

УДК 624.21

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.252

ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПІДХОДУ ДО РЕМОНТУ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ МОСТІВ З ОГЛЯДУ НА ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ

Мінюкова А.Д.

Національний транспортний університет

Анотація. У статті подано технічне обґрунтування вибору оптимального підходу до ремонту, реконструкції або нового будівництва мостових споруд, зважаючи на їх життєвий цикл. Проаналізовано сучасний стан мостів в Україні, виявлено основні проблеми, пов'язані з їх фізичним і моральним зносом. Досліджено підхід до оцінювання життєвих витрат (LCC) та його вплив на прийняття рішень щодо ремонту або заміни мостів. Визначено основні фактори, що впливають на довговічність та експлуатаційну надійність мостових споруд. Наведено порівняння економічної доцільності різних варіантів реконструкції та запропоновано рекомендації для ефективного управління інфраструктурними об'єктами.

Ключові слова: життєвий цикл мосту, ремонт мостів, реконструкція, довговічність, життєві витрати (LCC).

Вступ

Значна кількість штучних споруд в Україні перебуває в обмежено працездатному та непрацездатному станах і потребує ремонту. Мости, побудовані багато років тому, не відповідають сучасним вимогам, що зумовлено не тільки їх фізичним зносом, а й зміною навантажень, інтенсивності руху та умов експлуатації. Це зі свого боку приводить до необхідності капітальних ремонтів або реконструкцій, які мають брати до уваги сучасні технічні стандарти, технології та потреби транспортної інфраструктури. Однак в багатьох випадках, особливо для споруд, побудованих у середині ХХ ст., ремонтні роботи вже не дають бажаного ефекту, оскільки конструкції таких мостів настільки зношені, що навіть значні витрати на відновлення не дають змогу повернути їх до належного стану. З часом бетон і метал зазнають природної деградації, що призводить до значних дефектів, які неможливо повністю виправити без повної заміни конструкцій. Це підвищує вартість ремонту та скорочує його ефективність. У таких випадках навіть капітальний ремонт може бути нерациональним, оскільки старі матеріали не здатні витримати навантаження сучасного транспорту. Це зумовлює потребу в розробленні обґрунтованих підходів до вибору між ремонтом, реконструкцією та новим будівництвом мостових споруд з огляду на життєвий цикл.

Аналіз публікацій

Нині проблема управління життєвим циклом елементів споруд стає пріоритетною для

багатьох країн світу. Незважаючи на безумовну актуальність проблеми, публікацій в Україні мало.

Теоретичним дослідженням проблем надійності, довговічності та прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів присвятили публікації українські науковці, зокрема: О. Давиденко, А. Дехтяр, А. Лященко, Л. Янчук, Ф. Яцко та ін. А також зарубіжні вчені, зокрема М. Франгопол, Ю. Донг, Саманта Сабатіно. У своїх студіях вони звертають увагу на розробленні узагальненої основи для оцінювання продуктивності та вартості життєвого циклу мосту, зосереджуючись на аналізі, прогнозуванні, оптимізації та прийнятті рішень в умовах невизначеності.

Учені зазначають, що центральним питанням підходу життєвого циклу до проектування мостів є необхідність раціональної основи для ухвалення обґрунтованих рішень щодо проектування, будівництва, перевірки, моніторингу, технічного обслуговування, ремонту, відновлення, заміни та управління мостами. Науковці наголошують, що цей процес здійснюється за допомогою багатоцільових процедур оптимізації, які збалансують суперечливі критерії, зокрема продуктивність і вартість. Також вони узагальнюють низку важливих досягнень, серед яких надійність, ризик, стійкість і стабільність мостів, транспортних мереж мостів і взаємозалежних систем інфраструктури.

Проте досі поза увагою залишається життєвий цикл мостів у прийнятті рішень про капітальний ремонт споруди або її заміни на повністю нову.

Мета й постановка завдання

Метою статті є технічне обґрунтування вибору оптимального підходу до ремонту, реконструкції або нового будівництва мостових споруд з огляду на їх життєвий цикл, експлуатаційну надійність і довговічність.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити життєвий цикл мостових споруд та визначити основні чинники, що впливають на їх довговічність і надійність. Важливо розглянути й порівняти всі витрати, пов'язані з ремонтом і новим будівництвом, зважаючи на ризики прихованих дефектів після ремонту та потенційних додаткових витрат, пов'язаних з аваріями або зносом споруди.

Виклад основного матеріалу

Життєвий цикл мостових споруд – це період, протягом якого міст або інша штучна споруда функціонує, проходячи різні етапи існування. Він охоплює весь період – від моменту проектування та будівництва споруди до її експлуатації, технічного обслуговування, ремонту, реконструкції та, зрештою, до демонтажу або повної заміни. Розрахунок життєвих витрат (LCC, *Life Cycle Costing*) дає змогу детально оцінити економічну доцільність різних варіантів, зокрема між новим будівництвом і капітальним ремонтом наявних мостів.

Життєві витрати передбачають кілька основних категорій.

Інвестиційні витрати – це витрати на будівництво нового мосту або реконструкцію наявної споруди. Вони охоплюють витрати на проектування, закупівлю матеріалів, роботи з будівництва або відновлення. Для нового будівництва ці витрати можуть бути значно вищими, ніж для ремонту, але з огляду на тривалий термін служби нової споруди інвестиції в будівництво можуть бути економічно виправданими в довгостроковій перспективі.

Витрати на утримання – це постійні витрати на обслуговування споруди, що передбачають обстеження стану споруди, експлуатаційне утримання (очищення, підготовку до сезонних змін) та інші заходи з підтримки його працездатності. Витрати на утримання зазвичай зростають з часом, особливо якщо міст старіє або зношуються його елементи.

Ремонтні витрати – це витрати на відновлення частин мосту або його елементів, коли вони втрачають здатність виконувати свої функції чи виявляються пошкодженими. Це

або планові капітальні ремонти, або непередбачені ремонти через аварійні ситуації. Ремонтні витрати можуть бути суттєвими, особливо в старих спорудах, що мають серйозні дефекти.

Оцінювання життєвого циклу мосту передбачає не лише визначення вартості ремонту або реконструкції, але й прогнозування витрат на обслуговування та експлуатацію споруди протягом її експлуатаційного періоду. Це дає змогу порівняти різні варіанти, зважаючи на довгострокову економічну вигоду. Наприклад, інвестиції в реконструкцію можуть виявитися більш економічно вигідними, ніж постійні витрати на утримання зношеного мосту. Підхід до ремонту та реконструкції мостів має ґрунтуватися на комплексному аналізі технічного стану, економічній доцільності та довгострокових перспективах з огляду на зміни в умовах експлуатації, що дасть змогу забезпечити ефективність і безпеку транспортної інфраструктури.

Для того, щоб оптимально підійти до ремонту та реконструкції мостів, зважаючи на їх життєвий цикл, важливо брати до уваги кілька основних факторів.

Оцінка технічного стану конструкцій. Насамперед необхідна детальна діагностика наявних мостових споруд. Це дає змогу оцінити ступінь їх зносу, ідентифікувати дефекти, що можуть впливати на їх працездатність, і визначити потенційні проблеми. Важливо використовувати сучасні методи діагностики, такі як ультразвукове тестування, радіографія та інші технології, що дають змогу отримати точну картину стану конструкцій без необхідності розкриття елементів мосту.

Аналіз навантажень і умов експлуатації. Технічне обґрунтування підходу до ремонту та реконструкції має зважати на зміни в умовах експлуатації мосту, зокрема збільшення навантажень, інтенсивності руху й появу нових видів транспорту. Це дасть змогу визначити, чи здатні наявні конструкції витримати сучасні навантаження, чи необхідно посилювати конструкцію або повністю змінювати її.

Навіть під час значних ремонтних робіт не завжди вдається повністю усунути дефекти та забезпечити довговічність мостової споруди. Вийти з кругообігу споруд непрацездатного та обмежено працездатного стану не дають змогу ремонтні роботи низької якості. Навіть після капітального ремонту залишається ризик раптового виникнення прихованих дефектів. Ремонтні заходи, що не беруть

до уваги всі аспекти технічного стану споруди й сучасні вимоги до навантажень, можуть призвести до тимчасового покращення стану, але не забезпечують довгострокової надійності.

Упродовж 2017–2018 рр. на шляхопроводі по проспекту Перемоги біля станції метро «Нивки» виконано роботи з капітального ремонту. За рік після капітального ремонту на цьому шляхопроводі було виявлено нові тріщини та сколи в місцях розташування корозійних дефектів бетону й арматури конструкцій, зафіксованих обстеженням ще до виконання реконструкції. Це свідчить про те, що були наявні недоліки під час виконання ремонтних робіт. У 2020 р. розв'язано питання щодо влаштування тимчасових підтримувальних конструкцій під аварійними прогонами споруди. За результатами обстеження 2021 р., шляхопровід перебуває в непридатному стані та знову потребує ремонту.



Рис. 1. Шляхопровід по проспекту Перемоги біля станції метро «Нивки» за три роки після капітального ремонту

Ремонтні роботи можуть мати значно вищі ризики додаткових витрат через непередбачувані дефекти й необхідність перепроєктування. Так, у Києві 2024 р. відповідно до обстеження було прийнято рішення про ремонт шляхопроводу на перетині вул. Лугової та Богатирської. Споруда перебувала у 5-му експлуатаційному стані.



Рис. 2. Стан шляхопроводу на перетині вул. Лугової та Богатирської до ремонту

Проектом передбачено ремонт мостового полотна, прогонових будов, конструкцій опор, заміну опорних частин і крайніх балок. Проте під час демонтажних робіт виявилось, що деякі з конструкцій потребують більш серйозних змін, ніж передбачалося спочатку. Основною причиною стало неякісне обстеження перед початком робіт, відсутність детальної інформації про стан конструкцій.

Зрештою було ухвалено рішення про збільшення обсягів робіт та повну заміну шляхопроводу. Відповідно, постала необхідність додаткових витрат на коригування проекту, збільшення вартості самого ремонту, що створює більше складнощів змовнику, будівельникам та проектувальникам.

У довгостроковій перспективі в техніко-економічному обґрунтуванні важливо брати до уваги життєвий цикл споруди. У процесі прийняття рішень мають розглядатися не лише прямі витрати на ремонт чи будівництво, але й сукупні витрати за весь життєвий цикл об'єкта, зокрема утримання, регулярні ремонти, а також потенційні витрати.

Навіть після капітального ремонту залишається ризик раптового виникнення прихованих дефектів.

З огляду на це за значних дефектів споруди, замість ремонту, доцільно обирати нове будівництво, якщо вартість капітального ремонту перевищує 75–85 % вартості нового будівництва.

Для математичного обґрунтування такого підходу використовуються концепції життєвого циклу вартості (*Life Cycle Cost, LCC*), а також економічні методи, що передбачають дисконтовані грошові потоки та порівняння витрат.

Загальна вартість за весь життєвий цикл визначається формулою

$$LCC = C_{\text{інв}} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{\text{утр}}(t) + C_{\text{рем}}(t) + C_{\text{ав}}(t)}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

де $C_{\text{інв}}$ – початкові інвестиції (будівництво чи капітальний ремонт); $C_{\text{утр}}(t)$ – витрати на утримання за рік, t ; $C_{\text{рем}}(t)$ – витрати на ремонт за рік, t ; $C_{\text{ав}}(t)$ – потенційні витрати, пов'язані з аварійністю чи виходом з ладу (зокрема соціальні та економічні збитки); r – коефіцієнт, що використовується для приведення майбутніх витрат або доходів до їх поточної вартості (приведеної вартості). Вона відтворює зміну вартості грошей у часі

через інфляцію, ризики або альтернативну вартість використання капіталу; n – тривалість життєвого циклу (20–30 років для капітального ремонту; 50–100 років для нового будівництва).

Якщо вартість капітального ремонту $C_{\text{ремонт}}$ становить понад 75–85 % вартості нового будівництва $C_{\text{нове}}$, обирається нове будівництво:

$$C_{\text{ремонт}} \geq 0,75 \times C_{\text{нове}}. \quad (2)$$

Це обґрунтовано тим, що новий об'єкт матиме значно довший термін служби та нижчі майбутні витрати:

$$LLC_{\text{нове}} < LLC_{\text{ремонт}}. \quad (3)$$

Це насамперед дасть змогу запобігти ймовірності отримання неякісного капітального ремонту та ймовірності за декілька років знову кваліфікувати споруду як аварійну. Новий об'єкт має значно триваліший термін служби (50–100 років) порівняно з відремонтованим (20–30 років). Це знижує майбутні витрати на утримання та подальші ремонти.

В Україні виконання техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) є обов'язковим етапом у плануванні нового будівництва мостів, оскільки воно дає змогу оцінити доцільність проекту, обрати оптимальні технічні рішення, визначити прогнозовані витрати та зважати на довгострокову ефективність споруди.

Водночас для капітального ремонту мостових споруд подібної нормативної вимоги немає, що може призводити до нераціонального використання ресурсів. Наведені вище ризики наголошують на необхідності комплексного підходу до вибору між ремонтом і новим будівництвом, що ґрунтується на аналізі життєвого циклу споруди.

Саме тому на стадії «Проект» (П) під час капітального ремонту та реконструкції необхідно виконувати паралельний розрахунок двох варіантів: ремонту з підсиленням та нового будівництва.

Це дасть змогу ухвалювати рішення на основі порівняння загальних витрат, експлуатаційного ресурсу та довгострокової ефективності кожного варіанта. Впровадження єдиних критеріїв вибору забезпечить раціональне використання бюджетних коштів і підвищить надійність транспортної інфраструктури.

Висновки

Аналіз життєвого циклу мостових споруд демонструє, що витрати на додаткові роботи в процесі ремонту можуть перевищити різницю у вартості між капітальним ремонтом і новим будівництвом. Окрім цього, реконструкція має обмежені можливості для модернізації, що може негативно впливати на довговічність та функціональність об'єкта.

Нове будівництво не лише усуває поточні технічні проблеми, а й створює умови для розвитку транспортної інфраструктури. Однією з переваг нового будівництва є можливість збільшення габаритів мостів. Зокрема це дає змогу покращити пропускну здатність мостів і забезпечити відповідність сучасним нормативним вимогам. Отже, нове будівництво – це не лише розв'язання поточних проблем, але й інвестиція в майбутнє. Вибір між ремонтом і новим будівництвом має ґрунтуватися на комплексному аналізі життєвого циклу споруди з огляду на довгострокові експлуатаційні витрати й стратегічний розвиток мостового господарства. Оптимізація витрат і пріоритизація робіт з реконструкції дасть змогу забезпечити ефективне використання ресурсів та підвищити надійність транспортної інфраструктури в перспективі десятиліть. Збереження та розвиток мостового господарства – це стратегічний виклик, що потребує комплексного підходу.

Література

1. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. [Чинний від 2010-03-01]. – Київ: НТУ, 2009. 20 с.
2. Давиденко О. О., Гаркуша М. В., Козарчук І. А., Гаркуша І. Ю. Підходи техніко-економічного обґрунтування нового будівництва моста. Збірник наукових праць Вісник ХНАДУ. Харків, 2024. Вип. 104. С. 96-106.
3. Давиденко О. О. Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Київ: НТУ. 2017. 22 с.
4. Янчук Л.Л. Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків, 2015. Вип. 151. Том 2. С. 21-26.
5. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону», № 78, том 2. Київ, 2013. С. 225–235.
6. Дехтяр А.С. Планування експлуатації залізобетонних мостів. Наук. праці семінару «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріа-

лів і конструкцій». Луцьк, 16–19 вересня 2002 р.

7. Янчук Л.Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», № 664. Львів: 2010. С. 365–371.

References

1. DBN V.2.3-22:2009. Bridges and pipes. Basic design requirements. [Actual from 2010-03-01]. – Kyiv: NTU, 2009. 20 p.
2. Davydenko O. O., Garkusha M. V., Kozarchuk I. A., Garkusha I. Yu. Approaches to the feasibility study of a new bridge construction. Collection of scientific works Vis-nyk KhNADU. Kharkiv, 2024. Issue 104. P. 96-106.
3. Davydenko O. O. Modeling the life cycle of road bridges. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kyiv: NTU. 2017. 22 p.
4. Yanchuk L. L. Modeling the life cycle of reinforced concrete bridge elements in operation. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. Kharkiv, 2015. Issue 151. Volume 2. P. 21-26.
5. Davydenko O.O. Analysis of the durability of road bridges in Ukraine. Interdepartmental scientific and technical collection "Scientific and technical problems of modern reinforced concrete", No. 78, volume 2. Kyiv, 2013. P. 225–235.
6. Dekhtyar A.S. Planning the Operation of Reinforced Concrete Bridges. Scientific Papers of the Seminar "Mechanics and Physics of Fracture of Building Materials and Structures." Lutsk, September 16–19, 2002.
7. Yanchuk L.L. Justification of a Life Cycle Prediction Model for Reinforced Concrete Elements of a Bridge Crossing. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". No. 664, Lviv: 2010, pp. 365–371.

Мінюкова Анна Дмитрівна, аспірантка кафедри мостів, тунелів і гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, e-mail: anyminyukov@gmail.com, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>.

Technical Justification for the Optimal Approach to Bridge Repair, Reconstruction, and New Construction Considering the Life Cycle

Abstract. The article examines the technical justification for selecting the optimal approach to bridge

repair, reconstruction, or new construction based on their life cycle. The current state of bridges in Ukraine is analyzed, highlighting key issues related to their physical and functional deterioration. The study explores the life cycle cost (LCC) assessment approach and its impact on decision-making regarding bridge repair or replacement. The main factors affecting the durability and operational reliability of bridge structures are identified. A comparison of the economic feasibility of different reconstruction options is presented, along with recommendations for effective infrastructure management. **Goal.** The goal of this study is to provide a technical justification for choosing between bridge repair, reconstruction, or new construction by considering their life cycle, operational reliability, and long-term durability. **Methodology.** The research is based on an analysis of bridge life cycles, identifying key factors affecting their longevity and reliability. A comparative assessment of all costs associated with repair and new construction is conducted, considering hidden defects, potential additional expenses due to structural failures, and the long-term financial impact of different approaches. **Results** The life cycle analysis of bridge structures shows that additional repair costs may exceed the difference in price between major repairs and new construction. Furthermore, reconstruction has limited modernization potential, which can negatively affect the long-term durability and functionality of the structure. **Originality** This study highlights the necessity of incorporating life cycle cost analysis into decision-making regarding major bridge repairs or complete replacement, an aspect that has been largely overlooked in Ukrainian research. **Practical value** New bridge construction not only resolves existing technical issues but also creates opportunities for transport infrastructure development. One of its key advantages is the ability to increase bridge dimensions, improving traffic capacity and compliance with modern regulatory requirements. A comprehensive life cycle approach to bridge management will help optimize costs, prioritize reconstruction projects, and ensure the long-term reliability of transportation infrastructure.

Key words: bridge life cycle, bridge repair, reconstruction, durability, life cycle cost (LCC).

Minyukova Anna Dmytrivna, PhD student, Department of Bridges, Tunnels, and Hydraulic Structures, National Transport University, e-mail: anyminyukov@gmail.com, Ukraine, 01010, Kyiv, 1 M. Omelianovycha-Pavlenka St., <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>