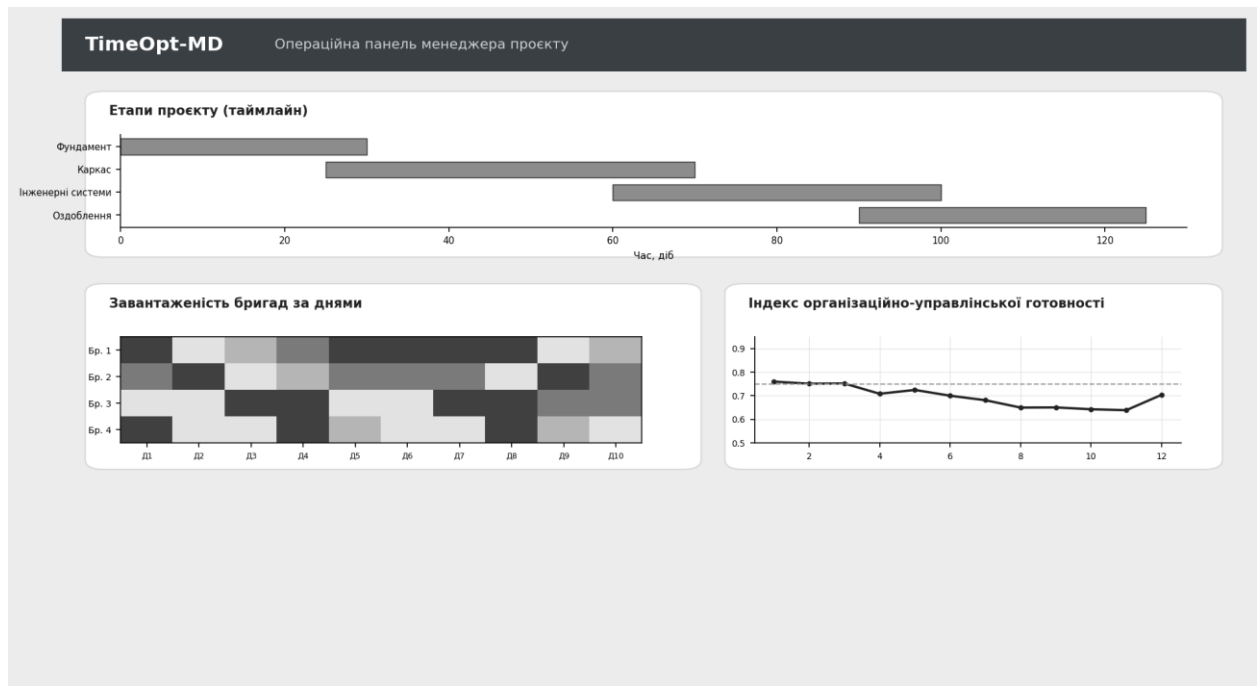


Рис. 4.18. Операційна панель менеджера проекту в системі «TimeOpt-MD»
(розроблено автором)

Запропонована система дашбордів не суперечить, а підсилює класичні методи календарно-мережевого планування: вона не відмовляється від ідеї критичного шляху чи ресурсно-обмежених моделей, а накладає на них організаційно-управлінський, соціально-екологічний і цифровий шар аналізу, наближаючи модель до реальних умов [71]. Управлінські рішення (прискорення чи гальмування робіт, перерозподіл ресурсів, перегляд договірних умов) ухвалюються не постфактум, а на основі прогнозних сигналів, сформованих цифровою моделлю.

Отже, сформований комплекс практичних рекомендацій поєднує цифрову аналітику, організаційно-управлінську стабільність, ресурсну прозорість і соціально-екологічну відповідальність у єдине взаємодоповнювальне середовище. Наголосимо, що стабільне скорочення тривалості досягається організаційно-технологічними та управлінськими заходами, які цифрова система виявляє, прогнозує й підтримує, а не підміною

фізичних параметрів об'єкта розрахунковими ефектами. Цим реалізовано практичне значення дисертації.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі здійснено практичне застосування розробленого науково-прикладного інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва: сформовано адаптивну модель прийняття строкових рішень, виконано її верифікацію на емпіричних даних реального будівельного підприємства та розроблено комплекс практичних рекомендацій із програмною реалізацією. За результатами дослідження сформульовано такі висновки.

1. Розроблений у попередніх розділах інструментарій (класифікація чинників невизначеності, стохастичне оцінювання строку, показники ризиково-часової ефективності та гнучкості) зведено в єдину адаптивну модель прийняття строкових рішень, придатну до застосування в реальних організаційно-технологічних умовах. Модель доповнено вимірним індексом організаційно-управлінської готовності та коефіцієнтом організаційно-цифрового коригування, які залишаються у предметному полі організації та технології будівництва.

2. Обґрунтовано, що часові параметри будівництва доцільно розглядати не як фіксовані величини, а як результат взаємодії технічних, організаційно-управлінських, логістичних та цифрових чинників; економічні, соціальні й екологічні виміри враховано як контекст сталого розвитку, що впливає на строкові рішення опосередковано. Це підвищує повноту й обґрунтованість оцінювання строків без виходу за межі спеціальності.

3. Виконано верифікацію цифрової моделі на емпіричних даних реального будівельного підприємства для об'єктів різного функціонального типу. Підтверджено, що модель відтворює фактичну динаміку тривалості з високою точністю, коректно ідентифікує структуру ризикових чинників та відокремлює внесок кожної їх групи, чим доведено достовірність і практичну придатність запропонованого інструментарію.

4. Розраховано інтегральний скоригований ефект застосування моделі за життєвий цикл проєкту, який відображає накопичене зниження непередбачених простоїв і невизначеності управлінських рішень. Показано, що позитивний ефект формується передусім за рахунок організаційно-технологічних заходів, які цифрова система виявляє, прогнозує й контролює, а не внаслідок зміни фізичних параметрів об'єкта методом оцінювання.

5. Сформовано цілісний комплекс практичних рекомендацій щодо скорочення тривалості будівництва без втрати якості, який поєднує цифрову аналітику, організаційно-управлінську стабільність, ресурсну прозорість і соціально-екологічну відповідальність. Запропоновано методичний порядок його впровадження та критерії оцінювання досягнутого ефекту, що надає рекомендаціям характеру завершеного прикладного результату.

6. Розроблено програмну реалізацію інструментарію у вигляді комплексу з набором дашбордів стратегічного та операційного рівнів, який забезпечує наскрізний рух інформації від первинних даних до управлінського рішення. Це реалізує положення наукової новизни щодо цифрового інструментарію прогнозування строків та інтеграції класичних мережевих методів організації будівництва з цифровими інструментами планування.

7. Доведено, що стале скорочення тривалості будівництва досягається лише через системне поєднання цифрової аналітики, організаційної стабільності та ресурсно-екологічної прозорості, а не окремими інструментами. Отримані результати мають прикладний характер, придатні до впровадження у практику девелоперських структур і забезпечують якісно новий рівень прийняття строкових рішень — від реактивного до проактивного, прогнозного управління.

Отримані у розділі результати підтверджують практичне значення дисертації та узгоджуються із заявленими у вступі й анотації положеннями наукової новизни, завершуючи цикл дослідження від теоретико-методичного обґрунтування до практичного впровадження науково-прикладного

інструментарію визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано еволюцію наукових підходів до визначення тривалості будівництва — від нормативно-детермінованих до імовірнісних і цифрових — та узагальнено наявні моделі строкового планування. Установлено, що сучасний методичний арсенал є розвиненим, але фрагментованим: імовірнісне оцінювання строків і цифрове організаційно-технологічне моделювання розвивалися переважно паралельно, без імовірнісного узгодження оцінки тривалості з інвестиційними показниками проєкту, що й визначило напрям дослідження.

2. Уточнено понятійний апарат дослідження: оптимальну тривалість будівництва обґрунтовано трактувати як науково вивірений адаптивний часовий проміжок реалізації будівельно-девелоперського проєкту, що враховує імовірнісний характер впливу організаційних, технологічних, ресурсних, зовнішніх і форс-мажорних чинників, а не як фіксовану нормативну величину.

3. Сформовано наскрізну класифікацію чинників впливу на тривалість реалізації будівельних проєктів за п'ятьма взаємопов'язаними групами (організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні, форс-мажорні) з урахуванням напрямку та ймовірності їх впливу, що дає змогу структуровано ідентифікувати причини відхилень від календарного плану й визначати критичні часові ризики ще на етапі підготовки будівництва.

4. Удосконалено стохастичний підхід до визначення тривалості будівництва, за яким тривалості робіт розглядаються не як фіксовані величини, а як діапазон імовірнісних станів із застосуванням тричленних (PERT) оцінок, методу Монте-Карло, байєсівського оновлення та аналізу чутливості. Це забезпечує перехід від точкових прогнозів до інтервальних оцінок із розподілом імовірностей і дає змогу кількісно оцінювати ймовірність дотримання директивного строку.

5. Сформовано цифровий інструментарій прогнозування строків, реалізований у програмному комплексі «TimeOpt-MD» (підсистеми інтеграції даних, аналітичне ядро та дашборди стратегічного й операційного рівнів), з інтеграцією традиційних мережових моделей організації робіт із BIM-, CDE- та ERP-середовищами; запропоновано спосіб адаптації показників гнучкості (F-index) і ризиково-часової ефективності (TRE-індекс) до задачі визначення оптимальної тривалості.

6. Виконано верифікацію моделі на емпіричних даних житлового комплексу «Montreal House» (м. Київ): імовірнісна модель знизилася середню відносну похибку прогнозу тривалості етапів з $MAPE = 22,2 \%$ (детерміноване планування) до $19,8 \%$ і кількісно відобразила ризик зриву строку (ймовірність завершення в межах проектної тривалості $\approx 8 \%$), коректно локалізуючи критичні за часом етапи. Практичну ефективність підтверджено актами впровадження: скорочення часу коригування календарних рішень на $12,4 \%$, підвищення точності прогнозування тривалості робіт на 16% , зменшення критичних часових відхилень на 13% , скорочення непродуктивних простоїв ресурсів на $10,5 \%$.

7. Розроблено комплекс практичних рекомендацій та інструментів для управлінців і девелоперських структур щодо скорочення тривалості будівництва без втрати якості, який поєднує цифрову аналітику, організаційно-технологічні заходи та ризик-орієнтоване управління строками; рекомендації придатні до впровадження у практику організації, планування та управління будівельними проектами.

8. Підтверджено наукову гіпотезу дослідження: подання тривалості будівництва як імовірнісної величини та інтеграція стохастичного оцінювання строків із мережевими й цифровими моделями підвищують обґрунтованість і надійність строкових рішень. Доведено, що стале скорочення тривалості будівництва досягається лише через системне поєднання цифрової аналітики, організаційно-технологічної надійності та адаптивного управління в умовах невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. AACE International. Recommended Practice No. 57R-09: Integrated Cost and Schedule Risk Analysis Using Risk Drivers and Monte Carlo Simulation of a CPM Model. Morgantown : AACE International, 2019. URL: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_57r-09.pdf (дата звернення: 01.09.2026).
2. Arash M. Karimi, Pieter de Vries, et al. A scenario-planning method for cost estimation using morphological analysis //— Advances in Civil Engineering. — 2019. — Article 4962653. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4962653>
3. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. – Leadership and Management in Engineering, 2011, Vol. 11(3), p. 241–252. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
4. Ballard G., Howell G. Implementing Lean Construction: Understanding and Action. – Lean Construction Institute, 1998. URL: <https://iglc.net/papers/details/46>
5. MacCrimmon K. R., Ryavec C. A. An Analytical Study of the PERT Assumptions. Operations Research. 1964. Vol. 12, no. 1. P. 16–37. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.12.1.16>.
6. Wolny M. Monte Carlo Simulation Analysis of the PERT Method for a Complete Graph with All Activities as Critical. Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series. 2023. No. 186. P. 729–738. DOI: <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.186.52>.
7. AgiBuild: a Scaled Agile Framework for Building Adaptation Projects / P. L. Ng et al. Buildings. 2023. Vol. 13, no. 12. Art. 3019. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13123019>.
8. Artificial Neural Network Model to Predict Final Construction Contract Duration / A. M. Alsugair et al. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 14. Art. 8078. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148078>.

9. Al-Sinan M. A., Bubshait A. A., Aljaroudi Z. Generation of Construction Scheduling through Machine Learning and BIM: a Blueprint. Buildings. 2024. Vol. 14, no. 4. Art. 934. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14040934>.
10. Dasović B., Galić M., Klanšek U. A Survey on Integration of Optimization and Project Management Tools for Sustainable Construction Scheduling // Sustainability. 2020. Vol. 12, № 8, article 3405. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083405>
11. Devaux, S. A. (1999). Total Project Control: A Manager's Guide to Integrated Project Planning, Measuring, and Tracking. New York, NY: Wiley. ISBN 0471328596. Доступно в інтернет-архіві: archive.org/details/totalprojectcont0000deva. URL: <https://archive.org/details/totalprojectcont0000deva>
12. Dikmen I., Birgonul M. T., Anac C., Tah J. H. M., Aouad G. Learning from risks: A tool for post-project risk assessment. – Automation in Construction, 2008. – Vol. 18(1). – P. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.04.008>
13. Reducing Latency in Digital Twins: a Framework for Near-Real-Time Progress and Quality Reporting / Z. Sigmund et al. Buildings. 2026. Vol. 16, no. 7. Art. 1448. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings16071448>.
14. DuPont Company. The Critical Path Method in Construction: технічний звіт. – Wilmington: DuPont Engineering Dept., 1960. – 62 p.
15. Durdyev S., Ismail S., Kandymov N. Structural Equation Model of the Factors Affecting Construction Labor Productivity. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001452)
16. Faremi O.J. et al. Factors Affecting Cost and Time Control in Construction Projects. Lagos Journal of Environmental Studies, 2016. URL: <https://ir.unilag.edu.ng/items/3dd2b409-c968-4b38-b859-800e90ecfd04>
17. Felberbauer, T., Gutjahr, W. J., & Dörner, K. F. (2019). Stochastic project management: Multiple projects with multi-skilled human resources. Journal of Scheduling, 22(3), 271–288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10951-018-0592-y>

18. Fitzsimmons J. P., Lu R., Hong Y., Brilakis I. Construction schedule risk analysis – a hybrid machine learning approach // *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. 2022. Vol. 27. P. 70–93. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.004>
19. Chen L., Lu Q., Han D. A Bayesian-Driven Monte Carlo Approach for Managing Construction Schedule Risks of Infrastructures under Uncertainty. *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 210. Art. 118810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118810>.
20. Jackson E. N., Shanmuga Priya T. Identification and Classification of Construction-Risk Factors for Ghanaian Construction Projects: an Integrated Study with Structural Equation Modelling. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 21. Art. e40397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40397>.
21. Goldratt, E. M. (1997). *Critical Chain: A Business Novel*. Great Barrington, MA: North River Press. ISBN 0-88427-153-6; 978-0884271536. URL: <https://archive.org/details/criticalchain0000gold>
22. Yang I.-T. Using Gaussian Copula to Simulate Repetitive Projects. *Construction Management and Economics*. 2006. Vol. 24, no. 9. P. 901–909. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446190600658784>.
23. Hatefi, S. M., & Tamošaitienė, J. «Construction Projects Assessment Based on the Sustainable Development Criteria by an Integrated Fuzzy AHP and Improved GRA Model». *Sustainability*, 2018, 10(4), 991. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10040991>
24. Ökmen Ö., Öztaş A. Construction Project Network Evaluation with Correlated Schedule Risk Analysis Model. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2008. Vol. 134, no. 1. P. 49–63. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:1(49)).
25. Hillson D., Simon P. *Practical Project Risk Management: The ATOM Methodology*. Third Edition. Vienna, VA: Management Concepts, 2020. – 282 p. URL: <https://archive.org/details/practicalproject0000hill>

26. Hovhannisyan V., Zachares P., Grushka-Cockayne Y., Mosca A., Ledezma C. Data-Driven Schedule Risk Forecasting for Construction Mega-Projects. SSRN. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4496119>
27. Hulett D. T. Practical Schedule Risk Analysis. Farnham : Gower Publishing, 2009. 223 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315601885>.
28. Isah M. A., Kim B.-S. Integrating Schedule Risk Analysis with Multi-Skilled Resource Scheduling to Improve Resource-Constrained Project Scheduling Problems // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 2, article 650. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11020650>
29. Jeong H.D., Gransberg D.D., Touran A., Choi K. Bibliography: Determining Construction Contract Time. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/340580018_Bibliography_Determining_Construction_Contract_Time
30. Kelley J. E., Walker M. R. Critical-path planning and scheduling. – Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, 1959. – P. 160–173. DOI: <https://doi.org/10.1145/1460299.1460314>
31. Kerzner H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. – New York: Wiley, 2017. – 1120 p. . URL: <https://www.wiley.com/en-us/Project+Management%3A+A+Systems+Approach+to+Planning%2C+Scheduling%2C+and+Controlling%2C+12th+Edition-p-9781119165361>
32. Khahro S. H., Shaikh H. H., Zainun N. Y., Sultan B., Khahro Q. H. Delay in decision-making affecting construction projects: a sustainable decision-making model for mega-projects // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No 7. — Article 5872. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15075872>
33. Koskela L. Application of the New Production Philosophy to Construction. – Stanford: Stanford University, 1992. – Technical Report No. 72. . URL: <https://leanconstruction.org/wp-content/uploads/2022/09/application-of-the-new-production-philosophy-to-construction.pdf>

34. Kulkarni V. G., Adlakha V. G. Markov and Markov-Regenerative PERT Networks. Operations Research. 1986. Vol. 34, no. 5. P. 769–781. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.34.5.769>.
35. Liu Z., Ding R., Gong Z., Ejohwomu O. F. Fostering Digitalization of Construction Projects through Integration: A Conceptual Project Governance Model // Buildings. — 2023. — Vol. 13, No. 3. — Article 825. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13030825>
36. Malcolm D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., Fazar W. Malcolm, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., & Fazar, W. "Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation". – Journal of the Operations Research Society of America, 1959. – Vol. 7(5). – P. 646–669. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.7.5.646>
37. McKinsey Global Institute. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. – Research report. – New York: McKinsey & Company, 2017. – 59 p. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
38. Anbari Moghadam M., Bagherpour M., Ghannadpour S. F. Sustainability Assessment in Construction Projects: a Sustainable Earned Value Management Model under Uncertain and Unreliable Conditions. Environment Systems and Decisions. 2024. Vol. 44, no. 1. P. 45–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10669-023-09913-2>.
39. Naveen S. et al. Factors Influencing Time and Cost Overruns in Construction Projects. IJIRSET, 2016. URL: https://www.ijirset.com/upload/2016/april/254_Naveen%20IEEE%20Format_M.pdf
40. Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide). – 6-е вид. – Newtown Square: PMI, 2017. – 756 c. – ISBN 978-1628251845. URL: <https://search.worldcat.org/title/992738971>
41. Radman K., Smith J., Chong H. Y., Zhu L. Digital technologies and data-driven delay management process for construction projects // Frontiers in Built

Environment. — 2022. — Vol. 8. — Article 1029586. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1029586>

42. Remington Rand UNIVAC. Project Planning and Control Using Network Analysis. – New York: Remington Rand Division, 1958. – 49 p.

43. Research on Dynamic Optimization of a Critical Path Based on Stochastic Duration and the Earned Value Method / Cao P., Li D., Cao Z., Huang D., Wang J. (2025). Buildings, 15(8), 1285. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15081285>

44. Review of Big Data Integration in Construction Industry Digitalization / Yousif O.S., Zakaria R.B., Aminudin E., Yahya K., Mohd Sam A.R., Singaram L., Munikanan V., Yahya M.A., Wahi N., Shamsuddin S.M. // Frontiers in Built Environment. — 2021. — Vol. 7. — Article 770496. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.770496>

45. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. – Hoboken: Wiley, 2018. – 688 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119287568>

46. Visartsakul B., Damrianant J. Bridging BIM and Stochastic Simulation: a Conceptual Framework and Illustrative Application. Buildings. 2026. Vol. 16, no. 15. Art. 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings16153012>.

47. Sepasgozar, S. M. E. (2020). Digital Twin and Web-Based Virtual Gaming Technologies for Online Education: A Case of Construction Management and Engineering // Applied Sciences. — Vol. 10, No. 13. — Article 4678. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10134678>

48. Sohali F. S. M., Koulinas G., Xanthopoulos A. Schedule Delay Risk Analysis in Construction Projects with a Simulation-Based Expert System // Buildings. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings10080134>

49. Nguyen T. D., Adhikari S. Advancing Digital Twins for Building Lifecycle Management in Construction: a Systematic Literature Review. Buildings. 2026. Vol. 16, no. 6. Art. 1151. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings16061151>.

50. Straub D., Der Kiureghian A. Bayesian Network Enhanced with Structural Reliability Methods: Application to Infrastructure Systems. Reliability Engineering & System Safety, 2012. – 34 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1203.5985>
51. Sweis, G., Hammad, A.A., & Shboul, A. Delays in construction projects: The case of Jordan. International Journal of Project Management, 26(6), 665–674, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.009>
52. Szafranko E., Harasymiuik J. Modelling of decision processes in construction activity // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12, No 8. — Article 3797. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12083797>
53. Wang S., Feng K., Wang Y. Modeling Performance and Uncertainty of Construction Planning under Deep Uncertainty: a Prediction Interval Approach. Buildings. 2023. Vol. 13, no. 1. Art. 254. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13010254>.
54. Verzuh E. The Fast Forward MBA in Project Management. – 6th ed. – Hoboken: Wiley, 2021. – 544 p. URL: <https://search.worldcat.org/title/918940865>
55. Wang H., Gao F. Research on project schedule optimization model construction and engineering efficiency improvement method // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 2024. Vol. 9, № 1, P. 1–16. URL: <https://doaj.org/article/4f02099e2fc74fc38940a8608b6549cd>
56. Williams T. Modelling Complex Projects. Chichester : John Wiley & Sons, 2002. 276 p. URL: https://openlibrary.org/books/OL18776584M/Modelling_complex_projects (дата звернення: 01.09.2026).
57. Zadeh L. A. "Fuzzy sets". – Journal of Information and Control, 1965. – Vol. 8(3). – P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
58. Prediction of Risk Delay in Construction Projects Using a Hybrid Artificial Intelligence Model / Z. M. Yaseen et al. Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 4. Art. 1514. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12041514>.
59. Абрахамссон, М. Uncertainty in Quantitative Risk Analysis – Characterization and Methods of Treatment. Lund University, 2002. 180 с. URL:

<https://www.semanticscholar.org/paper/f860c4bd2ae5807d21b37b62afe3aff267b7ec1d>

60. Akintoye A. S., MacLeod M. J. Risk analysis and management in construction. *International Journal of Project Management*. 1997. Vol. 15, no. 1. P. 31–38. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00035-X).

61. Ансофф, І. І. *Corporate Strategy*. New York : McGraw-Hill, 1965. 270 с. URL: https://openlibrary.org/books/OL20946177M/Corporate_strategy

62. Багряк, С. А. Особливості розробки конкурентної стратегії: магістерська робота / С. А. Багряк. — Київ : Національний університет «Києво-Могилянська академія», 2023. — 86 с. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/server/api/core/bitstreams/d2cadb74-cc5a-46ef-a963-c155ea56ce09/content>

63. Балдук Г.П. Моделі і методи прийняття рішень в управлінні інвестиційно-будівельними проектами / Дис... К-ть наук – ОДАБА, 2020. URL: https://onmu.org.ua/spec_rada/Balduk/Balduk_dis1.pdf

64. Бастраков, І. Д. Система керування проектами розробки програм на основі веб-технологій : дипломна робота / І. Д. Бастраков. – Київ : НТУУ «КПІ», 2024. – 58 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f218d025-f3f4-4a2d-8bc7-59c17ddcde63/content>

65. Бганцев, М. В. Дослідження методів оцінки та прогнозування результативності ІТ-проектів систем налагодження взаємовідносин з клієнтами : кваліфікаційна робота магістранта / М. В. Бганцев. – Харків : Харківський національний університет радіоелектроніки, 2025. – 62 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/b5114103-bec4-47c3-bb94-8d2753a9c1af/content>

66. Блонний А. Конструювання моделей оцінки тривалості виконання проектів із застосуванням стохастичних та ймовірнісних підходів для прогнозування та аналізу ризиків. *Містобудування та територіальне планування*, 2026, 91, 366–379. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.91.366-379>

67. Блонний А. Еволюція уявлень про тривалість будівельного процесу: від нормативних підходів до інтегрованих моделей проєктного планування. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 56(2), 144–155. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).144-155](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).144-155)

68. Блонний А., Зінков О. Особливості управління параметрами будівельних проєктів з використання збірного залізобетону. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 55(2), 182–188. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).182-188](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).182-188)

69. Блонний А. Аналіз невизначеності як чинника впливу на хронологічну структуру реалізації будівельних проєктів. Просторовий розвиток, 2025, 15, 272–283. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.272-283>

70. Блонний А. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2024, 54(2), 200–213. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).200-213](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).200-213)

71. Блонний А., Горбач М. Інтеграція ризик-орієнтованого планування у прогнозування строків реалізації будівельних проєктів в умовах економічної нестабільності. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2022, 49(2), 293–304. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).293-304](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).293-304)

72. Bayram S. Duration prediction models for construction projects: in terms of cost or physical characteristics? KSCE Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 21, no. 6. P. 2049–2060. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0691-2>.

73. Білецький, І. В. Державне регулювання розвитку будівельного сектору житлової нерухомості в Україні : дис. ... д-ра екон. наук за спец. 08.00.03 – економіка та управління національним господарством / І. В. Білецький. – Одеса : Одеський національний технологічний університет, 2023. URL: <https://ontu.edu.ua/download/dissertation/disser/2023/Disser-Biletsky-2.pdf>

74. Боровська, Т. М. Основи теорії управління та дослідження операцій : навч. посіб. / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 242 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LANZ/Borovska_2008_242.pdf

75. Галунька О. Д. Система управління інноваційним розвитком будівельного підприємства : дис. ... докт. філос. / О. Д. Галунька. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2025. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/03/dysertacziya-galunky-o.d.-na-sajt.pdf>

76. Голдратт Е. М. Критичний ланцюг: новий підхід до управління проєктами: монографія / Е. М. Голдратт; пер. з англ. – К.: Міжнародні економічні відносини, 2008. – 288 с. – ISBN 978-966-206-423-2.

77. A Multi-Criteria Decision-Making Model for Selecting the Best Project Delivery Systems for Offsite Construction Projects / M. Assaf et al. Buildings. 2023. Vol. 13, no. 2. Art. 571. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13020571>.

78. Група компаній «Моноліт». Офіційний сайт. URL: <https://gkmonolit.ua/uk/development/>

79. Гудзь, П. В., & Шарова, С. В. Теорія і практика розвитку ринку нерухомості регіону : монографія / П. В. Гудзь, С. В. Шарова. – Запоріжжя : Акцент Інвест-трейд, 2014. – 246 с. URL: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/79123480-2284-41c3-8571-b64efa1c05c8/content>

80. Данченко О. Б., Занора В. О. Проєктний менеджмент: управління ризиками та змінами в процесі прийняття управлінських рішень : монографія / О. Б. Данченко, В. О. Занора. – Черкаси : ПП Чабаненко Ю.А., 2019. – 278 с. URL: https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1235/1/Монографія_Данченко_Занора.pdf

81. Довгань Л.Є., Мохонько Г.А., Малик І.П. Управління проєктами : навч. посіб. / Л.Є. Довгань, Г.А. Мохонько, І.П. Малик. – Київ : НТУУ «КПІ»,

2017. – 420 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/a0c480b8-fd0e-43c9-8d85-a2b05c62fdbc>

82. Журавель, С. С. **Методи та моделі підвищення ефективності функціонування розподілених сервісних систем : дис. на здобуття наукового ступеня доктора філософії : 172 — телекомунікації та радіотехніка / Станіслав Сергійович Журавель ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2025. – 186 с. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2025/radaphd/32065/phd-zhuravel-stanislav.pdf>

83. Зайчук, С. В. Економіко-управлінський інструментарій формування господарського портфеля підприємства-девелопера в будівництві : дис. ... канд. екон. наук за спец. 08.00.04 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності) / С. В. Зайчук. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024. – [276 с.]. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/11/dys_zajchuk-sv_sajt.pdf

84. Кабанцева Л. М. Методи оцінювання часових ризиків у будівництві. – Економіка та держава, 2019. – № 5. – С. 66–69. URL: http://www.economy.in.ua/pdf/5_2019/17.pdf

85. Construction Project Scheduling with Time, Cost, and Material Restrictions Using Fuzzy Mathematical Models and Critical Path Method / D. Castro-Lacouture et al. Journal of Construction Engineering and Management. 2009. Vol. 135, no. 10. P. 1096–1104. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2009\)135:10\(1096\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(1096)).

86. Кейнс, Дж. М. A Treatise on Probability. London : Macmillan, 1921. 272 с. URL: https://archive.org/details/treatiseonprobab00keyn_0

87. Кейнс, Дж. М. The General Theory of Employment, Interest and Money. London : Macmillan, 1936. 460 с. URL: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.50092>

88. Kerzner H. Project Management: a Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. 13th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2022. 848 p.

URL: <https://www.wiley.com/en-us/Project+Management%3A+A+Systems+Approach+to+Planning%2C+Scheduling%2C+and+Controlling%2C+13th+Edition-p-9781119805373> (дата звернення: 01.09.2026).

89. Керцнер Г. Управління проєктами: системний підхід до планування, розкладу та контролю: монографія / Г. Керцнер; пер. з англ. – К.: Кондор, 2010. – 1088 с. – ISBN 978-966-351-268-1.

90. Київська міська рада. Концепція інтегрованого розвитку Подільський район м. Києва — Київ : «Інтегрований розвиток міст в Україні», GIZ-проєкт, 2022. — 238 с. URL: https://kmr.gov.ua/sites/default/files/3765-22_propoz.pdf

91. Колективна монографія / За наук. редакцією Квасній Л.Г., Татомир І.Л. (ред.) «Особливості соціально-економічного поступу національної економіки в умовах інформаційно-технологічних викликів» : колективна монографія / [За наук. ред. Квасній Л.Г., Татомир І.Л.] – Трускавець : Посвіт, 2020. – 338 с. – ISBN 978-617-7835-69-0. URL: https://truskavets.maup.com.ua/wp-content/uploads/2020/06/Kolekt-monograf_-PI-MAUP-2020-pdf.pdf

92. Кричевська, Ю. В. **Економіко-управлінська оцінка операційної системи підприємств-стейкхолдерів будівництва : дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук : спец. 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)» / Ю. В. Кричевська. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2025. – 294 с. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/05/dysertacziya-krychevska_sajt_z-dodatkamyy.pdf

93. Купер, Д., Чепмен, Кр. Risk Analysis for Large Projects : Models, Methods and Cases. New York : Wiley, 1987. 312 с.

94. Лобунець Т. В. Конспект лекцій з дисципліни «Основи бізнес-проектування» : для студентів спеціальності 073 «Менеджмент» факультету аграрного менеджменту / Т. В. Лобунець. – Київ : Вид. центр

НУБіП України, 2017. – 150 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u282/2017_lobunec_konspekt_lekciy_obp.pdf

95. Investigation of Project Delays: Towards a Sustainable Construction Industry / A. H. Memon et al. Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 2. Art. 1457. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021457>.

96. Baraka H., Kotb M. H., Abu Dief M. I. Risk in the Construction Industry. PM World Journal. 2019. Vol. 8, iss. 4. URL: <https://pmworldjournal.com/article/risk-in-the-construction-industry> (дата звернення: 01.09.2026).

97. Найт, Ф. Г. Risk, Uncertainty and Profit. Boston, MA : Houghton Mifflin Co., 1921. 381 с. URL: <https://www.econlib.org/library/Knight/knRUP.html>

98. Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова. Управління проектами: проєктний підхід в сучасному менеджменті : матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції, 20-21 жовтня 2022 р., м. Одеса / ред. А. В. Ковров. – Одеса : ОДАБА, 2022. – 197 с. – ISBN 978-617-7900-69-5. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/Konferentsiya_UP_2022.pdf

99. Організація будівництва: теоретичні й технологічні питання / Підручник. – К.: КП “ІСТ”, 2008. URL: <https://kipt.com.ua/wp-content/uploads/2018/11/Організація-будівництва.pdf>

100. Осецький В., Камінський А., Куліш В. Системний характер інституційних перетворень структурної політики інноваційного розвитку економіки України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Економіка. 2024. № 2 (225). С. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2667.2024/225-2/5>.

101. Перрі, Дж. Г., Гейс, Р. В. Risk and Its Management in Construction Projects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part I. 1985. Vol. 78, № 3, pp. 499–521. DOI: <https://doi.org/10.1680/iicep.1985.859>

102. Пінчук М. О. Застосування штучного інтелекту для прогнозування ринкової вартості житла : магістр-ська дис. / М. О. Пінчук. – Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2024. – 68 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c52299ad-e15b-4b6a-9533-38f395ce9961/content>

103. Sebestyén Z., Alfrehat D. A construction-specific extension to a standard project risk management process. Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal. 2022. Vol. 14, no. 1. P. 2666–2674. DOI: <https://doi.org/10.2478/otmcj-2022-0011>.

104. Ткаченко, Д. В. Використання машинного навчання для створення алгоритмів передбачення споживчого попиту і оптимізації запасів в роздрібних мережах : дипломна робота / Д. В. Ткаченко. – Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2024. – 81 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bead23c2-95b5-4d9b-8c54-e2224c0f6114/content>

105. Укладач: В. Д. Кишенько. Ідентифікація та моделювання об'єктів автоматизації : конспект лекцій / В. Д. Кишенько. – Київ : Національний університет харчових технологій, 2007. – 102 с. URL: <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/63663>

106. Фазі-логічні підходи до оцінки ризику. A fuzzy approach to construction project risk assessment. International Journal of Project Management, 2010. Vol. 28. pp. 68–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.02.002>

107. El-Rayes K., Kandil A. Time-Cost-Quality Trade-Off Analysis for Highway Construction. Journal of Construction Engineering and Management. 2005. Vol. 131, no. 4. P. 477–486. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:4\(477\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:4(477)).

108. Чепмен, Кр., Ворд, Ст. Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights. 2-е вид. Chichester : John Wiley & Sons, 2003. 374 с.

URL: <https://www.wiley.com/en-us/Project+Risk+Management%3A+Processes%2C+Techniques+and+Insights%2C+2nd+Edition-p-9781118585207>

109. Чжі, Х. Risk management for overseas construction projects. International Journal of Project Management, 1995. Vol. 13, № 4. pp. 231–237. DOI: [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(95\)00015-I](https://doi.org/10.1016/0263-7863(95)00015-I)

110. Чубук, Л. П. Стратегічне управління нерухомим майном підприємств : дис. ... д-ра екон. наук за спец. 08.00.04 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності) / Л. П. Чубук. – Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2021.

URL: https://scc.knu.ua/upload/iblock/bd9/1wdmj0wppdn4vuk5vk6ytcivodhjyvjv5/dis_Чубук_Л.П..pdf

111. Шандрик, В. І. Трансформація публічного управління будівельною галуззю на засадах цифровізації : дис. ... д-ра держ. упр. за спец. 25.00.02 «Механізми державного управління» / В. І. Шандрик. – Київ, 2024. URL: <https://er.kai.edu.ua/items/84d2da13-2515-463d-b79d-6dda4ece04f0>

112. Шевченко А. Ю. Імовірнісне оцінювання тривалості будівельних процесів у моделі PERT. – Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2020. – № 1. – С. 112–118. URL: <https://pgasa.dp.ua/files/scientific-works/visnyk-2020-1.pdf>

113. Шелестовський, О. В. «Сучасний менеджмент : моделі, стратегії, технології» – Київ, 2023. – 221 с. URL: https://economics.net.ua/files/science/suchasnyy_men/2023/SM_2023.pdf

114. Taroun A., Yang J.-B., Lowe D. Construction Risk Modelling and Assessment: Insights from a Literature Review. The Built & Human Environment Review. 2011. Vol. 4, spec. iss. 1. P. 87–97. URL: <https://researchportal.hw.ac.uk/en/publications/construction-risk-modelling-and-assessment-insights-from-a-litera> (дата звернення: 01.09.2026).

115. Van Slyke R. M. Letter to the Editor — Monte Carlo Methods and the PERT Problem. *Operations Research*. 1963. Vol. 11, No. 5. P. 839–860. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.11.5.839>.
116. Lu M., AbouRizk S. M. Simplified CPM/PERT Simulation Model. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2000. Vol. 126, No. 3. P. 219–226. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2000\)126:3\(219\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:3(219)).
117. Hajdu M., Bokor O. Sensitivity analysis in PERT networks: Does activity duration distribution matter? *Automation in Construction*. 2016. Vol. 65. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.01.003>.
118. Chanas S., Kamburowski J. The use of fuzzy variables in PERT. *Fuzzy Sets and Systems*. 1981. Vol. 5, No. 1. P. 11–19. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(81\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(81)90030-0).
119. Sadeghi N., Fayek A. R., Pedrycz W. Fuzzy Monte Carlo Simulation and Risk Assessment in Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2010. Vol. 25, No. 4. P. 238–252. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00632.x>.
120. Nasir D., McCabe B., Hartono L. Evaluating Risk in Construction—Schedule Model (ERIC–S): Construction Schedule Risk Model. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2003. Vol. 129, No. 5. P. 518–527. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:5\(518\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:5(518)).
121. Chen L., Lu Q., Li S., He W., Yang J. Bayesian Monte Carlo Simulation–Driven Approach for Construction Schedule Risk Inference. *Journal of Management in Engineering*. 2021. Vol. 37, No. 2. Art. 04020115. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000884](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000884).
122. Koo B., Fischer M. Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2000. Vol. 126, No. 4. P. 251–260. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2000\)126:4\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:4(251)).

123. Sloot R. N. F., Heutink A., Voordijk J. T. Assessing usefulness of 4D BIM tools in risk mitigation strategies. *Automation in Construction*. 2019. Vol. 106. Art. 102881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102881>.
124. Організація будівництва : підручник / С. А. Ушацький, Ю. П. Шейко, Г. М. Тригер та ін. ; за ред. С. А. Ушацького. Київ : Кондор, 2007. 521 с.
125. Організація та управління будівництвом : підручник / за заг. ред. О. А. Тугая. Київ : Ліра-К, 2024. 400 с. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/01/pidruchnyk-oub-dlya-sajta.pdf>.
126. Тугай О. А., Іванейко І. Д., Дубинка О. В., Шебек М. О., Іванейко М. М. Вплив періоду згортання потоків у промисловому будівництві без застосування додаткового трудового ресурсу. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2023. Вип. 52, ч. 1. С. 171–180. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(1\).171-180](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1).171-180).
127. Млодецький В. Р. Ентропійна оцінка якості управління. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2015. № 4. С. 33–40. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/45034>.
128. Заяць Є. І., Млодецький В. Р., Ткач Т. В., Мартиш О. О. Методи забезпечення управлінської реалізованості календарних планів зведення об'єктів будівництва : монографія. Дніпро : Акцент ПП, 2019. 148 с.
129. Заяць Є. І., Дадіверіна Л. М., Мартиш А. А. Фактори виникнення відмов у процесі будівництва. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2018. № 3. С. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.29.193>.
130. Мартиш О. О., Мартиш О. П., Павлов Ф. І., Полтавець М. О. Аналіз організаційно-технологічної надійності на рівні визначення часових параметрів календарного плану. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2019. № 2. С. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.280519.21.431>.

131. Meneylyuk O., Nikiforov A., Meneylyuk I. Transport construction cost management by rational organizational and technological solutions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, No. 3 (105). P. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205117>.

132. Науменко К. Алгоритмічне моделювання та верифікація методів визначення тривалості інженерної підготовки будівництва в умовах типових і нетипових проєктних конфігурацій. *Просторовий розвиток*. 2026. Вип. 17. С. 260–272. URL: <https://spd.knuba.edu.ua/article/view/367817>.

133. Штиль А. М., Блонний А. В. Управління відновленням житлового фонду на основі сталого розвитку та науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності на основі наукового процесу. *Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнародної конференції, 12 листопада 2025 р. Київ : Видавництво Ліра-К, 2026. С. 796–797. ISBN 978-617-520-492-4.*

134. Блонний А. В. Формування моделей визначення тривалості процесів із застосуванням стохастичних та ймовірнісних методів. *Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів : матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 04 червня 2026 р. Секція 4 «Стратегічні орієнтири забезпечення функціонування бізнесу». Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 226–227.*

135. Єдина державна електронна система у сфері будівництва: дозвіл на виконання будівельних робіт ІУ 113190460673 від 15.02.2019 (зі змінами ІУ 123193572485 від 23.12.2019); містобудівні умови та обмеження від 02.01.2018 № 10.

136. Публічна кадастрова карта України: земельна ділянка 80000000000:79:025:0050, площа 0,5092 га.

137. Офіційні матеріали забудовника та фотозвіти про хід будівництва об'єкта за 2019–2026 рр.

138. Спеціалізовані інформаційно-аналітичні ресурси ринку нерухомості (LUN, DOM.RIA, Нерухомі, BILD) – технічні характеристики, стан готовності та цінові параметри об'єкта.

139. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила визначення вартості будівництва; ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва – укрупнені показники вартості та трудомісткості для розрахункових значень.

140. Бушуєв С. Д., Сукач С. В., Бушуєва В. Б. Надихаючий менеджмент інноваційних проєктів. Управління розвитком складних систем. 2022. № 51. С. 12–19. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.12-19>.

141. Chupryna Yu., Petrenko H., Hrynenko I., Nikolaieva M., Pokolenko V., Savchuk T. Methodological Regulation and Analytical-Information Support of Process-Oriented Management in the Modern System of Construction Development. Управління розвитком складних систем. 2021. № 48. С. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.48.125-134>.

142. Zeltser R. Ya., Bielienskova O. Yu., Novak Ye., Dubinin D. V. Digital Transformation of Resource Logistics and Organizational and Structural Support of Construction. Science and Innovation. 2019. Vol. 15, № 5. P. 38–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine15.05.034>.

143. Ryzhakova G., Pereli D., Wan Yuytao, Kushnir O., Herhi M., Fedorova Ya. Modeling and Forecast-Analytical Assessment of Structural-Transformational Changes in the Digitalized Operational System of Developer Enterprises. Просторовий розвиток. 2025. Вип. 12. С. 66–77. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.12.66-77>.

144. Тесля Ю. М., Латишева Т. В. Розробка концептуальних основ матричного управління портфелем проєктів і програм. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. Т. 1, № 3 (79). С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.61153>.

145. Горда О. В., Цюцюра С. В., Лященко Т. О. Cognitive elements of information environments. Управління розвитком складних систем. 2022. № 51. С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.49-57>.

ДОДАТКИ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1. Блонний А. Конструювання моделей оцінки тривалості виконання проєктів із застосуванням стохастичних та ймовірнісних підходів для прогнозування та аналізу ризиків. Містобудування та територіальне планування, 2026, 91, 366–379. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2026.91.366-379>. URL: <https://mtp.knuba.edu.ua/article/view/363186>.
2. Блонний А. Еволюція уявлень про тривалість будівельного процесу: від нормативних підходів до інтегрованих моделей проєктного планування. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 56(2), 144–155. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).144-155](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).144-155). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/348061>.
3. Блонний А., Зінков О. Особливості управління параметрами будівельних проєктів з використання збірного залізобетону. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2025, 55(2), 182–188. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).182-188](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).182-188). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/336011>.
4. Блонний А. Аналіз невизначеності як чинника впливу на хронологічну структуру реалізації будівельних проєктів. Просторовий розвиток, 2025, 15, 272–283. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.272-283>. URL: <https://spd.knuba.edu.ua/article/view/366926>.
5. Блонний А. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2024, 54(2), 200–213. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).200-213](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).200-213). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/341397>.
6. Блонний А., Горбач М. Інтеграція ризик-орієнтованого планування у прогнозування строків реалізації будівельних проєктів в умовах економічної

нестабільності. Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2022, 49(2), 293–304. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).293-304](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).293-304). URL: <https://ways.knuba.edu.ua/article/view/342153>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях:

7. Штиль А. М., Блонний А. В. Управління відновленням житлового фонду на основі сталого розвитку та науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності на основі наукового процесу. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнародної конференції, 12 листопада 2025 р. Київ : Видавництво Ліра-К, 2026. С. 796–797. ISBN 978-617-520-492-4. DOI не присвоєно. Електронний ресурс збірників серії: <https://repository.knuba.edu.ua/communities/cd8c191e-f63b-414f-9a46-ed50fed3862e>.

8. Блонний А. В. Формування моделей визначення тривалості процесів із застосуванням стохастичних та ймовірнісних методів. Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів : матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 04 червня 2026 р. Секція 4 «Стратегічні орієнтири забезпечення функціонування бізнесу». Житомир : Поліський національний університет, 2026. С. 226–227. DOI не присвоєно. Інституційний репозитарій: <http://ir.polissiauniver.edu.ua/>.

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
"МАРСТОН-ГРУП"**

№24-1 від 20.03.2026

*Голові разової спеціалізованої вченої
ради в КНУБА*

ДОВІДКА

про науково-прикладні переваги впровадження результатів дисертаційного дослідження Блонного Андрія Володимировича на тему: «Науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності» у практику діяльності компанії «Марстон-груп»

У процесі співпраці із здобувачем КНУБА Блонним Андрієм Володимировичем підприємством відзначено високий рівень його фахової підготовки та практичну спрямованість наукових розробок у сфері організації й управління будівництвом. Запропонований ним науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва продемонстрував доцільність використання для вдосконалення календарного та ресурсного планування будівельних проектів. За результатами співпраці підтверджено практичну цінність розроблених методичних і аналітичних підходів для діяльності підприємства. Підприємство вважає доцільним подальше впровадження та використання наукового доробку здобувача у практиці організації та управління будівельними проектами.

Практична цінність результатів дисертації полягає у формуванні науково-прикладного інструментарію, який дозволяє перейти від традиційного детермінованого встановлення строків будівництва до адаптивного визначення оптимальної тривалості з урахуванням імовірнісного характеру впливу організаційних, технологічних, ресурсних, зовнішніх та форс-мажорних чинників. Такий підхід є особливо актуальним для сучасних будівельних і девелоперських проектів, у яких коливання ресурсного забезпечення, зміни логістичних умов, технологічні відхилення та зовнішні ризики безпосередньо впливають на виконання календарних планів.

Суттєву практичну перевагу становить запропоноване автором інтегроване трактування оптимальної тривалості будівництва як адаптивного часового інтервалу реалізації будівельного проекту, сформованого на основі комплексного врахування внутрішніх і зовнішніх детермінант та результатів стохастичного прогнозування. Використання такого підходу у практичній діяльності підприємства створює можливість визначати не лише планову дату завершення

будівництва, а й діапазон можливих строків реалізації проєкту, імовірність їх досягнення та потенційні часові відхилення, що підвищує надійність організаційно-технологічних рішень.

Важливе прикладне значення має удосконалена класифікація чинників впливу на тривалість будівельних проєктів, у межах якої систематизовано організаційні, технологічні, ресурсні, зовнішні та форс-мажорні фактори з урахуванням інтенсивності, напряду та ймовірності їх впливу на строковий профіль проєкту. Її практичне застосування дозволяє структуровано ідентифікувати потенційні причини відхилення від календарного плану, визначати критичні фактори часових ризиків та формувати відповідні заходи реагування ще на етапах підготовки та планування будівництва.

Особливу науково-прикладну цінність для будівельного підприємства становить удосконалений стохастичний підхід до визначення тривалості будівництва, який враховує імовірнісні відхилення ресурсного забезпечення, варіативність технологічних процесів та ризикові впливи зовнішнього середовища. На відміну від фіксованого календарного показника, запропонований підхід дозволяє сформувати систему альтернативних часових сценаріїв і оцінити ймовірність їх реалізації. Це створює передумови для підвищення обґрунтованості рішень щодо резервування часу, ресурсів та виробничих потужностей.

Практичний інтерес становить поєднання багатофакторного аналізу та імовірнісного моделювання для оцінювання часових параметрів будівельного проєкту. Застосування такого підходу дозволяє враховувати взаємозалежність основних організаційно-технологічних параметрів, здійснювати порівняння альтернативних календарних рішень та визначати найбільш прийнятний часовий сценарій з урахуванням рівня ризику. Для підприємства це забезпечує підвищення достовірності календарно-ресурсного планування та зменшення ймовірності виникнення критичних відхилень від установлених строків.

Високу прикладну цінність має науково-методичний підхід до формування цифрового інструментарію прогнозування тривалості будівництва, що передбачає використання методів Монте-Карло, аналізу чутливості та ризикового ранжування. Зазначений інструментарій дозволяє моделювати значну кількість можливих варіантів розвитку будівельного процесу, визначати найбільш впливові фактори часових відхилень та формувати альтернативні календарні плани. Практичне застосування такого підходу сприяє підвищенню оперативності підготовки управлінських рішень і зменшенню залежності результатів планування від суб'єктивних оцінок.

Суттєвою перевагою дисертаційних результатів є інтеграція традиційних мережевих методів організації будівництва з цифровими засобами планування та BIM-орієнтованим моделюванням. Запропоноване поєднання графоаналітичного і

параметричного інструментарію створює можливість візуалізувати технологічні взаємозв'язки між роботами, моделювати наслідки зміни окремих параметрів та оцінювати їх вплив на загальну тривалість реалізації проекту. Для практики будівельного підприємства це забезпечує підвищення прозорості календарного планування, координації робіт та оперативності реагування на зміни організаційно-технологічних умов.

Впровадження розробленого Блонним А.В. науково-прикладного інструментарію у діяльність може бути здійснене під час підготовки та супроводу будівельних і девелоперських проектів шляхом його використання для аналізу вихідних календарних параметрів, моделювання альтернативних сценаріїв, оцінювання часових ризиків, визначення резервів тривалості та оперативного коригування календарно-ресурсних планів. Застосування запропонованих підходів забезпечує системне поєднання організаційно-технологічного, імовірнісного та цифрового аналізу тривалості будівництва.

За результатами впровадження запропонованих підходів забезпечено скорочення тривалості підготовки та коригування календарних планів на 17%, підвищення точності прогнозування строків виконання будівельних робіт на 16%, зниження кількості критичних часових відхилень на 13%, а також підвищення оперативності реагування на зміни ресурсного та організаційно-технологічного характеру на 19%. Зазначені результати свідчать про доцільність використання запропонованого інструментарію для підвищення надійності строкових рішень та ефективності організації будівельного виробництва.

Застосування розроблених підходів також створює передумови для зниження ризику порушення договірних строків, раціоналізації використання трудових, матеріальних і технічних ресурсів, скорочення непродуктивних простоїв та підвищення узгодженості дій учасників будівельного проекту. В умовах реалізації складних інвестиційно-будівельних та відновлювальних проектів це має безпосереднє значення для забезпечення ритмічності будівельного виробництва, дотримання календарних зобов'язань та підвищення загальної функціонально-технічної та організаційно-управлінської ефективності діяльності будівельної компанії.

Директор



Міронов О.О.



Публічне акціонерне товариство КИЇВЗДРАВРЕКОНСТРУКЦІЯ

Вих. №_33-1 від 12.02.2026

Інформація про результати науково-прикладної співпраці зі здобувачем КНУБА Блонного А.В. з ПАТ «Київздравреконструкція»

Фахівці підприємства, ознайомившись із результатами дисертаційного дослідження Блонного Андрія Володимировича на тему «Науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності», відзначають їх актуальність для вдосконалення організації будівельних процесів та підвищення обґрунтованості управлінських рішень у сучасному будівництві. Запропоновані здобувачем підходи мають прикладну спрямованість і можуть бути використані для коригування календарних моделей, уточнення строкових параметрів та оперативного реагування на зміни виробничого середовища.

Практичний інтерес для компанії становить можливість уточнювати заплановані строки безпосередньо в процесі виконання будівельних робіт, виходячи з фактичного стану виробничого циклу. Запропонований підхід дає змогу пов'язати календарні рішення з реальною забезпеченістю об'єкта матеріалами, технікою і трудовими ресурсами, особливостями технологічних операцій, логістичними ситуаціями та змінами умов виконання робіт. Це створює основу для своєчасного перегляду послідовності операцій і коригування строків до того, як виявлені відхилення трансформуються у суттєве порушення графіка. У роботі запропоновано цифрову мережеву модель, яка розширює можливості традиційного календарного планування. Її особливістю є можливість розглядати строк виконання робіт не як одне наперед задане значення, а як сукупність імовірнісних сценаріїв, що можуть змінюватися залежно від поточного стану проекту. Така постановка задачі дозволяє своєчасно виявляти потенційні відхилення, визначати критичні ділянки будівельного процесу та обирати доцільний варіант організації робіт.

Підприємство вважає перспективним запропоноване поєднання мережевого моделювання, стохастичних розрахунків, сценарного аналізу, BIM-технологій та прогнозних алгоритмів. Застосування методів Монте-Карло, байєсівського оновлення та LSTM-прогнозування створює передумови для переходу від реагування на вже виниклі порушення графіка до їх попереднього прогнозування. Практично це може бути використано при оперативному перегляді календарних планів, оцінюванні наслідків зміни ресурсного забезпечення та виборі найбільш стійких сценаріїв реалізації будівельних проектів.

Окремий інтерес для підприємства становить запропонована здобувачем модель визначення оптимальної тривалості без втрати якості. Її практична ідея полягає у пошуку такого строку виконання робіт, за якого скорочення часу не супроводжується неприйнятним погіршенням якості. Це дозволяє врахувати характерний для будівництва trade-off між швидкістю виконання, ресурсними витратами та якістю результату. Відповідно, управлінське рішення орієнтується не на механічне скорочення календарного строку, а на пошук раціонального співвідношення між часом та якістю. Заслугує уваги і можливість використання результатів дослідження для цифрового супроводу будівельного проєкту. Інтеграція календарних даних із BIM-, CDE- та ERP-середовищами дозволяє поєднувати інформацію про хід робіт із ресурсними, технологічними та організаційними параметрами. У такому форматі цифрова модель може виконувати не лише функцію планування, а й функцію аналітичного контролю та підтримки оперативних рішень. Проведена здобувачем апробація підходів на базі реалізованих компанією будівельних проєктів підтверджує можливість практичного використання запропонованих рішень для аналізу фактичної та прогнозованої тривалості будівельних процесів. Отримані результати можуть бути корисними насамперед для проєктів, у яких відхилення строків мають значний вплив на економічні результати та потребують постійного коригування організаційно-технологічних рішень.

З урахуванням викладеного підприємство вважає доцільним подальше використання та адаптацію науково-прикладних результатів Блонного А.В. для удосконалення власних підходів до календарного планування, прогнозування строків та управління ризиками. Найбільш перспективним напрямом є включення запропонованих алгоритмів до цифрових контурів управління будівельними проєктами з метою формування більш гнучких, прогнозно орієнтованих моделей організації будівництва. Таким чином, результати дисертаційної роботи мають практичну спрямованість, відповідають сучасним потребам будівельного виробництва та можуть бути використані як методична й аналітична основа для коригування моделей організації будівництва в складних технологічних, ресурсних та інституційних умовах вітчизняної будівельної галузі.

Заступник директора



Виготовський А.С.

Закрите акціонерне товариство
«УКРАЇНСЬКА АКАДЕМІЯ ІНВЕСТИЦІЙ В НАУКУ І
БУДІВНИЦТВО»

Вих. №87/1 від 12.03.2026

Інформація про впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача
КНУБА
в практику організації діяльності ЗАТ
«Українська академія інвестицій в науку і будівництво»

У процесі прикладної співпраці з Блонним Андрієм Володимировичем, здобувачем КНУБА, підприємством відзначено практичну спрямованість його наукових розробок по дисертаційній роботі «Науково-прикладний інструментарій визначення оптимальної тривалості будівництва в умовах невизначеності» та відповідність доробку здобувача актуальним потребам організації будівництва. Запропоновані здобувачем рішення дають змогу удосконалювати календарно-організаційні моделі з урахуванням фактичного стану будівельного виробництва. За результатами співпраці підтверджено можливість використання його наукового доробку для підвищення адаптивності управління строками будівельних проєктів. Підприємство вважає доцільним подальше впровадження зазначених розробок у власну виробничо-управлінську практику.

Особливість сучасних умов діяльності вітчизняних будівельних підприємств полягає у тому, що сформована на початку проєкту організаційно-технологічна модель часто потребує оперативного коригування. Зміни доступності матеріалів і техніки, перебої постачання, кадрові обмеження, трансформація технологічних послідовностей, зміни нормативних вимог та інші інституційні фактори безпосередньо впливають на можливість дотримання встановлених строків. У цьому контексті результати дисертації Блонного А.В. можуть бути використані як інструмент адаптації діючої моделі організації будівництва до фактичних умов реалізації проєкту.

Практична цінність запропонованого підходу полягає передусім у можливості перейти від одноразового формування календарного плану до його періодичного аналітичного коригування. На основі вдосконаленої цифрової мережевої моделі можна визначати зміну критичного шляху, локалізувати процеси, які формують часові обмеження, та встановлювати, які організаційно-технологічні параметри потребують першочергового втручання. Для підприємства це означає можливість змінювати не всю систему організації робіт, а цілеспрямовано коригувати її найбільш чутливі елементи.

Важливим напрямом практичного використання результатів є ресурсне коригування будівельного процесу. Запропонований інструментарій дозволяє

пов'язувати зміну тривалості робіт із варіативністю трудових, матеріальних, машинних та фінансових ресурсів. Це створює можливість обґрунтовано перерозподіляти ресурси між технологічними операціями, формувати часові резерви та оцінювати наслідки ресурсного дефіциту до його безпосереднього прояву у вигляді відставання від графіка.

Окрему практичну перевагу становить можливість сценарного перегляду організаційно-технологічної моделі. Стохастичне моделювання та метод Монте-Карло дозволяють оцінювати декілька варіантів розвитку будівельного процесу за різних комбінацій ризикових факторів. Застосування такого підходу дає підприємству можливість заздалегідь порівняти наслідки зміни технологічної послідовності, ресурсного забезпечення або строків виконання окремих робіт і обрати варіант, який забезпечує прийнятне співвідношення між тривалістю та ризиком її порушення.

Практичний інтерес становить і цифрова складова розробленого інструментарію. Поєднання мережевого моделювання з BIM, CDE та ERP-середовищами створює основу для синхронізації календарної, технологічної та ресурсної інформації. Використання прогнозного алгоритму із застосуванням LSTM може бути спрямоване на уточнення очікуваної тривалості робіт за накопичення фактичних даних про перебіг проекту. Відповідно, цифрова модель набуває не лише функції відображення запланованого процесу, а й функції підтримки його своєчасного коригування. Для підприємства практично значущим є також запропонований F-index, який характеризує гнучкість строкового управління, та TRE-індекс, орієнтований на оцінювання результативності управління тривалістю з урахуванням часових ризиків. Їх застосування дозволяє порівнювати альтернативні організаційно-технологічні рішення та визначати, наскільки обрана модель здатна зберігати прийнятні строки за зміни умов виконання робіт.

За результатами апробації на будівельному об'єкті (проект «ЖК Montreal House», м. Київ, 2025-2026 рр.) використання розроблених підходів дозволило удосконалити процедури актуалізації календарно-ресурсного планування, підвищити оперативність виявлення критичних відхилень та забезпечити більш обґрунтоване коригування організаційно-технологічних параметрів. Практичний ефект впровадження характеризувався скороченням часу коригування календарних рішень на 12,4%, підвищенням точності прогнозування тривалості робіт на 16%, зменшенням критичних часових відхилень на 13% та скороченням непродуктивних простоїв ресурсів на 10,5%.

Отриманий результат має значення не лише для окремого будівельного проекту, а й для удосконалення самої моделі організації будівельного виробництва підприємства. Науковий доробок Блонного А.В. дозволяє доповнити традиційні календарно-мережеві методи елементами прогнозування, сценарного аналізу та цифрового моніторингу, забезпечивши їх пристосування до технологічних, ресурсних та інституційних змін. У такий спосіб формується більш гнучка організаційно-технологічна система, здатна

коригувати параметри будівельного процесу без втрати його цілісності та керованості.

Таким чином, результати дисертаційної роботи Блонного Андрія Володимировича мають практичну цінність для діяльності будівельного підприємства як інструмент адаптації та коригування сучасних моделей організації будівництва до складних умов вітчизняного будівельного середовища. Їх використання сприяє підвищенню гнучкості календарного планування, раціоналізації ресурсних рішень, своєчасному реагуванню на технологічні зміни та зниженню ризику порушення строків реалізації будівельних проєктів. Результати рекомендуються до подальшого використання у практиці організації, планування та управління будівельними проєктами підприємства.

Заступник директора



Кириленко М.О.

ДОДАТОК В

ПЕРВИННІ (ВИХІДНІ) ДАНІ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗВЕДЕННЯ ЖК «MONTREAL HOUSE»

Об'єктом апробації розроблених організаційно-технологічних моделей обрано житловий комплекс бізнес-класу «Montreal House», що споруджується в умовах щільної міської забудови центральної частини м. Києва на земельній ділянці обмеженої площі (0,5092 га). Об'єкт є характерним представником сучасного багатоповерхового монолітно-каркасного житлового будівництва зі складними умовами виконання робіт: стиснений будівельний майданчик, двоярусна підземна частина, каскадна поверховість (11–20 поверхів), а також наявність тривалої вимушеної перерви у виконанні робіт, спричиненої обставинами непереборної сили. Наведена сукупність чинників робить об'єкт репрезентативним для дослідження надійності організаційно-технологічних рішень і тривалості будівництва.

Загальну характеристику об'єкта дослідження наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Загальна характеристика об'єкта дослідження

Показник	Значення	Одиниця виміру	Дост.
Найменування об'єкта	Житловий комплекс «Montreal House»	—	Ф
Місцезнаходження	м. Київ, Голосіївський р-н, вул. Велика Васильківська, 102-у / вул. Антоновича, 83	—	Ф
Замовник будівництва	ТОВ «КИЇВЦЕНТРДЕВЕЛОПМЕНТ»	—	Ф
Забудовник (девелопер)	«Альянс Новобуд» / Cityconsult Development	—	Ф
Генеральний підрядник	ТОВ «ВЕНЗАБУД»	—	Ф
Генеральний проєктувальник	ТОВ «Архітектурна майстерня Пашенько»	—	Ф
Містобудівні умови та обмеження	від 02.01.2018 № 10	—	Ф
Дозвіл на виконання будівельних робіт	ІУ 113190460673 від 15.02.2019 (зміни – ІУ 123193572485 від 23.12.2019)	—	Ф
Кадастровий номер земельної ділянки	8000000000:79:025:0050	—	Ф
Площа земельної ділянки	0,5092 (5 092 м²)	га	Ф
Функціональне призначення	Житловий будинок з приміщеннями громадського призначення та підземним паркінгом	—	Ф
Клас житла	бізнес	—	Ф
Кількість секцій	2	шт.	Ф
Поверховість (каскадна)	11–12 / 16–17 / 20	пов.	Ф
Кількість квартир	328	шт.	Ф

Показник	Значення	Одиниця виміру	Дост.
Діапазон площ квартир	51,53 – 95,0	м²	Ф
Кількість машиномісць (2 підземні рівні)	197	м/м	Ф
Конструктивна схема	монолітно-каркасна з цегляним заповненням огорожувальних конструкцій	—	Ф
Теплоізоляція огорожувальних конструкцій	мінеральна вата	—	Ф
Висота поверху у чистоті	3,0	м	Ф
Система теплопостачання	автономна (індивідуальна котельня)	—	Ф
Ринкова ціна реалізації (станом на 2026 р.)	від 118 985	грн/м²	Ф
Продавана площа квартир	23 300	м²	Р
Загальна площа надземної частини	30 100	м²	Р
Загальна площа підземної частини (паркінг)	8 400	м²	Р
Загальна площа будівлі	38 500	м²	Р
Площа забудови / щільність забудови ділянки	2 100 / 41,2	м² / %	Р
Кошторисна вартість будівельно-монтажних робіт	1 617,0	млн грн	Р
Питома вартість БМР на 1 м² загальної площі	42,0	тис. грн/м²	Р
Загальна трудомісткість БМР	135 000	люд.-дн	Р
Питома трудомісткість на 1 м² загальної площі	3,5	люд.-дн/м²	Р
Проектний (директивний) строк будівництва	40 (II кв. 2019 – II кв. 2022)	міс	О
Фактичний строк будівництва	94 (I кв. 2019 – IV кв. 2026)	міс	Ф/О
Вимушена перерва у виконанні робіт (форс-мажор)	24 (03.2022 – 02.2024)	міс	О
Коефіцієнт подовження строку будівництва	2,35 (без урахування перерви – 1,75)	—	Р

Примітка. Достовірність даних: Ф – фактичні дані, отримані з відкритих джерел (Єдиний реєстр документів дозвільного характеру у сфері будівництва, офіційні матеріали забудовника, спеціалізовані інформаційні ресурси); Р – розрахункові значення, визначені за укрупненими показниками вартості та трудомісткості будівництва; О – оціночні (експертні)

значення, реконструйовані за фотозвітами про хід будівництва та даними про стан готовності об'єкта.

Декомпозицію процесу зведення об'єкта на дванадцять організаційно-технологічних етапів та первинні дані за кожним із них наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Первинні дані за етапами зведення житлового комплексу «Montreal House»

№ з/п	Найменування етапу	Основні обсяги робіт	Тпл, міс	Тф, міс	ΔТ, міс	Кп	Q, люд.-дн	N, чол.	C, млн грн	Питома вага, %
1	Підготовчий період	Улаштування тимчасового огороження – 285 м.п.; підготовка будівельного майданчика – 5 092 м ² ; винесення інженерних мереж, тимчасові будівлі та споруди	2,5	3,0	+0,5	1,20	1 080	17	19,4	1,2
2	Земляні роботи, огороження котловану	Розробка ґрунту – 34 800 м ³ ; огороження котловану (буросічні палі) – 2 300 м ² (285 м.п.); водопониження	6,0	8,5	+2,5	1,42	4 050	23	88,9	5,5
3	Улаштування фундаментної плити	Бетон – 4 180 м ³ ; арматура – 502 т; гідроізоляція – 4 400 м ² ; бетонна підготовка – 4 400 м ²	4,0	8,0	+4,0	2,00	6 750	40	97,0	6,0
4	Підземна частина (2 рівні паркінгу)	Монолітні конструкції: бетон – 4 450 м ³ , арматура – 445 т; площа – 8 400 м ² ; зворотна засипка – 6 200 м ³	5,0	6,5	+1,5	1,30	13 500	99	177,9	11,0
5	Надземний монолітний каркас	Бетон – 9 600 м ³ ; арматура – 960 т; площа перекриттів – 30 100 м ² ; каскадна схема 11–20 поверхів	12,0	12,5	+0,5	1,04	29 700	113	388,1	24,0
6	Огороджувальні конструкції, перегородки	Цегляна кладка зовнішніх стін і перегородок – 5 400 м ³	10,0	10,0	0,0	1,00	12 825	61	121,3	7,5
7	Фасадні роботи та скління	Фасад – 9 100 м ² , у т.ч. світлопрозорі конструкції – 3 200 м ² ; утеплення мінеральною ватою – 5 900 м ²	9,0	11,0	+2,0	1,22	12 150	53	177,9	11,0

№ з/п	Найменування етапу	Основні обсяги робіт	Тпл, міс	Тф, міс	ΔТ, міс	Кп	Q, люд.-дн	N, чол.	С, млн грн	Питома вага, %
8	Покрівля та експлуатовані тераси	Покрівельне покриття – 2 200 м²; покрівельні огороження – 340 м.п.	3,0	3,5	+0,5	1,17	2 700	37	37,2	2,3
9	Внутрішні інженерні системи	Опалення, водопостачання, каналізація, електропостачання, вентиляція, слабкострумові мережі, ліфти (4 од.) – приведена площа 30 100 м²	10,0	14,0	+4,0	1,40	20 250	69	226,4	14,0
10	Оздоблювальні роботи (місць загального користування)	Штукатурні, малярні, облицювальні роботи, підлоги – 30 100 м² приведеної площі	8,0	12,0	+4,0	1,50	20 250	80	145,5	9,0
11	Зовнішні мережі та благоустрій	Благоустрій – 2 950 м² (експлуатована покрівля паркінгу); зовнішні мережі – 620 м.п.; озеленення, МАФ	4,0	5,0	+1,0	1,25	8 100	77	88,9	5,5
12	Пусконаладження, введення в експлуатацію	Комплексне випробування систем, виконавча документація, сертифікат відповідності	2,5	3,5	+1,0	1,40	3 645	50	48,5	3,0
	Разом	Загальна площа будівлі – 38 500 м²	76,0*	97,5*	+21,5	1,28	135 000	–	1 617,0	100,0

Умовні позначення: Тпл – планова (проектна) тривалість етапу; Тф – фактична тривалість виконання робіт; $\Delta T = T_f - T_{пл}$ – абсолютне відхилення тривалості; $K_p = T_f / T_{пл}$ – коефіцієнт подовження тривалості етапу; Q – трудомісткість робіт етапу; $N = Q / (T_f \cdot 21)$ – середня чисельність робітників в одну зміну; С – кошторисна вартість будівельно-монтажних робіт етапу.

* Сума тривалостей етапів перевищує календарну тривалість будівництва внаслідок суміщення (паралельного виконання) робіт. Коефіцієнт суміщення за проектом становить $K_{сум} = 76,0 / 40,0 = 1,90$; фактичний – $K_{сум} = 97,5 / 70,0 = 1,39$, що свідчить про зниження рівня поточності організації робіт порівняно з проектним рішенням.

Примітка. Фактична тривалість наведена як чиста тривалість виконання робіт без урахування вимушеної перерви тривалістю 24 міс (03.2022 – 02.2024). Загальна календарна тривалість будівництва з урахуванням перерви становить 94 міс проти 40 міс за проектом.

Для подальшого ймовірнісного моделювання тривалості зведення об'єкта первинні дані щодо тривалості етапів подано у тричленній (PERT) формі: оптимістична t_o , найбільш імовірна t_n та песимістична t_p оцінки. Очікувану тривалість етапу та її середньоквадратичне відхилення визначено за залежностями:

$$T_e = (t_o + 4 \cdot t_n + t_p) / 6; \quad \sigma = (t_p - t_o) / 6; \quad \sigma^2 = [(t_p - t_o) / 6]^2.$$

За оптимістичну оцінку прийнято 0,9 від проєктної тривалості етапу, за найбільш імовірну – проєктну тривалість, за песимістичну – фактично досягнуту тривалість виконання робіт. Результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Ймовірнісні характеристики тривалості етапів зведення об'єкта

№ з/п	Найменування етапу	t_o , міс	t_n , міс	t_p , міс	T_e , міс	σ , міс	σ^2 , міс ²
1	Підготовчий період	2,2	2,5	3,0	2,53	0,13	0,017
2	Земляні роботи, огороження котловану	5,4	6,0	8,5	6,32	0,52	0,270
3	Улаштування фундаментної плити	3,6	4,0	8,0	4,60	0,73	0,533
4	Підземна частина (паркінг)	4,5	5,0	6,5	5,17	0,33	0,109
5	Надземний монолітний каркас	10,8	12,0	12,5	11,88	0,28	0,078
6	Огороджувальні конструкції, перегородки	9,0	10,0	10,0	9,83	0,17	0,029
7	Фасадні роботи та скління	8,1	9,0	11,0	9,18	0,48	0,230
8	Покрівля та тераси	2,7	3,0	3,5	3,03	0,13	0,017
9	Внутрішні інженерні системи	9,0	10,0	14,0	10,50	0,83	0,689
10	Оздоблювальні роботи МЗК	7,2	8,0	12,0	8,53	0,80	0,640
11	Зовнішні мережі та благоустрій	3,6	4,0	5,0	4,10	0,23	0,053
12	Пусконаладження, введення в експлуатацію	2,2	2,5	3,5	2,62	0,22	0,048
	Разом (сума за етапами)	68,3	76,0	97,5	78,29	1,65	2,713

Очікувана сумарна тривалість робіт критичної послідовності становить $\Sigma T_e = 78,29$ міс за середньоквадратичного відхилення $\sigma_{кр} = \sqrt{2,713} = 1,65$ міс. Отримані значення є вихідними для побудови ймовірнісної сітьової моделі та проведення імітаційного моделювання за методом Монте-Карло, а також для оцінювання надійності директивного строку введення об'єкта в експлуатацію.

Джерела формування первинних даних

Первинні (вихідні) дані сформовано на основі джерел, наведених у списку використаних джерел за позиціями [135–139].