

Васильєв Ігор Анатолійович

Ph.D., молодший науковий співробітник, науково-дослідна частина,

<https://orcid.org/0000-0002-4477-4521>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Бушуєв Сергій Дмитрович

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління проєктами,

<https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ МЕНЕДЖМЕНТУ ПРОЄКТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ОРГАНІЗУВАННЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ В ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАДАХ В УМОВАХ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ

Анотація. Повномасштабна агресія проти України суттєво погіршила функціонування транспортних систем територіальних громад, загостривши довоєнні проблеми, пов'язані з дорожнім рухом. В умовах високої невизначеності та дефіциту ресурсів, повоєнна відбудова територіальних громад вимагає не лише відновлення інфраструктури, а й підвищення її стійкості та керованості. Це вимагає застосування нових інструментів проєктного менеджменту, таких як інтегрована концептуально-математична модель менеджменту проєктів модернізації організування дорожнього руху (ОДР). У дослідженні запропоновано поєднання концептуальної, математичної та методичної складових, що забезпечує оцінювання сталості проєктних рішень та підтримує прийняття рішень на основі адаптивного циклу «аналіз – планування – реалізація – моніторинг – коригування», орієнтуючись на індекс сталості проєкту S як узагальнюючу характеристику. Розроблено концептуальну модель менеджменту проєктів модернізації ОДР, що базується на чотирьох ключових принципах: сталості, безпечності, адаптивності та технологічності. Побудовано математичну модель, де цільова функція полягає у максимізації інтегрованого індексу сталості S . Цей індекс визначається як зважена сума нормалізованих покращень трьох цільових змінних – середнього часу в дорозі T_r , рівня аварійності A_r та екологічного впливу E_c . Модель була верифікована на прикладі Київської міської територіальної громади. Проведено розрахунки для трьох сценаріїв: оптимістичного, ризик-орієнтованого та песимістичного. Проведений аналіз чутливості ідентифікував ключові «важелі» управління. Верифікація інтегрованої моделі надає інструмент для кількісного обґрунтування та сценарного планування управлінських рішень у проєктах модернізації ОДР в умовах повоєнної відбудови. Ключовим висновком дослідження є виявлення «структурної стабільності» моделі: аналіз часткових похідних довів, що вплив технологічних параметрів (T_e , T_c) на індекс S є стабільним і не залежить від рівня ризиків P . Це математично обґрунтовує, що ризики та технології є незалежними, окремо керованими компонентами. На основі цього сформульовано практичні рекомендації: обґрунтовано доцільність упровадження роздільного менеджменту, що передбачає реалізацію двох паралельних стратегій – антикризової та технологічної. Антикризова стратегія має бути спрямована на мінімізацію інституціональних, фінансових та логістичних ризиків P , які здатні нівелювати будь-які технологічні досягнення. Технологічна стратегія, у свою чергу, має пріоритизувати інвестиції у розширення покриття цифровою інфраструктурою T_c як найбільш ефективний важіль підвищення сталості проєкту.

Ключові слова: аналіз чутливості; концептуальна модель; математична модель; організування дорожнього руху; повоєнна відбудова; територіальна громада; управління проєктами

Вступ

Повномасштабна агресія проти України суттєво вплинула на функціонування транспортних систем (ТС) територіальних громад, загостривши довоєнні

проблеми пов'язані з інтенсивністю та безпекою дорожнього руху, перевантаженістю вулично-дорожньої мережі (ВДМ), недостатнім розвитком дорожньої інфраструктури, неузгодженістю управлінських рішень. У цих динамічних умовах

проекти модернізації ОДР стикаються з високою невизначеністю, дефіцитом ресурсів і необхідністю швидкої адаптації дорожнього руху до змін. Водночас повоєнна відбудова вимагає не лише відновлення інфраструктури відповідно до принципів і підходів сталого розвитку та сталої мобільності, а й підвищення її стійкості та керованості за рахунок цифровізації та використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС), штучного інтелекту (ШІ), геоінформаційних систем (ГІС), а також упровадження сучасних підходів до менеджменту проєктів.

Особлива практична значущість цього проявляється для територіальних громад зі складними транспортними системами, що характеризуються великою кількістю транспортних засобів, розгалуженою та протяжною ВДМ, інтенсивним дорожнім рухом, значними обсягами внутрішніх і транзитних пасажирських та вантажних перевезень. Насамперед йдеться про великі міста та складні транспортні вузли, керованість і транспортна стійкість яких безпосередньо впливають на забезпечення обороноздатності держави. Посилення цієї спроможності є критично важливим під час повоєнної відбудови територіальних громад, коли оперативність, надійність і безпека транспортних потоків стають ключовими передумовами функціонування економіки, логістики, критичної інфраструктури, систем цивільного захисту населення, забезпечення потреб сил оборони та безпеки.

На цьому тлі актуальним є створення системи управління проєктами, яка поєднує концептуальну, математичну та методичну складові, забезпечує оцінювання сталості проєктних рішень та підтримує прийняття рішень у різних сценаріях розвитку подій.

Постановка проблеми

Реалізацію зазначеного підходу пропонується здійснювати на базі інтегрованого адаптивного циклу «аналіз – планування – реалізація – моніторинг – коригування», орієнтуючись на індекс сталості проєкту модернізації ОДР S , як узагальнюючу характеристику ефективності та стійкості проєктів модернізації ОДР в територіальних громадах.

Це потребує розробки та верифікації інтегрованої моделі менеджменту проєктів модернізації ОДР, яка здатна:

- відображати динамічний контекст воєнного стану та повоєнної відбудови територіальних громад;
- кількісно оцінювати сталість проєкту за допомогою індексу S ;
- підтримувати вибір керуючих дій та пріоритетів цифровізації на рівні керуючої системи ОДР.

Для цього послідовно вирішуються чотири взаємопов'язаних завдання, які формують теоретико-

методичну основу проєктів модернізації ОДР у територіальних громадах:

- розроблення інтегрованої концептуальної моделі менеджменту проєктів модернізації ОДР з адаптивним циклом «аналіз – планування – реалізація – моніторинг – коригування»;
- побудова математичної моделі з цільовою функцією сталості проєкту модернізації ОДР;
- розрахунок індексу сталості проєкту S для оптимістичного, ризик-орієнтованого та песимістичного сценаріїв, формування для кожного з них пакету заходів щодо підвищення сталості;
- аналіз чутливості індексу S до технологічних параметрів та ймовірних збоїв для виявлення «важелів» управління.

Вирішення зазначених завдань в подальшому дозволить розробити рекомендації щодо модернізації ОДР територіальних громад в умовах їх повоєнної відбудови.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Менеджмент проєктів модернізації ОДР в територіальних громад в умовах повоєнної відбудови є комплексним завданням, що вимагає науково обґрунтованого підходу для збалансування ефективності, безпеки та екологічності. Успішна реалізація таких проєктів спирається на інтегровану аналітичну структуру з трьох ключових елементів: концептуальної моделі, математичної моделі та аналізу чутливості.

Стаття [1] присвячена вибору методології управління для інфраструктурних проєктів з ОДР в контексті воєнної та повоєнної відбудови, що є на даний час одним з ключових завдань проєктного менеджменту. Автори пропонують інтегровану концептуальну модель у вигляді синкретичного підходу, який поєднує послідовну водоспадну модель для чітко визначених етапів (наприклад, розроблення нормативних актів) та гнучкі методології (Scrum і Kanban) для ітеративних компонентів, як-от створення інформаційних систем управління ОДР.

У статті [2] обґрунтовується застосування проєктного підходу до стратегічного відновлення та розвитку транспортної інфраструктури України, що є завданням програмного та портфельного менеджменту. З позиції управління проєктами, дослідження висуває інтегровані концептуальні моделі, зокрема державно-приватне партнерство та залучення грантових ресурсів, як ключові інструменти для реалізації ефективних проєктних рішень. Підкреслюється, що стійкість проєктів відновлення вимагає упровадження прозорих систем звітності, таких як Цифрова система управління відбудовою, для моніторингу та оцінки ефективності.

Стаття [3] пропонує підхід до визначення раціональних сценаріїв реалізації проектів відновлення транспортної інфраструктури, що є формою сценарного аналізу в проектному менеджменті. Дослідження представляє інтегровану концептуальну модель, що поєднує математичну модель транспортних потоків Гріншилда та геоінформаційний фреймворк OpenStreetMap (OSM) для кількісної оцінки. На основі цієї моделі проводиться аналіз чутливості шляхом порівняння різних сценаріїв відновлення, оцінюючи їх вплив на математичні показники сталості дорожнього руху, такі як середня швидкість та середня затримка.

Дослідження [4] розглядає особливості управління проектами відновлення транспортної та безпекової інфраструктури в сільських громадах, що є складним завданням через системні взаємозв'язки між проектами. Автори пропонують інтегровану концептуальну модель системи управління, що складається з чотирьох компонентів (проектне середовище, проект, продукт проекту, управління проектом). З позиції проектного менеджменту, ключовим результатом є аналіз системного взаємовпливу продуктів різних проектів на їхню сукупну цінність та стійкість для стейкхолдерів, що формулює науково-прикладні задачі для подальшого математичного моделювання.

Дослідження [5] аналізує аспекти упровадження синкретичної методології при управлінні проектами відновлення інфраструктури, що є передовим підходом у проектному менеджменті. У статті представлена інтегрована концептуальна модель «система-результат», яка об'єднує організаційний, методологічний та інструментальний аспекти.

У статті [6] розглядається концептуальна модель створення міських транспортних мереж, заснована на інтегрованій парадигмі «Smart Port-City», що є основою для ініціювання проектів збалансованого розвитку інфраструктури. З позиції проектного менеджменту, дослідження визначає систему спільних цілей міста та транспортної системи на прикладі порту, як умова для запуску транспортних проектів.

Стаття [7] розглядає проектний підхід до створення керуючої системи для модернізації ОДР під час відбудови, фокусуючись на концепції сталої мобільності, адаптованої до воєнних викликів. Дослідження пропонує концептуальну модель керуючої системи, що інтегрує принципи стійкості та адаптивності.

Дослідження [8] аналізує особливості проектів пасажирських перевезень, обґрунтовуючи необхідність переходу від традиційних підходів до ціннісно-орієнтованого управління проектами, де головною цінністю є якісна та ефективна система

перевезень, що задовольняє потреби пасажирів. У статті згадується про важливість створення сталих систем перевезень та застосування моделей для оптимізації.

У статті [9] досліджується технологічний аспект цифровізації управління дорожнім рухом в умовах воєнного стану, що є ключовим компонентом проектів модернізації. Пропонується інтегрована концептуальна модель управління проектом, що базується на принципах сталості та адаптивності, та розглядаються інструменти просторово-часового аналізу ДТП.

Дослідження [10] присвячене розробці організаційної моделі управління етапами реалізації програм інфраструктурних проектів на прикладі водного транспорту. У статті розглядається математична модель PERT для оцінки тривалості робіт в умовах невизначеності, що опосередковано стосується сталості проекту.

У статті [11] обґрунтовується застосування системного ризик-орієнтованого підходу до управління безпекою на пішохідних переходах, що є специфічним проектом в ОДР. Дослідження пропонує інтегровані структурно-логічні моделі ДТП та використовує математичний апарат теорії ймовірностей і булевої алгебри для кількісної оцінки ризиків, що є формою моделювання сталості системи безпеки.

У статті [12] розглядаються сучасні підходи до ОДР в умовах надзвичайних ситуацій, що є критичним аспектом проектів модернізації, орієнтованих на стійкість. Дослідження пропонує застосування інтегрованих математичних моделей транспортних потоків та теорії масового обслуговування для оптимізації руху.

Аналіз приведених досліджень дозволяє зробити висновок щодо необхідності розгляду проектів модернізації ОДР не тільки з позицій їхньої економічної, соціальної та екологічної ефективності, але й за їхньою здатністю забезпечувати функціонування ТС територіальних громад в умовах воєнного стану та швидку їх відбудову.

Мета статті

Мета статті полягає у представленні результатів розроблення та верифікації інтегрованої концептуально-математичної моделі менеджменту проектів модернізації ОДР, орієнтованої на максимізацію індексу сталості S , із застосуванням сценарного моделювання та аналізу чутливості сталості проектів, для подальшого обґрунтування на цій основі моделі управління проектами модернізації ОДР (на прикладі міських територіальних громад) та підготовки рекомендацій із цифровізації виробничих процесів упровадження ОДР в умовах повоєнної відбудови територіальних громад.

Виклад основного матеріалу

Концептуальна модель менеджменту проєкту модернізації ОДР в територіальній громаді. Концептуальна модель є необхідним інструментом стратегічного управління проєктами модернізації ОДР, її мета полягає у забезпеченні ефективного управління проєктами, спрямованими на вдосконалення ОДР, підвищення безпеки дорожнього руху та ефективності перевезення пасажирів та вантажів, більш широкого застосування сучасних інформаційних технологій в умовах упровадження принципів сталої мобільності та перманентної загрози збройної агресії проти України.

Запропонована концептуальна модель розроблена з врахуванням наступних принципів:

- *сталості*: будь-яке транспортне рішення в рамках ОДР повинно бути економічно ефективним, екологічним та соціально орієнтованим. Економічну ефективність в рамках моделі, що пропонується, також можна розглядати, як окремий принцип;

- *безпечності*: упровадження заходів ОДР повинно орієнтуватися на зниження аварійності дорожнього руху, запобігання виникненню місць концентрації ДТП, покращення умов руху пішоходів, маломобільних осіб, засобів мікромобільності, велосипедистів;

- *адаптивності*: заходи з ОДР повинні забезпечувати гнучкість ТС до змін у дорожньому русі, пов'язаних із змінами дорожніх умов, автомобілізацією, демографією, просторовим плануванням, змінами у законодавстві, розвитком технологій, а також ризиками воєнного стану та повоєнної відбудови;

- *технологічності*: заходи з ОДР повинні використовувати сучасні технології (штучний інтелект, інтернет-речей, геоінформаційні системи) для аналізу актуальної інформації щодо стану дорожнього руху та приймання своєчасних обґрунтованих управлінських рішень щодо ОДР.

Концептуальна модель (рисунок 1) включає наступні основні структурні елементи (компоненти):

- *зацікавлені сторони (стейкхолдери)*: органи державної та місцевої влади, військові, патрульна поліція, перевізники, підрядні організації, громада, учасники дорожнього руху;

- *ресурси*: фінансові, матеріальні, людські, інформаційні;

- *етапи упровадження*, які реалізуються через наступні процеси: аналіз поточного стану, планування, проєктування, моніторинг, коригування;

- *технології та інструменти їх реалізації*: методології управління проєктами, ключові показники ефективності, програмне забезпечення для контролю виконання;

- *зовнішні фактори*, що впливають на реалізацію комплексної моделі;

– *інфраструктура ОДР*: дорожні знаки, світлофори, дорожня розмітка, камери відеоспостереження, ІТС, автоматизовані системи керування дорожнім рухом (АСКДР).

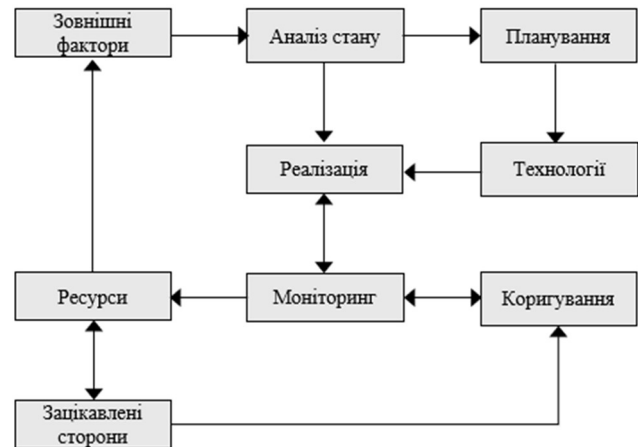


Рисунок 1 – Блок-схема концептуальної моделі менеджменту проєктів модернізації ОДР, [9] із змінами

Усі елементи концептуальної моделі взаємопов'язані між собою. Наприклад, ресурси використовуються для досягнення цілей через упровадження певних рішень, а інструменти менеджменту дозволяють відстежувати ефективність кожного етапу та своєчасно вносити корективи.

Реалізація проєктів за цією моделлю дозволяє досягти очікуваних результатів щодо зменшення аварійності на ВДМ, скорочення часу в дорозі, покращення екологічного стану (особливо на ділянках ВДМ з найбільш інтенсивним дорожнім рухом), зростання задоволеності населення якістю послуг, прийняття більш обґрунтованих управлінських рішень щодо розвитку та планування ТС, просторового планування території, підвищення керованості та стійкості ТС, у тому числі, по відношенню до ризиків воєнного стану та повоєнної відбудови.

Згідно блок-схеми «зовнішні фактори» впливають на дорожній рух, «аналіз стану» якого дозволяє його оцінити. За результатами «аналізу стану» здійснюється «планування» модернізації, яке включає визначення її цілей та стратегій. На основі проведеного «планування» проводиться «реалізація» модернізації, яка підтримується «технологіями». «Реалізація» модернізації супроводжується «моніторингом», який дозволяє контролювати процес модернізації та отримувати інформацію про його стан для подальшого, у разі необхідності, «коригування». Різноманітні «ресурси» забезпечують процес модернізації, отримуючи інформацію від «моніторингу» щодо його стану. «Зацікавлені сторони», впливають на «ресурси» та беруть участь у «коригуванні» процесу модернізації, замикаючи цикл модернізації.

Математична модель менеджменту проєкту модернізації ОДР в територіальній громаді

Для формалізації процесу управління проєктами модернізації ОДР побудована математична модель, яка дозволяє, використовуючи цільову функцію, кількісно оцінити ефективність проєкту з позицій сталості, технологічної ефективності, безпеки дорожнього руху та екологічності.

У моделі пропонується використовувати наступні змінні, що поділяються на кілька груп.

Цільові змінні: S – індекс сталості проєкту (0–1); T_r – середній час у дорозі після модернізації (хв); A_r – рівень аварійності після модернізації (ДТП/рік); E_c – екологічний вплив після модернізації (тон CO_2 /рік).

Ресурсні змінні: B – бюджет (млн грн); H – людські ресурси (кількість працівників, осіб); I – інфраструктурні ресурси (кількість ТЗРДР, од).

Технологічні параметри: T_e – ефективність технологій (0–1, частка оптимізованого трафіку); T_c – покриття технологіями (0–1, частка оснащених зон).

Обмеження: T_{max} – максимальний час реалізації проєкту (кількість місяців); B_{max} – максимальний бюджет; H_{min} – мінімальна кількість працівників (осіб); I_{min} – мінімальна кількість об'єктів (од); P – ймовірність збоїв (0–1, наприклад, через погодні умови або технічні фактори).

Зовнішні фактори: D – щільність населення (осіб/км²); V – обсяг трафіку, кількість транспортних засобів (авто/год).

Цільова функція, яка полягає у максимізації індексу сталості проєкту S , приймає наступний вигляд:

$$S = w_1 \left(1 - \frac{T_r}{T_{r0}}\right) + w_2 \left(1 - \frac{A_r}{A_{r0}}\right) + w_3 \left(1 - \frac{E_c}{E_{c0}}\right) - \lambda P, \quad (1)$$

де T_{r0} , A_{r0} , E_{c0} – базові значення цільових змінних до модернізації; w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти впливу для часу, безпеки та екології (0–1); λ – штраф за збої (0–1).

Для цільової функції приймаються наступні обмеження: час: $\sum T_i \leq T_{max}$ – до часу на етапи (планування, будівництво, тестування); $\sum B_i \leq B_{max}$ – до витрат на інфраструктуру, технології, персонал; $H \geq H_{min}$, $I \geq I_{min}$ – до мінімізації вимог до ресурсів; $T_r \leq T_{r0}(1 - T_e T_c)$ – до технологічності, що зменшує час у дорозі; $A_r \leq A_{r0}(1 - k I T_c)$ – до зниження аварійності, яка залежить від інфраструктури та технологій, де k – коефіцієнт ефективності впливу заходів; $E_c \leq E_{c0}(1 - m T_e)$ – до зменшення викидів, яке залежить від технологій, де m – коефіцієнт ефективності впливу заходів.

Вплив технологічних параметрів на цільові змінні можна визначити наступним чином:

– для середнього часу у дорозі

$$T_r = T_{r0} \left(1 - T_e T_c \frac{V}{V_{max}}\right), \quad (2)$$

де $V_{max} = 0,5(D)$, що визначає взаємозв'язок максимального обсягу трафіку з щільністю населення, яка збільшується в десятки разів в міських територіальних громадах;

– для рівня аварійності

$$A_r = A_{r0} \left(1 - T_c \frac{I}{I_{max}}\right), \quad (3)$$

– для рівня викидів CO_2

$$E_c = E_{c0} \left(1 - T_e \frac{H}{H_{max}}\right). \quad (4)$$

Для рівня викидів CO_2 цей вплив характеризується тим, що чим більше кваліфікованих працівників H використовують ефективні технології T_e , тим сильніше знижується кількість шкідливих викидів. Іншими словами: технології T_e не дадуть ніякого ефекту без їх реалізації працівниками H , які в свою чергу без нових технологій не зменшать викиди CO_2 .

З врахуванням зазначеного вище цільова функція приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \max S = & w_1 \left(1 - \frac{T_r}{T_{r0}}\right) + w_2 \left(1 - \frac{A_r}{A_{r0}}\right) + \\ & + w_3 \left(1 - \frac{E_c}{E_{c0}}\right) - \lambda P, \end{aligned} \quad (5)$$

з обмеженнями: $\sum T_i \leq T_{max}$, $\sum B_i \leq B_{max}$, $H \geq H_{min}$, $I \geq I_{min}$.

У разі, якщо T_r , A_r та E_c мають різномасштабні розмірності (наприклад, хвилини часу у дорозі проти тон CO_2), незважаючи на використання ваг, у розрахунках може виникнути переки, що може бути вирішено за рахунок нормалізації цільової функції шляхом уведення очікуваних діапазонів покращення цільових змінних – ΔT_r , ΔA_r , ΔE_c .

У цьому випадку вираз, що описує нормалізовану цільову функцію буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \max S = & w_1 \frac{(T_{r0} - T_r)}{\Delta T_r} + w_2 \frac{(A_{r0} - A_r)}{\Delta A_r} + \\ & + w_3 \frac{(E_{c0} - E_c)}{\Delta E_c} - \lambda P, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\Delta T_r = T_{r0} - T_{rmin}$ – очікуваний діапазон покращення середнього часу у дорозі; $\Delta A_r = A_{r0} - A_{rmin}$ – очікуваний діапазон покращення рівня аварійності; $\Delta E_c = E_{c0} - E_{cmin}$ – очікуваний діапазон покращення екологічного впливу.

Застосування нормування дозволяє об'єктивно порівнювати прогрес у різних вимірах.

У разі, якщо ваги критеріїв важко визначити, багатокритеріальність можна визначити через альтернативу, наприклад, використовуючи принцип Парето або багатокритеріальну оптимізацію з функціями-орієнтирами по кожному з показників T_r , A_r та E_c .

Визначення коефіцієнтів k , m , λ можливо прив'язати до емпіричних даних або сценаріїв. Наприклад, коефіцієнт λ залежить від типу територіальної громади.

Ефективність технологій T_e та покриття технологіями T_c можна зробити функціями часу або фаз реалізації проекту. Наприклад:

$$T_e(t) = f \left(\begin{matrix} \text{оснащення,} \\ \text{навчання персоналу,} \\ \text{адаптація системи} \end{matrix} \right). \quad (7)$$

Це дозволяє будувати динамічну модель, наприклад, для симуляції ефектів за п'ятирічний період.

При застосуванні просторового моделювання, деякі змінні має сенс визначати у просторі, роблячи їх прив'язаними до нього. Наприклад, щільність населення D та обсяг трафіку V можуть мати різні значення для населених пунктів, що обумовить різницю в значенні S для різних населених пунктів.

Розглянемо на прикладі Київської міської територіальної громади цільову функцію для трьох сценаріїв модернізації ОДР, використовуючи наступні вхідні значення:

– $T_{\max} = 36$ міс, $V_{\max} = 300$ млн грн (на прикладі витрат у 2024 році, передбачених Програмою економічного та соціального розвитку міста Києва на 2024–2026 роки [13; 14]);

– $T_{r0} = 30$ хв [15]; $A_{r0} = 40000$ ДТП/рік (середнє з 2017 по 2020 роки [16]);

– $E_{c0} = 800$ тис. тон CO_2 /рік (виходячи з розміру викиду CO_2 143 грама/км [17], середньої відстані у 25 км, яку проїжджає автомобіль за один день у місті Києві, кількості автомобілів у 1 млн, що виїжджають в середньому кожен день на ВДМ міста Києва);

– $N = 100$ працівників, $N_{\min} = 50$ працівників,

$N_{\max} = 150$ працівників;

– $I = 800$ світлофорів, $I_{\min} = 500$ світлофорів,

$I_{\max} = 1000$ світлофорів;

– $D = 3500$ осіб/км², $V = 1000$ авто/год, $V_{\max} = 1750$ авто/год;

– $w_1 = 0,3$; $w_2 = 0,4$; $w_3 = 0,3$; $\lambda = 0,2$.

Отримані за результатами розрахунків значення параметрів представлені в табл. 1.

Сценарій 1 (оптимістичний). Відрізняється високою ефективністю технологій ($T_e = 0,8$), високим рівнем покриття території технологіями ($T_c = 0,7$) та низьким рівнем ризиків ($P = 0,2$), що забезпечує порівняно з еталонними значеннями значні покращення середнього часу у дорозі на 32,0%, зниження аварійності на 56,0% зниження викидів CO_2 на 53,3%. Розрахований коефіцієнт сталості S дорівнює 0,44, що є помірно високим значенням, яке вказує на ефективну та збалансовану модернізацію, позитивні зміни у роботі ТС, підвищення безпеки дорожнього руху, збільшення рівня екологічної ефективності роботи дорожнього транспорту.

Сценарій 2 (ризик-орієнтований). Відрізняється високою ефективністю технологій ($T_e = 0,8$), високим рівнем покриття території технологіями ($T_c = 0,7$) та підвищеним рівнем ризиків ($P = 0,5$), що забезпечує такий же самий рівень T_r , A_r та E_c , як у сценарії 1. Але високий рівень ризиків знижує в порівнянні зі сценарієм 1 значення коефіцієнту сталості S на 0,06 або приблизно на 14%, що свідчить про високу чутливість проекту модернізації до ризиків, попри технічно успішну модернізацію.

Сценарій 3 (песимістичний). Відрізняється помірною ефективністю технологій ($T_e = 0,5$), середнім рівнем покриття території технологіями ($T_c = 0,5$) та підвищеним рівнем ризиків ($P = 0,5$), що забезпечує порівняно з еталонними значеннями незначне покращення середнього часу у дорозі на 14,3%, більш помірне в порівнянні зі сценаріями 1 та 2 зниження аварійності на 40,0% та зниження викидів CO_2 на 33,3%. Розрахований коефіцієнт сталості S дорівнює 0,203, що є низьким значенням, яке падає до критичного рівня.

Таблиця 1 – Розраховані значення T_r , A_r , E_c та S для трьох сценаріїв модернізації ОДР

Параметр	Сценарій			Примітка
	1	2	3	
T_e	0,8	0,8	0,5	Впливає на T_r та E_c
T_c	0,7	0,7	0,5	Впливає на T_r та A_r
P	0,2	0,5	0,5	Впливає прямо через λP
T_r , хв	20,4	20,4	25,71	Найкраще у сценаріях 1 і 2
Зміна T_r відносно T_{r0} , %	-32,0%	-32,0%	-14,3%	
A_r , ДТП/рік	17600,0	17600,0	24000,0	Найкраще у сценаріях 1 і 2
Зміна A_r відносно A_{r0} , %	-56,0%	-56,0%	-40,0%	
E_c , тон/рік	373333,0	373333,0	533333,0	Найкраще у сценаріях 1 і 2

Це свідчить про обмежену сталість проекту та низьку ефективність його упровадження, які забезпечують тільки часткове зменшення часу у дорозі, скорочення аварійності та екологічне навантаження.

Щодо запропонованих сценаріїв модернізації можна зазначити наступне:

– *сценарій 1 (оптимістичний)* є найбільш ефективним за результатами реалізації, мінімальним за ризиками та максимальним за використанням технологій;

– *сценарій 2 (ризик-орієнтований)* є технічно вдалим, але за рахунок високого рівня ризиків, що обумовлені внутрішніми та зовнішніми загрозами, в порівнянні зі сценарієм 1 є менш сталим та має більш високу вірогідність невдалої реалізації;

– *сценарій 3 (песимістичний)* є невдалим, як у технічному плані, так і в плані реалізації за рахунок низької сталості, що обумовлено низьким рівнем технологічності та високим рівнем ризиків. Це обумовлює потребу щодо оптимізації проекту модернізації, збільшення технологічності та зменшення впливу ризиків на реалізацію проекту.

Аналіз трьох сценаріїв упровадження проекту модернізації ОДР демонструє, що успішність реалізації проекту суттєво залежить від рівня упровадження сучасних технологій, ступеня цифровізації, рівня ризиків, а також організаційних заходів у сфері управління транспортними потоками.

Для підвищення індексу сталості проекту S у кожному з розглянутих сценаріїв доцільно реалізувати певні заходи, враховуючи аспекти, пов'язані з ОДР:

– *сценарій 1* передбачає – подальше зниження ризиків до рівня 0,1–0,15 шляхом упровадження антикризових механізмів, резервного фінансування та підвищення інституційної спроможності; збільшення кількості кваліфікованих працівників до 120–130 осіб; модернізацію світлофорних об'єктів з розширенням функцій «зеленої хвилі», що дозволить покращити регулювання трафіку та безпеку; локальну оптимізацію маршрутів з урахуванням даних моніторингу трафіку;

– *сценарій 2* передбачає – зниження ризиків до 0,2, що суттєво вплине на підвищення сталості без необхідності технічної модернізації; вдосконалення управління ризиками (розроблення сценаріїв реагування на непередбачувані виклики, кризові ситуації, логістичні збої); додаткове підсилення персоналу та технічного забезпечення; оптимізацію перевантажених ділянок (точкове коригування маршрутів, розроблення тимчасових схем ОДР з врахуванням викликів, кризових ситуацій, та логістичних збоїв);

– *сценарій 3* передбачає – цифровізацію ОДР, у тому числі, застосування ІТС, систем адаптивного регулювання сигналів; розширення цифрової

інфраструктури ОДР для підвищення T_c до $\geq 0,7$; зниження ризиків до рівня 0,3 через структурну реорганізацію управлінських процесів та упровадження управління ризиками на основі моделей ISO 31000; розширення кадрової бази, принаймні до 120 осіб із фокусом на інженерно-технічний склад; масове оновлення ТЗРДР та інших технологічних рішень, які використовують сучасні цифрові технології, наприклад, адаптивні світлофори, інформаційні табло; реорганізація схем руху для усунення зайвих конфліктів транспортних потоків; формування пріоритету для громадського транспорту шляхом створення виділених смуг; запровадження сталих швидкісних режимів, наприклад, зон 30 км/год у центральних і житлових районах; інфраструктурне переосмислення перехресть та створення кругових розв'язок, безпечних переходів тощо.

Підсумовуючи запропоновані заходи, можна зробити загальний висновок, а саме: підвищення сталості проекту модернізації ОДР повинно базуватись не лише на технічних показниках, а й на системному управлінні ризиками, людському потенціалі, адаптації транспортного простору до потреб сталого розвитку та ефективному управлінні міською мобільністю. Це відображає системну логіку методології інноваційного розвитку, згідно до якої ефективне використання людського потенціалу (знань, компетентності, творчих здібностей персоналу) разом із упровадженням інновацій є ключовим фактором для досягнення стратегічної переваги у сучасних умовах конкурентної боротьби [18].

Аналіз чутливості проекту модернізації ОДР у територіальній громаді. У рамках дослідження був проведений аналіз чутливості індексу сталості проекту S щодо визначення ступеня впливу на нього параметрів T_e , T_c та P з метою подальшого оцінювання ефективності проекту модернізації ОДР та його спрямування в бік підвищення ефективності в отриманні запланованих результатів.

Для оцінки чутливості були розраховані значення індексу S при зміні на 0,1 кожного з параметрів T_e , T_c та P в інтервалі від 0,1 до 1,0. У результаті було отримано 1 тис. значень індексу S , що надало можливість визначити залежність S від T_e , T_c та P . Стисле синтетичне порівняння впливу параметрів T_e , T_c та P на індекс сталості S приведені у табл. 2.

Результати аналізу чутливості індексу сталості S проекту модернізації ОДР свідчать, що найбільш суттєвий позитивний вплив на індекс має технологічна ефективність T_e яка забезпечує зменшення середнього часу в дорозі та екологічного навантаження. Покриття технологіями T_c також позитивно впливає на сталість модернізації, насамперед шляхом зниження аварійності, однак ефект є менш вираженим порівняно з T_e .

Таблиця 2 – Порівняння впливу параметрів T_e , T_c та P на індекс сталості S

Параметр	Вплив на S	Характер впливу	Ключова позиція
T_e	Високий позитивний	Нелінійний, синергічний	Інноваційність та ефективність технологій
T_c	Помірний позитивний	М'який, стабільний	Покриття та інтеграція у просторі
P	Високий негативний	Лінійний, різко понижуючий	Уразливість, нестабільність, невизначеність модернізації

Найбільший негативний вплив на індекс сталості S має рівень ризиків P , зростання якого призводить до лінійного і суттєвого зниження інтегрального показника, навіть за умов високих значень технологічних параметрів. Це обумовлює критичну важливість упровадження ефективного управління ризиками у реалізації проєктів модернізації ОДР. Найвищі значення індексу досягаються за умов синергетичного поєднання високої ефективності технологій, їх застосування на всіх етапах реалізації ОДР та покриття як можна більшої частини ВДМ.

Додатково був проаналізований вплив змін значень T_e , T_c та P на зміну S , тобто на скільки індекс сталості є чутливим до змін параметрів T_e , T_c та P . Аналіз ґрунтувався на параметризованій моделі, в якій значення S визначається як функція від трьох ключових чинників: ефективності технологій T_e , ступеня покриття інфраструктури сучасними транспортними технологіями T_c та рівня ризиків P .

Для кожного з параметрів (T_e , T_c , P) була розрахована наближена часткова похідна цільової функції сталості S , використовуючи метод кінцевих різниць:

$$\frac{\partial S}{\partial x} \approx \frac{S(x + \Delta x) - S(x)}{\Delta x}, \quad (8)$$

де $x \in \{T_e, T_c, P\}$; Δx – мале додатне число; $S(x)$ – значення цільової функції S при базовому значенні параметра; $S(x + \Delta x)$ – значення S при незначному зростанні параметра.

При значенні $P = 0,20$ наближені часткові похідні індексу сталості S дорівнюють:

– $\frac{\partial S}{\partial T_e} \approx +0,32$ – збільшення T_e на 0,1 підвищує S на 0,032;

– $\frac{\partial S}{\partial T_c} \approx +0,457$ – збільшення T_c на 0,1, підвищує S на 0,046;

– $\frac{\partial S}{\partial P} \approx -0,20$ – збільшення ризиків на 0,1 знижує S на 0,02.

Таким чином, найбільш чутливим індекс сталості S є до змін T_c , який має найбільший вплив на підвищення сталості. T_e також впливає на S , але в меншій мірі відносно T_c . P має стійкий лінійно негативний вплив на S .

При значенні $P = 0,50$ значення наближених часткових похідних індексу сталості S збігаються з

результатами попереднього сценарію ($P = 0,2$), що свідчить про загальну стабільність характеру зміни значень градієнтів S незалежно від зміни значень P .

З приводу цього можна зробити висновок, що при різних значеннях ризиків ($P = 0,2$ та $P = 0,5$) значення наближених часткових похідних індексу сталості S за параметрами T_e та T_c залишаються практично незмінними. Це свідчить про локальну лінійність впливу технологічних параметрів на індекс S у досліджуваній області та про відсутність сильної взаємодії між P та технологічними параметрами у запропонованій моделі.

Відсутність сильної взаємодії означає, що зміна T_e впливає на S тільки через T_c і E_c незалежно від P ; зміна P впливає лише через $-\lambda P$, ніяк не змінюючи T_c , A_c та E_c . Це говорить про те, що навіть якщо P збільшується з 0,2 до 0,5, вплив T_e та T_c на S залишається майже однаковим: похідні $\frac{\partial S}{\partial T_e} \approx 0,32$ та

$\frac{\partial S}{\partial T_c} \approx 0,457$ для обох сценаріїв ($P = 0,2$ та $P = 0,5$)

залишаються однаковими. Іншими словами – відсутність сильної взаємодії означає, що вплив технологічних параметрів T_e та T_c на індекс сталості S є стабільним і не залежить від рівня ризиків P . Модель побудована таким чином, що ризики знижують сталий ефект, як окремий фактор, але не змінюють того, наскільки ефективними будуть технології.

Отже, аналіз часткових похідних та порівняльна побудова сценаріїв для різних рівнів ризиків ($P = 0,2$ та $P = 0,5$) свідчить, що вплив технологічних параметрів T_e та T_c на індекс сталості S є стабільним і майже незмінним у досліджуваному діапазоні ризиків. Це обумовлено структурою моделі, в якій ризики впливають на індекс сталості як окремий незалежний компонент без взаємодії з технологічними параметрами, що дає можливість окремо управляти ризиками і технологічними параметрами, спрощувати процес проєктного планування та стратегічної оптимізації заходів модернізації ОДР.

Це дозволяє зробити висновки щодо чутливості індексу S до зміни параметрів T_e , T_c та P :

– *локальний висновок щодо модельної стабільності чутливості (структурна стабільність)* згідно, до якого аналіз часткових похідних та порівняльна характеристика сценаріїв для різних

рівнів ризику ($P = 0,2$ та $P = 0,5$) свідчать, що вплив параметрів T_e та T_c на S є стабільним і майже незмінним у досліджуваному діапазоні ризиків. Модель характеризується локальною властивістю, яка полягає у тому, що зміна ризиків не впливає на те, яким чином T_e та T_c впливають на S . Іншими словами градієнтні характеристики моделі залишаються стабільними, а P входить до функції як додатковий незалежний знижуючий фактор. Це дозволяє роздільно управляти ризиками і технологіями, спрощуючи проектне планування;

– *глобальний висновок щодо системного впливу на S (системна важливість усіх трьох параметрів)*, згідно до якого найвищі значення індексу S досягаються за умов поєднання високої ефективності технологій, повного їх упровадження та мінімального рівня ризиків. Цей висновок можна вважати загальним, так як підтверджує повну взаємодію всіх трьох параметрів у межах системи та незалежну дію кожного з параметрів. При цьому максимальним значення S може бути у разі максимального позитивного впливу кожного з параметрів. Структурна незалежність впливу кожного з параметрів не може компенсувати відсутність іншого впливу. Тобто всі параметри є критично важливим для цільової функції;

– *кількісний висновок щодо оцінки впливу параметрів (величина впливу через градієнт)*, згідно до якого найбільш суттєвий позитивний вплив має T_e , далі йде T_c , а найбільший негативний вплив має P . Цей висновок базується на аналізі величин похідних

$$- \text{чутливості } S \text{ до змін кожного параметра, а саме } \frac{\partial S}{\partial T_e} \approx +0,32, \frac{\partial S}{\partial T_c} \approx +0,457, \frac{\partial S}{\partial P} \approx -0,20.$$

Більш стисло зазначені висновки можна представити у вигляді табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристика висновків щодо чутливості індексу S до зміни параметрів T_e , T_c та P

Висновок	Зміст висновку	Вплив на проект
Структурна стабільність	Чутливість T_e та T_c не залежить від P	Дає змогу планувати роздільно
Системна важливість усіх трьох параметрів	Для досягнення максимуму S потрібні всі параметри	Узагальнює та стратегічно об'єднує
Величини впливу (градієнт)	$T_c > T_e > P$ (по модулю впливу)	Оцінює локальну ефективність керування

Підсумовуючи висновки зазначимо, що параметр P , хоча є структурно незалежним у моделі,

він все одно має істотний знижуючий ефект. T_e та T_c мають незалежні, але не взаємозамінні позитивні впливи. Тому оптимальна стратегія для проекту полягає не в пошуку заміни, а в збалансованому поєднанні трьох складових: ефективності, цифровізації та мінімізації ризиків, що можна відобразити у вигляді трикутника впливів (рисунок).

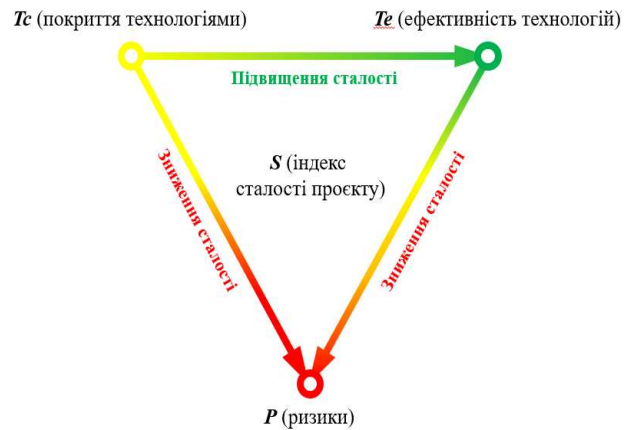


Рисунок – Впливи параметрів T_e , T_c , P та індекс сталості проекту S

За результатами проведеного аналізу можна сформулювати базові рекомендації щодо менеджменту проектів модернізації ОДР:

– *роздільне управління ризиками та технологічними параметрами*. Так як модель демонструє незалежність впливу P на T_e та T_c , вбачається доцільною реалізація двох паралельних стратегічних стратегій управління: технологічна та антикризова. Технологічна стратегія передбачає орієнтування на збільшення ефективності технологій та покриття ними ОДР. Антикризова стратегія направлена на мінімізацію інституціональних, фінансових, логістичних ризиків;

– *пріоритизація інвестицій в розширення покриття технологіями T_c* . Оскільки чутливість S є найвищою до змін T_c (0,046), інвестиції в розвиток технологій дають найбільший приріст сталості на одиницю вкладених ресурсів. Це обґрунтовує необхідність подальшої цифрової трансформації ОДР, у тому числі діджиталізації виробничих процесів з упровадження ОДР;

– *забезпечення підвищення ефективності технологій T_e* . Виходячи з того, що технологічна ефективність суттєво впливає на S , доцільним є подальше упровадження інноваційних рішень (адаптивне регулювання, обробка даних у реальному часі), підвищення технологічної компетенції працівників, інтегрування зі сталими елементами мобільності (громадським транспортом, засобами мікробільності);

– *управління ризиками*, які незалежно від T_e та T_c , значно знижують сталість проекту, що може бути нівельоване у разі упровадження системи управління

ризиками, формуванням фінансових резервів, формуванням антикризових сценаріїв;

– сценарне планування, яке базується на розумінні прогнозованості зміни індексу сталості S , у зв'язку зі зміною параметрів і яке передбачає планування альтернативних сценаріїв упровадження проєкту залежно від наявних ресурсів та ймовірних наслідків пов'язаних зі збройною агресією, а також доцільності конкретних технологічних рішень через їхній вплив на S ;

– застосування моделі на етапі прийняття рішень, так як модель аналітично керована та піддається аналізу, її доцільно використовувати для оцінки сценаріїв модернізації в системі прийняття управлінських рішень та як частину підтримки проєктного офісу.

Подяка

Дослідження було виконане в рамках реалізації науково-дослідної роботи «Методологія управління проєктами модернізації ОДР воєнної та повоєнної відбудови територіальних громад» (№ 4 ДБ-2023), номер державної реєстрації 0123U101943, що фінансується державним бюджетом України.

Висновки

На прикладі Київської міської територіальної громади для трьох сценаріїв ОДР (оптимістичного, ризик-орієнтованого та песимістичного) проведені – розрахунки цільової функції щодо максимізації індексу сталості проєкту модернізації ОДР S ; розрахунки індексу чутливості S ; аналіз чутливості проєктів модернізації ОДР щодо визначення ступеня впливу на нього технологічних параметрів та ймовірних збоїв.

За результатами проведених розрахунків визначений вплив ресурсних змінних, технологічних параметрів, обмежень та зовнішніх факторів на цільову функцію, а також визначені основні напрями та заходи щодо підвищення індексу сталості проєкту модернізації ОДР.

Проведене дослідження дає можливість, використовуючи проєктний підхід, обґрунтувати модель модернізації системи управління ОДР та розробити рекомендації щодо модернізації ОДР в територіальних громадах в умовах їх повоєнної відбудови.

Список літератури

1. Бушуєв С. Д., Веренич О. В., Терейковська Л. О., Войтенко О. С. Інфраструктурні проєкти організації дорожнього руху: вибір методології. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 56. С. 24–30. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.24-30> (дата звернення: 31.10.2025).
2. Кирчата І. М., Шершенюк О. М., Кирчатий Ю. В. Стратегічні орієнтири відновлення та розвитку транспортної інфраструктури: проєктний підхід. *Проблеми та перспективи розвитку підприємництва*. 2024. № 32. С. 48–56. URL: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.32.48> (дата звернення: 31.10.2025).
3. Тригуба А. М., Демчина В. Р., Тригуба І. Л., Коваль Л. С. Визначення сценаріїв реалізації проєктів відновлення об'єктів транспортної інфраструктури у післявоєнний період на основі моделювання транспортних потоків. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 59. С. 105–114. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.105-114> (дата звернення: 31.10.2025).
4. Тригуба А. М., Ратушний А. Р., Демчина В. Р., Коваль Л. С. Особливості управління проєктами відновлення транспортної та безпекової інфраструктури сільських громад у післявоєнний період. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2023. № 28. С. 44–54. URL: <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.05> (дата звернення: 31.10.2025).
5. Ivko A. Implementation aspects analysis of syncretic methodology in the management of infrastructure restoration projects. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 115, ч. 2. С. 276–289. URL: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-276-289> (дата звернення: 31.10.2025).
6. Bushuyev S., Lapkina I., Bondar A., Lapkin A., Khusainova M. Creating Urban Transportation Networks Grounded In the Principles of the Smart Port-City Paradigm. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 231. P. 323–328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.211> (дата звернення: 31.10.2025).
7. Бушуєв С. Д., Васильєв І. А. Проєктний підхід щодо створення керуючої системи для модернізації організації дорожнього руху під час відбудови територіальних громад. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 59. С. 24–33. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.24-33> (дата звернення: 31.10.2025).
8. Іщенко В. А., Харута В. С. Аналіз особливостей проєктів пасажирських перевезень. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 57. С. 27–35. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.27-35> (дата звернення: 31.10.2025).
9. Verenych O., Vasyliov I., Tymchenko S., Voitenko O., Limonov A. The Technological Aspect of Digitalizing Traffic Management in Settlements under Martial Law and During Post-War Reconstruction. *Proceedings of the VI International Workshop on IT Project Management (ITPM 2025)*, Kyiv, Ukraine, May 22, 2025. CEUR Workshop Proceedings, 2025. P. 188–199. URL: <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-4023.zip> (дата звернення: 31.10.2025).
10. Крамський С. О., Захарченко О. В. Організаційна модель управління етапами реалізації програм інфраструктурних проєктів. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 52. С. 28–34. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.28-34> (дата звернення: 31.10.2025).

11. Яремко З. М., Писаревська С. В., Фірман В. М. Системний підхід до управління безпекою на пішохідних переходах. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 43. С. 192–199. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.192-199> (дата звернення: 31.10.2025).

12. Голотюк М. В., Дорошук В. О., Бережний І. А. Сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11 (42), ч. 1. С. 280–286. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.280-286](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.280-286) (дата звернення: 31.10.2025).

13. КП «Центр організації дорожнього руху». Звіт про виконання фінансового плану (основні фінансові показники) 2024 рік. Київ. URL: https://balans.gukv.gov.ua/output/?zvit=1&kod_form=6334&kod_kl=5&kod_zm=0&kod_obj=3451&d=182 (дата звернення: 31.10.2025).

14. Про перерозподіл видатків бюджету міста Києва, передбачених Департаменту транспортної інфраструктури виконавчого органу Київської міської ради (Київської міської державної адміністрації) на 2024 рік: Розпорядження Київської міської військової адміністрації від 30.08.2024 № 979. URL: https://kyivcity.gov.ua/npa/pro_pererозpodil_vidatkiv_byudzhetu_mista_kiyeva_peredbachenikh_departamentu_transportno_infrastrukturi_vikonavchogo_organu_kivsko_misko_radi_kivsko_misko_derzhavno_administratsi_na_2024_rik/kmva_979.pdf (дата звернення: 31.10.2025).

15. Порфіренко В. І., Дехтяренко Д. П., Гребельник М. М., Хобта М. О. Транспорт мегаполісів: сучасний стан, проблеми, реінжиніринг та екологічне вдосконалення. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки»*. 2022. № 52. С. 224–233. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-2-52-224-233> (дата звернення: 31.10.2025).

16. Патрульна поліція України. Статистика. *Патрульна поліція України*. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (дата звернення: 30.10.2025).

17. Скільки кілограмів CO₂ викидає автомобіль? Ресурс відповідей. *Настанови лідерів*. URL: <https://groshi.mercy.cx.ua/vzaemodiya/skilki-kilogramiv-co2-vikidaie-avtomobil.html> (дата звернення: 31.10.2025).

18. Бушуєв С. Д., Дорош М. С. Формування інноваційних методів та моделей управління проєктами на основі конвергенції. *Управління розвитком складних систем*. 2015. № 23. С. 30–38. URL: <https://urss.knuba.edu.ua/ua/zbirnyk-23/article-826> (дата звернення: 31.10.2025).

Стаття надійшла до редколегії 02.12.2025

Vasyliiev Ihor

Ph.D., Junior Researcher, Research Department, <https://orcid.org/0000-0002-4477-4521>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Bushuyev Sergiy

DSc (Eng.), Professor, Project Management Department, <https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

MODELING PROJECT MANAGEMENT FOR THE MODERNIZATION OF TRAFFIC CONTROL IN TERRITORIAL COMMUNITIES UNDER POST-WAR RECOVERY

Abstract. The full-scale aggression against Ukraine has significantly degraded the functioning of territorial communities' transport systems, exacerbating pre-war road-traffic challenges. Under conditions of high uncertainty and resource constraints, post-war recovery of territorial communities requires not only infrastructure restoration but also enhanced resilience and governability. This necessitates the deployment of advanced project-management instruments, notably an integrated conceptual-mathematical model for managing modernization projects in road traffic control. This study proposes a synthesis of conceptual, mathematical, and methodological components that enables the assessment of the sustainability of project decisions and supports decision-making via an adaptive cycle "analysis – planning – implementation – monitoring – adjustment" guided by the project sustainability index S as an aggregate metric. A conceptual model of project management for road traffic control modernization is developed, grounded in four key principles: sustainability, safety, adaptability, and technological orientation. A mathematical model is constructed in which the objective function maximizes the integrated sustainability index S . The index is defined as a weighted sum of normalized improvements in three target variables – average travel time T_r , crash rate A_r , and environmental impact E_c . The model was validated on the case of the Kyiv City Territorial Community. Computations were performed for three scenarios: optimistic, risk-oriented, and pessimistic. Sensitivity analysis identified the key managerial "levers". Validation of the integrated model provides a scientific-methodological tool for quantitative justification and scenario planning of managerial decisions in road traffic control modernization projects under post-war recovery conditions. A key finding is the model's "structural stability": analysis of partial derivatives shows that the influence of technological parameters (T_e , T_c) on S is stable and independent of the risk level P . This mathematically substantiates that risks and technologies are independent, separately manageable components. Based on this, practical recommendations are formulated: it is advisable to implement split (dual-track) management comprising two parallel strategies – a crisis-mitigation strategy aimed at minimizing institutional, financial, and logistical risks P , which can nullify technological gains, and a technology-oriented strategy that prioritizes investment in expanding digital-infrastructure coverage T_c as the most effective lever for increasing project sustainability.

Keywords: sensitivity analysis; conceptual model; mathematical model; traffic control; post-war recovery; territorial community (hromada); project management

References

1. Bushuyev S. D., Verenych O. V., Tereykovska L. O., Voitenko O. S. (2023). Infrastructure projects for traffic organization: choosing a methodology. *Management of Development of Complex Systems*, 56, 24–30. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.24-30>.
2. Kyrchata I. M., Shersheniuk O. M., Kyrchatyi Yu. V. (2024). Strategic guidelines for the restoration and development of transport infrastructure: a project approach. *Problems and Prospects of Entrepreneurship Development*, 32, 48–56. URL: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.32.48>.
3. Tryhuba A. M., Demchyna V. R., Tryhuba I. L., Koval L. S. (2024). Determination of scenarios for the implementation of transport infrastructure restoration projects in the post-war period based on traffic flow modeling. *Management of Development of Complex Systems*, 59, 105–114. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.105-114>.
4. Tryhuba A. M., Ratushnyi A. R., Demchyna V. R., Koval L. S. (2023). Features of managing projects for the restoration of transport and security infrastructure of rural communities in the post-war period. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 28, 44–54. URL: <https://doi.org/10.32447/20784643.28.2023.05>.
5. Ivko A. (2024). Implementation aspects analysis of syncretic methodology in the management of infrastructure restoration projects. *Automobile Roads and Road Construction*, 115(2), 276–289. URL: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-276-289>.
6. Bushuyev S., Lapkina I., Bondar A., Lapkin A., Khusainova M. (2024). Creating urban transportation networks grounded in the principles of the smart port-city paradigm. *Procedia Computer Science*, 231, 323–328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.211>.
7. Bushuyev S. D., Vasyliov I. A. (2024). Project approach to creating a control system for the modernization of traffic organization during the reconstruction of territorial communities. *Management of Development of Complex Systems*, 59, 24–33. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.24-33>.
8. Ishchenko V. A., Kharuta V. S. (2024). Analysis of the features of passenger transportation projects. *Management of Development of Complex Systems*, 57, 27–35. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.27-35>.
9. Verenych O., Vasyliov I., Tymchenko S., Voitenko O., Limonov A. (2025). The technological aspect of digitalizing traffic management in settlements under martial law and during post-war reconstruction. *Proceedings of the VI International Workshop on IT Project Management (ITPM 2025)*, Kyiv, Ukraine, 188–199. URL: <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-4023.zip>.
10. Kramskyi S. O., Zakharchenko O. V. (2022). Organizational model for managing the stages of implementation of infrastructure project programs. *Management of Development of Complex Systems*, 52, 28–34. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.28-34>.
11. Yaremko Z. M., Pysarevska S. V., Firman V. M. (2020). A systems approach to safety management at pedestrian crossings. *Management of Development of Complex Systems*, 43, 192–199. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.192-199>.
12. Holotyiuk M. V., Doroshchuk V. O., Berezhniak I. A. (2025). Modern approaches to traffic organization in emergency situations. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11 (42), 280–286. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.280-286](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.280-286).
13. Municipal Enterprise “Traffic Management Center”. Report on Financial Plan Performance (Key Financial Indicators), 2024. https://balans.gukv.gov.ua/output/?zvut=1&am&kod_form=6334&am&kod_kl=5&am&kod_zm=0&am&kod_obj=3451&am&d=18 (accessed on: 2025-10-31).
14. On the redistribution of expenditures of the budget of the city of Kyiv provided for the Department of Transport Infrastructure for 2024: Order of the Kyiv City Military Administration dated 30.08.2024 No. 979. URL: https://kyivcity.gov.ua/npa/pro_pererospodil_vidatkiiv_byudzhetu_mista_kiyeva_peredbacheniikh_departamentu_transportno_infrastrukturi_vikonavchogo_organu_kivsko_misko_radi_kivsko_misko_derzhavno_administratsi_na_2024_rik/kmva_979.pdf.
15. Porfirenko V. I., Dekhtiarenko D. P., Hrebelnyk M. M., Khobta M. O. (2022). Transport of megapolises: current state, problems, reengineering and environmental improvement. *Bulletin of the National Transport University. Series "Economic Sciences"*, 52, 224–233. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-2-52-224-233>.
16. Patrol Police of Ukraine. (2025). Statistics. *Patrol Police of Ukraine*. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/>.
17. How many kilograms of CO2 does a car emit? Answer Resource. *Leader Guidelines*. URL: <https://groshi.mercy.cx.ua/vzaemodiya/skilki-kilogramiv-co2-vikidaie-avtomobil.html>.
18. Bushuyev S. D., Dorosh M. S. (2015). Formation of innovative methods and models of project management based on convergence. *Management of Development of Complex Systems*, 23, 30–38. URL: <https://urss.knuba.edu.ua/ua/zbirnyk-23/article-826>.

Посилання на публікацію

- | | |
|------|--|
| APA | Vasyliov, I. & Bushuyev, S. (2025). Modeling project management for the modernization of traffic control in territorial communities under post-war recovery. <i>Management of Development of Complex Systems</i> , 64, 55–66, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.55-66 . |
| ДСТУ | Васильєв І. А., Бушуєв С. Д. Моделювання менеджменту проєктів модернізації організування дорожнього руху в територіальних громадах в умовах повосенної відбудови. <i>Управління розвитком складних систем</i> . Київ, 2025. № 64. С. 55 – 66, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.55-66 . |