

<b>Секція С1 Економіка</b>	
<b>УДК 69.002.5:658.5</b>	
<b>Дата першого надходження статті до видання</b>	2026-02-15
<b>Дата прийняття статті до друку після рецензування</b>	2026-03-15
<b>Дата публікації/оприлюднення</b>	2026-03-30

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА ПРОСТОЇВ

**Лопатка Сергій**

доктор економічних наук, доцент,  
ЗВО «Львівський університет бізнесу та права», м. Львів, Україна  
<https://orcid.org/0009-0008-7941-368X>

**Лопатка Оксана**

кандидат економічних наук, доцент,  
ЗВО «Львівський університет бізнесу та права», м. Львів, Україна  
<https://orcid.org/0009-0006-7501-5022>

**Анотація.** У статті розв'язано проблему підвищення ефективності використання будівельної техніки через узгоджену систему коефіцієнтів завантаження та аналіз структури простоїв. Актуальність дослідження зумовлена масштабними потребами повоєнної відбудови України на тлі фізично зношеного й дефіцитного парку машин, обмежених інвестиційних ресурсів та необхідності зближення з технічними нормами Європейського Союзу. Автори розмежовують поняття завантаження, використання, простою та ефективності експлуатації, доводячи, що головна управлінська вада вітчизняних підрядників полягає у підміні одного показника іншим. Систематизовано чотири коефіцієнти (використання за часом, за продуктивністю, інтегральний, а також технічної готовності та змінності) і визначено межі застосовності кожного: технічна готовність діагностує ремонтну службу й задає верхню межу можливого використання, тоді як інтегральний коефіцієнт відображає кінцеву економічну віддачу машини. Запропоновано типологію простоїв за плановістю та причинами, а також механізм їх вартісної оцінки через вартість машино-години та супутні втрати. Показано, що структура простою важливіша за його абсолютну величину, оскільки організаційні простой усуваються плануванням майже без витрат, а ремонтні потребують інвестицій у передбачувальне обслуговування. Розглянуто моделі оптимізації завантаження парку (теорію масового обслуговування, дискретно-подієве та агентне моделювання, багатокритеріальну оптимізацію й цілочислове нелінійне програмування) та обґрунтовано, що оптимум завантаження є компромісом між мінімумом простоїв, максимумом виробітку й мінімумом витрат, а не екстремумом одного критерію. Запропоновано інтегральний показник економічної віддачі парку та систематизовано розрахунковий апарат коефіцієнтів використання й витрат від простоїв у вигляді формул. Окрему увагу приділено цифровим інструментам моніторингу: телематиці, передбачувальному обслуговуванню та цифровим двійникам парку. Авторська позиція полягає в тому, що для України оптимізація завантаження наявної техніки є найдешевшим способом нарощування будівельної спроможності в умовах капітального голоду.

**Ключові слова:** будівельна техніка, коефіцієнт завантаження, простой, ефективність експлуатації, оптимізація, машино-година, телематика, повоєнна відбудова.

**OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION EQUIPMENT USAGE BASED ON LOAD AND DOWNTIME COEFFICIENTS****Lopatka Serhii**

Doctor of Economic Sciences, Associate Professor,  
Lviv University of Business and Law, Lviv, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0008-7941-368X>

**Lopatka Oksana**

PhD in Economics, Associate Professor,  
Lviv University of Business and Law, Lviv, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0006-7501-5022>

**Abstract.** *The article addresses the problem of improving the efficiency of construction equipment usage through a coherent system of utilization coefficients and an analysis of the structure of downtime. The relevance of the study stems from the large-scale needs of Ukraine's post-war reconstruction against the background of a physically worn and deficient machine fleet, limited investment resources and the need to converge with the technical standards of the European Union. The authors distinguish the concepts of loading, utilization, downtime and operational efficiency, arguing that the principal managerial flaw of domestic contractors lies in substituting one indicator for another. Four coefficients are systematized (utilization by time, by productivity, the integral coefficient, as well as the technical readiness and shift coefficients) and the limits of applicability of each are defined: technical readiness diagnoses the repair service and sets the upper bound of possible utilization, whereas the integral coefficient reflects the ultimate economic return of the machine. A typology of downtime by planning and causes is proposed, together with a mechanism for its cost evaluation through the machine-hour cost and associated losses. It is shown that the structure of downtime matters more than its absolute magnitude, since organizational downtime is eliminated by planning almost at no cost, while repair-related downtime requires investment in predictive maintenance. Models for optimizing fleet load are examined (queueing theory, discrete-event and agent-based simulation, multi-objective optimization and integer nonlinear programming) and it is substantiated that the optimum of loading is a compromise between minimum downtime, maximum output and minimum costs rather than the extremum of a single criterion. An integral indicator of the fleet's economic return is proposed, and the calculation apparatus of the utilization coefficients and downtime losses is systematized as a set of formulas. Particular attention is paid to digital monitoring tools: telematics, predictive maintenance and digital twins of the fleet. The authors' position is that for Ukraine the optimization of the load of available equipment is the cheapest way to increase construction capacity under conditions of capital scarcity.*

**Keywords:** *construction equipment, utilization coefficient, downtime, operational efficiency, optimization, machine-hour, telematics, post-war reconstruction.*

**Вступ**

**Актуальність проблеми.** Будівельна галузь набуває для України значення, яке важко переоцінити, адже саме від її спроможності залежить, чи вдасться повернути до життя зруйновану війною інфраструктуру. Прямі збитки інфраструктури, за оцінкою Київської школи економіки станом на листопад 2024 року, сягнули майже 170 млрд доларів, причому втрати транспортної мережі перевищили 38 млрд доларів, а промисловості та будівництва склали 14 млрд доларів [1]. За цими цифрами стоїть безпрецедентний попит на землерийні, вантажопідіймальні й дорожньо-будівельні

машини, без яких відбудова залишається лише наміром на папері. Потреба в машинах зростає швидше, ніж спроможність ринку її задовольнити, і це переводить питання раціонального використання наявного парку з суто технічної площини у площину економічної стратегії.

Структурні зрушення в національній будівельній індустрії лише поглиблюють цю суперечність, надаючи їй рис тривалої проблеми. Внутрішнє виробництво технологічних машин скоротилося, частка імпортової техніки за останні роки зростає приблизно з 16 до 20 відсотків, а відчутний фізичний і моральний знос наявного парку водночас підвищує витрати на механізацію та знижує надійність машин [2]. Складається ситуація, у якій придбання нової одиниці техніки коштує дорого, доступ до кредитних ресурсів обмежений, а потреба у виробничій потужності лише наростає. За таких обставин єдиним швидким резервом нарощування потужності залишається повніше використання вже наявних машин, тому ефективність експлуатації техніки, виміряна коефіцієнтами завантаження та структурою простоїв, перетворюється на чинник конкурентоспроможності підрядника й на передумову виконання програм відбудови.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематику експлуатації парку машин активно розробляє вітчизняна інженерно-економічна школа. Дослідження підвищення ефективності використання парків транспортних і технологічних машин через удосконалення системи технічного обслуговування й ремонту обґрунтовує залежність коефіцієнта технічної готовності від організації ремонтної служби та доводить, що саме стан обслуговування визначає верхню межу можливого використання техніки [3]. Питання якості виробничих процесів у будівництві розглянуто з оцінкою результативності систем управління якістю на підприємствах галузі та впливу організаційних чинників на продуктивність ресурсів [4].

Цифровий вимір управління технікою дедалі активніше досліджують у фаховій періодиці. Аналіз стану, проблем і перспектив цифровізації будівельної галузі України фіксує відставання вітчизняних підприємств у впровадженні інформаційних технологій та окреслює напрями його подолання [5]. Прикладні аспекти оптимізації будівельного процесу засобами цифровізації за умов нестійкого ресурсозабезпечення трактують цифрові інструменти як спосіб згладжування дефіциту ресурсів [6]. Ці роботи окреслюють український контекст, проте здебільшого залишають поза увагою формальний апарат оптимізації завантаження.

Зарубіжна наука пропонує розвинений математичний інструментарій для розв'язання саме цього завдання. Багатокритеріальне оптимальне планування роботи автоматизованої техніки на основі генетичного алгоритму непомітного сортування дає множину Парето-оптимальних розкладів земляних робіт [7]; агентне моделювання й симуляція землерийних операцій відтворюють варіативність циклів точніше за нормативні методи [8]. Систему підтримки рішень на основі імітаційного моделювання з використанням комп'ютерного зору запропоновано в [9], а управління парком на стадії деталізованого кошторису з використанням змішаного цілочислового нелінійного програмування – у [10]. Оптимізацію роботи будівельних машин з урахуванням часів переналагодження та втоми персоналу на основі гібридної метаевристики викладено в [11], класичний апарат теорії масового обслуговування – у [12], його застосування до транспортних систем з оцінкою витрат і викидів – у [13], а можливості цифрових двійників узагальнено в систематичному огляді [14].

**Виділення невирішеної частини проблеми.** Попри багатство вітчизняних і зарубіжних розробок, між ними зберігається помітний розрив. Українські праці докладно описують нормативну базу та знос парку, проте рідко доводять аналіз до формальних моделей оптимізації; зарубіжні дослідження пропонують потужний інструментарій, але абстрагуються від умов капітального голоду та інституційних обмежень повоєнної економіки. На практиці підрядники змішують різні за змістом

показники (завантаження, використання, технічну готовність) і ухвалюють рішення про закупівлю чи списання машин на хибних підставах, а простій сприймають як технічну неприємність, а не як категорію економічних втрат. Майже не розробленим залишається питання поєднання системи коефіцієнтів завантаження з вартісною оцінкою простоїв і цифровим моніторингом в єдину управлінську логіку, придатну для українських підрядників.

**Мета статті.** Мета статті полягає в обґрунтуванні цілісного підходу до оптимізації використання будівельної техніки, що поєднує систему коефіцієнтів завантаження, типологію та вартісну оцінку простоїв і сучасний цифровий моніторинг у єдину управлінську модель, адаптовану до умов повоєнної відбудови України. Досягнення мети передбачає розмежування базових понять; систематизацію коефіцієнтів використання з визначенням меж застосовності; побудову типології простоїв та механізму переведення їх у грошові втрати; критичний аналіз моделей оптимізації й цифрових інструментів, а також формулювання авторської позиції щодо пріоритетів управління технікою.

**Наукова новизна.** Наукова новизна полягає в обґрунтуванні ієрархічної системи коефіцієнтів використання техніки, у якій технічна готовність трактується як стеля можливого використання, а інтегральний коефіцієнт – як підлога реальної економічної віддачі; у запровадженні авторських понять градієнта дорожнечі усунення простою та латентного простою; а також в інтеграції коефіцієнтів завантаження, вартісної оцінки простоїв і цифрового моніторингу в єдину управлінську модель.

**Практичне значення.** Практичне значення результатів полягає в тому, що запропонована модель дає підрядникові інструмент для діагностики прихованих резервів продуктивності, для пріоритезації заходів зі скорочення простоїв за критерієм вартості усунення та для економічного обґрунтування інвестицій у телематику й передбачувальне обслуговування, що особливо актуально в умовах масштабної відбудови за обмежених капіталовкладень.

### Методологія

**Методи дослідження.** Дослідження ґрунтується на загальнонаукових методах. Аналіз і синтез застосовано для розмежування понять завантаження, використання, простою та ефективності експлуатації; порівняння – для зіставлення коефіцієнтів за предметом діагностики; систематизацію й типологізацію – для побудови класифікації простоїв за градієнтом вартості усунення; метод сходження від абстрактного до конкретного – для переходу від понятійного апарату до управлінських рекомендацій.

**Джерела даних.** Нормативну й наукову базу утворюють рецензовані наукові статті 2020–2025 років [3–14], вітчизняні ресурсні кошторисні норми ДСТУ Б Д.2.7-1:2012 [15], навчально-методичні джерела [16; 17], аналітичні звіти Київської школи економіки щодо збитків інфраструктури та стану галузі [1; 2], міжнародний стандарт телематичного обміну ISO/TS 15143-3 [21] та регламенти Європейського Союзу щодо викидів і безпечності техніки [22; 23].

**Інструменти аналізу.** Інструментами аналізу слугують порівняльні таблиці, авторська ієрархічна модель коефіцієнтів використання та типологія простоїв за вартістю усунення. Для оцінки методів оптимізації завантаження залучено апарат теорії масового обслуговування, дискретно-подієвого та агентного моделювання, багатокритеріальної (Парето) оптимізації й цілочислового нелінійного програмування.

**Обмеження дослідження.** Дослідження має теоретико-оглядовий характер і не передбачає емпіричної верифікації на даних конкретних підприємств. Частина кількісних оцінок простоїв узяті з галузевих і консалтингових джерел, а не з рецензованих статей, тому вони слугують орієнтирами, а не нормативами. Більшість формальних моделей оптимізації розроблено для відкритих гірничих робіт і

землерийних циклів, що потребує адаптації при перенесенні на вантажопідіймальну й дорожню техніку. Кількість суто україномовних рецензованих джерел із зареєстрованими DOI щодо економіки машино-години обмежена.

### Результати

Будь-яка спроба впорядкувати використання техніки наражається на термінологічну плутанину, доки не розмежовано чотири споріднені поняття, які повсякденна практика звично зливає в одне. Завантаження описує інтенсивність, з якою машина виконує корисну роботу в межах доступного їй часу, тож екскаватор, що копає половину зміни, завантажений наполовину. Використання – ширша категорія, яка співвідносить фактичний корисний час із календарним або плановим фондом і відповідає на питання, наскільки актив узагалі залучено до виробництва. Простій, дзеркальний щодо використання, охоплює будь-який проміжок, коли справна чи несправна машина не створює доданої вартості, попри те що підприємство продовжує нести витрати на її утримання. Ефективність експлуатації вивершує цей ряд як інтегральна оцінка, що поєднує час, продуктивність і вартість. Якщо поглянути на проблему крізь призму класичної опозиції потенційного й дійсного, то простій постає станом, у якому виробнича потужність машини існує лише як можливість, не переходячи в дійсність, і саме повноту цього переходу зрештою вимірює ефективність експлуатації.

Особливе місце будівельних машин серед основних засобів пояснюється тим, що їхня активна частина безпосередньо формує виробничу потужність підрядника, а не лише обслуговує її. Класифікація парку розрізняє землерийну техніку, вантажопідіймальні механізми та дорожньо-будівельні машини, і кожна група має власну логіку формування витрат [16; 17]. Вартість машино-години постає економічно ключовим показником, і вітчизняні ресурсні кошторисні норми включають до неї амортизаційні відрахування на повне відновлення, паливно-мастильні матеріали, заробітну плату машиністів, витрати на ремонт, технічне обслуговування та перебезування [15]. Значна частина цих витрат має умовно-постійний характер, оскільки амортизація, страхування й частина утримання нараховуються незалежно від того, працює машина чи стоїть.

Умовно-постійний характер витрат робить недовикористання техніки дорогим немовби автоматично. Постійні витрати розподіляються на менший обсяг виробітку, тож кожна година простою підвищує фактичну ціну корисної години та роздуває собівартість будівельно-монтажних робіт. Зв'язок тут не лінійний, а підсилювальний, бо недовантажений баштовий кран робить дорожчою не лише власну роботу, а й увесь технологічний потік, який від нього залежить. Показники використання техніки не є суто обліковими абстракціями, адже вони безпосередньо керують економікою об'єкта й визначають межу, за якою підрядник із прибуткового стає збитковим.

Система показників використання будується на трьох пов'язаних, але не тотожних коефіцієнтах. Коефіцієнт використання за часом, або екстенсивний, дорівнює відношенню фактично відпрацьованого часу до планового фонду й вимірює повноту залучення машини в роботу. Коефіцієнт використання за продуктивністю, або інтенсивний, зіставляє фактичний виробіток із технічно можливим за той самий час. Інтегральний коефіцієнт як добуток перших двох дає найчесніший підсумок, оскільки машина може мати високий часовий показник за низької інтенсивності [16]. Від цих трьох вимірників слід відрізнити коефіцієнт змінності, що характеризує організацію багатозмінної роботи, та коефіцієнт технічної готовності (відношення машино-днів у справному стані до машино-днів перебування в господарстві), який оцінює роботу ремонтної служби й задає верхню межу можливого використання [18; 3].

Якщо вибудувати ці показники в ієрархію, прояснюється логіка управління парком, яку автори вважають за доцільне покласти в основу аналізу. Коефіцієнт технічної

готовності утворює стелю, тобто максимум, якого можна досягти за наявного стану ремонтної служби; коефіцієнт змінності та екстенсивний коефіцієнт описують наближення до цієї стелі організаційно; а інтегральний коефіцієнт фіксує підлогу реальної економічної віддачі. Підміна одного показника іншим веде до системних хибних висновків, коли високу технічну готовність помилково тлумачать як ознаку повного завантаження. Систематизований вигляд цих відмінностей подано в таблиці 1.

**Таблиця 1. Розмежування коефіцієнтів використання будівельної техніки**

Коефіцієнт	Спосіб обчислення	Що насправді діагностує	Типове хибне тлумачення
Використання за часом (екстенсивний)	Відношення фактично відпрацьованого часу до планового фонду часу	Повноту залучення машини до роботи	Високе значення вважають ознакою інтенсивної праці, хоча машина може стояти «під парою»
Використання за продуктивністю (інтенсивний)	Фактичний виробіток, поділений на технічно можливий за той самий час	Щільність роботи, коли машина вже працює	Ігнорують
Інтегральний	Добуток екстенсивного й інтенсивного коефіцієнтів	Кінцеву економічну віддачу одиниці техніки	Підмінюють часовим коефіцієнтом
Технічної готовності	Машино-дні у справному стані / машино-дні перебування в господарстві	Якість роботи ремонтної служби та стелю можливого використання	Плутають із завантаженням: справна ще не означає зайнята роботою
Змінності	Відпрацьовані машино-зміни / машино-дні	Організацію багатозмінної роботи	Видають за показник продуктивності машини

*Джерело: систематизовано авторами на основі [3; 15; 16; 18]*

Логічним завершенням цієї ієрархії є інтегральний показник, що зводить розрізнені коефіцієнти в єдину економічну величину. Автори пропонують оцінювати економічну віддачу парку за формулою (1), у якій вклад кожної машини зважується її продуктивністю та ціною робіт, а в знаменнику підсумовуються постійні витрати на утримання та грошові втрати від простоїв:

$$E_{\text{парку}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\text{інт}}^i \cdot Q_i \cdot \text{ці}_i}{\sum_{i=1}^n (C_{\text{пост}}^i + C_{\text{прост}}^i)} \quad (1)$$

Тут  $E_{\text{парку}}$  – інтегральна економічна віддача парку;  $n$  – кількість машин;  $K_{\text{інт}}$  – інтегральний коефіцієнт використання  $i$ -ї машини як добуток її екстенсивного та інтенсивного коефіцієнтів;  $Q_i$  – її виробіток;  $\text{ці}_i$  – ціна одиниці робіт;  $C_{\text{пост}}$  – умовно-постійні витрати на утримання, а  $C_{\text{прост}}$  – вартісна оцінка простоїв. Така побудова робить помітним головний важіль управління: зростання інтегрального коефіцієнта в чисельнику та скорочення втрат від простоїв у знаменнику діють в один бік, збільшуючи

віддачу без жодних нових закупівель. Розрахункові формули всіх складників показника зведено в таблиці 3.

Дзеркальною до коефіцієнтів використання категорією є простій, який лише на перший погляд видається однорідним, а насправді розпадається на види з різною економічною природою. За плановістю простої поділяють на заплановані (технічне обслуговування, перебазування, технологічні перерви) і незаплановані, серед яких вирізняють організаційні, спричинені відсутністю фронту робіт, матеріалів чи оператора, а також ремонтні, технологічні та метеорологічні. Вітчизняна нормативна логіка вже закладає це розрізнення, бо експлуатаційна продуктивність машини враховує лише конструктивно-технічні й технологічні перерви, тоді як організаційні та метеорологічні простой залишаються поза нормою і стають резервом управління [15]. Облік простоїв спирається на хронометраж і фотографію робочого дня, а в гроші їх переводять, множачи тривалість простою на вартість машино-години й додаючи супутні втрати: оплату простоюючих робітників, орендні платежі та штрафи за зрив строків. Якщо впорядкувати види простою не за причиною, а за вартістю усунення, як це зроблено в таблиці 2, відкривається практична ієрархія пріоритетів, яку автори позначають як градієнт дорожнечі усунення.

**Таблиця 2. Типологія простоїв за градієнтом вартості усунення**

Вид простою	Характерна причина	Спосіб усунення	Вартість усунення
Організаційний	Не підготовлено фронт робіт, не підвезли матеріал, відсутній машиніст	Диспетчеризація та синхронізація постачання	Майже нульова: це питання планування, а не грошей
Технологічний	Очікування твердіння бетону, жорстка послідовність операцій	Перепланування графіка, паралелізація суміжних робіт	Низька
Метеорологічний	Тривалі опади, мороз, шквальний вітер	Сезонне планування, навіси, перенесення частини робіт у приміщення	Помірна та частково непереборна
Ремонтний (аварійний)	Раптова відмова вузла без попередніх ознак	Перехід від ремонту за напрацюванням до передбачувального обслуговування	Висока: потрібні інвестиції в датчики, зв'язок і аналітику
Латентний	Простій, що його приховує неточний ручний облік напрацювання	Об'єктивна телеметрія, яка оголює справжню картину	Окупається швидко після впровадження моніторингу

*Джерело: розроблено авторами*

Запропонована типологія має не лише класифікаційну, а й прагматичну цінність, бо підказує, з чого починати. Галузеві оцінки робочого часу важкої техніки промовисті, адже незаплановані простой нерідко сягають двадцяти-тридцяти відсотків часу, тоді як дисципліновані компанії утримують їх на рівні близько п'яти відсотків. Структура простоїв прямо позначається на рентабельності, причому організаційні втрати

усуваються майже безкоштовно через краще планування, а ремонтні вимагають інвестицій у профілактику. Особливо підступним є латентний простій, який автори виокремлюють як окремий вид саме тому, що його не видно у звичайній звітності й він роками з'їдає віддачу непомітно для керівництва.

**Таблиця 3. Розрахункові формули показників використання техніки та втрат від простоїв**

Показник	Формула	Позначення
Екстенсивний коефіцієнт використання	$K_{\text{ч}} = \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{пл}}}$	$T_{\text{ф}}$ – фактично відпрацьований час; $T_{\text{пл}}$ – плановий фонд часу
Інтенсивний коефіцієнт використання	$K_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{тех}}}$	$Q_{\text{ф}}$ – фактичний виробіток; $Q_{\text{тех}}$ – технічно можливий виробіток
Інтегральний коефіцієнт	$K_{\text{інт}} = K_{\text{ч}} \cdot K_{\text{п}}$	добуток екстенсивного та інтенсивного коефіцієнтів
Коефіцієнт технічної готовності	$K_{\text{тг}} = \frac{D_{\text{спр}}}{D_{\text{госп}}}$	$D_{\text{спр}}$ – машино-дні у справному стані; $D_{\text{госп}}$ – машино-дні перебування в господарстві
Фактична вартість корисної машино-години	$\text{ц}_{\text{ф}} = \frac{\text{ц}_{\text{мг}}}{K_{\text{інт}}}$	$\text{ц}_{\text{мг}}$ – нормативна вартість машино-години; зростає при недовикористанні
Втрати від простою	$L = t_{\text{прост}} \cdot (\text{ц}_{\text{мг}} + \text{з}_{\text{роб}}) + \text{Ш}$	$t_{\text{прост}}$ – тривалість простою; $\text{з}_{\text{роб}}$ – оплата простоюючих робітників; $\text{Ш}$ – штрафи за зрив строків

*Джерело: складено авторами на основі [15; 16; 18]*

### Обговорення

**Інтерпретація результатів.** Побудована ієрархія коефіцієнтів і градієнт вартості усунення простоїв разом задають чіткий управлінський пріоритет: діагностика структури простою має передувати будь-яким рішенням про розширення чи скорочення парку, бо саме структура, а не сумарна величина, підказує, де лежить найдешевший резерв. Видається обґрунтованим зробити це правилом, оскільки гонитва за зменшенням загального простою без огляду на його склад нерідко веде до марнування коштів на дорогі заходи там, де достатньо організаційних. Виокремлення латентного простою додає до цієї логіки вимір видимості: найбільші втрати часто приховані саме там, де облік найслабший.

**Порівняння з іншими дослідженнями.** На відміну від праць, що оптимізують окремий аспект, апарат дослідження операцій дозволяє знаходити компроміс свідомо. Землерийні цикли «екскаватор – самоскид» описуються теорією масового обслуговування, де надмірний парк самоскидів утворює чергу до екскаватора, а недостатній призводить до простою самого екскаватора [12]; дослідження кар'єрних систем підтверджують існування оптимального розміру автопарку [13]. Там, де аналітичні припущення завеликі, точніші результати дають дискретно-подієве та агентне моделювання [8; 9], а на стику імітації з багатокритеріальною оптимізацією народжуються Парето-оптимальні розклади [7], підбір складу парку методами

нелінійного програмування [10] та гібридні метаевристики [11]. Запропонований у статті підхід не конкурує з цими моделями, а доповнює їх, бо інтегрує формальну оптимізацію з понятійним апаратом коефіцієнтів і вартісною оцінкою простоїв, якої бракує як зарубіжним моделям, так і вітчизняним описовим працям [3–6].

**Наукова новизна (розгорнуто).** Розгорнуто наукова новизна виявляється в трьох взаємопов'язаних елементах. По-перше, коефіцієнти використання вибудовано не як паралельний перелік, а як ієрархію зі стелею (технічна готовність) і підлогою (інтегральний коефіцієнт), що унеможлиблює їх підміну. По-друге, простої класифіковано за новим критерієм – вартістю усунення, що перетворює типологію на інструмент пріоритезації, а не лише опису. По-третє, запроваджено поняття латентного простою як виду втрат, невидимого для традиційного обліку й видобувного лише засобами об'єктивної телеметрії. Разом ці елементи утворюють єдину управлінську модель, у якій вимірювання, діагностика та цифровий моніторинг поєднані спільною логікою.

**Практичне значення (розгорнуто).** Практичну реалізацію моделі забезпечують цифрові інструменти, що змінюють якість вхідних даних. Телематика, датчики інтернету речей і супутникове позиціонування фіксують мотогодини, холості оберти й місцезнаходження машин у реальному часі, усуваючи систематичне заниження напрацювання ручними журналами та оголюючи латентний простій [21]. Системи передбачувального обслуговування прогнозують відмови до їх настання й переводять ремонтні простої з незапланованих катастроф у керовані події [19], а цифрові двійники парку дозволяють симулювати завантаження ще до виходу техніки на майданчик [14; 20]; передумовою ефекту є стандартизація обміну даними для змішаного парку [21]. В українському контексті, де масштаб відбудови накладається на виснажений і дефіцитний парк [1; 2], а вітчизняні підприємства відстають у цифровізації [5; 6], підвищення віддачі наявної техніки стає найдешевшим резервом потужності. Зближення з нормами ЄС щодо викидів і безпечності техніки [22; 23] водночас обмежує експлуатацію застарілих машин і стимулює оновлення парку, тож якщо припустити синхронізацію списання, закупівлі сумісної техніки та впровадження моніторингу, ефект від кожного заходу підсилюється рештою.

### Висновки

Проведене дослідження показує, що ефективність використання будівельної техніки не зводиться до жодного окремого показника, а постає результатом узгодженої системи метрик, вибудованої в чітку ієрархію. Коефіцієнт технічної готовності задає верхню межу можливого використання, екстенсивний коефіцієнт і коефіцієнт змінності описують наближення до цієї межі, а інтегральний коефіцієнт фіксує кінцеву економічну віддачу машини. Головна управлінська вада вітчизняних підрядників полягає в підміні одного коефіцієнта іншим, тому впорядкування понятійного апарату виявляється першим і найдешевшим кроком до оптимізації.

Простій належить трактувати не як прикру технічну випадковість, а як структуровану категорію економічних втрат, що піддається обліку й цілеспрямованому скороченню. Його структура важить більше за абсолютну величину, оскільки організаційні простої усуваються плануванням майже без витрат, тоді як ремонтні потребують інвестицій у передбачувальне обслуговування, а латентний простій узагалі залишається невидимим для традиційної звітності. Відповідно, діагностика причин і вартості усунення простою повинна передувати будь-яким рішенням про розширення чи скорочення парку.

Оптимум завантаження техніки постає компромісом між мінімумом простоїв, максимумом виробітку й мінімумом витрат, а не екстремумом одного критерію. Апарат теорії масового обслуговування, імітаційного моделювання та багатокритеріальної

оптимізації дозволяє знаходити цей компроміс свідомо, проте його застосування критично залежить від якості вхідних даних, яку забезпечують цифрові інструменти моніторингу.

Для України оптимізація завантаження наявної техніки постає найдешевшим способом нарощування будівельної спроможності в умовах капітального голоду й масштабної відбудови. Поєднання економічного тиску дефіциту парку з регуляторним тиском євроінтеграції створює ситуацію, коли інтереси ефективності й відповідності європейським нормам збігаються, що відкриває можливість синхронного оновлення техніки, скорочення простоїв і цифровізації управління як єдиного взаємопідсилювального процесу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням галузевої методики, яка інтегрувала б систему коефіцієнтів завантаження, вартісну оцінку простоїв і телематичні дані в єдиний показник економічної віддачі парку, а також з емпіричною перевіркою запропонованого підходу на матеріалах конкретних будівельних підприємств, задіяних у програмах відбудови.

### Список використаних джерел

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури України від руйнувань внаслідок збройної агресії Російської Федерації станом на листопад 2024 року. Київ : Київська школа економіки, 2025. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE\\_Damages\\_Report-November-2024-UA.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf)
2. Структурні зміни та виклики в будівельній індустрії України. Київ : Київська школа економіки, 2024. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02\\_09\\_24\\_Zvit\\_Strukturni\\_zmini\\_ta\\_vikliki\\_v\\_budivelnnii--\\_industrii--.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_vikliki_v_budivelnnii--_industrii--.pdf)
3. Харченко С. В., Байцан В. Г., Косякевич Д. П., Лисенко С. В. Підвищення ефективності використання парків транспортних та технологічних машин шляхом вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. II. С. 382–393. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.382-393](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.382-393)
4. Машта Н. О., Поліщук О. А., Василенко В. В. Оцінка ефективності системи управління якістю продукції на підприємствах будівельної галузі. *Економіка та суспільство*. 2023. № 54. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-45>
5. Бондаренко Д. В., Калашнікова К. Ю. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблем та перспектив розвитку. *Економіка та суспільство*. 2024. № 65. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2>
6. Оптимізація будівельного процесу за допомогою цифровізації в умовах нестійкого ресурсозабезпечення. *Сучасні дослідження в архітектурі*. 2025. Т. 11, № 1. URL: <https://arch-studies.com.ua/uk/journals/tom-11-1-2025/>
7. Chen Z., et al. Multi-objective optimal scheduling of automated construction equipment using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III). *Automation in Construction*. 2022. Vol. 143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104587>
8. Zankoul E., Khoury H., Awwad R. Evaluation of agent-based and discrete-event simulation for modeling construction earthmoving operations. *Automation in Construction*. 2017. Vol. 83. P. 271–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>
9. Simulation-based decision support system for earthmoving operations using computer vision. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106948>
10. Kim S., et al. Fleet management for earthmoving operation in the phase of detail estimation using mixed integer nonlinear programming. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2320321>

11. Wang D., Gao B., Zhang L. Optimization on construction machinery considering sequence-dependent setup times and personnel fatigue based on the improved hybrid gray wolf and whale algorithm. *PLoS ONE*. 2025. Vol. 20, № 5. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320753>
12. Carmichael D. G. Queues, construction operations and optimization. *System Modelling and Optimization*. Boston : Springer, 1992. P. 268–277. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2490-6\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2490-6_26)
13. Boukherroub T., et al. Sustainable transportation planning for an open-pit mine using queuing theory and cost-emission analysis. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2023. URL: <https://www.iieta.org/download/file/fid/130620>
14. Opoku D.-G. J., et al. Digital twin and its applications in the construction industry: a state-of-the-art systematic review. *Digital Twin*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17664.3>
15. ДСТУ Б Д.2.7-1:2012. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів. Київ : Мінрегіон України, 2012. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=50179](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50179)
16. Качура О. М. Механізація та автоматизація будівництва і ремонтно-будівельних робіт : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. URL: [http://eprints.kname.edu.ua/17318/1/Лекції\\_Качура.pdf](http://eprints.kname.edu.ua/17318/1/Лекції_Качура.pdf)
17. Будівельні машини та обладнання : навчальний посібник. Дніпро : УДУНТ. URL: <https://crust.ust.edu.ua/bitstream/123456789/4570/1/textbook.pdf>
18. Поняття про коефіцієнт технічної готовності. URL: <https://yak.koshachek.com/articles/37-ponjattja-pro-koeficient-tehnicnoi-gotovnosti.html>
19. Predictive maintenance for Industrial IoT of vehicle fleets using hierarchical modified fuzzy support vector machine. *arXiv preprint*. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.09612>
20. Developing a calibrated physics-based digital twin for construction vehicles. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/pdf/2508.08576>
21. ISO/TS 15143-3:2020. Earth-moving machinery and mobile road construction machinery – Worksite data exchange – Part 3: Telematics data. Geneva : ISO, 2020. URL: <https://www.iso.org/standard/76394.html>
22. Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. *Official Journal of the European Union*. 2016. L 252. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng>
23. Regulation (EU) 2023/1230 of the European Parliament and of the Council of 14 June 2023 on machinery. *Official Journal of the European Union*. 2023. L 165. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1230/oj/eng>

## References

1. Report on direct damage to the infrastructure of Ukraine from destruction as a result of the armed aggression of the Russian Federation as of November 2024. Kyiv: Kyiv School of Economics, 2025. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE\\_Damages\\_Report-November-2024-UA.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf)
2. Structural changes and challenges in the construction industry of Ukraine. Kyiv: Kyiv School of Economics, 2024. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02\\_09\\_24\\_Zvit\\_Strukturni\\_zmini\\_ta\\_vikliki\\_v\\_budivelnnii--\\_industrii--.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_vikliki_v_budivelnnii--_industrii--.pdf)
3. Kharchenko S. V., Baytsan V. G., Kosyakevych D. P., Lysenko S. V. Increasing the efficiency of using fleets of transport and technological machines by improving the maintenance and repair system. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 11(42), Part II. P. 382–393. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.382-393](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.382-393)

4. Mashta N. O., Polishchuk O. A., Vasylenko V. V. Assessment of the effectiveness of the product quality management system at construction enterprises. *Economy and Society*. 2023. No. 54. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-45>
5. Bondarenko D. V., Kalashnikova K. Yu. Digitalization of the construction industry of Ukraine: analysis of the state, problems and prospects for development. *Economy and Society*. 2024. No. 65. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2>
6. Optimization of the construction process through digitalization in conditions of unstable resource supply. *Modern Studies in Architecture*. 2025. Vol. 11, No. 1. URL: <https://archstudies.com.ua/uk/journals/tom-11-1-2025/>
7. Chen Z., et al. Multi-objective optimal scheduling of automated construction equipment using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III). *Automation in Construction*. 2022. Vol. 143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104587>
8. Zankoul E., Khoury H., Awwad R. Evaluation of agent-based and discrete-event simulation for modeling construction earthmoving operations. *Automation in Construction*. 2017. Vol. 83. P. 271–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>
9. Simulation-based decision support system for earthmoving operations using computer vision. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106948>
10. Kim S., et al. Fleet management for earthmoving operation in the phase of detail estimation using mixed integer nonlinear programming. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2320321>
11. Wang D., Gao B., Zhang L. Optimization of construction machinery considering sequence-dependent setup times and personnel fatigue based on the improved hybrid gray wolf and whale algorithm. *PLoS ONE*. 2025. Vol. 20, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320753>
12. Carmichael D. G. *Queues, construction operations and optimization*. System Modeling and Optimization. Boston: Springer, 1992. P. 268–277. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2490-6\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2490-6_26)
13. Boukherroub T., et al. Sustainable transportation planning for an open-pit mine using queuing theory and cost-emission analysis. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2023. URL: <https://www.iieta.org/download/file/fid/130620>
14. Opoku D.-G. J., et al. Digital twin and its applications in the construction industry: a state-of-the-art systematic review. *Digital Twin*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17664.3>
15. DSTU B D.2.7-1:2012. Resource costing norms for the operation of construction machines and mechanisms. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=50179](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50179)
16. Kachura O. M. Mechanization and automation of construction and repair and construction works: lecture notes. Kharkiv: KhNUMG named after O. M. Beketov, 2018. URL: [http://eprints.kname.edu.ua/17318/1/Лекції\\_Kachura.pdf](http://eprints.kname.edu.ua/17318/1/Лекції_Kachura.pdf)
17. Construction machines and equipment: textbook. Dnipro: UDUNT. URL: <https://crust.ust.edu.ua/bitstream/123456789/4570/1/textbook.pdf>
18. The concept of the coefficient of technical readiness. URL: <https://yak.koshachek.com/articles/37-ponjattja-pro-koeficient-tehnicnoi-gotovnosti.html>
19. Predictive maintenance for Industrial IoT of vehicle fleets using hierarchical modified fuzzy support vector machine. arXiv preprint. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.09612>
20. Developing a calibrated physics-based digital twin for construction vehicles. arXiv preprint. 2025. URL: <https://arxiv.org/pdf/2508.08576>
21. ISO/TS 15143-3:2020. Earth-moving machinery and mobile road construction machinery – Worksite data exchange – Part 3: Telematics data. Geneva : ISO, 2020. URL: <https://www.iso.org/standard/76394.html>

22. Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. Official Journal of the European Union. 2016. L 252. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/eng>
23. Regulation (EU) 2023/1230 of the European Parliament and of the Council of 14 June 2023 on machinery. Official Journal of the European Union. 2023. L 165. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1230/oj/eng>