

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОДНАР ЛАРИСА ПЕТРІВНА

УДК 624.21

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕМОНТІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник:

Канін Олександр Петрович

кандидат технічних наук, доцент

Ідентичність усіх примірників дисертації

Засвідчую

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

_____ В.І. Каськів

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Боднар Л.П. Удосконалення проектування ремонтів при експлуатації автодорожніх мостів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми. (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2019.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження; сформульовано наукове завдання, висунуто головну наукову ідею дослідження, наведено мету та задачі, предмет та об'єкт дослідження; зазначено зв'язок роботи із науковими програмами (планами, темами); сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів; наведено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі «Аналіз шляхів удосконалення проектування ремонтів при експлуатації автодорожніх мостів» дисертаційної роботи проаналізовано формування стратегії експлуатації автодорожніх мостів як складової частини загальної фундаментальної задачі системи експлуатації – забезпечення функціонування споруди протягом проектного строку служби з заданими показниками надійності.

Встановлено, що обґрунтування стратегії ремонтів мостів є складним завданням, обтяженим низкою ще не вирішених наукових задач, а саме: недостатністю кількісних залежностей між обсягами і структурою робіт з ремонту мостів і їх прогнозованим технічним станом; кількісної оцінки впливу ремонтів на зменшення рівня деградації елементів мостів; складністю визначення надійності і довговічності моста в цілому.

З'ясовано, що центральне завдання дослідження – удосконалення проектування відновлення стану мостів при експлуатації – є задачею індивідуальною, теоретично тісно пов'язаною з прийнятою в системі експлуатації моделлю деградації, оцінки і прогнозу технічного стану.

При проектуванні ремонту моста необхідне зосередження уваги на всій вартості забезпечення його проектного ресурсу, а не тільки на початкових витратах на здійснення ремонту.

Аналіз існуючих моделей обґрунтування стратегії ремонтів мостів дозволив визначити основний напрям їх удосконалення – розробку механізму обґрунтування стратегії ремонтів, який базується на вітчизняній нормативній моделі деградації мостів та базі даних, накопичених в АЕСУМ.

У другому розділі «Моделювання надійності і довговічності мостів на автомобільних дорогах» визначено, що теоретичним підґрунтям дослідження процесу деградації моста є марковська феноменологічна модель накопичення пошкоджень. В цій моделі знос елементу споруди описується марковським дискретним процесом з неперервним часом. Виділено п'ять експлуатаційних станів системи. Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується функцією надійності, якою встановлюється зв'язок між надійністю та часом експлуатації елемента. Постулюється, що швидкість деградації описується одним параметром – показником інтенсивності відмов, що приймається постійним у часі. За функцію надійності прийнята інтегральна функція $P(t)$ для часу T_n , протягом якого стануться всі n подій процесу (розподіл Пуассона).

Доведено, що теоретичний критерій граничного зносу прогонових будов автодорожніх мостів прийнятий для оптимізації стратегії ремонтів мостів має достатню збіжність з нормативними вимогами на рівні 4-го експлуатаційного стану.

Запропонована модель ефективності експлуатаційних втручань для 5-го непрацездатного експлуатаційного стану на основі застосування формалізованого критерія – безрозмірної величини, яка є індикатором рівня ушкодження елементів моста і служить в системі управління мостами критерієм доцільності виконання капітального ремонту або реконструкції замість заміни новим мостом.

Критерій, що пропонується, є функцією параметрів споруди: фізичного віку споруди на момент оцінювання технічного стану, тобто часу, що пройшов від моменту введення в експлуатацію; залишкового ресурсу прогнаної будови; інтенсивності відмов; експертної оцінки стану споруди (рейтингу).

У третьому розділі «Моделі і механізм оптимізації процесу відновлення технічного стану мостів на автомобільних дорогах» сформульовані базові принципи і механізм обґрунтування стратегії ремонтів мостів.

З метою врахування різної важливості мостів на мережі доріг, на підґрунті зарубіжного досвіду розроблена модель пріоритезації мостів.

Розроблені математичні моделі оптимізації стратегії ремонтів мостів на рівнях мережі автомобільних доріг, окремої ділянки дороги та одного моста, які враховують процеси деградації елементів мостів і процес відновлення технічного стану мостів шляхом вибору оптимальної відносно заданих умов послідовності експлуатаційних заходів. Задача відноситься до класу комбінаторних задач дискретної оптимізації як однокритеріальна або багатокритеріальна. В якості критеріїв прийняті: мінімум середньозваженого по роках прогнозного періоду рівня деградації мостів при бюджетних обмеженнях і мінімум функції вартості ремонтів мостів, яка враховує досягнутий рівень деградації мостів. При перевищенні рівня деградації заданої максимально допустимої величини значення функції буде зростати, що слугує бар'єром для невиправданого зменшення витрат на ремонти мостів. При одночасному використанні двох критеріїв будується фронт Парето-оптимальних рішень.

Складність пошуку оптимального рішення задачі обґрунтування стратегії ремонтів мостів на рівні мережі доріг, обумовлена великою кількістю мостів в комбінації з варіантами експлуатаційних заходів та кількістю років прогнозного періоду, стала причиною розробки механізму обґрунтування стратегії ремонтів мостів шляхом пошуку наближеного до оптимального рішення, в якому природньо враховується необхідна послідовність виконання експлуатаційних заходів, яка залежить від фактичного і прогнозованого рівня деградації моста і

не вимагає штучних обмежень на міжремонтні періоди, властиві відомим генетичним алгоритмам.

Комп'ютерні експерименти, виконані за допомогою розробленої комп'ютерної програми, яка реалізує запропонований механізм оптимізації стратегії ремонтів мостів, дозволили визначити раціональні параметри моделювання: кількість рішень в початковій множині 200 – 250, кількість генерацій алгоритму 150 – 200. Ймовірність рекомбінації (кросоверу) рішень 0,8 – 0,9, ймовірність регенерації (мутації) 0,008 – 0,010.

У четвертому розділі «Розбудова підсистеми стратегії ремонтів мостів в АЕСУМ» запропоноване удосконалення архітектури АЕСУМ, яка дозволяє розраховувати (прогнозувати) деградацію об'єктів в часі та оптимізувати розподіл ремонтів та розрахунок їх вартості з урахуванням бюджетних обмежень. В програмному комплексі АЕСУМ створено підсистему обґрунтування стратегії ремонтів мостів. Програмне забезпечення і розроблена методика дозволяють обґрунтувати раціональну стратегію ремонтів мостів як на мережевому, так і на об'єктному рівнях. Методика дозволяє за рахунок вибору кращого за вибраними критеріями рішення – років і варіантів ремонтів досягти економії витрат до 15 – 25 % порівняно з евристичним рішенням за принципом «найгірші – перші».

Розроблений зручний інтерфейс оперування процесом оптимізації як частина механізму обґрунтування стратегії ремонтів мостів та аналізу отриманих з його допомогою результатів. Кінцевим виходом роботи модуля є звіти про оптимальну стратегію ремонтів мостів на вибраній мережі доріг або по окремому мосту.

За допомогою розробленої в дисертації підсистеми програмного комплексу АЕСУМ на основі реальних даних з АЕСУМ отримані важливі результати відносно структури розподілення витрат на експлуатаційне утримання, дрібний поточний, поточний середній та капітальний ремонти і реконструкцію мостів. Капітальні витрати складають 40 – 70 % від загальної

суми витрат, в залежності від реального стану мостів на досліджуваній мережі доріг державного значення.

Ключові слова: автодорожній міст, деградація, життєвий цикл, критерій оптимальності, механізм, модель, проектування, ремонт, стан моста, стратегія, АЕСУМ.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами Украины // Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск: 2015. Вып. № 2 (16). С. 18-23 (Беларусь).

Статті у наукових фахових виданнях:

2. Боднар Л.П. Управління утриманням елементів залізобетонних мостів на основі моделей нечіткої логіки // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. Вип.33. С. 39-42.

3. Боднар Л.П., Канін О.П., Халай Т.О. Модель обґрунтування стратегії ремонтів мостів // Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах: Ч.1. К.: НТУ, 2012. Випуск 26. С.47-52.

4. Боднар Л.П. Теоретичні засади управління довговічністю автодорожніх мостів // Автошляховик України, №4 (240), 2014. С.37- 40.

5. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М, Стабровський О.О. Визначення прогнозованої вартості проведення ремонтів мостів з використанням Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ) // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2016. Вип.16. С. 28-35.

6. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М. Обстеження мостів та вдосконалення критеріїв планів з обстежень // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2017. Вип.17. С. 42-53.

7. Боднар Л.П., Коваль П.М., Степанов С.М. Критерії формування планів обстежень мостів // Автошляховик України, №2 (254), 2018. С.34-42.

8. Боднар Л.П., Редченко В.П. Про посібник до національного стандарту щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів // Автошляховик України, №1 (257), 2019. С. 40-45.

Список опублікованих праць апробаційного характеру:

9. Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2010. Вип.12. С. 31-39.

10. Боднар Л.П., Коваль П.М., Фаль А.Є., Панібратець Л.Г. Досвід впровадження Аналітичної експертної системи управління мостами // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2010. Вип.13. С. 39-46.

11. Боднар Л.П. Обґрунтування рівнів утримання залізобетонних мостів в управлінні програмами їх експлуатації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА БУДІВНИЦТВА. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. № 662. С. 65-69.

12. Боднар Л.П., Лантух-Лященко А.І., Канін О.П., Коваль П.М., Фаль А.Є. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження // Дорожня галузь України. 2011. №7. С. 42-47.

13. Боднар Л.П., Канін О.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Досвід впровадження, сучасний стан та напрями подальшого розвитку. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції з участю студентів і молодих учених «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов». Х.: ХНАДУ, 2012. С. 30-35.

14.Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами. Опыт внедрения. Современное положение. Перспективы развития. Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы» Инженерия транспорта и организация перевозок. Вильнюс: Техника, 2013. С. 263-268.

15.Боднар Л.П. Генетичні алгоритми в оптимізації стратегії ремонтів мостів // Збірник наукових праць Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. Вип.6. С. 18 - 23.

16.Боднар Л.П., Канін О.П., Панібратець Л.Г., Степанов С.М. Оптимізація стратегій експлуатації мостів // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 54-65.

17.Боднар Л.П., Кушнір О.В., Коваль П.М., Панібратець Л.Г. Робота асфальтобетонного покриття в зоні примикання деформаційних швів на автодорожніх мостах // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 74-80.

18.Боднар Л.П., Панібратець Л.Г., Завгородній С.С., Чурсін О.П. Сучасний інструмент управління мостами // Дорожня галузь України. 2016. №4. С. 46-51.

19.Боднар Л.П. Моделі оптимізації стратегії експлуатації автодорожніх мостів. LXXII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету. Київ: НТУ, 2016. С. 162.

20.Боднар Л.П., Канин А.П. Задача обоснования стратегий эксплуатации мостов на автомобильных дорогах. Международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги: безопасность и надежность». Сборник докладов. (24-25 ноября 2016 г), Минск. С. 179-183.

21.Larysa Bodnar, Alex Kanin, Sergii Stepanov. Genetic Algorithm to optimize the strategies for bridge repair works. 2018. 10 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://zenodo.org/record/1485402#.XDX1nGmLmUk>.

22. Боднар Л.П. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження та перспективи розвитку. Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів». Збірник тез. (20-21 червня 2018 року), м. Ужгород. С. 33-36.

Свідоцтва та патенти:

1. Свідоцтво серія № 68663 Комп'ютерна програма «Оптимізація стратегії експлуатації мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 16.11.2016.

2. Свідоцтво серія № 68904 Науковий твір «Критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 06.12.2016.

ABSTRACT

Bodnar L.P. Improvement of the design of repairs in operation of road bridges. Qualifying scientific paper categorized as a manuscript.

A thesis is submitted for obtaining the Candidate's Degree in Technology (Degree of Doctor of Philosophy), specialty 05.22.11 – Highways and airfields. (192 – construction and civil engineering). – National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The introduction justifies the relevance of the research topic; the scientific task is formulated, the main scientific idea of the research is put forward, the purpose and tasks, the subject and the object of research are given; the connection of work with scientific programs (plans, themes) is indicated; the scientific novelty and practical value of the obtained results are formulated; the structure and volume of the thesis are presented.

In the first section of the thesis "Analysis of ways to improve the design of repairs during the operation of road bridges" the formation of strategies for the operation of road bridges as part of the overall fundamental task of the system of

operation, which is ensuring the functioning of the structure during the design service life with specified reliability metrics is analyzed.

It is established that the justification of the bridge repair strategy is a complex objective, burdened by a number of scientific tasks that have not yet been solved, namely: lack of quantitative relationships between the scope and structure of bridge repair works and their predicted technical condition; quantifying the impact of repairs on reducing the degradation of bridge elements; the complexity of determining the reliability and durability of the bridge on the whole. It has been found that the central task of the study is to improve the design of bridge condition restoration during operation, which is an individual task that is theoretically closely related to the degradation, evaluation and prediction model of the technical condition adopted in the system.

It was found out that the central problem of research is the improving the design of the rehabilitation of bridge condition during operation and it is an individual problem, theoretically closely related to the model of degradation, estimation and forecast of the technical state adopted in the system of operation the model of degradation, assessment and prediction of technical condition.

When designing a bridge repair, it is necessary to focus on the entire cost of providing its design lifetime, not just the initial cost of repair.

The analysis of the existing models of justification of the bridge repair strategy allowed determining the main direction of their improvement – the development of the mechanism of justification of the repair strategy which is based on the national normative model of bridge degradation and the data accumulated at the AESUM database.

In the second section, “Modeling the reliability and durability of bridges on highways”, it is determined that the theoretical basis for the study of the bridge degradation process is the Markov phenomenological model of damage accumulation. In this model, the wear of the structure’s element is described by a Markov discrete process with continuous time. Five operational states of the system are highlighted. The degradation process of an element over the life cycle is

described by a reliability function that establishes the relationship between the reliability and the lifetime of the element. It is postulated that the rate of degradation is described by one parameter – an indicator of the failure rate, which is assumed to be constant over time. The reliability function is assumed to be an integral function $P(t)$ for time T_n , during which all events of the process (Poisson distribution) will occur.

It is proved that the theoretical criterion of the limit wear of the spans of the road bridges adopted for optimization of the bridge repair strategy has sufficient convergence with the normative requirements at the level of the 4th operational state.

The proposed model of efficiency of operational interventions for the 5th non-operable operating state on the basis of the use of a formalized criterion – a dimensionless value, which is an indicator of the level of damage of the elements of the bridge and serves in the bridge management system as a criterion for expediency of performing major repairs or reconstruction instead of replacement with a new bridge.

The proposed criterion is a function of the parameters of the structure: the physical age of the structure at the time of assessing the technical condition, that is, the time elapsed from the moment of commissioning; residual life of the span; failure rates; expert evaluation of the condition of the structure (rating).

In the third section In the third section "Models and mechanism of optimization of process of rehabilitation of technical state of bridges on the roads" the basic principles and mechanism of justification of bridges repair strategy are formulated.

In order to take into account the different importance levels of bridges on the road network, a model of bridge prioritization has been developed on the basis of foreign experience.

Mathematical models of optimization of the bridge repair strategy at the levels of the road network, an individual section of the road and of an individual bridge have been developed, which take into account the processes of degradation of the bridge elements and the process of rehabilitation of the technical state of the bridges

by selecting the optimal relative set of conditions for the sequence of operational measures. The problem belongs to the class of combinatorial problems of discrete optimization as single-criteria or multi-criteria. The criteria are accepted: minimum weighted average for years of the forecast period of the level of bridge degradation with budgetary restrictions and minimum function of the cost of bridges repair which takes into account the achieved level of bridge degradation. If the degradation level is exceeded, the value of the function will increase, which serves as a barrier to unnecessarily reduction in the cost of the bridge repair. At the same time, using two criteria, the Pareto-optimal solutions front is built.

The complexity of finding the optimal solution to the problem of justifying the bridge repair strategy at the level of the road network, due to the large number of bridges in combination with variants of operational measures and the number of years of the forecast period, became the reason for developing a mechanism for justification of the bridges repair strategy by finding an approximate to the optimal solution, which naturally takes into account the necessary sequence of operational measures performance that depends on the actual and predicted level of bridge degradation and does not require artificial restriction on the inter-repair periods inherent in known genetic algorithms.

Computer experiments performed with the help of a developed computer program which implements the proposed mechanism of optimization of the bridge repair strategy, allowed determining the rational modeling parameters: the number of solutions in the initial set 200 – 250, the number of generations of the algorithm 150 – 200. The probability of recombination (crossover) of solutions is 0,8 – 0,9, the probability of regeneration (mutation) is 0,008 – 0,010.

The fourth section, “Development of a subsystem of the bridge repair strategy justification at AESUM” proposes improvements to the AESUM architecture which allows calculating (predicting) the degradation of objects over time and optimizing the distribution of repairs and their cost calculations, taking into account budgetary constraints. Within the AESUM software complex, a sub-system for justification of the bridge repair strategy has been created. The software and the developed

methodology make it possible to justify a rational bridge repair strategy at both the network and object levels. The technique allows achieving the cost savings of up to 15 - 25% compared to the worst-case-first solution by choosing the best solution criteria - years and repair options.

A convenient interface for operating the optimization process as part of the mechanism for justifying the bridge repair strategy and analyzing the obtained results is developed. The ultimate output of the module is the reports on the optimal bridge repair strategy on the selected road network or on an individual bridge.

Basing on the developed in the thesis subsystem of the AESUM software complex based on the real data from AESUM, important results have been obtained concerning the structure of maintenance cost distribution for minor current, current mid-term and major repairs and bridge reconstruction. Capital expenditures account for 40-70% of the total cost, depending on the actual state of the bridges on the studied network of roads of national importance.

Keywords: road bridge, degradation, life cycle, optimality criterion, mechanism, model, design, repair, bridge state, strategy, AESUM.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами Украины // Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск: 2015. Вып. № 2 (16). С. 18-23 (Беларусь).

Статті у наукових фахових виданнях:

2. Боднар Л.П. Управління утриманням елементів залізобетонних мостів на основі моделей нечіткої логіки // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во

Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. Вип.33. С. 39-42.

3. Боднар Л.П., Канін О.П., Халай Т.О. Модель обґрунтування стратегії ремонтів мостів // Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах: Ч.1. К.: НТУ, 2012. Випуск 26. С.47-52.

4. Боднар Л.П. Теоретичні засади управління довговічністю автодорожніх мостів // Автошляховик України, №4 (240), 2014. С.37- 40.

5. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М, Стабровський О.О. Визначення прогнозованої вартості проведення ремонтів мостів з використанням Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ) // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2016. Вип.16. С. 28-35.

6. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М. Обстеження мостів та вдосконалення критеріїв планів з обстежень // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2017. Вип.17. С. 42-53.

7. Боднар Л.П., Коваль П.М., Степанов С.М. Критерії формування планів обстежень мостів // Автошляховик України, №2 (254), 2018. С.34-42.

8. Боднар Л.П., Редченко В.П. Про посібник до національного стандарту щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів // Автошляховик України, №1 (257), 2019. С. 40-45.

Список опублікованих праць апробаційного характеру:

9. Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2010. Вип.12. С. 31-39.

10. Боднар Л.П., Коваль П.М., Фаль А.Є., Панібратець Л.Г. Досвід впровадження Аналітичної експертної системи управління мостами // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2010. Вип.13. С. 39-46.

11. Боднар Л.П. Обґрунтування рівнів утримання залізобетонних мостів в управлінні програмами їх експлуатації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА БУДІВНИЦТВА. Львів:

Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. № 662. С. 65-69.

12.Боднар Л.П., Лантух-Лященко А.І., Канін О.П., Коваль П.М., Фаль А.Є. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження // Дорожня галузь України. 2011. №7. С. 42-47.

13.Боднар Л.П., Канін О.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Досвід впровадження, сучасний стан та напрями подальшого розвитку. Матеріали міжнародної научно-практичної конференції з участю студентів і молодих учених «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов». Х.: ХНАДУ, 2012. С. 30-35.

14.Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами. Опыт внедрения. Современное положение. Перспективы развития. Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы» Инженерия транспорта и организация перевозок. Вильнюс: Техника, 2013. С. 263-268.

15.Боднар Л.П. Генетичні алгоритми в оптимізації стратегії ремонтів мостів // Збірник наукових праць Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. Вип.6. С. 18-23.

16.Боднар Л.П., Канін О.П., Панібратець Л.Г., Степанов С.М. Оптимізація стратегій експлуатації мостів // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 54-65.

17.Боднар Л.П., Кушнір О.В., Коваль П.М., Панібратець Л.Г. Робота асфальтобетонного покриття в зоні примикання деформаційних швів на автодорожніх мостах // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 74-80.

18.Боднар Л.П., Панібратець Л.Г., Завгородній С.С., Чурсін О.П. Сучасний інструмент управління мостами // Дорожня галузь України. 2016. №4. С. 46-51.

19.Боднар Л.П. Моделі оптимізації стратегії експлуатації автодорожніх мостів. LXXII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету. Київ: НТУ, 2016. С. 162.

20.Боднар Л.П., Канин А.П. Задача обоснования стратегий эксплуатации мостов на автомобильных дорогах. Международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги: безопасность и надежность». Сборник докладов. (24-25 ноября 2016 г), Минск. С. 179-183.

21.Larysa Bodnar, Alex Kanin, Sergii Stepanov. Genetic Algorithm to optimize the strategies for bridge repair works. 2018. 10 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://zenodo.org/record/1485402#.XDX1nGmLmUk>.

22.Боднар Л.П. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження та перспективи розвитку. Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів». Збірник тез (20-21 червня 2018 року), м. Ужгород. С. 33-36.

Свідоцтва та патенти:

1. Свідоцтво серія № 68663 Комп'ютерна програма «Оптимізація стратегії експлуатації мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 16.11.2016.

2. Свідоцтво серія № 68904 Науковий твір «Критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 06.12.2016.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕМОНТІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ	26
1.1 Терміни та визначення понять	26
1.2 Проблема формування стратегії ремонтів мостів на автомобільних дорогах	27
1.3 Моделі прогнозування технічного стану мостів	47
1.4 Системи управління мостами на мережі автомобільних доріг	55
1.5 Висновки до розділу 1.....	62
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ МОСТІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ	65
2.1 Теорія марковських стохастичних процесів в прогнозуванні залишкового ресурсу елементів мостів	65
2.2 Дослідження граничних значень рівня деградації елементів мостів.....	71
2.3 Критерій доцільності виконання ремонту або реконструкції моста, що знаходиться у непрацездатному експлуатаційному стані	79
2.4 Висновки до розділу 2.....	86
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛІ І МЕХАНІЗМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ	87
3.1 Принципи обґрунтування параметрів процесу відновлення технічного стану мостів на автомобільних дорогах і механізм оптимізації	87
3.2 Пріоритезація мостів на мережі автомобільних доріг	95
3.3 Передумови моделювання процесу відновлення технічного стану мостів на автомобільних дорогах	101
3.4 Математичні моделі оптимізації параметрів процесу відновлення стану мостів на мережі автомобільних доріг	113

3.5 Розв’язання задачі відновлення технічного стану мостів на основі пріоритезації	116
3.6 Розв’язання задачі відновлення технічного стану мостів з застосуванням механізму оптимізації	123
3.7 Дослідження впливу параметрів еволюційного алгоритму на ефективність пошуку оптимальної стратегії ремонтів мостів	134
3.8 Висновки до розділу 3	139
РОЗДІЛ 4 РОЗБУДОВА ПІДСИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРАТЕГІЇ РЕМОНТІВ МОСТІВ В АЕСУМ	142
4.1 Підсистема оптимізації процесу відновлення технічного стану мостів на мережі автомобільних доріг в архітектурі АЕСУМ	142
4.2 Методика застосування підсистеми оптимізації стратегії ремонтів мостів в програмному комплексі АЕСУМ	145
4.3 Методика визначення питомої вартості ремонтів мостів.....	156
4.4 Висновки до розділу 4.....	166
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	170
ДОДАТКИ	191

ВСТУП

Актуальність роботи. Ефективність використання мережі автомобільних доріг суттєво залежить від забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності автодорожніх мостів.

Проте, 63,5 % мостів на дорогах загального користування України не відповідають вимогам діючих норм за габаритами та/або вантажопідйомністю. Крім того, в останні роки відбувається погіршення експлуатаційних станів мостів, обумовлене недостатнім рівнем фінансування їх утримання і ремонтів. Кількість мостів, які знаходяться в обмежено працездатному та непрацездатному експлуатаційних станах і потребують капітального ремонту або реконструкції, становить близько 30 % від кількості обстежених мостів. Вже сталися випадки аварійних обвалень мостів, що є прямою техногенною загрозою для економіки країни. Отже, проблема своєчасного ремонту мостів, підвищення їх надійності, збільшення строку служби набуває особливої актуальності та соціальної значимості.

В Аналітичній експертній системі управління мостами (АЕСУМ) Укравтодору накопичена велика кількість даних обстежень і результатів оцінювання технічного стану мостів на дорогах загального користування. Вони можуть сприяти вирішенню важливого науково-практичного завдання – удосконалення проектування ремонтів мостів з урахуванням прогнозованої тривалості залишкового життєвого циклу шляхом вибору найбільш ефективної послідовності і видів ремонтів мостів – розробки ефективної стратегії ремонтів на мережі автомобільних доріг.

Існує нагальна потреба в об'єднанні наукового базису результатів досліджень процесу деградації елементів конструкцій мостів з дослідженнями процесу відновлення їх технічного стану, що сприятиме збільшенню строку служби і підвищенню безпеки експлуатації мостів на основі реалізації концепції проектування ремонтів з ефективним використанням коштів на забезпечення їх життєвого циклу у експлуатаційній стадії.

Очевидно, що дослідження, які спрямовані на обґрунтування ефективної стратегії відновлення технічного стану автодорожніх мостів при проектуванні їх ремонтів є актуальними і відповідають інтересам суспільства і державній політиці у сфері техногенної і економічної безпеки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає актуальним напрямам науково-технічної політики України щодо управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд і конструкцій: Постанові Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 року № 409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», Розпорядженню Кабінету Міністрів України від 11 червня 2003 року №351-р «Про схвалення Концепції державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки». Тема дисертації відповідає напрямам і завданням державних науково-технічних програм: «Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 30.05.2018 № 430-р), «Державна цільова економічна програма розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 21.03.2018 № 382).

Основні теоретичні і прикладні дослідження дисертації були виконані в рамках науково-дослідних робіт ДП «ДерждорНДІ» за планами науково-дослідних робіт Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор», а саме: «Розробити модуль аналізу залишкового ресурсу визначальних елементів мостів з оцінкою доцільності виконання ремонтів чи нового будівництва» (номер державної реєстрації 0111U007312); «Провести дослідження та розробити модуль управління ремонтами та експлуатаційним утриманням мостів» (номер державної реєстрації 0112U004904); «Провести модернізацію паспорта моста в АЕСУМ та розробити модуль для аналізу і визначення поточного та перспективного експлуатаційного стану мостів із врахуванням рівня фінансування» (номер державної реєстрації 0114U006224); «Провести дослідження впливу ремонтів мостів на процеси деградації їх

конструктивних елементів, розробити модуль АЕСУМ оцінки проведення відновлювально-ремонтних робіт та модернізувати в цілому систему управління програмним комплексом» (номер державної реєстрації 0116U007456); «Виконати аналіз та розробити модуль АЕСУМ з визначення приведеної вартості робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання мостів» (номер державної реєстрації 0118U000774); «Виконати аналіз та розробити пропозиції щодо удосконалення моделей оцінювання і прогнозування ресурсу мостів, що знаходяться в експлуатації» (номер державної реєстрації 0118U000775).

Особистий внесок автора полягає в розробленні теоретичних та методичних підходів щодо удосконалення проектування ремонтів при експлуатації автодорожніх мостів та розробки програмних засобів їх реалізації у складі АЕСУМ.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення проектування ремонтів при експлуатації мостів узгодженням процесів їх деградації та відновлення, що забезпечує підвищення надійності, збільшення тривалості та зменшення вартості життєвого циклу мостів. Для досягнення мети роботи були поставлені такі **завдання**:

- виконати аналіз існуючих наукових підходів щодо моделей оцінювання та прогнозування технічного стану мостів і способів формування стратегії їх ремонтів;

- встановити кількісний критерій доцільності реконструкції або капітального ремонту моста, що перебуває у непрацездатному стані, замість його заміни новим;

- розробити модель пріоритезації мостів на мережі автомобільних доріг;

- розробити базові принципи, математичні моделі і механізм обґрунтування стратегії ремонтів мостів на мережевому й об'єктному рівнях;

- розробити підсистему обґрунтування стратегії ремонтів мостів в рамках програмного комплексу АЕСУМ та методику її використання.

Об'єктом дослідження є процес відновлення технічного стану мостів на автомобільних дорогах.

Предметом дослідження є моделі і механізм обґрунтування параметрів процесу відновлення стану мостів при проектуванні їх ремонтів за критеріями надійності, вартості і тривалості життєвого циклу під час експлуатації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні важливого науково-практичного завдання розвитку теоретичних і практичних аспектів удосконалення проектування ремонтів автодорожніх мостів на мережевому та об'єктному рівнях з урахуванням впливу ремонтів на підвищення їх надійності і подовження тривалості життєвого циклу у фазі експлуатації. Найбільш вагомими результати полягають в наступному:

Вперше:

- на підґрунті вітчизняної нормативної моделі деградації елементів мостів розроблені моделі і механізм обґрунтування параметрів відновлення їх стану на мережі автомобільних доріг, що дозволяють, порівняно з існуючими підходами, підвищити надійність, збільшити тривалість та зменшити вартість життєвого циклу мостів;

- для мостів, що перебувають у непрацездатному експлуатаційному стані, встановлено кількісний критерій, який дозволяє, на відміну від трудомісткого і витратного техніко-економічного обґрунтування, швидко оцінити доцільність капітального ремонту або реконструкції моста замість його заміни новим.

Удосконалено модель пріоритезації мостів на мережі автомобільних доріг, яка, порівняно з існуючими підходами, дозволяє врахувати поточну і перспективну значимість мостів в процесі прогнозування їх ремонтів.

Дістав подальший розвиток програмний комплекс АЕСУМ, який, на відміну від попередньої версії, на основі розробки і впроваджених підсистем обґрунтування ефективної стратегії ремонтів мостів та більш точної оцінки їх вартості розширює практичні можливості АЕСУМ для удосконалення проектування ремонтів мостів.

Методи дослідження: системний аналіз – для встановлення зв'язків між складовими досліджуваного процесу при розробці вихідних фундаментальних принципів, як структурної основи для обґрунтування стратегій ремонтів мостів; теорія надійності споруд – для оцінювання процесу деградації елементів мостів; методи математичного моделювання – для розробки математичних моделей обґрунтування стратегії ремонтів мостів; еволюційне моделювання – для розробки механізму обґрунтування стратегії ремонтів мостів на основі розроблених математичних моделей; комп'ютерний експеримент – для оцінки ефективності запропонованого механізму і математичних моделей.

Достовірність результатів дослідження підтверджується: чіткою постановкою завдань в рамках теорії експлуатації транспортних споруд; застосуванням усталених методів теорії ймовірностей і математичної статистики; комп'ютерне тестуванням моделей і механізму обґрунтування стратегії відновлення технічного стану на основі історичних даних експлуатації автодорожніх мостів України; збіжністю з результатами досліджень інших авторів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що теоретичні положення дисертаційної роботи доведені до рівня програмних засобів у складі програмного комплексу АЕСУМ та методики обґрунтування стратегії ремонтів мостів на мережі доріг, достовірність яких обґрунтована застосуванням матеріалів обстежень, накопичених в базі даних АЕСУМ, та застосуванням нормативної моделі деградації елементів мостів. Результати досліджень і практичні рекомендації можуть бути використані дорожньо-експлуатаційними організаціями України для прогнозування ремонтів мостів, проектними організаціями при проектуванні нових мостів, реконструкції та ремонтів існуючих мостів. Розроблена методика обґрунтування стратегії ремонтів мостів пропонується як інформативний додаток до існуючого нормативного документа: ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів».

Впровадження результатів роботи. Результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень були впроваджені:

- в Аналітичній експертній системі управління мостами Державного агентства автомобільних доріг України (Довідка № 13-8-64 від 30.08.2016);
- в Аналітичних експертних системах управління мостами Служб автомобільних доріг Вінницької, Хмельницької і Черкаської областей (акти про впровадження).

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною, завершеною науковою працею, у якій викладено авторський підхід до вирішення поставленого наукового завдання, що має значення для розвитку теоретичних і практичних аспектів обґрунтування параметрів процесу відновлення технічного стану мостів як на мережі автомобільних доріг, так і на рівні однієї споруди. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно [3, 4, 8, 17, 20, 21, 22, 25]. У спільних публікаціях автором: проведено аналіз зарубіжних систем управління мостами, структури і стану АЕСУМ [9, 19], розроблені алгоритми і комп'ютерні програми обґрунтування стратегії ремонтів мостів [12, 13, 26], виконаний аналіз розподілу деформаційних швів мостів на дорогах загального користування на основі бази даних АЕСУМ [14], встановлена кількість мостів, що підлягають динамічному випробуванню на основі аналізу даних АЕСУМ [10], проаналізовано стан обстежень автодорожніх мостів на дорогах загального користування України, запропоновані критерії формування планів обстежень мостів в умовах недостатнього фінансування [5, 16], дана характеристика АЕСУМ як інструмента управління мостами [9, 24], розроблена комп'ютерна програма «Оптимізація стратегії експлуатації мостів» [6], отримана залежність критерію доцільності заміни моста новим [7].

Апробація результатів дослідження. Основні положення дисертаційної роботи викладені та опубліковані в матеріалах науково-технічних конференцій: Міжнародна науково-технічна конференція «Збірно-монолітні і збірні попередньо напружені залізобетонні конструкції та мости»: (12-14 травня

2010 року, Львів); Міжнародна науково-практична конференція «Мости та тунелі: Теорія. Дослідження. Практика» (27-28 травня 2010 року, Дніпропетровськ); Международная научно-практическая конференция с участием студентов и молодых ученых «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов»: (1-4 ноября 2012 года, Харьков); 15-я конференция молодых ученых Литвы «Наука – будущее Литвы. Транспорт» (8 мая 2013 года, Литва); LXXII Наукова конференція професорсько-викладацького складу і студентів Національного транспортного університету (м. Київ, травень 2016 року); Международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги: безопасность и надежность» (г. Минск, 24-25 ноября 2016 года); Науково-практичний семінар «Сучасні інформаційні технології в дорожньому господарстві» (м. Київ, 13 грудня 2017 року); Transport Research Arena (м. Відень, Австрія, 17-20 квітня 2018 року); Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів» (м. Ужгород, 20-21 червня 2018 року).

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 182 найменувань, 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 212 сторінок у тому числі 169 сторінок основного тексту, список використаних джерел на 21 сторінках та 22 сторінки додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕМОНТІВ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Терміни та визначення понять

Проблема, що розглядається в цій роботі, ще мало вивчена. Ця обставина вимагає від дослідника уточнення формулювання термінів і понять проблеми, як апарата дослідження. В дисертації використовуються терміни і поняття з нормативних джерел [35, 36, 37, 38, 39, 40, 46, 47]. Деякі з використаних в дисертації сьогодні ще не стали усталеними і потребують строгого формулювання, а деякі – уточнення. Визначення таких основних термінів і понять, які застосовані в дисертації, наводяться нижче.

Генетичний алгоритм – евристичний алгоритм розв’язання задач оптимізації шляхом послідовного підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію.

Життєвий цикл експлуатації – період, протягом якого споруда виконує проектні функції. Дорівнює періоду часу між введенням споруди в експлуатацію після будівництва, реконструкції або ремонту і її закриттям (утилізацією).

Механізм – структура, що виконує функцію в її складових частинах, компонентних операціях і її організація. Організоване функціонування механізму відповідає за одне або більше явищ.

Рівень деградації – числовий показник D , зв’язаний з характеристикою безпеки β . Так, наприклад, характеристиці безпеки $\beta \geq 3,8$ відповідає рівень деградації $D = 0$, а $\beta \leq 1,74$ відповідає $D = 1$.

Розрахунковий строк експлуатації – період часу, для якого виконуються розрахунки надійності об’єкта і після впливу якого можливість його подальшої експлуатації визначається за результатами обстеження технічного стану.

Строк служби – тривалість нормальної експлуатації споруди до стану, при якому її подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна.

Стратегія ремонтів при експлуатації мостів – загальний довгостроковий прогноз виконання ремонтів на заданій мережі автомобільних доріг, який формується на основі результатів: обстежень мостів, оцінки і прогнозування з використанням науково обґрунтованих моделей процесу деградації елементів мостів та процесу відновленні їх технічного рівня та експлуатаційного стану, з метою досягнення заданих цілей підвищення надійності, довговічності та ефективності використання мережі автомобільних доріг.

1.2 Проблема формування стратегії ремонтів мостів на автомобільних дорогах

Загальною фундаментальною проблемою системи експлуатації мостів є проблема забезпечення функціонування кожної споруди протягом проектного строку служби із заданими показниками надійності – проблема управління життєвим циклом мостів у фазі їх експлуатації на мережевому або об'єктному рівнях [34, 36, 46, 47, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 85, 86, 113, 115, 117, 120, 121, 133, 146, 173].

Оцінка надійності існуючих конструкцій відрізняється від проектування нових конструкцій в ряді аспектів, включаючи [128, 146, 173]:

- підвищений рівень безпеки зазвичай передбачає більше витрат на існуючі споруди, ніж на нові споруди;
- залишок тривалості експлуатації (remaining working life) існуючих споруд часто відрізняється від стандартної проектною тривалості експлуатації, яка становить 50 років, передбачених для нових будівель (100 років для мостів);
- інформацію про фактичні умови, яка може бути доступна для оцінки існуючої споруди (перевірки, випробування, вимірювання).

В даний час існуючі споруди в основному перевіряються за допомогою спрощених детермінованих процедур, які зазвичай застосовуються при проектуванні нових споруд. Такі оцінки можуть призвести до збільшення витрат. Більш реалістична перевірка фактичних показників існуючих споруд може бути досягнута імовірнісними методами, коли невизначеності основних змінних описуються відповідними імовірнісними моделями. Було визнано, що для існуючих будівель та мостів було б неекономічно визначати ті ж рівні надійності, що й для нових споруд [128, 146, 173].

Цільові рівні надійності, рекомендовані EN 1990 2002 [112], пов'язані з наслідками відмови, в першу чергу, призначені для нових конструкцій. Більш детальна класифікація наведена в ISO 2394 1998 [131], де також враховуються відносні витрати на заходи безпеки. Цільові рівні надійності, передбачені в обох документах, повинні розглядатися як орієнтовні. ISO 13822 2010 [130] вказує на можливість встановлення цільових рівнів надійності для існуючих споруд шляхом оптимізації загальної вартості, пов'язаної з передбачуваним строком робочого життя (working life).

Головною метою системи управління життєвим циклом мостів у фазі експлуатації є оптимізація витрат на реконструкцію, ремонти та утримання мостів при умові досягнення максимального строку служби.

Сьогодні є загально визнаним, теоретично доведеним [41, 63, 72 , 96, 100, 101, 107, 181], що витрати на ремонти та утримання мостів можуть збільшуватись в 3–5 і більше разів порівняно з мінімальними, необхідними при вчасному ремонті. Особливої актуальності проблема формування стратегії ремонтів мостів в системі експлуатації набула в сучасних умовах недостатнього фінансування дорожнього господарства.

Домінуюча ідея вибору стратегії ремонтів полягає в наступному:

- виконувати ремонти мостів в науково обґрунтовані строки;
- в умовах обмеженого фінансування раціональним чином призначити ремонти мостів дорожньої мережі з урахуванням важливості мостів.

Очевидно, що науковим підґрунтям системи експлуатації має бути модель життєвого циклу моста, що дозволить визначити час безпечного використання елементів (або споруди в цілому) при заданих навантаженнях у визначених умовах експлуатації. Системною базою дослідження стають моделі деградації, оцінки і прогнозу технічного стану мостів (рис.1.1).

Аналіз життєвого циклу використовують для оцінки нових та існуючих мостів, а також для оцінки стратегій ремонтів [49, 54, 87, 88, 94, 98, 99, 107, 108, 110, 111, 115, 117, 118, 120, 121, 123, 136, 152, 153, 154, 179, 182].

Оцінка стану споруди зазвичай базується на детерміністичних моделях прогнозування експлуатаційних характеристик, які описують майбутній стан функціональною кореляцією між атрибутами стану споруди, такими як вік, механічні, хімічні та термічні процеси та процеси навантаження [172].

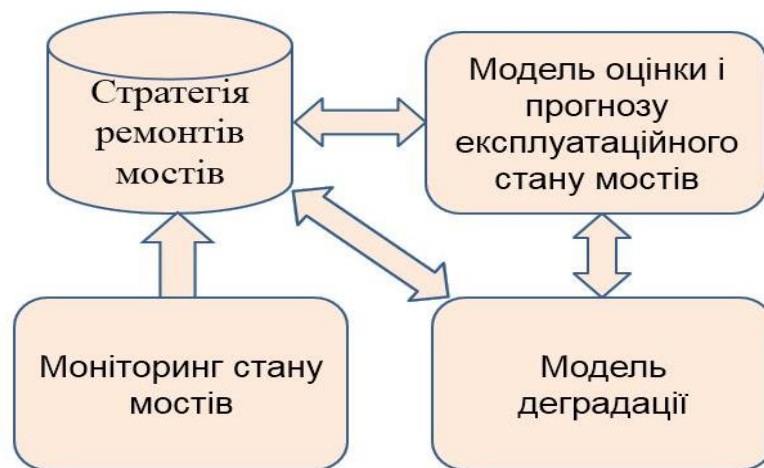


Рисунок 1.1 – Системна база дослідження. Джерело: власна розробка

Ймовірнісні (стохастичні) моделі прогнозування експлуатаційних характеристик передбачають включення невизначеностей в описові змінні за допомогою функцій розподілу ймовірностей, що підвищує якість прогнозування експлуатаційних характеристик [172].

Одним з перших досліджень проблеми оптимізації стратегії ремонтів в системі експлуатації мостів була робота [167], в якій відмічалось, що в умовах бюджетних обмежень та великої потреби у ремонті та заміні мостів, особи, які

приймають рішення, (далі – ОПР) потребують ефективного інструменту для відбору проектів ремонтів серед багатьох альтернатив. Головними цілями були визначені: побудова моделей для прогнозування стану мостів із застосуванням марковського процесу деградації з кінцевими дискретними станами у дискретному часі і процесу вибору оптимального варіанту стратегії ремонтів. Для оптимізації стратегії ремонтів мостів запропоновані моделі: цілочисельного лінійного програмування з булевими змінними, динамічного програмування та ряд альтернативних моделей.

Модель ранжирування розглядає кілька критеріїв оцінки в термінах функцій корисності, а модель оптимізації використовує пряме представлення критеріїв оцінки. Через різні концепції цих двох методів згадані дві моделі дають два різні набори результатів. Отже, бажано поєднати методики так, щоб моделі ранжирування та оптимізації мали однакову форму представлення критеріїв оцінки, а результати можна було б порівняти та аналізувати на загальній основі [167].

Застосування регресійних моделей на основі історичних даних свідчить лише про те, що було зроблено, а не про те, що можна було б зробити. Такі історичні оцінки, які використовують інженери-мостовики, можуть бути не оптимальним, тобто не представляють оптимальної послідовності ремонтів, котра теоретично може бути досягнута [162].

Автори робіт [138, 140] відмічають, що вибір оптимальної стратегії ремонтів мостів є складною комбінаторною задачею, тому що кількість можливих комбінацій послідовностей ремонтів експоненціально зростає при збільшенні кількості мостів, що розглядаються, N , тривалості прогнозного періоду T та кількості можливих альтернатив ремонту M . Кількість всіх комбінацій стратегій утримання є $M^{N \times T}$. Вибір стратегії стає ще більш складним, якщо до уваги приймаються інші умови, такі як взаємозв'язок між елементами моста і між різними мостами, обмеження на ресурси, вимога допустимої границі деградації тощо. Автори робіт [138, 140] в якості методу пошуку

оптимальної стратегії ремонтів мостового полотна (bridge deck) вибрали генетичний алгоритм [1, 15, 54, 77, 82, 84, 91, 100, 116, 137, 151, 164].

Моделям оптимізації життєвого циклу мостів у фазі експлуатації присвячені ряд робіт [109, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 129, 135, 136, 152, 153, 154, 177, 179]. Їх висновки є такими:

- індекс стану та характеристика безпеки виявилися ефективними з точки зору візуальної оцінки стану та загальної ефективності деградуючої споруди;
- існують важливі відмінності між показником стану та характеристикою безпеки. З цієї причини експлуатаційні стани, які визначені в системах управління мостами, відрізняються від станів надійності окремої конструкції або групи конструкцій [113];
- експлуатаційні втручання та їх вплив на показники стану та індекс надійності повинні враховувати невизначеність;
- співвідношення між загальною вартістю експлуатаційних втручань та їх впливом на надійність повинне враховуватися під час оптимізації експлуатаційних витрат деградуючих споруд.

В роботі [117] показано, що системи управління мостами на основі експлуатаційного стану та моделювання марковського процесу деградації мають кілька обмежень, які можна подолати, використовуючи підхід, оснований на надійності. Експлуатаційні втручання вибираються у відповідь на чіткі зміни надійності стану. Застосування аналізу витрат і вигоди для прийняття рішень щодо управління мостами на основі надійності дозволяє обґрунтувати оптимальну стратегію з урахуванням невизначеності та фінансових обмежень.

В роботі [177] описано і порівняно дві моделі, які використовуються для оптимального збалансування надійності та вартості життєвого циклу деградації інфраструктури. Вони представляють невизначеність деградації різним способом. У Д. Франгопола, очікувана деградація описується моделлю, яка в часі є лінійною або квадратичною, а коефіцієнти цих моделей приймаються як

випадкові величини. У голландській моделі процес деградації вважається стохастичним процесом (гамма-процесом) з незалежними прирощеннями. Інша відмінність полягає в тому, що модель Д. Франгопола [177] включає зниження надійності, а голландська модель включає погіршення експлуатаційного стану.

В роботі [114] сформульована загальна методологія для оптимізації стратегії ремонтів мостів, яка складається з шести кроків:

1. Визначають режими відмови моста (наприклад, відмова плити, зміщення крайньої балки тощо), випадкові змінні і знаходять параметри (наприклад, середнє значення, стандартне відхилення), пов'язані з цими випадковими змінними. Розробляють рівняння граничного стану з точки зору цих випадкових величин для кожного режиму відмови. Обчислюють надійність щодо виникнення кожного з можливих режимів відмови.

2. Розробляють системну модель для всього моста як послідовно-паралельно поєднану комбінацію окремих режимів відмови. Обчислюють системну надійність всього моста.

3. Розробляють моделі, що описують деградацію і навантаження у функції часу. Це неминуче вводить нові випадкові величини. Обчислюють надійність системи в часі.

4. Встановлюють критерій ремонту або заміни. Розробляють варіанти ремонту та пов'язаних з ними витрат.

5. Використовуючи всі можливі комбінації варіантів ремонту і заміни та очікуваного строку служби, оптимізують стратегію ремонту, мінімізуючи загальну суму експлуатаційних витрат при збереженні встановленого рівня надійності.

6. Розробляють програму інспекції протягом життєвого циклу, щоб надати необхідну інформацію для оновлення оптимальної стратегії ремонту з часом.

Ця методологія застосовна до будь-якого типу моста.

Більшість традиційних алгоритмів оптимізації орієнтовані на одну функцію цілі. Градієнтні алгоритми реалізують процес пошуку оптимального

рішення при умові неперервних змінних, що диференціюються. Навпаки, евристичні алгоритми, що базуються на еволюційному моделюванні, такі як генетичний алгоритм (ГА) [1, 4, 50, 77, 164], цього не потребують, отже, більш застосовні для розв'язання задачі вибору оптимальної стратегії ремонтів мостів.

В роботі Д. Франгопола [119] наведений генетичний алгоритм багатокритеріальної оптимізації стратегії ремонтів мостів, що формулюється як комбінаторна оптимізаційна проблема, при розв'язанні якої слід врахувати багато звичайно конфліктуючих цілей. Загальна багатоцільова оптимізаційна проблема формулюється як:

$$\begin{aligned} &\text{оптимізувати } f(x) \equiv [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \\ &\text{при обмеженнях } C(x) \equiv [C_1(x), C_2(x), \dots, C_n(x)] < 0, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де f – множина цільових функцій, які, звичайно, природньо конфліктують;
 C – множина обмежень, яка визначають область простору рішень;
 x – вектор проектних змінних.

Неможливо оптимізувати всі цільові функції одночасно, тому застосовується група Парето-оптимальних недомінованих рішень.

В сучасній роботі Д. Франгопола та його співавторів [120] коротко розглядається розробка узагальненої основи для оцінки експлуатаційних характеристик та вартості життєвого циклу моста з акцентом на аналіз, прогнозування, оптимізацію та прийняття рішень в умовах невизначеності. Головним питанням, що лежить в основі важливості цього підходу, є необхідність раціональної основи прийняття обґрунтованих рішень щодо проектування, будівництва, інспекції, моніторингу, ремонту, заміни та управління мостами в умовах невизначеності, яка здійснюється за допомогою багатоцільових процедур оптимізації, що балансують суперечливі критерії, такі як результативність (експлуатаційні характеристики) та вартість. Узагальнено низку суттєвих змін, включаючи надійність, ризик, стійкість та сталість мостів, транспортних мереж з мостами та взаємозалежних систем інфраструктури. Крім того, розглядаються наслідки зміни клімату щодо ймовірного

оцінювання ефективності транспортних магістральних мостів. Також представлені інтеграція системи та оновлення моделі ймовірнісної оптимізації життєвого циклу, що враховують багатоатрибутну корисність та ставлення ОПР до ризику.

Проблемі оптимізації стратегії ремонтів мостів присвячені роботи [142, 143, 144]. В статті [142] представлено системний підхід для управління експлуатацією мостів, який поєднує в собі стохастичну марковську модель прогнозування експлуатаційних характеристик з багатоцільовою процедурою оптимізації для визначення оптимального розподілу коштів та визначення пріоритетів мостів для їх експлуатаційного утримання, ремонту та заміни (MR&R). Визначення пріоритетів мостів ґрунтується на задоволенні кількох суперечливих цілей одночасно, включаючи мінімальні умови для стану моста, мінімальні витрати на MR&R та максимальну середню денну інтенсивність руху. Модель марковського ланцюга є ключовим компонентом цієї системи управління мостами, оскільки вона прогнозує майбутній стан мостів на дорожній мережі, що дозволяє забезпечити надійний розподіл необхідних коштів на MR&R. Стохастичне моделювання результативності (performance) моста за допомогою дискретної моделі ланцюгів Маркова фіксує часову залежність, невизначеність та мінливість, пов'язану з рейтингом стану, що виникає внаслідок погіршення і відновлення. Марковську матрицю ймовірності переходу можна оцінити, використовуючи дані рейтингу стану, зібрані під час необхідних оглядів та/або обстежень мостів через кожні два роки. Задача управління обслуговуванням мостів сформульована як стохастична багатоцільова задача оптимізації, де одночасно досягаються кілька суперечливих цілей. Цілі включають мінімізацію витрат на MR&R та максимізацію надійності і рейтингу стану мережі мостів.

Робота [144] представляє практичний підхід до оптимізації обслуговування мережі старіючих мостів, який об'єднує модель стохастичного зносу на основі теорії накопичення збитків [2] з ефективним багатоцільовим оптимізаційним підходом. Багатоцільова оптимізація технічного

обслуговування мостів враховує всі необхідні цілі, такі як поліпшення стану мостового полотна, мінімізацію витрат на обслуговування та мінімізацію витрат користувачів. Розгляд цих трьох цілей дає змогу скористатись усіма доступними даними обстежень та призвести до мінімізації ризику невдач у зв'язку з деградацією мостів і проведенням їх технічного обслуговування. Запропоновано багатоцільовий індекс оптимальності як критерій оптимальності для визначення пріоритетності дефектних мостів з точки зору технічного обслуговування. Отримана оптимальна стратегія визначення пріоритетів мостів забезпечує задовільний компроміс між вибраними конкуруючими цілями оптимізації.

Отже, задачі оптимізації в зарубіжних дослідженнях пропонувались як однокритеріальні, так і багатокритеріальні, детерміністичні і стохастичні. Проте, вони спираються на моделі деградації елементів мостів, які відрізняються від української нормативної моделі [47], потребують значної кількості історичних даних, отже, з практичної точки зору, їх пряме застосування у вітчизняних умовах проблематичне і, швидше за все, недоцільне.

В українській технічній літературі найбільш відомі фундаментальні дослідження з оптимізації життєвого циклу мостів професора А.С. Дехтяра [41, 42, 43, 44]. Зокрема в цих роботах відмічено, що будь-яка будівельна залізобетонна конструкція після спорудження певний досить короткий час покращує свої якості за рахунок набуття бетоном додаткової міцності, релаксації напружень та інших тривалих процесів. В цей період деградація цих якостей також відбувається, проте стан конструкції можна вважати сталим через те, що обидва згаданих процеси фактично компенсують один одного (рис. 1.2).

Наступний період характеризується виразним зниженням властивостей – надійності, несної здатності. На рис. 1.2 таке зниження подане лінією АВ, конкретний вигляд якої залежить від того, яка саме властивість розглядається, проте для всіх властивостей ця лінія є вигнута догори. Кожна розглядувана

якість характеризується трьома рівнями (рис.1.2) – початковим (вихідним) U_1 , допустимим U_2 і аварійним U_3 [43].

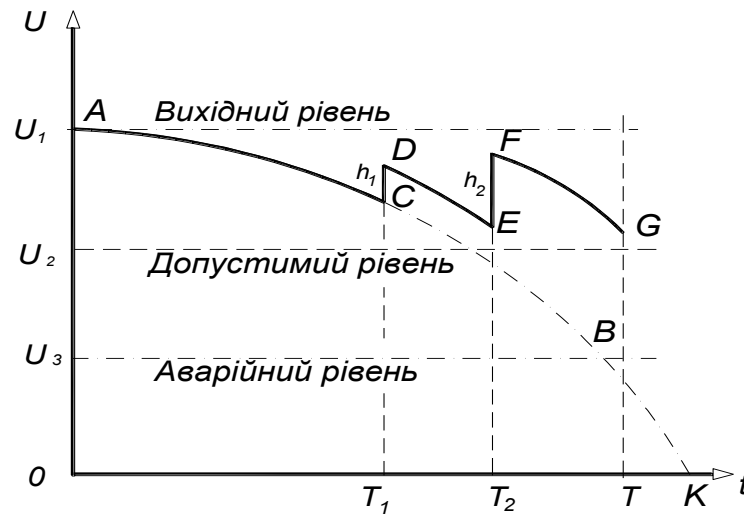


Рисунок 1.2 – Концептуальна схема зміни якостей бетону Джерело: [43]

Утримання споруди протягом граничного терміну експлуатації T серед інших заходів полягає в здійсненні ремонтів. Якщо ремонти не виконувати, споруда може втратити експлуатаційні властивості ще до настання терміну T (точка В на рис.1.2). Проведення ремонтів дозволяє шляхом підвищення якості забезпечити подальшу надійну експлуатацію споруди протягом усього заданого періоду T .

Нижче подано модель задачі про оптимальну стратегію експлуатації. В результаті розв’язання маємо отримати відповіді на такі три питання:

- кількість n ремонтів протягом терміну T ;
- час проведення ремонтів T_i , $i=1, 2, \dots, n$;
- склад і об’єми ремонтних робіт, що призводять до підвищення рівня певного показника якості U на величину h_i , $i=1,2, \dots, n$.

При розбудові моделі автор [41, 42, 43] приймає такі припущення:

- експлуатація споруди або конструкції залежить від її початкової якості, відтак від вартості. Більш якісні конструкції в подальшому вимагають менших експлуатаційних витрат. Проте, тут розглядаються лише конструкції однакової вихідної вартості;

– конкретна форма лінії АВ (рис.1.2) залежить від типу конструкції (для мостів – прогонові будови, опори, фундаменти). Для спрощення надалі розглядаються конструкції одного типу, наприклад, прогонові будови;

– прийнято, що між підвищенням якості h_i ($i = 1, 2, \dots, n$) і вартістю ремонту C_i існує лінійна залежність $C_i = k_i h_i$, причому h_i може набувати будь – якої величини в інтервалі $U_1 - U_2$;

– як впливає з рис. 1.2, йдеться про врахування витрат, які відбуваються в різні моменти T_i часу ($i = 1, 2, \dots, n$). Тому для порівняння різних стратегій експлуатації обираємо економічний критерій – вартість робіт, приведену до моменту T закінчення терміну експлуатації;

– початкова вартість будівництва вважається однаковою для всіх порівнюваних варіантів, отже тут вона не враховується;

– проведення ремонтних робіт може бути пов’язане не тільки з фізичною деградацією, а й з моральною, тобто йдеться про необхідність підсилення або розширення проїзної частини через збільшення ваги, габаритів або швидкості рухомого складу. Автор обмежується розглядом лише фізичної деградації [43].

З урахуванням прийнятих припущень наведемо формулювання задачі [43]. Необхідно відшукати таку стратегію ремонтних робіт:

за умов

$$\begin{aligned} 0 \leq T_i \leq T, (i = 1, 2, \dots, n), \\ 0 \leq h_i \leq U_1 - U_2, (i = 1, 2, \dots, n), \\ U_1 \geq U \geq U_2, T_{i+1} \geq T_i (i = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (1.2)$$

щоби

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

Зважаючи на форму лінії АВ, отримуємо задачу нелінійного програмування, до розв’язання якої застосовано метод покоординатного спуску.

Слід звернути увагу на стрімке нелінійне зростання цільової функції C (рис.1.3). Воно показує, яку ціну маємо сплачувати за підвищення надійності споруди.

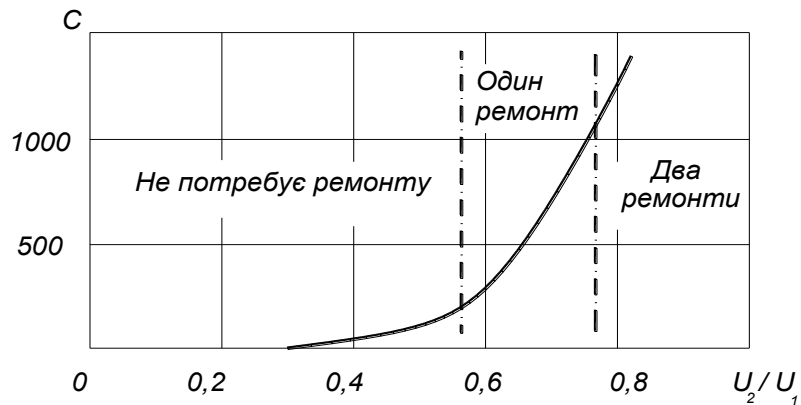


Рисунок 1.3 – Модель цільової функції нормативного степеневого співвідношення. Джерело: [43]

Слід зауважити, що підхід, запропонований автором [43], є спрощеним, а використання для розв'язання задачі методу покоординатного спуску накладає жорсткі вимоги щодо гладкості та диференційованості нелінійних функцій.

Ключовим моментом методики, запропонованої в [41], є встановлений (нормативний або вирахуваний) період експлуатації споруди. Він має залежати від багатьох чинників, серед них – якість проекту споруди, рік (роки) спорудження, тип і якість використаних матеріалів, якість виконання будівельних і монтажних робіт, категорія дороги, інтенсивність і структура транспортних потоків, якість і повнота експлуатаційних заходів від завершення будівництва і до розглядуваного моменту.

Метою передбачуваних заходів є забезпечення протягом зазначеного періоду належного стану споруди, тобто утримання її експлуатаційних показників на рівні, що перевищує допустимий рівень або, принаймні, дорівнює йому.

Оптимізаційна задача, про яку тут йдеться, має містити три обов'язкові частини – цільову функцію (або цільові функції), перелік незалежних змінних з границями їх змінювання і систему обмежень.

Цільовою функцією має бути вартість експлуатації споруди (в широкому розумінні) протягом всього зазначеного терміну.

Незалежними змінними в розглядуваній оптимізаційній задачі є заходи з експлуатаційного утримання та ремонтів споруди – від фарбування перил і бар'єрів безпеки до повної заміни певних конструкцій.

В загальному випадку потрібно отримати відповіді на такі запитання:

- Які заходи слід планувати (їхня структура і обсяги виконуваних робіт)?
- Коли, в які терміни такі заходи мають бути здійснено?
- Чи варто взагалі витратити кошти на підтримування споруди в неналежному стані? Альтернативою може бути будівництво нового моста.

Обмеження в оптимізаційній задачі поділяються на інтервальні і функціональні. Перші встановлюють границі для зазначених вище незалежних змінних. Зокрема, це стосується об'ємів запланованих робіт (не можна, наприклад, виділяти кошти, яких вистачить лише на заміну половини головної балки прогонової будови, таку балку якщо міняти, то треба міняти повністю).

До другої групи мають бути віднесені функціональні обмеження, які встановлюють нижню допустиму границю для найважливіших експлуатаційних характеристик – міцності, деградації, надійності тощо.

В роботах [49, 54, 50, 55, 52, 51, 53] розвинута теорія управління автомобільними дорогами та аналітичний апарат оптимізації вкладень в підтримку належного рівня експлуатаційного стану дороги в залежності від кількісних характеристик пошкоджень. Окремі підходи з них можуть бути застосовані в обґрунтуванні стратегії експлуатації мостів. В названих роботах особливе місце займають дослідження впливу на життєвий цикл рівня експлуатаційного стану об'єкта та оптимізація стратегії MR&R за параметрами вартості утримання і строком служби.

Розробка правил та методичних положень проектування довговічності, визначення і прогнозування експлуатаційного стану окремих елементів мостів та мостів в цілому є предметом вивчення великої кількості вітчизняних та зарубіжних авторів. Наведемо роботи найбільш відомих українському загалу науковців [21, 31, 34, 45, 48, 85, 86, 88, 90, 99, 110, 117, 121, 133, 134, 153, 137, 138, 140, 139, 169, 150, 119, 142, 160, 161, 169, 171, 172].

В роботі японських дослідників [138] представлена прогнозована на довільний час залежність рівня деградації прогонової будови споруди:

$$D(t) = D(0) + \sum_{j=1} \mu \cdot R(A_j, Tr_j) - \sum_{j=1} I_m(j), \quad (1.4)$$

де $D(0)$ – початковий рівень деградації на час $t = 0$, який встановлений за даними обстеження;

$D(t)$ – рівень деградації прогонової будови моста на кінець року t періоду прогнозування;

t – поточний рік стратегічного періоду прогнозування;

Для рівнів деградації I, II, III, IV і V [138] значення $D(0)$ приймається по середині інтервалу рівня деградації 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1 відповідно;

$R(A_j, Tr_j)$ – приріст рівня деградації прогонової будови в рік j .

A_j – вік моста в рік j , інакше час від побудови моста до поточного року j ;

Tr_j – коефіцієнт інтенсивності руху по мосту в рік j . Дорівнює відношенню спостереженої або прогнозованої інтенсивності в рік j до проектної інтенсивності руху;

μ – коефіцієнт за матеріалом: 1,0 – бетонна плита, 1,1 – металева плита;

$I_m(j)$ – вплив експлуатаційного заходу m на рівень деградації в рік j .

В табл. 1.1 показано відношення між приростом рівня деградації $R(A_j, Tr_j)$, віком моста A_j та коефіцієнтом інтенсивності руху по мосту.

Як робочу гіпотезу, у [138] прийнято, що капітальний ремонт продовжує ресурс прогонової будови на 10 років.

Визначення рівня деградації базується на таких принципах:

– оцінка рівня деградації може бути виконана через 10 років після будівництва або заміни прогонової будови;

– швидкість деградації залізобетонних прогонових будов приймається не менше 2 % на рік;

– швидкість деградації лінійно збільшується з віком моста.

Таблиця 1.1 – Приріст рівня річної деградації за [138]

Коефіцієнт інтенсивності руху	Вік мосту, років				
	0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	> 40
< 1,0	0,000	0,020	0,025	0,030	0,035
1,0 – 1,1	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040
1,0 – 1,2	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045
> 1,2	0,025	0,035	0,040	0,045	0,050

Зауважимо, що швидкість деградації залежить також від великої кількості інших факторів, таких як товщина плити, якість будівництва, повнота експлуатаційних заходів, умов оточуючого середовища та інших.

В табл.1.2 наведені параметри, які залежать від типу заходу.

Таблиця 1.2 – Параметри експлуатаційних заходів за [138]

Експлуатаційні заходи	Рівень деградації	Оцінка впливу експлуатаційного заходу
Експлуатаційне утримання	0,0 – 0,1	0,01
Ремонт	0,1 – 0,3	0,25
Відновлення	0,3 – 0,6	0,40
Заміна	0,6 – 1,0	0,90

Повна вартість експлуатації на мережевому рівні, що планується на період часу T :

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [(1+r)^{-t} \cdot c_m(i,t) \cdot L(i) \cdot W(i)] \quad (1.5)$$

де N – кількість мостів;

T – період часу, на який планується експлуатація, років;

R – ставка дисконту, яка приймається постійною на період планування;

$c_m(i, t)$ – одинична вартість експлуатаційного заходу m , що застосовується до моста i в рік t , $m = 0$ – нічого не робити, 1 – утримання, 2 – поточний ремонт, 3 – капітальний ремонт, 4 – заміна, грн./м²;

$L(i)$ та $W(i)$ – довжина та ширина моста відповідно, м.

В якості функції цілі задачі оптимізації стратегії експлуатації залізобетонних плит прогонових будов мостів в роботі [138] використана так звана функція штрафу Z , яка враховує вартість ремонтів і ступінь деградації:

$$Z = C \times (1 + p \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{D(i,t) - D_{\max}(A_{it})}{D_{\max}(A_{it})}), \quad (1.6)$$

де C – повна вартість ремонтів та утримання, що плануються на період часу T , грн.;

p – коефіцієнт значимості ступеню деградації;

N – кількість мостів, одиниць;

T – тривалість планового періоду, років;

$D(i,t)$ – рівень деградації;

A_{it} – вік, років;

$D_{\max}$ – максимально допустимий рівень деградації.

Якщо $D(i,t) \leq D_{\max}(A_{it})$, то $\frac{D(i,t) - D_{\max}}{D_{\max}} = 0$, тобто премія за досягнення

кращого стану не нараховується.

В моделі з двома критеріями, окрім критерію вартості ремонтів (1.6), використовується ще й середній за плановий період ступінь деградації, зважений за площею плити кожного моста:

$$D = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{D(t,i) \cdot s(i)}{T \cdot \sum s(i)} \Rightarrow \min, \quad (1.7)$$

де $s(i)$ – площа плити i -го моста, м².

Розглянемо ще одну модель запропоновану в роботах [117, 125, 175]. Тут в основі лежить характеристика безпеки залежна від часу. Характеристика безпеки у випадку відсутності відновлення описується залежністю:

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0 & \text{if } t \leq t_i \\ \beta_0 - \alpha(t - t_i) & \text{if } t > t_i \end{cases}, \quad (1.8)$$

де $\beta(t)$ – характеристика безпеки залежна від часу;

β_0 – початкова характеристика безпеки при $t = 0$;

α – коефіцієнт зниження характеристики безпеки в силу деградації елемента споруди.

В загальній формі модель вартості життєвого циклу, що встановлює зв'язок між параметром надійності і вартістю експлуатаційних втручань записується так:

$$C = f(\gamma, t_d, t_{pd}, X), \quad (1.9)$$

де γ – різниця між значеннями початкової та на час t характеристик безпеки (тобто різниця в характеристиках безпеки до і після експлуатаційного втручання) $\gamma = \beta(0) - \beta(t)$;

t_d – час між двома експлуатаційними втручаннями;

t_{pd} – час першого експлуатаційного втручання;

X – вектор, що містить такі фактори як тип споруди або елемента і форму експлуатаційного втручання.

На рис. 1.4 наведений графік зміни характеристики безпеки у випадку без експлуатаційного втручання та у випадку регулярних експлуатаційних втручань (профіль з ремонтами). На графіку наведені також змінні функції експлуатаційного втручання.

Модель вартості життєвого циклу побудована на принципах (1.5), (1.6) має вид:

$$C = C_1 + C_2\gamma^{q_1} + C_3(\gamma^*)^{q_2}, \quad (1.10)$$

де C – загальна вартість ремонтних втручань;

C_1 – фіксовані (початкові) витрати;

C_2 – витрати на підвищення надійності;

C_3 – витрати на підтримання надійності на постійному рівні;

q_1 та q_2 – параметри, що встановлюють зв'язок між вартістю експлуатаційного втручання та підвищенням надійності і між вартістю експлуатаційного втручання та підтриманням надійності на постійному рівні відповідно;

γ^* – міра ефективності підтримання надійності на постійному рівні. Цей параметр описується залежністю:

$$\gamma^* = \alpha \cdot (t_d) + \delta(t_{pd} - t_d), \quad (1.11)$$

де δ – коефіцієнт зниження характеристики безпеки після експлуатаційного втручання

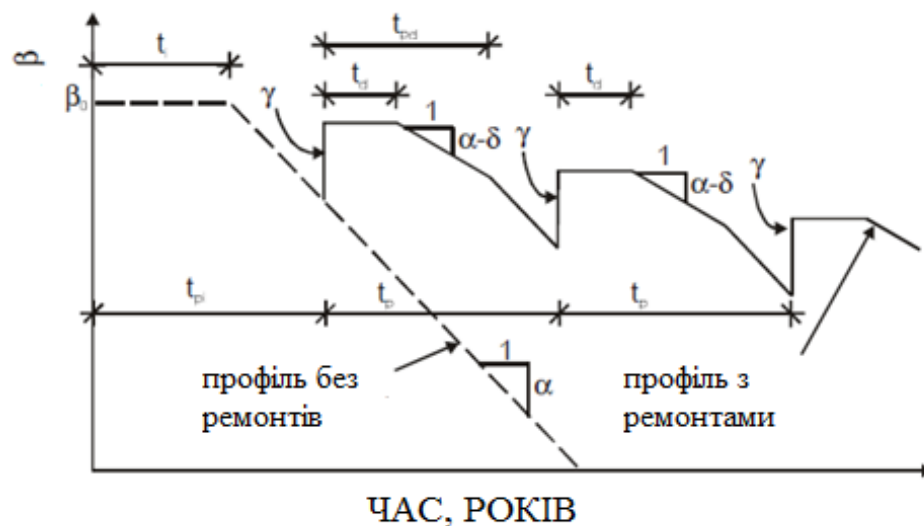


Рисунок 1.4 – Графік зміни характеристики безпеки у часі. *Адаптовано автором за джерелами [117, 121, 125]*

За умови, що експлуатаційне втручання має незначний вплив на підтримку надійності на постійному рівні і зменшенню падіння надійності (тобто $t_d = 0$ і $t_{pd} = 0$) рівняння (1.9) матиме вид:

$$C = C_1 + C_2 \gamma^{q1}. \quad (1.12)$$

Вплив постійних витрат C_1 на загальну вартість експлуатаційних втручань C для $q = 0,5$, $q = 1,5$, $q = 2,5$ показано на рис. 1.5

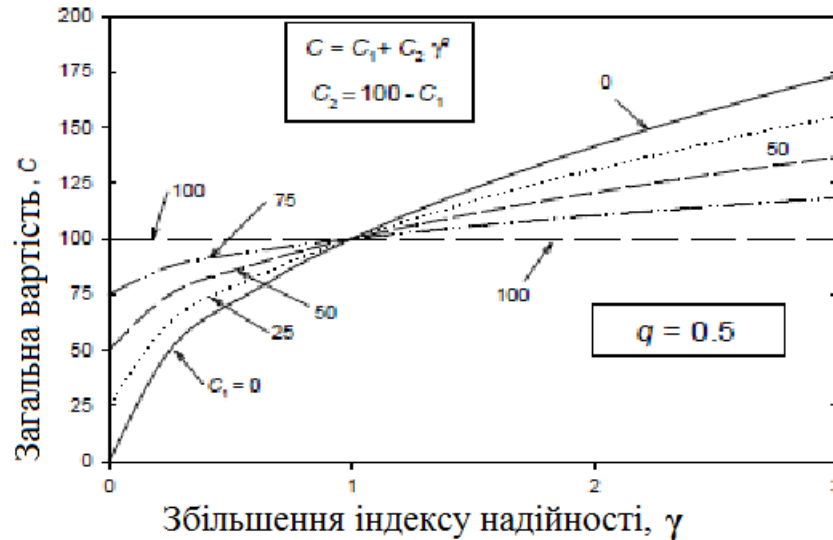


Рисунок 1.5 – Залежність загальної вартості експлуатаційного втручання C від параметра надійності γ . Джерело: [126]

Ці графіки побудовано поклавши, що $C_1 + C_2 = 100$ (тобто $C = 100$ якщо $\gamma = 1$). Як видно, відносно мале підвищення надійності (тобто $0 < \gamma < 1$), $q = 0,5$ веде до більшого значення загальної вартості C , ніж при $q = 1,5$ чи $q = 2,5$.

З іншого боку, $q = 2,5$ веде до більшого значення загальної вартості C при $q = 0,5$ і $q = 1,5$ для відносно значного підвищення надійності (тобто $\gamma > 1$). Ця залежність між загальною вартістю експлуатаційного втручання і параметром q є головним положенням в розрахунках оптимального сценарію.

В процесі створення однієї з італійських BMS [93] була зроблена спроба застосування в моделі деградації напівмарковських процесів [59]. В роботі [93] відмічалося, що було здійснено багато спроб розробити аналітичні моделі, що представляють деградацію мостових споруд, починаючи зі знання процесу погіршення матеріалів. Ці моделі, як правило, дуже складні, оскільки вони намагаються представити фізичні та хімічні процеси з використанням

конкретних моделей для кожної з різних причини деградації. Крім того, вони повинні враховувати умову, що фактичний стан мосту є наслідком багатьох паралельних процесів деградації. З цих причин отримати ефективну і надійну математичну модель деградації є дуже складним завданням [2].

Моделі ланцюгів Маркова широко використовувалися для прогнозування майбутніх умов мосту. У літературі запропоновано декілька методів оцінки ймовірностей переходу з наявних даних інспекцій мостів. Загальне припущення полягає в тому, що ймовірності переходу не залежать від віку об'єкта, тобто, що ймовірності переходу є однорідними. У Автономній провінції Тренто у АРТ-BMS був розроблений процес деградації, який наразі моделюється за допомогою напівмарковських ланцюгів. Нестационарні ланцюги Маркова, в яких ймовірності переходу залежать від часу перебування в певному початковому стані, на думку авторів [93], виявляються більш реалістичними.

Напівмарковський процес визначається як процес, який змінює стани також згідно з марковським ланцюгом, але залишається в i -му стані протягом певного періоду часу. Ця кількість часу T_i – час перебування в i -му стані, яка також називається часом очікування або часом в стані, вважається випадковою змінною $\mathcal{I}_i$ з безперервною і позитивною функцією розподілу ймовірності.

$$P_{ij+1}(t) = \frac{f_{T_{1i}}(t)}{S_{T_{1i}}(t) - S_{1(i-1)}(t)}, i = 2, 3, \dots, n-1, \quad (1.13)$$

де $f_{T_{1i}}$ – щільність розподілення випадкової величини часу перебування в станах з першого по i -й;

$S_{T_{1i}}$ – функція виживання.

Проте, для отримання законів розподілення $\mathcal{I}_i$ необхідно мати достатню кількість спостережень, які фіксуються протягом багатьох років. Більш того, в якості закону розподілення часто використовують показовий (експоненціальний) закон з параметром інтенсивності відмов λ .

1.3 Моделі прогнозування технічного стану мостів

Теоретичні засади моделювання надійності і довговічності конструкцій досліджувались в роботах [27, 31, 34, 45, 48, 62, 67, 68, 72, 85, 86, 2, 76, 103, 113, 118, 128, 146, 173, 174, 175] та інших.

Теоретичною базою нашого дослідження є модель життєвого циклу – аналітична або числова процедура, що дозволяє визначити час безпечного використання елемента (або споруди в цілому) при заданих навантаженнях в визначених умовах експлуатації. Це функція часу, якою описується процес погіршення технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента протягом терміну служби елемента або споруди. В загальному випадку така функція має вид [85, с. 13]:

$$T_l = R(t) \cdot L(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (1.14)$$

де T_l – термін служби елемента, що прогнозується;

$R(t)$ – функція деградації;

$L(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – випадкова функція;

$(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – параметри, якими характеризуються: властивості матеріалів, напружено-деформований стан, тип конструкції, оточуюче середовище, рівень експлуатаційного утримання.

В свою чергу модель життєвого циклу складається з моделей нижчого рівня. Зазвичай використовуються моделі трьох типів:

- моделі деградації та функції зв'язку надійності з деградацією;
- моделі вартості життєвого циклу;
- моделі оптимізації життєвого циклу.

Апарат управління життєвим циклом має включати:

- інструмент оцінки експлуатаційного стану на базі моделі деградації;
- методику оцінки надійності в функції часу, тобто модель зв'язку функції надійності з функцією деградації;

- модель прогнозу експлуатаційного стану споруди, як функцію ремонтів, що плануються протягом заданого періоду часу;
- модель оптимізації витрат на технічне обслуговування протягом життєвого циклу споруди;
- методику визначення доцільності подальшої експлуатації споруди, як результат оптимізації витрат на експлуатаційні заходи.

Починаючи з 1970-х рр. були розроблені моделі деградації елементів моста для опису математичних взаємозв'язків між станом елементу моста та факторами – причинами, що впливають на стан елемента, такими як завантаження рухом, фактори навколишнього середовища тощо. В літературі наведено багато різних типів моделей деградації елементів мостів, але найбільш визнаними є детерміністичні, стохастичні та інші моделі, які розглянемо згідно з оглядом, який наведено авторами досліджень [139, с.18-23, 147, 160, 161, 167].

Детерміністичні моделі пов'язують фактори, що впливають на деградацію елементів мостів, такі як вік, завантаженість руху, використовуючи просту математичне або статистичне формулювання, наприклад, середнє значення, стандартне відхилення та регресію. Прогнозовані умови обчислюються детерміновано, ігноруючи випадковість у процесі деградації моста та існування непомічених пояснювальних змінних, тобто кожен прогноз може дати лише одне значення.

Існують різні методи розробки детермінованих моделей деградації. Наприклад, прямолінійний метод екстраполяції (SLE) передбачає лінійну залежність між завантаженням рухом та історією обслуговування. Для обчислення лінійних співвідношень потрібні два входи: початкова умова (задана або експертним судженням, або галузевими стандартами) та вимірювання стану (дані обстеження споруди). SLE цінується за свою простоту і дає порівняно точні короткострокові прогнози стану. Тим не менш, якщо міст пройшов через деякі заходи з технічного обслуговування, SLE не працюватиме.

У випадку, коли задіяно кілька пояснювальних змінних, математичну залежність можна визначити за допомогою регресії.

Детерміністичні моделі прості і, отже, ефективні для аналізу мереж автомобільних доріг з великою кількістю споруд. Але вони, як правило, страждають від таких недоліків:

- нехтують невизначеністю через притаманну випадковість погіршення інфраструктури та наявність непомічених пояснювальних змінних;
- прогнозують середній стан сімейства об'єктів незалежно від їх поточного стану та історії стану окремих об'єктів;
- оцінюють деградацію споруди для стратегії «без технічного обслуговування» лише через складність оцінки наслідків різних варіантів технічного обслуговування;
- не враховують взаємодію між механізмами зносу різних елементів споруди, таких як між мостовим полотном та плитою;
- їх важко оновити, коли отримуються нові дані.

Стохастичні моделі деградації трактують процес деградації моста як одну або кілька випадкових змінних, що фіксують невизначеність та випадковість цього процесу. Для прогнозування погіршення стану інфраструктури використовуються два типи ймовірнісних моделей: моделі, засновані на стані та моделі, засновані на часі.

У NBI (National Bridge Inventories, США) та багатьох подібних системах даних про стан мостів стани елементів мостів реєструються як дискретні цілі числа. Наприклад, стан плити прогонової будови в NBI кодується як ціле число, що становить від 0 до 9, причому 0 представляє неприйнятний стан відмови, а 9 – найкращий можливий стан, наприклад, як нова споруда. Моделі, які базуються на стані, передбачають ймовірність того, що об'єкт зазнає зміни стану в даний момент часу, котрий залежить від масиву пояснювальних змінних, таких як завантаження рухом, фактори довкілля, атрибути проекту та історія обслуговування.

Найчастіше використовувані моделі погіршення стану є марковські моделі. Марковське припущення передбачає, що перехід між будь-якою парою станів залежить лише від початкового стану на поточному етапі прогнозування, враховуючи дію, яка застосовується, тобто ймовірність переходу не залежить від історії погіршення. Марківські моделі широко застосовуються в системах управління мостами (BMS), таких як Pontis [155, 156] та BRIDGIT [126, 125].

Однак властивість Маркова («без пам'яті») може не існувати в реальності або може мати місце лише для деяких типів процесів погіршення стану. Обмеження марковських моделей узагальнено як:

- історична незалежність. Прогнозовані умови залежать лише від поточного стану, а не від усієї/вибраної історії деградації;
- обмежувальні припущення. Марковські моделі передбачають дискретні інтервали часу переходу, постійну чисельність мостів і стаціонарні ймовірності переходу, які іноді недоцільні;
- марковським моделям важко розглянути інтерактивні ефекти між механізмами деградації різних елементів моста;
- марковським моделям важко чітко враховувати неоднорідність множини мостів. Традиційний підхід полягає в поділі множини на відносно однорідні групи, які поділяють певні ознаки (матеріал, тип структури тощо);
- перехідні ймовірності спочатку отримують часто за допомогою експертного судження (Pontis), яке може бути суб'єктивним. Тому вони можуть потребувати частого оновлення, коли під час огляду отримуються нові дані, після ремонту мостів.

Дослідники уточнили прості ймовірності марковських переходів для усунення деяких перелічених вище обмежень. Наприклад, представляють модель деградації стану із додатковими станами, що послаблює марковське припущення. Історія деградації та експлуатації об'єкту обчислюється шляхом врахування двох додаткових змінних: останньої дії з технічного обслуговування (включаючи «не вжито жодних заходів»), яку об'єкт зазнає, і

часу її застосування. Деякі дослідження також пропонують параметризувати марковські ймовірності переходу з віком мосту, завантаженням рухом тощо, отже, явно враховують неоднорідність популяції. Для оцінки параметрів цих моделей та для обчислення ймовірностей переходу використовувались економетричні методи, такі як регресія Пуассона та *пробіт* регресія (у статистиці модель пробіту – це тип регресії, коли залежна змінна може приймати лише два значення, наприклад, «так» чи «ні»). Пробітна модель – популярна специфікація для порядкової або двійкової моделі відповідей).

Моделі деградації, засновані на часі, спочатку пропонували послабити марковське припущення про незалежність історії у деградації інфраструктури. Основна ідея полягає в тому, що на ймовірність переходу об'єкта має впливати не тільки його сучасний стан, але й історія його деградації. Один клас моделей, заснований на часі, широко відомий – це моделі тривалості на основі ризику (Hazard-based duration model – клас аналітичних методів, які підходять для моделювання даних, які мають у своєму фокусі виникнення в кінці періоду тривалості, враховуючи, що тривалість відбувалась до певного моменту часу). Моделі тривалості на основі небезпеки моделюють погіршення в рамках аналізу виживання, при цьому відмова визначається як перехід із одного стану до іншого, виживання в іншому випадку.

Моделі тривалості на основі небезпеки також дозволяють дослідникам чітко враховувати причинно-наслідкові фактори, що впливають на погіршення стану. Моделі тривалості, базовані на ризику, також можуть використовувати марковські перехідні матриці, які можна легко розгорнути в рамках процесу марковського рішення.

Інші моделі включають механістичні моделі. Механістичні моделі описують специфічний механізм деградації елементів моста. Вони, як правило, розроблені та випробувані в лабораторних умовах [2, 85, 86]. Приклади механістичних моделей включають:

- модель корозійного процесу сталевих мостів, яка визначається за допомогою регресійного аналізу;

– рівняння глибини карбонації в елементах бетонного мосту.

Механічні моделі, як правило, орієнтовані на деталі і тому корисні для критично важливих для безпеки конструкцій. Вони ефективні на рівні проекту, коли рівень складності аналітики порівняно низький; на рівні мережі компоненти мостів можуть мати кілька моделей відмов, і тому механістичні моделі стають неефективними. Як результат, ці моделі не широко застосовуються практиками управління мостами або департаментами транспорту. Вітчизняні приклади таких моделей знаходимо в роботах [85, 86].

Застосовують також моделі штучного інтелекту (AI), спрямовані на автоматизацію інтелектуальної поведінки за допомогою сучасних комп'ютерних методик і розглядають їх застосування в широкому діапазоні областей, включаючи експертні системи (CES), штучні нейронні мережі (ANN), кейс-базовані міркування (CBR) та машинне навчання (ML) [77].

У 1997 році досліджувалась можливість застосування ANN при моделюванні деградації мостів. Багатошаровий ANN був використаний для співвідношення віку верхньої будови моста (у роках) з показником її стану (ціле число від 1 до 9). Більш детальне дослідження AI було проведено для прогнозування показника рейтингу моста в межах від 0 до 100 балів, з використанням атрибутів віку, руху, геометрії та структурних ознак в якості пояснювальних змінних. Оскільки ANN має на меті знайти оптимальну поліноміальну форму, вона все ще страждає від недоліків детермінованих моделей деградації, а також наступних труднощів:

- не існує чітких правил визначення ефективної архітектури ANN;
- ANN вимагає перетворення вхідних змінних в числові значення для досягнення максимальної продуктивності, однак конверсія може спричинити втрату інформації, яка відображалася в оригінальному поданні.

Дослідження дисертаційної роботи базується на системі управління життєвим циклом, запропонованій професором А.І. Лантух-Лященко реалізованої в програмному комплексі АЕСУМ [22, 59, 63, 64, 66] та нормативному документі з експлуатації автодорожніх мостів [47].

В стохастичних феноменологічних моделях процес деградації елемента протягом фази експлуатації життєвого циклу описується залежностями, які базується на теорії випадкових марковських процесів. Життєвий цикл елемента поділено на n експлуатаційних станів. Кожен із станів описується добіркою якісних та кількісних показників деградації, що характеризують ієрархію відмов елемента [68].

Вводяться такі гіпотези:

- система може бути тільки в одному експлуатаційному стані в певний відрізок часу (рік) t_i ;
- протягом одного року система не покине стан за час менший, ніж один рік;
- початковий стан системи та закон розподілу подій відомі. Випадковою подією тут, як і вище, є перехід в один із гірших станів;
- перехідні ймовірності системи вважаються стаціонарними в часі і не залежать від того, яким чином система опинилася в стані j .

Вводиться матриця переходів $P_{n \times n}$, де n – прийнята для системи кількість експлуатаційних станів. Елемент матриці переходів p_{ij} є ймовірністю того, що система із стану i перейде в стан j в заданий відрізок часу.

Задача опису деградації елемента формулюється як *визначення ймовірності* переходу системи з експлуатаційного стану S_i в стан S_{i+1} , $i = 1, 2, \dots, 5$ за умови, що час переходу є неперервний. В такій постановці модель деградації елемента трактується, як *дискретний стохастичний марковський процес з безперервним часом*.

Ймовірності марковського ланцюга (матриця перехідних ймовірностей) $p_1(t)$, $p_2(t)$, ..., $p_n(t)$ – функції часу, визначаються розв'язком системи диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{ik} p_{kj}(t), \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (1.15)$$

при початкових умовах $p_{ij}(0) = \delta_{ij}$, де δ_{ij} – символ Кронекера (або дельта Кронекера) – індикатор рівності елементів – функція двох цілих змінних, яка дорівнює 1, якщо вони $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}$ рівні, і 0 – в іншому випадку.

Якщо відомий початковий стан системи, тобто його початкова матриця p_0 , то майбутній стан може бути прогнозованим для довільного заданого часу T . Залежність майбутнього стану від початкового показана в роботі [2]:

$$p_k = p_0 \cdot p^k, \quad (1.16)$$

де p_k – вектор-рядок розміром $(1 \times n)$ – абсолютна надійність елемента у експлуатаційному стані p_k в час t ;

p_0 – вектор-рядок розміром $(1 \times n)$ початкових надійностей;

p^k – одно-крокова матриця ймовірності переходів розміром $(n \times n)$ піднесена до ступеню k (матриця p помножена сама на себе k разів).

В роботах [63, 68, 65, 85, 92, 97, 103, 104, 105, 106, 108, 134, 136, 143, 157, 158] підкреслюється, що експлуатаційний стан споруди, який прогнозується, та час життєвого циклу в стадії експлуатації мають базуватися на обґрунтованих моделях деградації, сформульованих в функції часу в залежності від матеріалу, факторів напружено-деформованого стану та оточуючого середовища. Моделлю деградації має бути передбачено декілька механізмів розвитку деградації [66]. Ймовірнісна сторона моделі базується на статистичних даних регулярних обстежень споруд.

Сьогодні є усталеним, що модель деградації в системі управління життєвим циклом має бути зв'язаною в часі з надійністю. Ця теза фігурує як одна із фундаментальних в концепції такої системи. Досить велику кількість таких моделей прийнято і описано в публікаціях для систем управління життєвим циклом. Дещо умовно всі нам відомі моделі можна розділити на дві групи:

– моделі, в яких роль деградаційної міри відіграє надійність або характеристика безпеки в функції часу $\beta(t)$ (*Time-dependent reliability*);

– стохастичні феноменологічні моделі, побудовані на засадах теорії марковських ланцюгів.

Подібні моделі, зв'язані з дискретними станами елемента споруди наводяться також в роботах [121, 122, 123].

1.4 Системи управління мостами на мережі автомобільних доріг

Для виявлення загальних рис систем управління мостами (Bridge Management Systems – BMS [93, 99, 107, 109, 110, 124, 126, 129, 134, 139, 142, 150, 166, 168, 176, 180]) наведемо приклад найбільш відомої в західному світі BMS (Bridge Management System) Pontis [155, 156]. Вона складається з підсистем які призначені для:

- зберігання, обробки та пред'явлення даних інвентаризації та обстежень;
- управління бюджетом і поточними коштами;
- вибору стратегії ремонтно-відновлювальних заходів;
- формування вихідної інформації та звітності.

Значна увага в виборі стратегії відновлювання і ремонту приділяється проблемі безпеки. Діапазон стратегії можна розділити на чотири типи:

- шляхом ремонту зробити міст майже «як новий»;
- провести ремонт задля усунення найбільш важливих дефектів і руйнувань;
- нічого не робити і дочекатися, коли елемент втратить можливість його безпечної експлуатації, тоді замінити його;
- взагалі нічого не робити і закрити міст, коли він втратить можливість безпечної експлуатації, відтак побудувати новий міст.

Сучасні BMS, зокрема Pontis [155, 156, 176], для прогнозування ймовірностей відмов використовують марковську стохастичну теорію [162, 167, 176, 180].

Середня величина строку експлуатаційної придатності визначається залежністю

$$T_i = (1 - P_i)^{-1}, \quad (1.17)$$

де P_i – ймовірність переходу з одного стану до іншого.

Як підкреслюється в [156], стратегія експлуатації суттєво залежить від типу моста (залізобетонний, попередньо напружений з напруженням на упори, з напруженням на бетон, металевий, сталезалізобетонний) і розробляється у відповідності до типу. Тому має бути відомим принаймні на 30 років вперед, що саме, де, коли і в якому обсязі мусять виконуватися роботи, а також вартості таких робіт. Проте наявності самого лише стратегічного прогнозу експлуатації замало, ще необхідно мати прогноз проектних пропозицій, поданий в термінах споруд.

Система експлуатації мостів використовує мережеву модель оптимізації, марковський процес прийняття рішень і методи динамічного і лінійного програмування [155, 156]. Вона створює на багато років вперед різні альтернативи сполучення збереження і покращення для кожного конкретного моста, які охоплює система. Враховуються бюджетні обмеження за рахунок використання інкрементального алгоритму, який співвідносить ефективність експлуатації моста для споживачів і витрачені кошти.

Pontis – це водночас комп'ютерна система і організаційна структура для управління мостами для здійснення переходу від «сирих», початкових даних до узагальнень і оптимізації економічної ефективності капітальних вкладень [156].

Для формулювання довготермінової політики і мінімізації витрат на відновлення і утримання при обмеженнях на ризик виходу елемента з ладу застосовується метод динамічного програмування. Умова

$$V(i) = C(i, a) + a \sum_{j=1}^n P_{ij}(a) V(j), \quad (1.18)$$

де i – номер стану конструкції, який спостерігається сьогодні;

j – номер стану, що очікується в один з майбутніх років;

$V(i)$ – довготермінова очікувана вартість як результат перебування конструкції сьогодні в стані i , \$;

$C(i,j)$ – початкова вартість заходів a в стані i , \$;

α – фактор зниження вартості в один з років в майбутньому;

$P_{ij}(a)$ – ймовірність переходу конструкції з стану j в стан i під впливом заходу a ;

$V(j)$ – приведена вартість, очікувана в році j , якщо реалізується стан i , \$.

Передбачається певна послідовність рекурсивних обчислень. Є декілька шляхів реалізації марковських рішень такого типу, серед них – лінеаризація задачі, тоді можна застосувати метод лінійного програмування. Після визначення оптимальної стратегії – відшукується стан конструкції, який може відповідати зробленим витратам.

Систему BRIDGIT [125, 126] розроблено як інструмент забезпечення ефективної експлуатації мостів. вона потрібна для раціонального розподілу обмежених ресурсів. Ініціатором створення системи стала громадська організація Highway Research Project, яка розпочала роботи в 1985 році за підтримки державних установ. Мета полягала в створенні комп'ютерної програми для транспортних агенцій. Програма, як передбачалося, мала збирати і зберігати дані про мости, забезпечувати складання ясних, акуратних і своєчасних звітів, для ранжирування мостів за споживчими властивостями. Система мала забезпечувати потреби саме невеликих експлуатаційних організацій і використовуватися паралельно з іншими системами, наприклад такими як Pontis.

Система BRIDGIT була створена на основі широковідомої раніше комп'ютерної програми для роботи з базами даних Fox Pro Database. Вона оптимізує плани утримання і покращення мостів, причому оптимальні заходи розглядаються в сполученні з оптимальним розподілом часу.

Процедура передбачення майбутнього стану починається з підрахунків майбутнього стану системи [127]. Вплив попередніх станів і інтенсивність руху втілюється в тому, що попередньо проведені ремонти враховуються шляхом

введення штучного прискорення деградації властивості, а рух важких транспортних засобів враховується множителем ADT (середньодобовий рух).

Передбачення несної спроможності і деградації несних властивостей проводиться на підставі проектної несної спроможності або підрахованої після ремонту, причому вона визначається міцністю найслабкішого або найбільш ушкодженого елемента. Використовується таке співвідношення

$$LC(t) = LC_0(t) \cdot (t - t_0 - YLC) \cdot REDe \cdot NEWLC / 100, \quad (1.19)$$

де $LC(t)$ – несна здатність;

$LC(t_0)$ – несна здатність в момент часу t_0 ;

YLC – час (в роках), необхідний для досягнення елементом половини порога, який визначається як неприпустимий стан;

$REDe$ – % зменшення несної здатності для елемента e ;

$NEWLC$ – проектна або «як нова» несна здатність.

Система BRIDGIT передбачає проведення аналізу і порівняння витрат експлуатаційного агентства і коштів користувачів.

Створення фінської системи [167] експлуатації мостів розпочалось в 1986 році з ініціативи Національної адміністрації автомобільних доріг. Система призначена для розробки оптимальних планів витрат на утримання і ремонти мостів на підставі моделі деградації конструкцій. Водночас встановлюється черговість виконання робіт стосовно кожного моста зокрема. Як і деякі інші, фінська система експлуатації мостів має два рівня – мережевий і проектний.

Мережевий рівень, в свою чергу, складається з двох частин – з модуля довготермінового планування, який створює ідеалізовану стратегію для мережі мостів в цілому, і модуля короткотермінового планування, який стосується кожної конкретної споруди.

Математичну модель системи [167] побудовано на передбаченні ймовірності погіршення стану окремих конструкцій з використанням ланцюгів Маркова. Модель також містить опис можливих ремонтів і їх вартість. Шляхом

лінеаризації модель приводиться до такого вигляду, коли можна застосовувати метод лінійного програмування.

У системі управління мостами Нью-Йорка на сучасному етапі узагальнення певних відомостей про мости або отриманих усереднених показників деградації стану вважається недоцільним, тому що воно може привести до спотворення результатів через брак досконалих баз даних і відомостей про кожний міст зокрема, інколи просто через відсутність добре документованих даних про історію моста [180, 181, 182].

Обговорюються дві проблеми, що існують в цій галузі [180]:

- яка саме експлуатація може якомога більше подовжити термін повноцінного життя моста;
- як зіставити витрати і корисність стосовно проблем експлуатації, ремонту і реконструкції мостів.

В місті Нью-Йорк існує 764 мости з загальною кількістю 4689 прогонів. Їхній середній вік приблизно дорівнює 75 років, а загальна площа – 1,43 млн. квадратних метрів. Протягом останніх 10 років показник стану мостів за шкалою 7 –1 (7 – новий міст, 1 – майже зруйнований міст) становив 4,5.

Для обчислень наведено формулу

$$NR = [(N_1 R_1 + N_2 R_2)(N - N_3) - R_0 N_0^2] / [N_1 + N_2] + R_3 N_3, \quad (1.20)$$

де N – повна кількість мостів з середнім для них показником стану R ;

N_0 – мости, що експлуатуються і мають середній показник стану R_0 ;

N_1 – мости, що пройшли повне відновлення і набули стану R_1 ;

N_2 – мости, елементи яких повністю відновлено, вони мають новий показник стану R_2 ;

N_3 – закриті мости з показником стану R_3 .

Останнє видання посібника з експлуатації мостів в місті Нью-Йорк розглядає принаймні 15 заходів з експлуатації мостів і рекомендації з частоти їх здійснення. Тут співвідношення «вартість / корисність» оцінюється з точки зору можливого подовження життєвого циклу мостів.

При побудові методу розрахунку кривої деградації властивостей споруди приймається, що пропонується експлуатація має подовжити життєвий цикл моста від відомого тепер терміну L_0 до нового терміну L_1 . Розглянуто 13 найважливіших елементів моста. При визначенні показника стану R локальні показники R_i ($i = 1, \dots, 13$) враховуються з нормалізованими ваговими коефіцієнтами k_{ei} :

$$R = \sum_{i=1}^{13} k_{ei} R_i. \quad (1.21)$$

Якщо відомі стани компонента конструкції, яких він набуває при відсутності будь-якого ремонту і при його виконанні, якщо відомо, за яким законом слід інтерполювати показник R_i стану цього компонента в поточний момент, то будь-який рівень утримання M_j може бути пов'язаний зі станом компонента r_i за допомогою фактору значущості I_{ij} в таких спосіб:

$$I_{ij} = r_{i1} - (r_{i0} - r_{i1}) \sum_{j=1}^{15} k_{ij} M_{ij}, \quad (1.22)$$

де r_{i1} і r_{i0} – показники деградації при «повній» експлуатації і при її відсутності;

M_{ij} – рівні утримання відповідно до шкали з 15 рівнів ($0 < M_{ij} < 1$);

k_{ij} – коефіцієнти, які отримано нормалізацією величин M_{ij} .

У 1998 році Міністерство транспорту провінції Онтаріо (МТО) вирішило розробити нову систему управління мостами (OBMS) [110]. Перевірка елементів проводиться щорічно і включає запис типу, тяжкості та ступеня зносу. Основними елементами, що входять до Системи управління базами даних (СУБД), є підходи, шлагбауми, балки, кріплення, покриття, водостоки, настили, насипи, фундаменти, стики, опори, підпірні стіни, тротуари, знаки та ферми. Кожен елемент має чотири можливі стани стану: відмінний, хороший, задовільний та поганий.

Рівень проекту починається з виявлення потреб стосовно окремих елементів, як це було визначено в останніх інспекціях. Виходячи з умови елемента, модель, заснована на знаннях, визначає ряд можливих альтернатив

експлуатаційних дій. Для кожної можливої дії модель пошкодження Маркова прогнозує стан елемента в кінці періоду аналізу. Кожна можлива комбінація альтернатив обробки елементів вважається потенційною альтернативою проекту. Кількість альтернатив для проектів потім звужується за допомогою аналізу вигоди / витрати та моделі на основі знань, що включає інженерні та економічні точки зору. Переваги альтернатив проекту оцінюються з точки зору зменшення соціальних витрат життєвого циклу, досягнутого реалізацією проекту, а не вибору альтернативи "нічого робити".

На рівні мережі OBMS знаходить той набір проектів, який максимізує вигоду в межах бюджетних обмежень. Аналіз мережі дає підсумок прогнозів щодо ефективності роботи мережі на будь-якому рівні фінансування. Проте, в OBMS ще не повністю впроваджені муніципалітетами, оскільки модуль на рівні мережі ще не розроблений повністю. Крім того, наразі вартість користувача не розглядається у моделі. Інтерв'ю з муніципальними мостовими інженерами показало, що OBMS використовується як сховище для даних мостової мережі та як інструмент для відстеження ефективності мережі, а рішення щодо ремонту все ще приймаються за допомогою традиційних методів.

Представлено огляд роботи над компонентами BMS та рішеннями MR&R. Існуючі методи прийняття рішень класифікуються на рішення на рівні мережі, рішення на рівні проекту та комбіновані рішення на рівні мережі та проекту. Аналіз літератури щодо BMS виявив компоненти, найбільш підходящі для інтеграції в дане дослідження. Система оцінювання умов FHWA була визнана найбільш популярною і прийнятою системою оцінювання стану різних елементів мосту.

Модель деградації Маркова є найбільш точною та популярною моделлю погіршення в BMS, оскільки вона фіксує невизначеність у процесі погіршення. Для оцінки загальних витрат на горизонті планування комбінований мережевий та проектний рівень LCCA є найкращим методом для оцінки та аналізу всіх витрат, понесених протягом життя мосту.

В відомих українських публікаціях [49, 50, 51, 52, 53, 54 55] запропоновані підходи до стратегічного прогнозування ремонтів автомобільних доріг України.

В Україні при участі автора дисертації створена та функціонує Аналітична експертна система управління мостами [17, 18, 19, 22, 23, 57, 60] (АЕСУМ), удосконалення якої є однією з цілей дисертаційної роботи.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Виконаний аналіз публікацій дає підстави стверджувати, що задача обґрунтування стратегії ремонтів в системі експлуатації автодорожніх мостів є актуальною для всіх країн світу, вагомою для суспільства в соціально-економічному плані. Науковці розвинених країн активно шукають важелі ефективного управління технічним станом мостів. Проте, слід відмітити, що всі відомі нам моделі обґрунтування стратегії ремонтів мостів орієнтовані на системи експлуатації США, Японії, Європи та деяких інших розвинених країн.

В дисертації задача обґрунтування стратегії ремонтів в системі експлуатації автодорожніх мостів України на мережі автомобільних доріг ставиться вперше.

2. Аналіз існуючих досліджень показав, що задача оптимізації стратегії ремонтів автодорожніх мостів України при їх проектуванні є задачею індивідуальною, теоретично тісно зв'язаною з прийнятою в системі експлуатації моделлю деградації, оцінки і прогнозу експлуатаційного стану мостів.

3. В умовах, що склалися, системним науковим базисом розробки стратегії ремонтів мостів України має стати модель деградації елементів автодорожніх мостів, запропонована професором А.І. Лантух-Лященко [66, 63, 67] для управління життєвим циклом мостів, яка реалізована в програмному комплексі АЕСУМ [22, 59] та нормативному документі з експлуатації автодорожніх мостів [47].

4. В роботах українських науковців останніх двох десятиріч з проблеми управління життєвим циклом експлуатації мостів найбільш відомі фундаментальні дослідження з оптимізації виконання ремонтів професора А.С. Дехтяра [41, 42, 43, 44]. Проте, скористатись цими дослідженнями безпосередньо для задач обґрунтування стратегії ремонтів на мережевому рівні нажаль утруднено з-за недостатнього рівня розробки низки наукових проблем, які потребують свого вирішення, а саме:

- відсутністю аналітичних або статистичних кількісних залежностей між потрібними об'ємами робіт з ремонту та утримання мостів і їх прогнозованим експлуатаційним станом;

- відсутністю кількісної оцінки впливу поточного дрібного ремонту та експлуатаційного утримання на швидкість деградації елементів мостів;

- складністю сукупного впливу параметрів пошкоджень на експлуатаційний стан мостів і показники їх надійності і довговічності;

- складністю класичних алгоритмів розв'язку оптимізаційної задачі великої розмірності, що розглядається, та жорсткі умови до властивостей цільових функцій (диференційованість, відсутність розривів тощо).

5. Складність визначення оптимальної стратегії ремонтів мостів на мережі автомобільних доріг обумовлена великою кількістю альтернатив ремонтів мостів протягом прогнозного періоду, необхідністю урахування бюджетних та інших обмежень одночасно для сукупності мостів на рівні мережі доріг або, навіть, окремого об'єкту. Тому, для визначення ефективних стратегій ремонтів мостів стали використовуватись евристичні методи еволюційного моделювання, системи пріоритезації споруд, хоча стратегії, отримані з їх допомогою не обов'язково є оптимальними.

Застосування строгих математичних методів оптимізації може забезпечити вибір оптимального рішення, проте, при умові допущення значних спрощень у постановці задачі, в той же час воно пов'язане з великими обчислювальними складнощами. Неспроможність таких методів обробляти великий об'єм даних роблять їх нездатними для відносно швидкого

призначення ремонтів мостів. У літературі описані методи цілочисельного програмування [167], які пропонувались для оптимізації стратегій ремонтів мостів. Однак більшість існуючих моделей не інтегрували рівень окремого об'єкту та рівень мережі в оптимізовані рішення.

Отже:

- **задача** полягає в обґрунтуванні в процесі проектування ремонтів найбільш ефективного, за обраними критеріями, переходу від поточного стану мостів на мережі доріг до заданого та/або можливого цільового стану з урахуванням процесів деградації та відновлення стану мостів;
- **центральна наукова ідея дослідження** полягає в розробці моделей і механізму стратегічного прогнозування ремонтів мостів, що враховують індивідуальні особливостей деградації елементів існуючих обстежених мостів і дозволяють визначити час їх безпечного використання при мінімально можливих експлуатаційних витратах в процесі проектування ремонтів мостів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ МОСТІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

2.1 Теорія марковських стохастичних процесів в прогнозуванні залишкового ресурсу елементів мостів

Теоретичним підґрунтям дослідження процесу деградації моста є марковська феноменологічна модель накопичення пошкоджень професора А.І. Лантуха-Лященко [68, 63, 66]. В цій моделі знос елементу споруди описується марковським дискретним процесом з безперервним часом [68]. Розглядається процес з кінцевою кількістю якісних станів. Роль випадкової змінної в ньому грає випадковий експлуатаційний стан системи. Вважається, що елемент знаходиться послідовно в станах $S_1, S_2, \dots, S_n$, а переходи з одного експлуатаційного стану в інший здійснюються в моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$.

Моделювання марковським процесом означає, що для довільного часу ймовірність перебування в кожному із станів елементу в майбутньому залежить тільки від його теперішнього стану і не залежить від того, як і за який час він досяг поточного стану (марковська властивість).

Визначальні залежності моделі отримані, слідуючи графові, в якому блукання по експлуатаційних станах здійснюється в одному напрямі: від стану з меншим до стану з більшим номером. Це марковський ланцюг є потоком послідовних подій з однаково розподіленими проміжками часу. Графік потоку показаний на рис. 2.1.

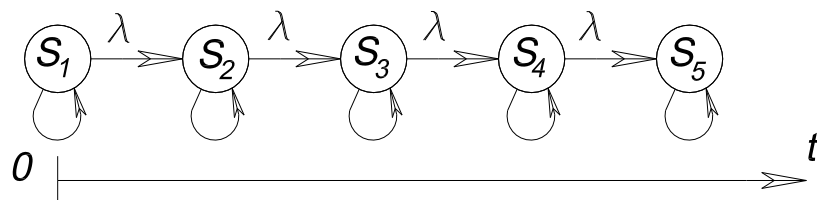


Рисунок 2.1 – Граф процесу деградації. Джерело: Лантух-Лященко А.І. [68]

В термінах дискретного марковського процесу завдання зводиться до пошуку безумовної ймовірності перебування системи S на довільному кроці k в стані S_i :

$$P_i(k) = P_{rob}[S(k) = S_i]; k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, \dots, n-1. \quad (2.1)$$

Ймовірність $p_i(k)$ визначається через умовну ймовірність переходу системи S на кроці k в стан S_j , за умови, що на кроці $k-1$ вона була в стані S_i :

$$P_{ij}(k) = P_{rob}[S(k) = S_j | S(k-1) = S_i]; i, j = 0, 1, \dots, n-1. \quad (2.2)$$

Умовні ймовірності переходу $p_{ij}(k)$ утворюють стохастичну матрицю p_0 . Коли матриця p_0 знайдена, за відомими значеннями умовних ймовірностей переходу і початковому значенню безумовної ймовірності перебування системи в стані S_i , всі інші безумовні ймовірності знаходяться за рекурентною формулою:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1) p_{ij}; k = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.3)$$

де n – кількість експлуатаційних станів, що розглядаються.

Шукані ймовірності марковського ланцюга $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ – функції часу є ймовірністю того, що система у момент t знаходиться в стані S_i і визначаються з системи звичайних диференціальних рівнянь із змінними, в загальному випадку, коефіцієнтами. Це відомі рівняння Колмогорова-Чепмена, які описують еволюцію дискретного марковського процесу з безперервним часом. У матричній формі рівняння мають такий вид:

$$dP(i,t) / dt = P(i,t)E, \quad (2.4)$$

де $P(i,t)$ – матриця ймовірностей переходу;

E – генеруюча матриця процесу Маркова.

Розв'язком системи рівнянь (2.4) є матриця щільності ймовірності переходів $p_{ik}(t)$ – матриця переходів, якою описується марковський ланцюг.

Надійність елементу обчислюється як ймовірність того, що у момент часу t елемент вийде із стану k , тобто відбудеться перехід до $k+1$:

$$P_i(t) = \sum_{k=1}^N P_k P_{ik}(t), \quad (2.5)$$

де N – кількість експлуатаційних станів протягом експлуатаційної фази життєвого циклу елементу;

p_k – надійність елементу, що приписується йому в k -тому експлуатаційному стані;

$p_{ik}(t)$ – перехідна ймовірність k -того експлуатаційного стану, отримана розв'язком системи рівнянь (2.4).

Таким чином, матриця переходів дозволяє обчислити надійність елементу в кожному з експлуатаційних станів по відомій початковій надійності елементу в першому стані. Так для випадку початкової надійності $P(t=0) = 0,9998$, (характеристика безпеки $\beta = 3,8$). В табл. 2.1 приведені надійності елементів в кожному з експлуатаційних станів [47, табл. 5.1; 66].

Таблиця 2.1 – Верхні значення надійності елементів [47, табл. 5.1]

Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану	Надійність за першою групою граничних станів P	Характеристика безпеки β
Стан 1	Справний	0,999844	3,80
Стан 2	Обмежено справний	0,998363	2,95
Стан 3	Працездатний	0,992461	2,43
Стан 4	Обмежено працездатний	0,979771	2,05
Стан 5	Непрацездатний	0,958351	1,74

Процес деградації елемента протягом експлуатаційної фази життєвого циклу описується класифікаційними таблицями експлуатаційних станів [47, додаток А]. Ці таблиці, залежні від типу матеріалу і конструктивного

призначення елемента, складені на підставі багаторічного досвіду українських науковців-експертів з нагляду, діагностики, обстеження і випробовування транспортних споруд. Вони містять характерні для i -го стану, $i = 1, 2, \dots, 5$ ознаки деградації. Для кожного з експлуатаційних станів, як ймовірності марковського ланцюга [2, 65], за відомою початковою надійністю в першому стані, визначена надійність елемента за першою групою граничних станів.

Для випадку початкової надійності $P(t=0) = 0,9998$, $\beta = 3,8$ в табл. 2.1 наведені значення надійності в експлуатаційних станах. Характеристика безпеки β – числовий параметр зв'язаний з надійністю співвідношенням: $P_s = \Phi(-\beta)$, де Φ – стандартна функція нормального розподілу [76].

Таким чином, фундаментальною базою моделі деградації є класифікаційні таблиці визначення експлуатаційного стану елемента.

Функцією надійності описується процес деградації елемента протягом життєвого циклу, тобто встановлюється зв'язок між надійністю та часом експлуатації елемента. Постулюється, що швидкість деградації описується одним параметром λ – показником інтенсивності відмов. Цей показник приймається постійним, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. За функцію надійності прийнята інтегральна функція розподілу $P(t)$ для часу T_n , котрий протікає доки стануться всі n подій процесу:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^N \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (2.6)$$

де λ – параметр процесу інтенсивність відмов (швидкість деградації);

e – основа натурального логарифму.

В термінах таблиці експлуатаційних станів (табл. 2.1), $P(t)$ – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$. Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ , залежністю (2.6) встановлюється зв'язок між надійністю елемента P_t в i -му стані та часом t , що пройшов від початку

експлуатації до стану $I = 2, \dots, 5$. При $k = 5$ ($1/k! = 1/120 = 0,008333$) функція має вид [47, п. 6.1]:

$$P_t = 1 - 0,008333 (\lambda t)^5 e^{-\lambda t}. \quad (2.7)$$

Криві деградації елементів за функцією (2.7) наведені на рис. 2.2.

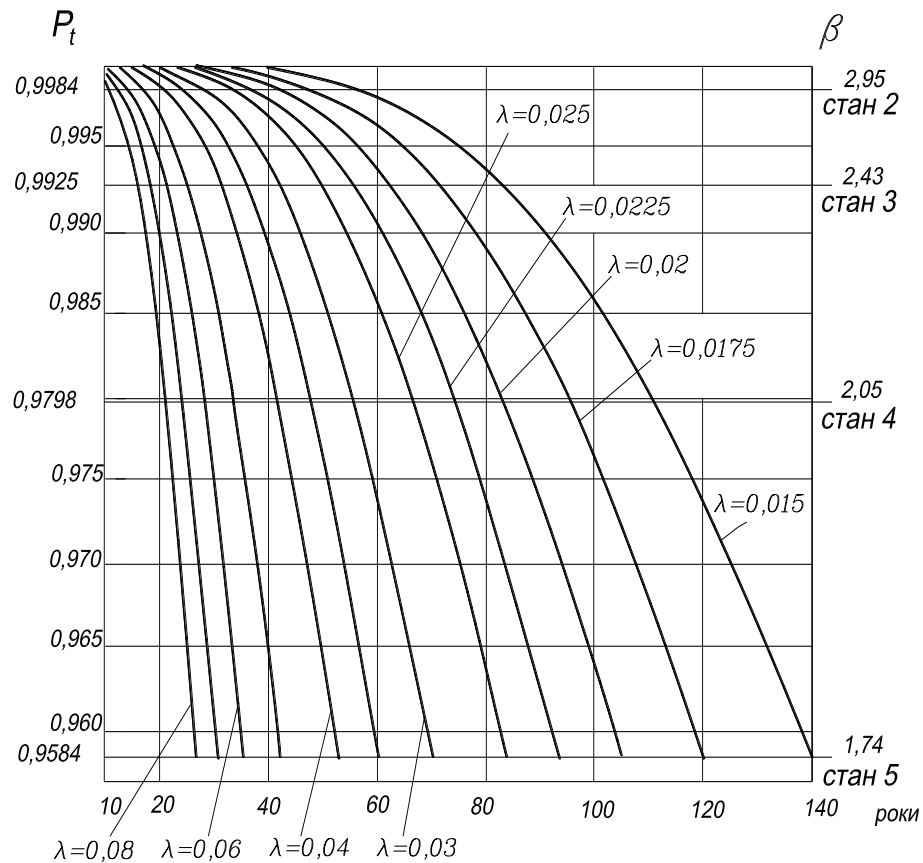


Рисунок 2.2 – Криві деградації елементів. Джерело: [47, рис. Г.1]

Як видно із залежності (2.7), єдиним параметром управління життєвим циклом є інтенсивність відмов λ . В моделі, що розглядається, параметр λ визначається розв'язком рівняння (2.7) за початкових умов для окремого елементу, отриманих за результатами обстеження. Процедура визначення параметра λ вперше була запропонована в роботах проф. А.І. Лантуха–Ляценка [66, 67]. Вона полягає в специфічному визначенні за даними обстеження початкових умов для розв'язку рівняння (2.6) відносно невідомого параметра λ :

– надійності відповідній визначеному i -тому стану P_{ti} . Це значення стає відомим, як тільки по даним обстеження виконана класифікація експлуатаційного стану елемента [47];

– та t_i – часу, що пройшов від початку експлуатації елемента до стану i . Час t_i є відомим з технічної документації моста.

Графічна інтерпретація процедури визначення параметра приведена на рис. 2.3.

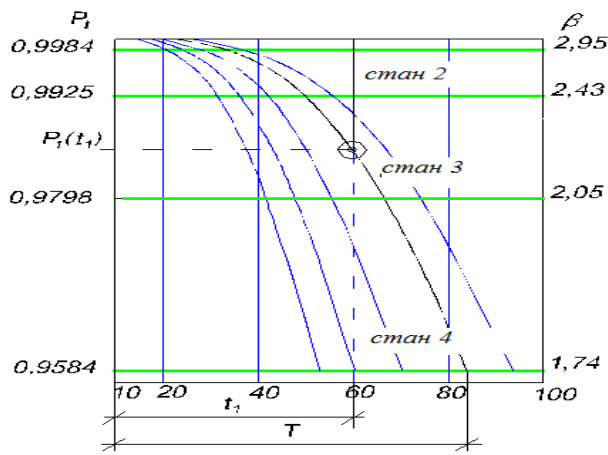


Рисунок 2.3 – Графічна інтерпретація визначення параметра інтенсивність відмов λ . Джерело: [68]

При відомому значенні параметра інтенсивності відмов λ з моделі життєвого циклу елемента (2.7) визначається час переходу в наступний експлуатаційний стан. Для випадку п'ятого експлуатаційного стану це буде залишковий ресурс. Очевидно, що запропонований прийом визначення параметра моделі життєвого циклу елемента, з «сьогодення», тобто i -го експлуатаційного стану, дає повну інформацію про історію деградації у минулому, і не тільки. Визначений за цією процедурою параметр інтенсивності відмов λ несе в собі багато іншої інформації, яка стосується умов експлуатації споруди, якості будівництва, особливостей конструкції тощо.

За рахунок того, що параметр λ визначається для кожного даного елемента, він має уточнюватися всякий раз після чергового обстеження.

Модель, що пропонується, є інтегральною. Вона не містить теоретичного апарату чутливого до матеріалу елементу, його статичної схеми, технології спорудження, екологічних умов тощо. З другого боку, всі названі фактори і багато інших, другорядних, приймаються до уваги в момент, коли за допомогою класифікаційних таблиць, що містять фізичні і механічні ознаки деградації, визначається стан елемента.

2.2 Дослідження граничних значень рівня деградації елементів мостів

Принципи оцінки технічного стану мостів викладені в роботі А.І. Лантуха-Лященко [67] в 1999 році. Ця феноменологічна модель, основана на марковському дискретному процесі з неперервним часом, була прийнята як нормативна в 2002 р. в документі ВБН і в 2013 р. в ДСТУ-Н [47]. За роки, що пройшли з моменту прийняття документу модель пройшла апробацію і обґрунтування, що виявили її слабкі місця. Це, перш за все, граничні рівні зносу, що встановлені в моделі директивно, базуючись на досвіді експлуатації мостів. Сьогодні настав час в подальшому розвитку моделі, науковому пошуку критеріїв граничного зносу елементів мостів. Один із можливих підходів, на основі досліджень, наведених в роботі [61], викладено в цьому розділі.

Дослідження [61] базується на таких гіпотезах:

А. Критерієм граничного зносу є характеристика безпеки за умови рівності характеристичних значень узагальнених опору і навантаження $R_n = S_n$ в першому граничному стані.

Б. Узагальнений опір елемента R_n зменшується в процесі експлуатації, узагальнений навантажувальний ефект від постійних навантажень та рухомого складу $S_n = S_{n1} + S_{n2}$ приймається постійним. Випадок змінного в часі навантаження S_n має розглядатися окремо.

Гіпотеза **А**, $R_n = S_n$, означає, що за граничний знос приймається стан, коли вичерпані всі коефіцієнти надійності, як з боку узагальненого опору елемента, так і з боку узагальненого навантажувального ефекту. Це стан, в якому реальна

несна здатність елемента дорівнює проектному навантаженню без коефіцієнтів надійності.

Гіпотеза **Б** стосовно постійності рівня рухомої частини узагальненого навантаження прийнята як умова того, що оцінка зносу елемента виконується відносно постійних та рухомих навантажень, прийнятих при проектуванні об'єкта.

Для оцінки граничного зносу використане класичне визначення характеристики безпеки β [76]. Основна формула, у випадку нормального розподілу, має вид:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad (2.8)$$

де μ_R – математичне сподівання узагальненого опору елемента;

μ_S – математичне сподівання узагальненого навантаження елемента;

σ_R – середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого опору елемента;

σ_S – середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого навантаження елемента.

Дослідження обмежувалось залізобетонними елементами автодорожніх мостів.

Після трансформування формули (2.8) до форми, в якій характеристика безпеки виражається через математичне сподівання узагальненого коефіцієнту запасу і узагальнені коефіцієнти варіації опору та навантаження, отримані [61]:

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S}, \quad (2.9)$$

$$V_R = \sigma_R / \mu_R; V_S = \sigma_S / \mu_S, \quad (2.10)$$

де γ_0 – математичне сподівання узагальненого коефіцієнту запасу;

V_R – узагальнений коефіцієнт варіації матеріалів;

V_S – узагальнений коефіцієнт варіації навантаження.

Підстановкою (2.9) та (2.10) в формулу (2.8) формула (2.8) приводиться до виду:

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \gamma_0^2 + V_S^2}}. \quad (2.11)$$

У чинних нормативних документах характеристичні значення граничного зусилля в перерізі елемента (несної здатності R_n і навантажувального ефекту S_n) не є математичними сподіваннями. Вони приймаються зміщеними відносно математичних сподівань. Вліво зміщено характеристичне значення узагальненого опору:

$$\mu_R = R_n \frac{1}{(1 - \nu_R V_R)}, \quad \mu_R > R_n \quad (2.12)$$

і вправо – характеристичне значення узагальненого навантаження S

$$\mu_S = S_n \frac{1}{(1 + \nu_S V_S)}, \quad \mu_S < S_n, \quad (2.13)$$

де R_n, S_n – характеристичне значення;

ν_R, ν_S – значення стандартів, що відділяють характеристичне значення відповідної випадкової змінної від її математичного сподівання. В чинних нормативних документах $\nu_R = \nu_S$, що відповідає забезпеченості характеристичних значень опору матеріалів $U_R = 0,95$ та характеристичних значень навантажень $U_S = 0,05$.

Для зручності обчислень коефіцієнти переходу від характеристичних значень до математичних сподівань в формулах (2.12) та (2.13) виділяються в окремі параметри, які будемо позначати літерою B з відповідними індексами [61]:

$$B_R = \frac{1}{(1 - 1,64 V_R)}; \quad B_S = \frac{1}{(1 + 1,64 V_S)}. \quad (2.14)$$

Отже, з урахуванням позначень (2.14) математичні сподівання узагальненого опору R_n і узагальненого навантаження S_n знаходиться за формулами:

$$\mu_R = R_n B_R, \quad (2.15)$$

$$\mu_Q = S_n B_S, \quad (2.16)$$

де R_n – характеристичне значення узагальненого опору, S_n – характеристичне значення узагальненого навантаження.

В позначеннях (2.15) та (2.16) математичне очікування узагальненого коефіцієнту запасу матиме вид:

$$\gamma_0 = \frac{R_n B_R}{S_n B_S}. \quad (2.17)$$

З урахуванням гіпотези А математичне очікування узагальненого коефіцієнту запасу матиме значення [61]:

$$\gamma_0 = \frac{B_R}{B_S}. \quad (2.18)$$

Для отримання числового значення характеристики безпеки маємо задати середні значення коефіцієнтів варіації узагальненої опірності елемента V_R та узагальненого навантаження елемента V_S .

Коефіцієнт варіації узагальненої опірності елемента V_R в формулах (2.11) та (2.14) визначається за загальною формулою середнього квадратичного відхилення суми взаємно незалежних випадкових величин [61]:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^n V_{Ri}^2 + \sum_1^n V_{Ri}^2 V_{Rj}^2}, \quad (2.19)$$

де V_{Ri}, V_{Rj} – коефіцієнти варіації матеріалів, з яких складається переріз;

n – кількість матеріалів складових перерізу (тих матеріалів, міцнісні характеристики яких входять до виразу для обчислення характеристичного значення узагальненого опору R_n).

Аналогічно записується формула коефіцієнта варіації узагальненого навантажувального ефекту:

$$V_s = \sqrt{\sum_1^n V_{si}^2 + \sum_1^n V_{si}^2 V_{sj}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = i - 1, \dots, n - 1, \quad (2.20)$$

де n – кількість типів характеристичних навантажень, що входять до виразу для обчислення характеристичного значення узагальненого навантажувального ефекту V_s (наприклад: перша частина постійного навантаження + друга частина постійного навантаження + смугове навантаження АК + тандем АК + натовп, ($n = 5$)).

Статистична модель залізобетонних попередньо напружених прогонових будов автодорожніх мостів прийнята за параметрами, наведеними в табл.2.2 та табл. 2.3.

Таблиця 2.2 – Статистичні параметри складових опору [47]

Випадкова змінна	V_s
Площа поперечного перерізу елемента	0,024
Момент опору поперечного перерізу елемента	0,023
Арматура залізобетонних елементів в залежності від класу	0,040 – 0,110
Міцність бетону за умови природнього твердіння в залежності від міцності $R_{b,28}$ 30 – 70 МПа	0,051 – 0,105

Обчисливши за формулами (2.19), (2.20) коефіцієнт варіації узагальненої опірності елемента та коефіцієнт варіації узагальненого навантажувального ефекту для заданих коефіцієнтів, за формулою (2.11) отримаємо значення характеристики безпеки, що відповідає граничному зносу при заданих коефіцієнтах варіації.

Таблиця 2.3 – Статистичні параметри навантажувальних ефектів [47]

Випадкова змінна	V_s
Всі навантаження і дії, окрім вказаних нижче в таблиці	0,03
Вага вирівнюючого, ізоляційного і захисного слоїв автодорожніх і міських мостів	0,10
Вага проїзного полотна і тротуарів автодорожніх мостів	0,1
Вага проїзного полотна і тротуарів міських мостів	0,33
Вага конструкцій в дерев'яних мостах	0,07
Дія усадки і повзучості бетону	0,03
Навантаження від ґрунту на опори моста	0,13
Дія попередньо напруженої арматури (дріт холодного витягу)	0,08
Навантаження від тандему у розрахунках елементів проїзної частини мостів	0,17
Навантаження від тандему у розрахунках всіх інших елементів мостів при $l < 30$ м	0,17
Навантаження від тандему у розрахунках всіх інших елементів мостів при $l > 30$ м	0,07
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК	0,24
Рівномірно-розповсюджене навантаження від натовпу	0,14
Дія одиночної осі навантаження АК	0,07

Як видно з статистичної моделі, наведеної в табл. 2.2 і табл. 2.3, граничне значення характеристики безпеки є функцією великої кількості факторів: типу навантаження, довжини лінії впливу, конструкції прогонової будови, типу арматури, міцності бетону і такого іншого. При цьому коефіцієнт варіації в деяких випадках відрізняється на порядок.

Аналіз чутливості виконано шляхом перебору можливих значень коефіцієнтів варіації. Обчислимо за формулами (2.19), (2.20) мінімальні і максимальні значення узагальнених коефіцієнтів варіації опірності елемента та навантажувального ефекту.

Обчислені за формулою (2.18) математичні очікування узагальненого коефіцієнту запасу γ_0 та критерії граничного зносу β (2.11) при всіх можливих

комбінаціях узагальнених коефіцієнтів варіації опірності елемента V_R та навантажувального ефекту V_S наведені в табл. 2.3.

Як видно з табл. 2.3 критерій граничного зносу, в залежності від прийнятих до розрахунку значень коефіцієнтів варіації опірності елемента і навантажувального ефекту лежить в границях $[2,310 - 2,021]$.

Якщо ці значення порівняти з даними ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [47], то очевидно, що отриманий критерій за величиною характеристики безпеки практично співпадає з верхньою границею 4-го експлуатаційного стану (характеристика безпеки $\beta = 2,05$; надійність $P_i = 0,9798$) і є більш обережним, ніж нормативне визначення. Записане в ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [47], узагальнене визначення 4-го стану «можливе часткове порушення вимог першої групи граничних станів» в даному випадку означає вичерпання всіх коефіцієнтів.

Інакше кажучи, отриманий критерій відповідає зменшенню несної здатності елемента на величину [61]:

$$\delta = \frac{R - R_n}{R} \times 100\%, \quad (2.21)$$

де R – розрахункове значення опірності елемента;

R_n – характеристичне значення опірності елемента.

Величина δ залежить від типу конструкції, типу бетону, армування, розрахункового навантаження. Аналіз типових проектів залізобетонних мостів малих і середніх прогонів показує, що у випадку рухомого навантаження А11 середня величина δ складає 13 – 22%. Якщо цей показник обчислити відносно рухомого навантаження, тобто оцінити зниження вантажопідйомності, отримаємо 21 – 46%, в залежності від довжини прогону і співвідношення постійного і рухомого навантаження.

Порівнюючи з даними ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [47], граничне зниження вантажопідйомності в 4-му експлуатаційному стані складає 14 – 40% бачимо,

що за цим показником граничний знос також практично співпадає з прийнятою нормою (табл. 2.4 та 2.5).

Таблиця 2.4 – Статистичні параметри складових опору [47]

Випадкова змінна	V_s
Площа поперечного перерізу елемента	0,024
Момент опору поперечного перерізу елемента	0,023
Арматура залізобетонних елементів в залежності від класу	0,040 – 0,110
Міцність бетону за умови природнього твердіння в залежності від міцності $R_{b,28}$ 30 – 70 МПа	0,051 – 0,105

Таблиця 2.5 – Екстремальні значення критерію граничного зносу [47]

Значення узагальнених коефіцієнтів варіації	Узагальнений коефіцієнт запасу γ_0	Критерій граничного зносу β
$\min V_s = 0,287$: $\min V_R = 0,065$	1,649	2,108
$\max V_s = 0,453$: $\max V_R = 0,152$	2,322	2,302
$\min V_s = 0,287$: $\max V_R = 0,152$	1,959	2,319
$\max V_s = 0,453$: $\min V_R = 0,065$	1,951	2,021

Що стосується 5-го експлуатаційного стану, то за [47], допускається подальше зниження вантажопідйомності. Сам же опис стану, цілком логічно, містить питання про закриття руху. За величиною характеристики безпеки ($\beta = 1,74$; надійність $P_i = 0,9583$) 5-й стан позиціонується значно нижче отриманого нами критерію. Обґрунтування допустимості такого значення характеристики безпеки сьогодні ми не маємо.

2.3 Критерій доцільності виконання ремонту або реконструкції моста, що знаходиться у непрацездатному експлуатаційному стані

Пропозиція 1. Вводиться формалізований критерій рівня пошкодження елементів моста (критерій доцільності) – безрозмірна величина, функція параметрів з бази даних АЕСУМ, який є індикатором рівня пошкодження елементів моста та служить в системі управління мостами показником доцільності виконання ремонту.

Критерій, що пропонується, є функцією таких параметрів споруди:

- фізичний вік споруди на момент оцінки технічного стану T_5 , тобто час, що пройшов від моменту введення в експлуатацію;
- залишковий ресурс прогонової будови, T_R ;
- інтенсивність відмов, λ ;
- експертна оцінка технічного стану споруди (рейтинг), E .

Для аналізу цих параметрів, з точки зору їх придатності слугувати критеріями доцільності подальшої експлуатації моста, використана вибірка з бази даних АЕСУМ мостів всіх типів, що знаходяться в 5 експлуатаційному стані.

Аналіз вибірки показав, що перший із параметрів – фізичний вік споруди відпадає, тому що немає прямого зв'язку з залишковим ресурсом прогонової будови або з інтенсивністю відмов.

Далі аналіз показав, що форма кривої залишкового ресурсу прогонової будови повторює форму кривої інтенсивності відмов, що і слід було очікувати, так як залишковий ресурс прогонової будови є функцією інтенсивності відмов. Отже, першим параметром є інтенсивність відмов λ . Другим параметром з бази даних приймається експертна оцінка технічного стану споруди – рейтинг E .

Таким чином, статистичний аналіз параметрів дав змогу формулювати:

Твердження 1. Визначальними параметрами з бази даних АЕСУМ для розбудови критерію доцільності можуть бути інтенсивність відмов λ та експертна оцінка технічного стану споруди – рейтинг E .

Твердження 2. Формалізованим критерієм доцільності подальшої експлуатації (виконання капітального ремонту або реконструкції) автодорожніх мостів, що знаходяться в п'ятому експлуатаційному стані вводиться безрозмірна величина – функція двох параметрів з бази даних: інтенсивність відмов λ та експертна оцінка технічного стану споруди – рейтинг E :

$$K_E = \frac{E}{\lambda \cdot 100}, \quad (2.22)$$

де експертна оцінка технічного стану споруди E обчислюється за формулою (7.1) ДСТУ-Н [47, п.7.8]:

$$E = \frac{80 (5 - \sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i D_i)}{4} + 20 = 20 (5 - \sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i D_i) + 20, \quad (2.23)$$

де D_i – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди згідно з методологією [47];

α_i – коефіцієнти впливу стану i -го елемента на загальний стан споруди (нормалізовані коефіцієнти ваги), $i = 1, 2, \dots, 7$. Значення вагових коефіцієнтів надано в таблиці 7.1 [47].

Константа 100 в формулі (2.22) є масштабним коефіцієнтом.

Твердження 3. Мости, за своїми значеннями критерію доцільності K_E поділяються на три групи:

А – подальша експлуатація недоцільна;

Б – проміжна група мостів, рішення приймається за результатами економічного обґрунтування на розсуд експерта;

В – подальша експлуатація доцільна.

У таблиці 2.6, з використанням діаграми Нассі – Шнейдермана [165], наведено алгоритм функції розрахунку критеріїв доцільності для мостів заданої мережі автомобільних доріг.

На основі цього алгоритму автором був розроблений програмний модуль у складі програмного комплексу АЕСУМ. Застосування модулю дозволило здійснити поділ мостів на групи за значенням критерію доцільності та встановити граничні значення критерію доцільності для трьох груп мостів (табл. 2.7).

На рис. 2.5 наведено графіки залежності критерію доцільності та залишкового ресурсу мостів від параметру інтенсивності відмов.

Лінія тренду залежності коефіцієнта доцільності достовірності отриманим результатам оцінювання технічного стану мостів $R^2 = 0,9538$.

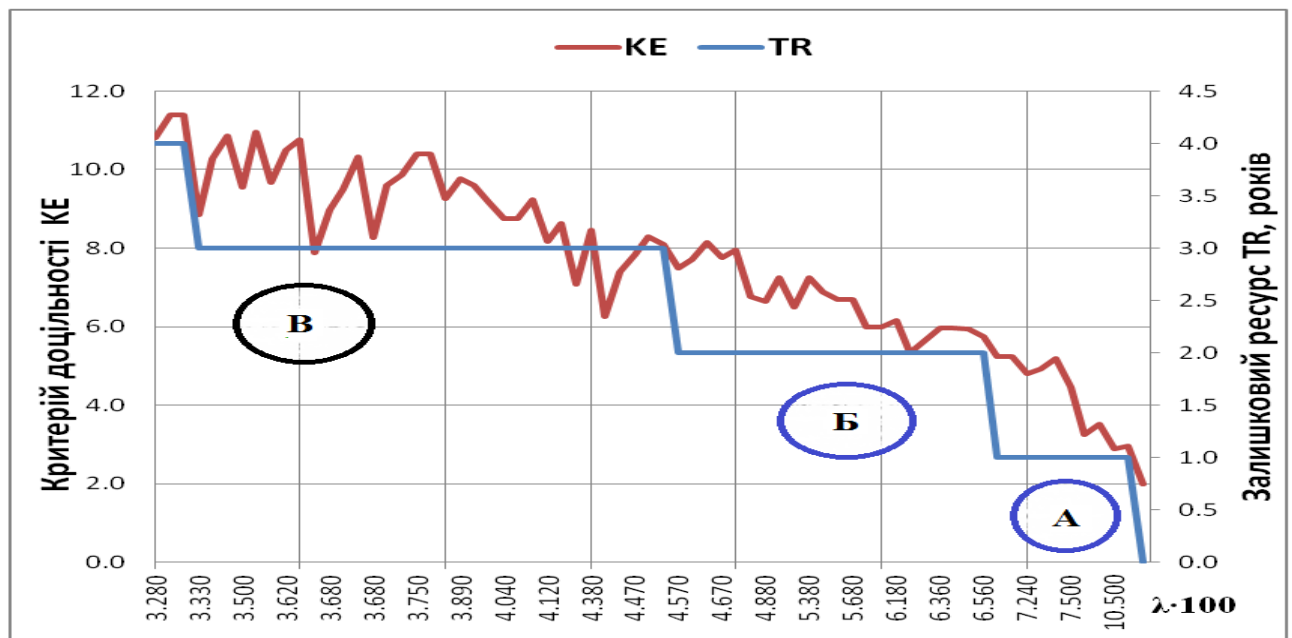


Рисунок 2.5 – Критерій доцільності. Джерело: власна розробка

Поділ мостів на групи за значенням критерію доцільності наведено в табл. 2.8.

Таблиця 2.6 – Функція розрахунку критерію доцільності

Крок	Оператори алгоритму
1	Встановити зв'язок з базою даних АЕСУМ Вибрати дані в залежності від встановлених користувачем режимів: по окремій області чи по всіх; по якому значенню доріг чи по всіх; по якій групі доцільності чи по всіх
2	Виконати запит до бази даних АЕСУМ
3	Задати верхні значення надійності за експлуатаційними станами: $F[1] := 0.999844$; $F[2] := 0.998363$; $F[3] := 0.992461$; $F[4] := 0.979771$; $F[5] := 0.958351$
4	Створити двовірний масив структур даних з розміром $R \times C$, де R – кількість записів у вибірці даних; C – кількість колонок.
5	Цикл завантаження даних по мостам: поки прочитані не всі записи: Ініціалізація робочих змінних: 1) визначити кількість років від року закінчення будівництва, реконструкції або ремонту до року обстеження T_{expl}; 2) призначити надійність за першою групою граничних станів при $state = 5$: $P = F[state]$; $P = 0.958351$; 3) задати інтервал значень показника інтенсивності відмов λ: $LMin = 0.0$; $LMax = 3.0$; 4) встановити значення: часу: $t = 1$, $step = \lambda \times t$, $step = LMin \times 1$, величина приращення $step$ в циклі $\Delta = 0.001$; 5) обчислити $P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot step^5 \cdot E_{xp}(-step)$; 6) встановити ознаку: $znak = '+'$, якщо $((P_{calc} - P) > 0$, $znak = '-'$ інакше; $step = step + \Delta$; 7) призначити надійність за першою групою граничних станів при стані $state = 5$: $P = F[state]$; $P = 0.958351$;

6	8) Цикл поки $step \leq LMax$ <table border="1" data-bbox="421 282 1481 1496"> <tr> <td data-bbox="421 282 512 344">a)</td><td data-bbox="512 282 1481 344">обчислити $P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot step^5 \cdot E_{xp}(-step)$;</td></tr> <tr> <td data-bbox="421 344 512 477">b)</td><td data-bbox="512 344 1481 477">встановити поточну ознаку: $zcur = '+'$, якщо $((P_{calc} - P) > 0)$, $zcur = '-'$ інакше;</td></tr> <tr> <td data-bbox="421 477 512 1496" rowspan="7">c)</td><td data-bbox="512 477 1481 667">якщо $znak = zcur$, то: $step := step + \Delta$; інакше</td></tr> <tr> <td data-bbox="584 672 1422 734">визначити інтенсивність відмов $\lambda = step/t$;</td></tr> <tr> <td data-bbox="584 734 1422 797">встановити $P = 0.9500$ ($\beta = 1.7$)</td></tr> <tr> <td data-bbox="584 797 1422 860">для $year = T_{expl}$ до T_{max} ЦИКЛ</td></tr> <tr> <td data-bbox="639 860 1401 922">$P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot (\lambda \cdot year^5 \cdot E_{xp}(-\lambda \cdot year))$;</td></tr> <tr> <td data-bbox="639 922 1401 1066">якщо $(P_{calc} - P) > 0$ та $znak \neq zcur$, то вихід з циклу</td></tr> <tr> <td data-bbox="584 1066 1422 1496">кінець циклу розрахувати критерій доцільності $K_E = \frac{E}{\lambda \times 100}$ визначити групу: якщо $\lambda \geq 0.0700$, то 'А' інакше якщо $\lambda < 0.0700$) та $\lambda \geq 0.0440$ то 'Б' інакше 'В';</td></tr> </table> кінець циклу розрахунку критерію доцільності K_E. Перехід до наступного запису даних по наступному мосту Кінець циклу по мостам	a)	обчислити $P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot step^5 \cdot E_{xp}(-step)$;	b)	встановити поточну ознаку: $zcur = '+'$, якщо $((P_{calc} - P) > 0)$, $zcur = '-'$ інакше;	c)	якщо $znak = zcur$, то: $step := step + \Delta$; інакше	визначити інтенсивність відмов $\lambda = step/t$;	встановити $P = 0.9500$ ($\beta = 1.7$)	для $year = T_{expl}$ до T_{max} ЦИКЛ	$P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot (\lambda \cdot year^5 \cdot E_{xp}(-\lambda \cdot year))$;	якщо $(P_{calc} - P) > 0$ та $znak \neq zcur$, то вихід з циклу	кінець циклу розрахувати критерій доцільності $K_E = \frac{E}{\lambda \times 100}$ визначити групу: якщо $\lambda \geq 0.0700$, то 'А' інакше якщо $\lambda < 0.0700$) та $\lambda \geq 0.0440$ то 'Б' інакше 'В';
a)	обчислити $P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot step^5 \cdot E_{xp}(-step)$;												
b)	встановити поточну ознаку: $zcur = '+'$, якщо $((P_{calc} - P) > 0)$, $zcur = '-'$ інакше;												
c)	якщо $znak = zcur$, то: $step := step + \Delta$; інакше												
	визначити інтенсивність відмов $\lambda = step/t$;												
	встановити $P = 0.9500$ ($\beta = 1.7$)												
	для $year = T_{expl}$ до T_{max} ЦИКЛ												
	$P_{calc} = 1 - 0.008333 \cdot (\lambda \cdot year^5 \cdot E_{xp}(-\lambda \cdot year))$;												
	якщо $(P_{calc} - P) > 0$ та $znak \neq zcur$, то вихід з циклу												
	кінець циклу розрахувати критерій доцільності $K_E = \frac{E}{\lambda \times 100}$ визначити групу: якщо $\lambda \geq 0.0700$, то 'А' інакше якщо $\lambda < 0.0700$) та $\lambda \geq 0.0440$ то 'Б' інакше 'В';												
7	Формування звіту в таблиці Excel												

Джерело: власна розробка

Таблиця 2.7 – Розрахунок критерію доцільності за даними АЕСУМ

λ	КЕ	Залишковий ресурс Тр	Група	Матеріал
1	2	3	4	5
0.1615	2	0	A	Попередньо напружений залізобетон
0.1313	3	1	A	Залізобетон
0.1313	3	1	A	Сталезалізобетон
0.1050	4	1	A	Залізобетон
0.0955	3	1	A	Залізобетон
0.0808	4	1	A	Залізобетон
0.0750	5	1	A	Бетон і кам'яна кладка
0.0750	5	1	A	Попередньо напружений залізобетон
0.0750	5	1	A	Попередньо напружений залізобетон
0.0724	5	1	A	Залізобетон
0.0724	5	1	A	Сталезалізобетон
0.0677	6	2	B	Залізобетон
0.0656	6	2	B	Залізобетон
0.0636	6	2	B	Залізобетон
0.0636	6	2	B	Залізобетон
0.0636	6	2	B	Залізобетон
0.0618	6	2	B	Залізобетон
0.0618	6	2	B	Залізобетон
0.0618	6	2	B	Залізобетон
0.0568	7	2	B	Залізобетон
0.0568	7	2	B	Залізобетон
0.0553	7	2	B	Залізобетон
0.0538	7	2	B	Залізобетон
0.0538	7	2	B	Залізобетон
0.0525	7	2	B	Залізобетон
0.0512	7	2	B	Сталезалізобетон
0.0488	7	2	B	Сталезалізобетон
0.0477	8	2	B	Залізобетон
0.0477	8	2	B	Залізобетон
0.0467	8	2	B	Залізобетон
0.0467	8	2	B	Залізобетон
0.0447	7	2	B	Залізобетон
0.0447	8	2	B	Залізобетон
0.0438	7	2	B	Залізобетон
0.0438	8	3	B	Залізобетон
0.0429	8	3	B	Залізобетон
0.0429	9	3	B	Залізобетон
0.0412	9	3	B	Залізобетон
0.0412	9	3	B	Залізобетон
0.0412	9	3	B	Попередньо напружений залізобетон
0.0404	9	3	B	Сталезалізобетон
0.0396	10	3	B	Залізобетон

1	2	3	4	5
0.0389	9	3	B	Залізобетон
0.0389	10	3	B	Залізобетон
0.0375	8	3	B	Залізобетон
0.0375	10	3	B	Залізобетон
0.0375	10	3	B	Залізобетон
0.0375	10	3	B	Сталезалізобетон
0.0375	10	3	B	Сталезалізобетон
0.0368	9	3	B	Залізобетон
0.0368	10	3	B	Залізобетон
0.0368	10	3	B	Кам'яна кладка
0.0368	8	3	B	Метал
0.0362	10	3	B	Залізобетон
0.0362	11	3	B	Залізобетон
0.0362	10	3	B	Сталезалізобетон
0.0356	10	3	B	Залізобетон
0.0356	11	3	B	Залізобетон
0.0350	9	3	B	Залізобетон
0.0350	10	3	B	Залізобетон
0.0350	11	3	B	Залізобетон
0.0333	11	4	B	Залізобетон
0.0333	11	4	B	Сталезалізобетон
0.0333	11	4	B	Сталезалізобетон
0.0328	11	4	B	Сталезалізобетон

Джерело: власна розробка

Таблиця 2.8 – Поділ мостів на групи за значенням критерію доцільності/

Джерело: власна розробка

Група А	Група Б	Група В
$K_E < 3$	$3 \leq K_E < 6$	$K_E \geq 6$
Приймається рішення про припинення експлуатації моста. Припиняються заходи з утримання	Рішення про припинення/продовження експлуатації моста приймається шляхом економічного обґрунтування	Приймається рішення про продовження експлуатації моста. Призначається капітальний ремонт або реконструкція

2.4 Висновки по розділу 2

1. Методичним підґрунтям цього дослідження є марковська феноменологічна модель накопичення пошкоджень [63, 66, 67]. В цій моделі знос елементу споруди описується марковським дискретним процесом з неперервним часом [68]. Розглядається процес з якісними станами. Роль випадкової змінної відіграє випадковий експлуатаційний стан системи.

2. Модель, що пропонується, є інтегральною. Вона не містить теоретичного апарату чуйного до матеріалу елементу, його статичної схеми, технології спорудження, екологічних умов тощо. З іншого боку, всі названі фактори і багато інших, другорядних, приймаються в моделі до уваги в момент, коли за допомогою класифікаційних таблиць, що містять фізичні і механічні ознаки деградації, визначається рівень ушкодження елемента.

3. Доведено, що теоретичний критерій граничного зносу прогонових будов автодорожніх мостів, прийнятий для алгоритму оптимізації стратегії ремонтів мостів, має достатню збіжність з нормативними вимогами на рівні 4-го експлуатаційного стану.

4. Показано, що виявлене в дослідженні перевищення зносу відносно встановленого критерію доцільності ремонту, реконструкції або заміни моста в 5-му експлуатаційному стані має бути попередженням для експерта, котрий виконує оцінку експлуатаційного стану моста. Несна здатність прогонової будови, в цьому випадку, має бути всебічно досліджена, встановлено значення реальної вантажопідйомності.

5. Встановлений кількісний критерій для мостів, що перебувають у п'ятому (непрацездатному) стані, який дозволяє на основі даних обліку в АЕСУМ швидко визначити доцільність капітального ремонту або реконструкції моста замість його закриття і заміни новим. Величина критерію доцільності K_E має інтервали значень: група А ($K_E < 3$), група Б ($3 \leq K_E < 6$) і група В ($K_E \geq 6$).

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛІ І МЕХАНІЗМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

3.1 Принципи обґрунтування параметрів процесу відновлення технічного стану мостів на автомобільних дорогах і механізм оптимізації

Відновлення технічного стану існуючих мостів на мережі автомобільних доріг здійснюється шляхом виконання їх ремонтів або реконструкції протягом експлуатаційної фази життєвих циклів мостів. В процесі проектування ремонту моста слід визначити залишковий проектний термін експлуатації та цільові рівні надійності. Орієнтовні значення проектного терміну експлуатації знаходяться в межах від 10 до 100 років для різних типів споруд, а рекомендовані цільові показники надійності в нормативних джерелах зазвичай даються на один або два базових періоди (1 рік і 50 років), без явного посилання на проектний термін експлуатації [36, 46, 112].

Для існуючих мостів потрібно уточнити взаємозв'язок між проектним терміном експлуатації та характеристикою безпеки і надати рекомендації щодо: уточнення цільового рівня надійності для заданих наслідків; проектного терміну експлуатації; норми дисконтування витрат.

Теоретичне дослідження на основі імовірнісної оптимізації показали, що оптимальні показники надійності залежать насамперед від співвідношення витрат, зв'язаних з відмовою споруди та витрат на одиницю зміни характеристики безпеки і менш істотно залежать від проектного терміну експлуатації та норми дисконтування [128].

Таким чином, визначення цільових рівнів надійності потрібно для імовірнісної оцінки існуючих споруд. Було визнано, що для всіх існуючих будівель та мостів було б неекономічно визначати ті ж рівні надійності, що й для нових споруд [173].

Цільові рівні надійності, рекомендовані EN 1990 2002 [112], пов'язані з наслідками відмови. Вони, в першу чергу, призначені для нових конструкцій. Більш детальна класифікація наведена в ISO 2394 1998 [131], де також враховуються відносні витрати на заходи безпеки. Цільові рівні надійності, передбачені в обох документах, частково базуються на калібруванні до попередньої практики і повинні розглядатися як орієнтовні. ISO 13822 2010 [130] вказує на можливість встановлення цільових рівнів надійності для існуючих структур шляхом оптимізації загальної вартості, пов'язаної з передбачуваним строком експлуатації (working life).

Необхідність уточнення цільових рівнів для існуючих споруд щодо залишкового терміну експлуатації, наслідків відмов та витрат на заходи безпеки, зазначена Європейським комітетом зі стандартизації (CEN). Технічним комітетом CEN / TC250, відповідальним за підготовку європейських правил проектування конструкцій (конструкційні єврокоди), створена Робоча група WG2 "Оцінка існуючих споруд". Ця ініціатива була мотивована бажаними європейськими технічними правилами щодо розширення будівельної діяльності при оцінці та модернізації існуючих споруд та інженерних робіт.

З метою підтримки технічної роботи CEN / TC250 WG2 Міжнародна федерація бетонних конструкцій (FIB) створила групу спеціальних заходів 7 «Оцінка та втручання на існуючих конструкціях» (SAG7). SAG7 організований у чотири робочі групи, орієнтовані на [173]:

- оцінку надійності та безпеки,
- моделювання структурних показників,
- процедури оцінки,
- підбір та виконання втручань.

Були розроблені оперативні вказівки щодо практичного застосування імовірнісних та напівімовірнісних методів оцінки існуючих споруд.

Рекомендації щодо цільових рівнів надійності також містяться у кількох національних стандартах. Наприклад, показник характеристики безпеки β для

існуючих конструкцій може бути знижений за голландським стандартом (NEN 8700 2009) до 1.8, 2.5 та 3.3 для низьких, помірних та високих наслідків відмови відповідно. Таким чином, для моделі споруди може бути прийнята, наприклад, цільова надійність з характеристикою безпеки $\beta \approx 2,5$.

Експлуатаційний стан існуючого моста є сукупним результатом дії двох протилежних процесів (рис. 3.1):

- 1) процесу деградації елементів моста;
- 2) процесу відновлення стану елементів шляхом виконання робіт з ремонту та експлуатаційного утримання моста.

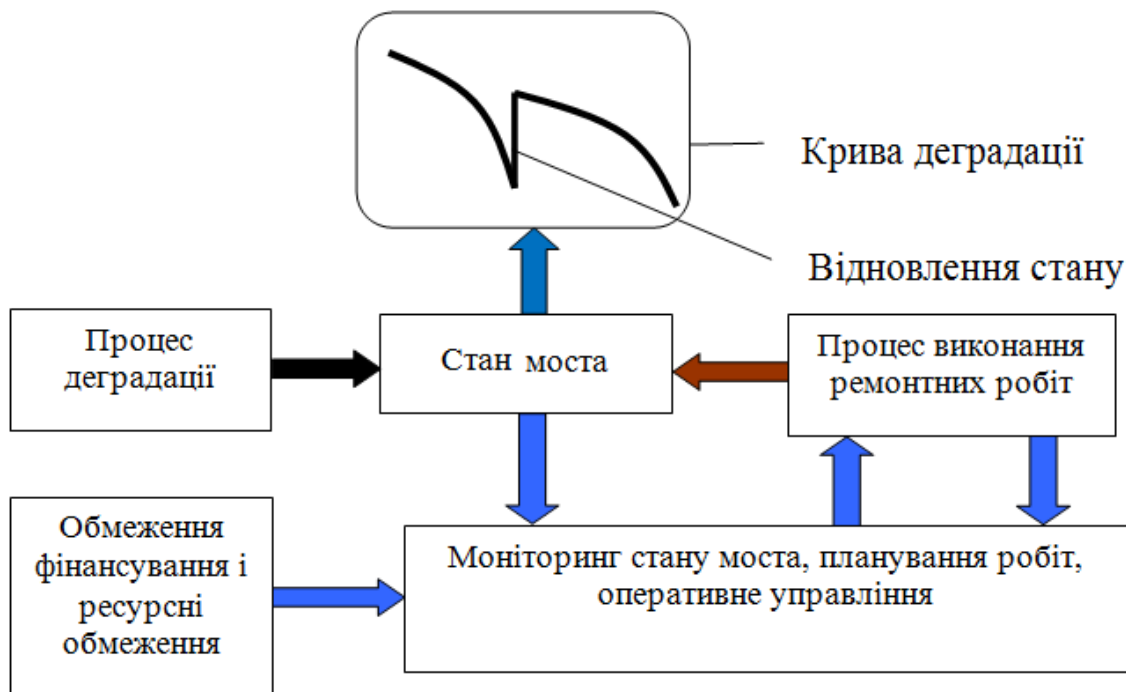


Рисунок 3.1 – Процеси формування експлуатаційного стану моста
Джерело: [83, с. 55]. Адаптовано автором

Процеси деградації і відновлення є взаємно обумовленими, «тримають один одного», отже повинні розглядатись у взаємодії, у сукупності. Результатом такої взаємодії є експлуатаційний стан моста. Прискорення швидкості процесу деградації обумовлює необхідність прискорення процесу відновлення, який уповільнює деградацію моста (*принцип взаємної обумовленості*).

Існує багато варіантів здійснення процесу відновлення стану моста – виконання робіт з експлуатаційного утримання і ремонтів моста (**принцип альтернативності**) (рис. 3.2).

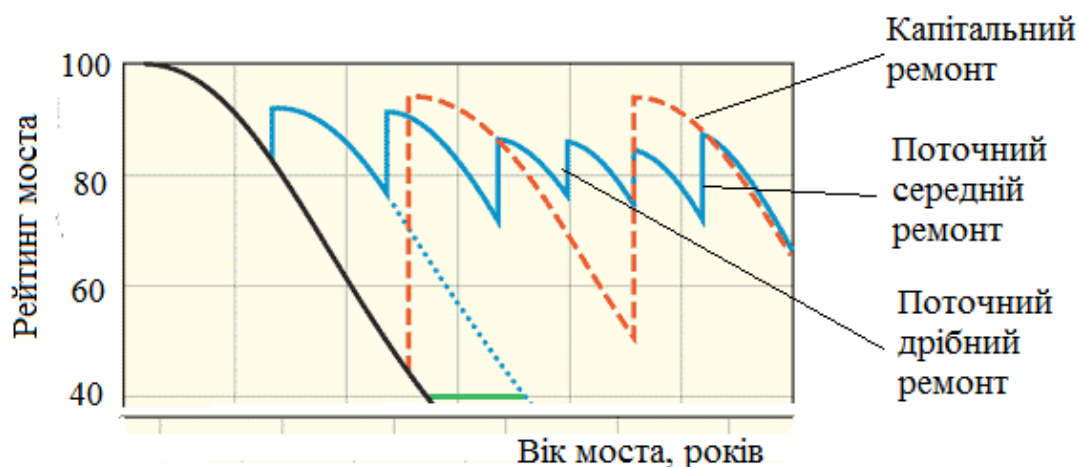


Рисунок 3.2 – Варіанти впливу відновлювальних заходів на рейтинг моста. Джерело: [74]. Адаптовано автором

Параметри процесу відновлення залежать від рівня деградації елементів моста і моста в цілому. Вид і частота вживання тих чи інших відновлювальних заходів, а також об'єми та склад їх робіт, залежать від характеру, рівня серйозності і рівня розповсюдження дефектів елементів мостів, розвиток яких у часі під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників становить сутність фізичного процесу деградації.

Забезпечення узгодженості процесу деградації і процесу відновлення у просторі і часі – *стратегія відновлення* – при виконанні певних обмежень складає зміст задач проектування ремонтів з урахуванням їх впливу на прогнозований стан мостів. Обмеженнями в цих задачах виступають граничні параметри процесу деградації і обмеження на ресурси (фінансові, трудові, матеріально-технічні, інформаційні) (**принцип узгодженості**).

Щоб вибрати прийнятний (оптимальний або, щонайменше, раціональний) варіант здійснення процесу відновлення потрібно визначити *критерій або критерії порівняння* варіантів стратегії процесу відновлення. Такими критеріями, скоріш за все, може бути досягнутий рівень технічного стану

мостів при обмеженнях на витрати з відновлення при заданому цільовому рівні технічного стану мостів. Проблема вибору варіанту стратегії відновлення може бути вирішена точно або наближено при досягненні оптимальних значень критеріїв або наближених до них значень.

Якщо формалізувати розвиток процесів деградації і відновлення створивши їх моделі, розробити моделі обчислення значень критеріїв, що відповідні тому чи іншому варіанту стратегії відновлення і розв'язати задачу пошуку оптимальних значень критеріїв, то можна отримати *ефективну* стратегію процесу відновлення, якщо не оптимальну, проте кращу за всі розглянуті (*принцип обмеженої раціональності*).

Неможливо забезпечити оптимальне рішення для одного моста без одночасного розгляду інших мостів на певній мережі доріг, отже мова йде не тільки про стратегію відновлення технічного стану окремого моста (об'єктний рівень), а, головним чином, про стратегію відновлення технічного стану мостів на мережевому рівні (*принцип домінування мережевого рівня*). В даній роботі розглядається саме така постановка задачі.

Мости на мережі автомобільних доріг мають різну значимість, по-перше, за своїм експлуатаційним станом, по-друге, по впливу на економічну ефективність перевезень та безпеку руху, по-третє, на економіко-соціальний стан прилеглого регіону, отже можуть мати різний пріоритет (*принцип пріоритезації*), який залежить від ряду факторів [111].

Важливим принципом обґрунтування стратегії відновлення технічного стану мостів є врахування зовнішніх ефектів (екстерналій) від самого існування моста, тобто слід приймати до уваги його корисність для споживачів (споживчі якості), яка може бути оцінена через швидкість руху, допустимі рухомі навантаження і габарити транспортних засобів, безпеку і комфортність руху, втрати від закриття моста для реконструкції, ремонту або заміни новим мостом тощо. Цей принцип доцільно назвати *принципом корисності*.

При реалізації цього принципу мости розглядаються як невіддільні частини дорожньої мережі, отже погіршення стану мостів спричиняє

неефективність роботи мережі автомобільних доріг. Негативні наслідки включають витрати на ремонти та реконструкцію мостів та збільшення витрат користувачів мостів. Тому необхідне підтримання мостів для збереження їх задовільних показників у їх корисному житті окремо або як частину мережі доріг [89].

Наведені принципи складають основу пропонованого удосконалення проектування ремонтів або реконструкції мостів, яку ми назвали механізмом.

Поняття «механізм» значно ширше від поняття «алгоритм». Механізм у науці – це структура, що виконує функцію в її складових частинах, компонентних операціях і їх організації. Організоване функціонування механізму відповідає за одне або більше явищ. Механізм містить чотири основні ознаки [148]:

- феномен,
- складові частини,
- причинно-наслідкові зв'язки,
- організацію.

Канонічне візуальне представлення механізму, що лежить в основі явища, показано на рис. 3.1.

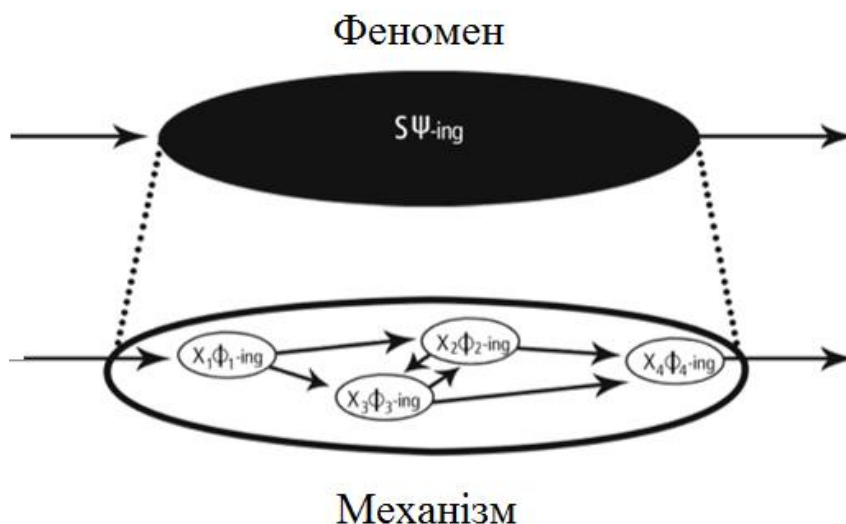


Рисунок 3.3 – Концепція механізму. Джерело [148]. Адаптовано автором

Угорі це явище, деяка система S займається поведінкою Ψ . Це поведінка механізму в цілому. Під ним розташовані частини $(X_1, \dots, X_4)$ і їхня дії (ϕ_s) , організовані разом. Пунктирними похилими вертикальними лініями відображається той факт, що частини і види діяльності, що містяться всередині, є складовими, механізмом, задіяними у цій поведінці. Таким чином, механізми розкладаються в тому сенсі, що поведінка системи в цілому може бути розбита на організовані взаємодії між діяльністю частин. Отже, механізм явища складається з суб'єктів і діяльності, організованих таким чином, що вони несуть відповідальність за це явище. Механізм для явища складається з утворень (чи частин), діяльність яких та взаємодія організовані таким чином, що вони виробляють це явище [148].

В нашому випадку, механізм виробляє оптимальну стратегію виконання ремонтів (або реконструкції), маючи на увазі на залишкову частину життєвих циклів мостів (фази експлуатації) від року проектування ремонту (реконструкції) на заданий часовий горизонт.

Явище – це поведінка механізму в цілому. Всі механізми є механізмами деякого явища. Наприклад, механізм синтезу білка синтезує білки. Механізм дії потенціалу породжує потенціал дії. Межі механізму – те, що знаходиться в механізмі, а що ні – фіксуються посиленням на явище, яке пояснює механізм. Компоненти в механізмі є складовими в силу того, що вони мають відношення до явища [148].

На думку автора цієї дисертаційної роботи, основними, але не виключно, частинами, які взаємодіють в запропонованому механізмі пошуку оптимальної стратегії ремонтів є (рис. 3.4):

- подальший розвиток теоретичних підходів до удосконалення моделей прогнозування процесу деградації мостів і процесу відновлення їх технічного стану;
- удосконалення на цій основі інформаційної моделі даних про параметри паспортизації, даних обстежень, технічного оцінювання стану мостів і відповідну трансформацію бази даних АЕСУМ;

- процес доповнення бази даних АЕСУМ новою інформацією, яка реалізує удосконалену інформаційну модель наявності та технічного стану мостів;
- розробка більш ефективних алгоритмів оптимізації ремонтів мостів і підвищення їх адекватності, а також програмних засобів їх реалізації в АЕСУМ;
- розробка нових та модифікація існуючих інтерфейсів користувачів програмних засобів АЕСУМ;
- організацію взаємодії згаданих частин в системі Укравтодору з встановленням відповідальності виконавців, часових параметрів їх діяльності та звітності стосовно розроблення стратегії ремонтів мостів та її перегляду за рахунок отримання в перспективі нових даних обстежень мостів.



Рисунок 3.4 – Складові механізму оптимізації стратегії ремонтів мостів.

Джерело: власна розробка

3.2 Пріоритезація мостів на мережі автомобільних доріг

Різна важливість мостів на мережі автомобільних доріг враховується системою їх пріоритезації. Пріоритезація мостів, запропонована в дисертаційній роботі, ґрунтується на підходах, наведених в роботах [95, 149]. В них пріоритет моста є зваженим адитивним показником п'яти факторів, які вимірюють: важливість моста, технічний стан моста, проектну надмірність (або резервування – *redundancy*), спроможність пропуску руху (*structure capacity*) та економічну ефективність. Безрозмірне значення кожного з цих факторів множиться на коефіцієнт ваги. Загальна форма рівняння пріоритету Π є:

$$\Pi = a \cdot KB + b \cdot PC + c \cdot КП + d \cdot КЗ + e \cdot KE, \quad (3.1)$$

де a, b, c, d, e – коефіцієнти ваги, $a + b + c + d + e = 1.0$;

KB – коефіцієнт важливості споруди (*Bridge Importance Factor*) – відносна важливість моста у певній мережі доріг;

PC (*Condition State Factor*) – коефіцієнт рейтингу стану – характеризує загальний фізичний стан моста на основі стану кожного окремого елементу;

$КП$ (*Design Redundancy Factor*) – коефіцієнт пристосування (надмірності) – міра ризику в аналізі важливих чотирьох граничних станів: крихкого руйнування; аварійного розмиву, аварійного руйнування за втомою, руйнування внаслідок землетрусу;

$КЗ$ (*Structure Capacity Factor*) – коефіцієнт пропускної здатності моста – здатність моста з пропуску руху, включаючи вплив обмежень на вагу, підмостовий габарит і габарит по ширині;

KE (*Cost-Effectiveness Factor*) – фактор ефективності витрат – характеризує економічну ефективність відновлювального заходу.

Наведені фактори вказують на відносну значимість споруди (в інтервалі від 0 до 1.0). Так, наприклад, споруда з оцінкою 0,62 є більш значущою, ніж споруда з оцінкою 0,43 для розглянутого фактора [95].

Нормовані коефіцієнти ваги, $a + b + c + d + e = 1.0$, у дисертаційній роботі вибираються для пріоритезації цілей дорожнього агентства за допомогою методу аналізу ієрархій, який запропонував Т. Сааті [78, 79].

Коефіцієнти a, b, c, d, e при наведених у формулі (3.1) п'яти факторах обчислюють за допомогою так званої матриці переваг (або порівнянь). Елементи цієї матриці відображують думку ОПР про важливість оцінок факторів, представлених у рядках і стовпцях матриці переваг [78]. Матриця переваг факторів W , розміром $n \times n$, містить компоненти w_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$, де $n = 5$ – кількість прийнятих до аналізу факторів (критеріїв), наведена у табл. 3.1. Очевидно, що діагональні елементи матриці дорівнюють одиниці ($w_{ii} = 1$). Матриця є обернено-симетричною. Шкала відносних переваг критеріїв Т. Сааті наведена в [78, 79].

Після визначення переваг w_{ij} , по кожному i -му критерію знаходиться середнє геометричне v_i , а елементи вектору переваг V нормалізуються:

$$v_i = \sqrt[n]{w_{i,1} w_{i,2} \dots w_{i,n}} = \left(\prod_{j=1}^n w_{i,j} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3.2)$$

$$v_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.3)$$

У таблиці 3.1 наведена матриця переваг для п'яти факторів (критеріїв), які використовуються в роботі [95].

Отже, пріоритет Π моста, який приймає свої значення в інтервалі від 0 до 1, за п'ятьма вибраними факторами обчислюється за формулою:

$$\Pi = 0.30 \cdot KB + 0.25 \cdot PC + 0.15 \cdot KP + 0.10 \cdot K3 + 0.20 \cdot KE. \quad (3.4)$$

Відсутність вихідних даних для обчислення значення фактору КР, а також методики його врахування в Настанові [47], спричинили його виключення в цьому дисертаційному дослідженні, отже матриця переваг є такою, як наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Матриця переваг для п'яти факторів (критеріїв)

	KB	PC	KП	KЗ	KE	$\prod_{j=1}^n w_{i,j}$	$v_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{i,j} \right)^{\frac{1}{n}}$	$v_i = \frac{v_i}{\sum_1^n v_j}$
KB	1,00	3,00	2,00	2,00	1,00	12,0000	1,64	a=0,30
PC	1/3	1,00	2,00	4,00	4,00	10,6667	1,40	b=0,25
KП	1/2	1/2	1,00	1,00	1,00	0,2500	0,82	c=0,15
KЗ	1/2	1/4	1,00	1,00	1/9	0,0139	0,54	d=0,10
KE	1,00	1/4	1,00	9,00	1,00	2,2500	1,12	e=0,20

$$\Sigma = 5,53 \quad \Sigma = 1,00$$

Джерело: власна розробка на основі [95]

Таблиця 3.2 – Матриця переваг для чотирьох факторів (критеріїв)

	KB	PC	KЗ	KE	$\prod_{j=1}^n w_{i,j}$	$v_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{i,j} \right)^{\frac{1}{n}}$	$v_i = \frac{v_i}{\sum_1^n v_j}$
KB	1,00	3,00	2,00	1,00	72,0000	2,35	0,45
PC	1/3	1,00	4,00	4,00	5,3333	1,27	0,24
KЗ	1/2	1/4	1,00	1/9	0,0139	0,54	0,10
KE	1,00	1/4	9,00	1,00	2,2500	1,12	0,21

$$\Sigma = 5,29 \quad \Sigma = 1,00$$

Джерело: : власна розробка власна розробка на основі [95]

Відповідно формула обчислення пріоритету П для цього випадку буде:

$$П = 0.45 \cdot KB + 0.24 \cdot PC + 0.10 \cdot KЗ + 0.21 \cdot KE. \quad (3.5)$$

Кожен фактор має розбиття на субфактори у наступному рівні ієрархії. Так фактор важливості моста KB складається з шести субфакторів (табл. 3.3) [95]:

А – середня добова інтенсивність руху, авт./добу на смугу руху;

С – те саме вантажних автомобілів, авт./добу на смугу руху;

B – майбутня середня добова інтенсивність руху, авт./добу на смугу руху, яка обчислюється через темп приросту інтенсивності руху q :

$$q = \left[\frac{B}{A} \right]^{1/(T_F - T_0 + 1)} - 1, \quad (3.6)$$

де q – середньорічний темп приросту добової інтенсивності руху;

T_0 – поточний рік визначення добової загальної інтенсивності руху;

T_F – майбутній рік визначення добової загальної інтенсивності руху;

D – вплив об'їзду моста;

E_b – належність моста до мережі державних доріг (1 – так, 0 – ні 0);

F – належність моста до транспортного коридору (1 – так, 0 – ні 0).

В процесі визначення пріоритету моста змінні A , B і D потрібно трансформувати у відповідні значення індексу. Для цього доцільно скористатися залежностями, наведеними в роботі [95]:

для загальної середньодобової інтенсивності руху

$$V_A = 2 \cdot (0.0707 \cdot \ln(N) - 0.2534), \quad (3.7)$$

для вантажних автомобілів

$$V_C = 0.071397 \cdot N^{0.25978} - 0.2534, \quad (3.8)$$

де N – середня добова інтенсивність руху, авт./добу на смугу руху.

$V_D = 1.0$ для міжнародних та національних доріг, 0.75 для регіональних та територіальних доріг, а для місцевих доріг визначається за формулою [95]:

$$V_D = 0.0951 \cdot L + 0.1353, \quad (3.9)$$

де L – довжина об'їзду.

Коефіцієнти при KB , отримані за матрицею переваг, наведені в табл. 3.3.

$$KB = 0.30 \cdot V_A + 0.10 \cdot V_B + 0.15 \cdot V_C + 0.20 \cdot V_D + 0.05 \cdot V_E + 0.20 \cdot V_F. \quad (3.10)$$

Таблиця 3.3 – Матриця переваг для шести субфакторів для КВ. Джерело [95]: складена автором

	A	B	C	D	E	F	$\prod_{j=1}^n w_{i,j}$	$v_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{i,j} \right)^{\frac{1}{n}}$	$v_i = \frac{v_i}{\sum_1^n v_j}$
A	1	2	3	3	4	1	72,00000	2,03965	0,30
B	1/2	1	1	1	1	1/6	0,08333	0,66090	0,10
C	1/3	1	1	2	3	1/2	1,00000	1,00000	0,15
D	1/3	1	1/2	1	9	4	6,00000	1,34801	0,20
E	1/4	1	1/3	1/9	1	1/2	0,00463	0,40825	0,05
F	1	6	2	1/4	2	1	6,00000	1,34801	0,20
							$\Sigma = 6,80481$	$\Sigma = 1,00$	

Значення фактору експлуатаційного стану РС у [95] визначається через індекс здоров'я моста (Health Index), який є сумішню індексів здоров'я плити прогонової будови, верхньої будови та нижньої будови моста.

З урахуванням [47, п. 7.7] рейтинг стану мосту визначається за формулою:

$$PC = 1.00 - \frac{20[5 - \sum_{i=1}^{i=7} (\alpha_i \times D_i)] + 20}{100}, \quad (3.11)$$

де D_i – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди згідно з класифікаційною таблицею [47, табл. 4.1]; α_i – коефіцієнти впливу стану i -ї групи елементів на загальний стан споруди (нормалізовані коефіцієнти ваги), $i = 1, 2, \dots, 7$. Значення коефіцієнтів наведені в табл. 3.4.

КЗ – коефіцієнт пропускної здатності моста включає (табл. 3.5):

– коефіцієнт зменшення ваги ЗВ (Weight Reduction Factor) = 0 до 1,0 – бальна характеристика споруди щодо вантажних автомобілів, машин швидкої допомоги, шкільних автобусів, пожежних автомобілів та транспортних засобів, що проектуються;

– коефіцієнт підмостового габариту ПГ (Vertical Clearance Factor), що може варіюватися від 0 до 1,0. Цей коефіцієнт враховує середній судноплавний

горизонт або категорію автомобільної дороги, або залізниці тощо під мостом або шляхопроводом;

– коефіцієнт відповідності ширини моста ширині під'їздів автомобільної дороги ШМ (Deck Width Factor). Змінюється в інтервалі від 0 до 1,0.

Таблиця 3.4 – Вагові коефіцієнти α_i у формулі експертної оцінки технічного стану споруди [47, табл. 7.1]

	Проїзна частина	Прогонова будова	Опора та опорні частини	Фундамент	Підмостове русло	Регуляційна споруда	Підходи
Міст через водну перешкоду	0,04	0,40	0,25	0,15	0,09	0,05	0,02
Міст без регуляційних споруд	0,05	0,44	0,25	0,15	0,09	-	0,03
Шляхопровід, естакада, віадук	0,05	0,56	0,25	0,12			0,02

Коефіцієнти ЗВ, ПГ та ШМ при відсутності порушень технічних параметрів приймають значення 10.

KE (Cost-Effectiveness Factor) – коефіцієнт ефективності витрат – відношення вартості заходу до вартості заміни моста (рис. 3.5).

Значення коефіцієнтів зменшення ваги (ЗВ), підмостового габариту (ПГ), ширини моста (ШС) приймаються при наявності порушень, інакше 1.0.

Таблиця 3.5 – Матриця переваг для трьох субфакторів для КЗ

	ЗВ	ПГ	ШМ	$\prod_{j=1}^n w_{i,j}$	$v_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{i,j} \right)^{\frac{1}{n}}$	$v_i = \frac{v_i}{\sum_1^n v_j}$
ЗВ	1	1/5	9	1,8000	1,12	0,35
ПГ	5	1	6	30,0000	1,63	0,50
ШС	1/9	1/6	1	0,0185	0,57	0,15
				$\Sigma=3,32$	$\Sigma=1,00$	

$$K3 = 1,00 - (0,35 \cdot ЗВ + 0,50 \cdot ПГ + 0,15 \cdot ШМ). \quad (3.12)$$

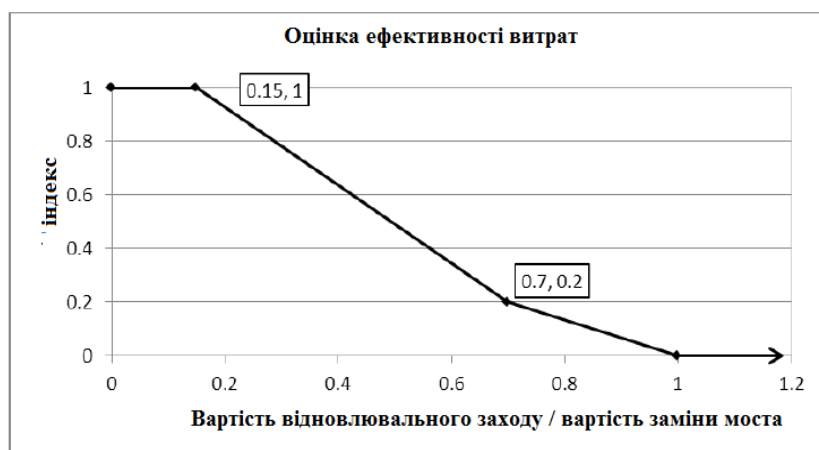


Рисунок 3.5 – Графік для визначення індексу коефіцієнту ефективності витрат КЕ. Джерело [95]: адаптовано автором

3.3 Передумови моделювання процесу відновлення технічного стану мостів на автомобільних дорогах

Дефекти і пошкодження елементів моста мають раптовий або кумулятивний характер [2]. Кумулятивні дефекти накопичуються поступово під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників, а швидкість їх накопичення з часом зростає. Раптові дефекти виникають в короткий проміжок часу звичайно під впливом зовнішніх факторів (землетрус, повінь тощо). Для запобігання передчасного зносу моста дефекти мають періодично усуватись, а їх розміри і вплив – зменшуватись. Для цього виконуються роботи з ремонтів та утримання мостів.

Базисні компоненти призначення комплексів ремонтно-відновлювальних заходів з ремонтів та утримання мостів в залежності від рівнів їх експлуатаційного стану, прийняті в АЕСУМ, наведені на рис. 3.6.

Центральним елементом системи є база даних АЕСУМ, в якій накопичуються поточні характеристики технічного рівня та експлуатаційного стану елементів мостів і мостів в цілому, розраховані на основі даних обстежень мостів і виявлених в процесі їх обстежень дефектів пошкоджень.

В свою чергу, в базі даних зберігаються рекомендації [47] щодо виконання рекомендованих для усунення дефектів робіт. Дефекти класифікуються за видами елементів, їм у відповідність поставлені експлуатаційні стани елементів, тобто за характером дефектів можна визначити

експлуатаційний стан елементу [47]. Приклад форми кривих деградації елементів мостів наведений на рис. 3.7.

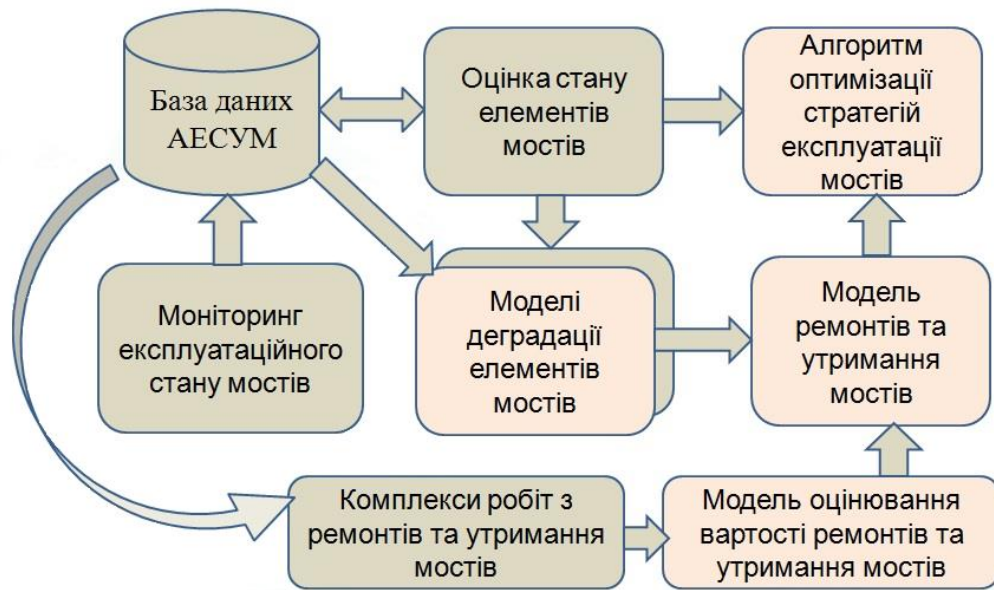


Рисунок 3.6 – Базисні компоненти призначення комплексів ремонтно-відновлювальних заходів. Джерело: власна розробка

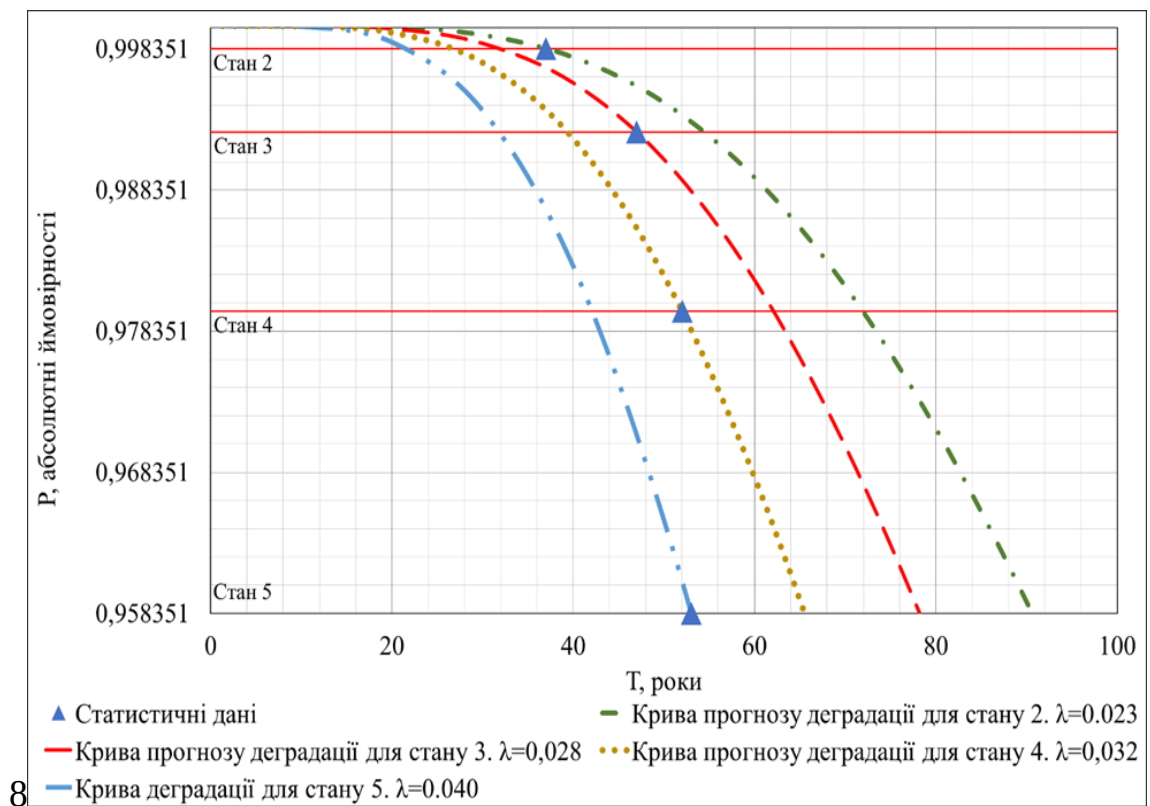


Рисунок 3.7 – Криві деградації елементу моста. Джерело: [47]

Отже, якщо розроблені моделі дозволять отримати результати, які не протирічать логіці розвитку процесів деградації і відновлення і підтверджуються даними обліку в АЕСУМ, то висунута робоча гіпотеза не буде спростована.

Пріоритезація самої стратегії відновлення стану мостів потребує одночасного задоволення трьох конфліктуючих цілей [145]:

1) пріоритезація на базі оцінки рівня деградації моста (рейтингу стану) – стратегії впорядковуються в термінах рейтингу стану мостів – мости з найвищим (або нижчим, в залежності від шкали) рейтингом (в найбільш ураженому стані) мають найвищий пріоритет;

2) пріоритезація на базі вартості відновлення мостів: стратегії впорядковуються в термінах вартості – стратегії з найнижчою вартістю отримують найвищий пріоритет;

3) пріоритезація на базі витрат користувачів: стратегії впорядковуються в термінах витрат користувачів – стратегії з найнижчими витратами отримують найвищий пріоритет.

Ці три головних цілі конфліктують між собою, тому потрібно знайти «ідеальне рішення», яке буде задовільним компромісом (рис. 3.8).

Рішення проблеми відновлення технічного стану мостів можливе як розв’язання задачі оптимізації з одним критерієм – однокритеріальна, в якій інші критерії виступають у якості обмежень, або як задача оптимізації одночасно по декільком критеріям – багатокритеріальна. В останньому випадку неможливо отримати оптимальне в математичному сенсі рішення. При будь-якому способі формалізації, задача кількісного обґрунтування рішення по декільком показникам – критеріям залишається не до кінця визначеною, і кінцевий вибір рішення визначається вольовим актом вибору ОПР, тобто отримується множина рішень, з якої ОПР вибирає одне на основі власних вподобань [30, с. 27]. Зауважимо, що потреба в критеріях оцінки рішень має місце тільки тоді, коли існує більше одного варіанту розв’язання задачі.

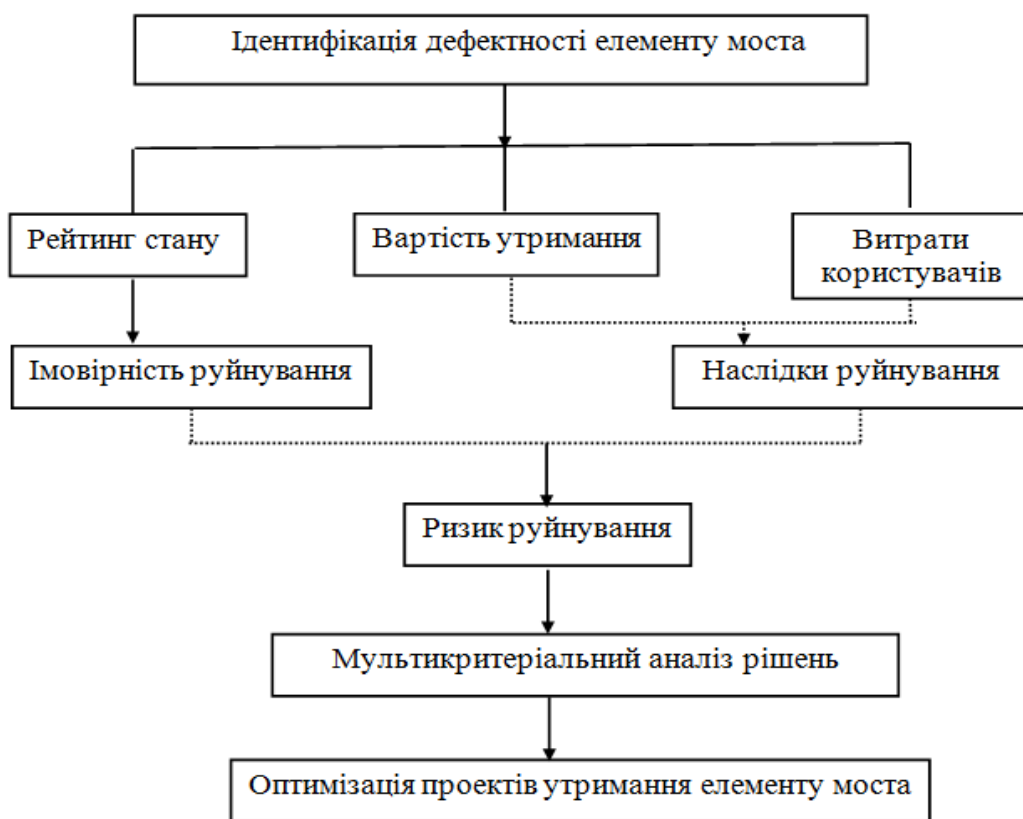


Рисунок 3.8 – Схематичний підхід до мультикритеріальної оптимізації утримання елементу моста. Джерело [144]: адаптовано автором

Слід ще звернути увагу на те, чи проблема розглядається на рівні окремого елементу моста (наприклад, плити проїзної частини або окремої балки прогонової будови тощо), чи на рівні всього моста. У багатьох системах управління мостами, власне і в АЕСУМ, експлуатаційний стан кожного елементу оцінюється окремо дискретним номером стану в залежності від його дефектів, а потім такі оцінки узагальнюються в єдиний показник рейтингу моста в цілому із застосуванням важливості всіх його елементів або їх груп [47].

Дорожня служба впливає на стан мостів і величину витрат шляхом вибору певної послідовності в часі, характеру і об'єму ремонтних заходів – стратегії відновлення технічного стану мостів. Існує велика кількість варіантів таких стратегій, тому проблема вибору оптимального варіанту стратегії за одним або багатьма критеріями має першорядне значення.

Для формалізації обґрунтування стратегії відновлення технічного стану мостів, в першу чергу, потрібно класифікувати можливі заходи для уповільнення процесу деградації і підвищення надійності конструктивних елементи мостів.

Згідно з нормативними документами СОУ 42.1-37641918-105:2013 [56], ГБН Г.1-218-182:2011 [75], СОУ 45.2-00018112 - 026:2007 [79] роботи з експлуатаційного утримання та ремонтів стосовно штучних споруд класифікуються так:

– *експлуатаційне утримання штучних споруд* – комплекс заходів щодо технічного нагляду за штучними спорудами та їх утримання на автомобільних дорогах загального користування. Роботи з експлуатаційного утримання штучних споруд включають [56]: технічний нагляд за штучними спорудами для своєчасного виявлення та усунення дефектів, забезпечення роботи елементів споруд в різні періоди року, утримання їх в експлуатаційному стані згідно з технічними правилами, зимове утримання згідно з П-Г.1-218-118 [73], інженерно-технічні та аварійні роботи;

– *поточний дрібний ремонт мостів* – фарбування з видаленням продуктів корозії, зачищенням металу окремих елементів прогонових будов і нанесенням ґрунтовки; ремонт та заміна окремих тротуарних блоків, бортових каменів, огорожень та оглядових пристроїв [75];

– *поточний середній ремонт мостів* включає, але не виключно, підсилення, відновлення або заміну окремих елементів мостів тощо [75].

– *капітальний ремонт мостів* – комплексне відновлення споруди або приведення геометричних параметрів і технічних характеристик окремих елементів з врахуванням зростання інтенсивності руху та осьових навантажень у відповідність нормативним вимогам. Включає, але не виключно, підсилення, поширення мостів з доведенням їх габаритів та/або вантажопідйомності до нормативних тощо[75].

В зарубіжних дослідженнях наведеній класифікації відповідають такі [140, 139, 151, 94]:

– *Routine maintenance* – дії, що не змінюють конструкцію і функції елементу моста і не вимагають перекриття руху (очистка елементів мостів, зимове утримання тощо);

– *Repair* – роботи з ліквідації мілких дефектів, які, в тому числі, можуть бути виконані при частковому перекритті руху, наприклад, ремонт вибоїн мостового полотна, закладення тріщин тощо;

– *Rehabilitation* – відновлення (реабілітація) або, наприклад, *уширення* прогонової будови додатковими повздовжніми балками або стальними плитами при перекритті руху тощо;

– *Replacement* – повна заміна елементу моста, така як заміна залізобетонної прогонової будови сталлюю при перекритті руху тощо.

Згідно з NBI General Condition Ratings (GCRs) США для мостів, що знаходяться в експлуатації, загальні рейтинги стану використовуються для опису мостів в порівнянні зі станом «як новий». Інформація про стан моста використовується для визначення GCRs за числовою шкалою, яка змінюється від 0 (відмова моста) до 9 (відмінний стан), як описано в FHWA Coding Guide 5 [94, с. 25]. Для виділених станів застосовуються ремонтно-відновлювальні дії, наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Заходи в залежності від стану моста за [94, с. 25]

Код	Опис	Застосовуються дії
9	Чудовий стан	Превентивне утримання
8	Дуже добрий стан, ніяких проблем	
7	Добрий стан, деякі невеликі проблеми	
6	Задовільний (satisfactory) стан, структурні елементи мають невелику деградацію	Превентивне утримання та/або ремонт
5	Прийнятний (fair) стан, Усі головні структурні елементи стабільні, але може мати деякі незначні втрати перерізу, тріщини, відшаровування або промоїни	
4	Незадовільний (poor) стан, прогресуючі втрати перерізу, тріщини, відшаровування або промоїни	

3	Серйозний стан, втрати перерізу, пошкодження, відколи або промоїни серйозно вплинули на первинні структурні компоненти, можливі локальні пошкодження. можуть бути присутні втомні тріщини в сталевих елементах або поперечні тріщини в бетоні.	Відновлення або заміна
2	Критичний стан, прогресуюча деградація головних структурних елементів, наявність втомних тріщин в сталевих елементах або поперечних тріщини в бетоні або промоїни можуть впливати на несучу здатність опор і фундаментів. Можливо доведеться закрити міст, доки не будуть здійснені коригувальні дії.	Реконструкція або заміна моста
1	Неминуча відмова моста, значне погіршення або втрати поперечного перерізу критичних конструктивних елементів, вертикальні чи горизонтальні зміщення, що знижують стабільність конструкції. Міст закривається для руху, але коригувальні дії можуть підняти стан моста.	
0	Відмова (руйнування) моста.	

Роботи з експлуатаційного утримання, дрібного поточного ремонту, поточного середнього та капітального ремонтів по-різному впливають на експлуатаційний стан елементів моста і моста в цілому. Їх застосування залежить від стану елементів мостів і моста в цілому. Отже, необхідно встановити, при якому рівні деградації доцільно застосовувати той чи інший експлуатаційний захід.

Як видно з табл. 3.6, різні експлуатаційні заходи призначаються для різних експлуатаційних станів мостів.

В табл. 3.7 наведені інтервали застосування експлуатаційних заходів в залежності від рівня деградації, запропоновані в роботі [138]. Різні експлуатаційні заходи можуть бути альтернативними в одному і тому ж інтервалі рівня деградації елементу моста.

В табл. 3.8 наведені заходи згідно ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012.

Таблиця 3.7 – Застосування експлуатаційних заходів в залежності від рівня деградації за [138]

Рівень деградації	Експлуатаційні заходи
0.0 – 0.8	Експлуатаційне утримання (routine maintenance)
0.2 – 0.8	Дрібний ремонт (repair)
0.4 – 0.8	Відновлення (rehabilitation)
0.6 – 1.0	Заміна елементу (replace)

Таблиця 3.8 – Застосування експлуатаційних заходів в залежності від оціночної шкали рейтингу стану за ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [47]

Рейтинг	Експлуатаційні заходи
100 – 95	Обстеження та догляд
94 – 80	Обстеження, догляд та поточні ремонти без обмеження руху
79 – 60	Обстеження, скорочуються терміни між періодичними оглядами, виконуються поточні ремонти . За необхідності, обмежується швидкість руху
59 – 40	Ведуться обстеження за спеціальним графіком, виконується капітальний ремонт . Відповідно до дефектів конструкцій обмежується рух транспортних засобів за вагою, швидкістю та габаритними параметрами. За необхідності, розробляються спеціальні заходи із забезпечення безаварійної експлуатації моста
≤ 39	Ведеться постійний нагляд та контроль за виконанням обмежень руху з залученням спеціалізованої організації. Терміново вирішується питання про капітальний ремонт або реконструкцію споруди або про її закриття. Вживаються тимчасові заходи до запобігання аварії

Вважаючи на сказане, в цілях моделювання процесу підтримки і відновлення стану моста приймемо такі види заходів, які наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Запропоноване автором кодування альтернативних експлуатаційних заходів

Код	Назва експлуатаційного заходу
0	нічого не робити, крім спостереження та обслуговування руху
1	експлуатаційне утримання в повному обсязі
2	поточний дрібний ремонт + експлуатаційне утримання
3	поточний середній ремонт
4	капітальний ремонт
5	Реконструкція

Для розробки моделі приймається спрощення: тільки один з п'яти видів заходів виконується в поточний рік. Елементи моста поєднуються у сім наступних груп елементів: мостове полотно, прогонові будови, опори, фундаменти, регуляційні споруди, в'їзди на міст, русла.

Приймаючи до уваги застосування критеріїв оптимізації рішення щодо призначення видів заходів, які зводяться до *мінімізації* рівня деградації елементів мостів та *мінімізації* витрат на їх здійснення, рівень деградації D прийнято як безрозмірну величину, що приймає значення в інтервалі $[0,1]$. Нулю відповідає відсутність деградації, а одиниці – можлива аварія елементу моста.

З метою математичного моделювання таблицю 3.8 переформатуємо в новій системі координат, в якій рівень деградації $D \in [0,1]$. В табл. 3.10 наведена саме така класифікація станів. В результаті обстеження стан однорідної групи елементів моста відноситься до однієї з п'яти категорій експлуатаційного стану (табл. 3.9) з числовим показником рівня деградації (табл. 3.10).

Ремонти мостів підвищують надійність елементу моста i , тим самим, зменшують рівень деградації D . Отже, у відповідність кожному виду ремонту ставимо зменшення рівня деградації (вплив) I_m .

Таблиця 3.10 – Деградація елементів моста відносно експлуатаційних станів та надійності. *Джерело*: власна розробка

Стан	Рівень деградації (D), $D_{i,v} \leq D < D_{i,n}$	Надійність за першою групою граничних станів, $P_{i,v} \geq P > P_{i,n}$	Характеристика безпеки β (верхній рівень надійності)	Рейтинг стану
1	$0,00 \leq D < 0,05$	$0,999844 \geq P > 0,998363$	3,80	100 – 95
2	$0,05 \leq D < 0,20$	$0,998363 \geq P > 0,992461$	2,95	94 – 80
3	$0,20 \leq D < 0,40$	$0,992461 \geq P > 0,979771$	2,43	79 – 60
4	$0,40 \leq D < 0,60$	$0,979771 \geq P > 0,958351$	2,05	59 – 40
5	$0,60 \leq D < 1,00$	$0,958351 \geq P$	1,74	≤ 39

У таблиці 3.10 $P_{i,v}$; $P_{i,n}$ – відповідно верхня та нижня границі надійності i -го експлуатаційного стану. По аналогії, $D_{i,v} \leq D < D_{i,n}$.

У роботі [111] констатується, що у реальному світі деякі заходи відновлення технічного стану елементу моста не обов'язково роблять стан елемента таким, як новий. Передбачається, що деяка кількість елементів мосту не потребує ніякого поліпшення (q_1). Захист або незначний ремонт підвищить стан до 78% від початкового нового стану (q_2). Капітальний ремонт підвищить стан елемента до 89% від початкового нового стану (q_3). Нарешті, заміна або реконструкція (q_4) повернуть елемент до початкового стану «як новий» (100%). Для визначення індексу здоров'я елементу моста означені відсотки зважують по q .

Важливим є перехід від рівня деградації окремих елементів моста до числової оцінки – рейтингу моста в цілому. В роботі [34] стверджується, що формула сьогодні вже не відповідає вимогам коректного оцінювання експлуатаційного стану споруди в цілому. Ці обставини і були мотивацією для розробки нової формули рейтингової мережевої оцінки. Були висунуті наступні вимоги до вхідних даних нової формули рейтингу моста в цілому [34]: експлуатаційний стан групи елементів приймається в функції стану **найбільш слабого визначального елемента** в групі (прогонові будови, опори та опорні частини, фундаменти); рейтинг моста призначається не вище найнижчого стану одного з трьох визначальних елементів, що належать трьом згаданим групам.

Виходячи з цього, прогнозування зміни рейтингу моста в цілому можна звести до прогнозування зміни рівня деградації найбільш слабого визначального елемента і, використавши табл. 3.10, визначати рівень деградації або рейтинг моста в цілому.

При *проектуванні* поточного середнього та капітального ремонтів мостів або їх реконструкції *в проектних матеріалах* необхідно обчислювати рейтинг або рівень деградації моста в цілому на основі розрахунків вантажопідйомності та характеристики безпеки β в залежності від кількості відновлених або заміненіх елементів моста згідно п. 6.5 ДСТУ-Н [47]. Поступове накопичення таких розрахункових характеристик в базі даних АЕСУМ дозволить в

подальшому запропонувати надійні статистичні дані відносно значень величини впливу.

Дані табл. 3.11 відносно значень величини впливу отримані з досліджень авторів робіт [111, 121, 138, 146, 173]. Ці дані були адаптовані до моделі деградації, застосованої в дисертаційній роботі.

Метод ремонту елементу моста кожного року вибирається випадковим чином (методом Монте-Карло) у відповідності до експлуатаційного стану, як показано на рис. 3.9.

Модель деградації, таким чином, буде такою:

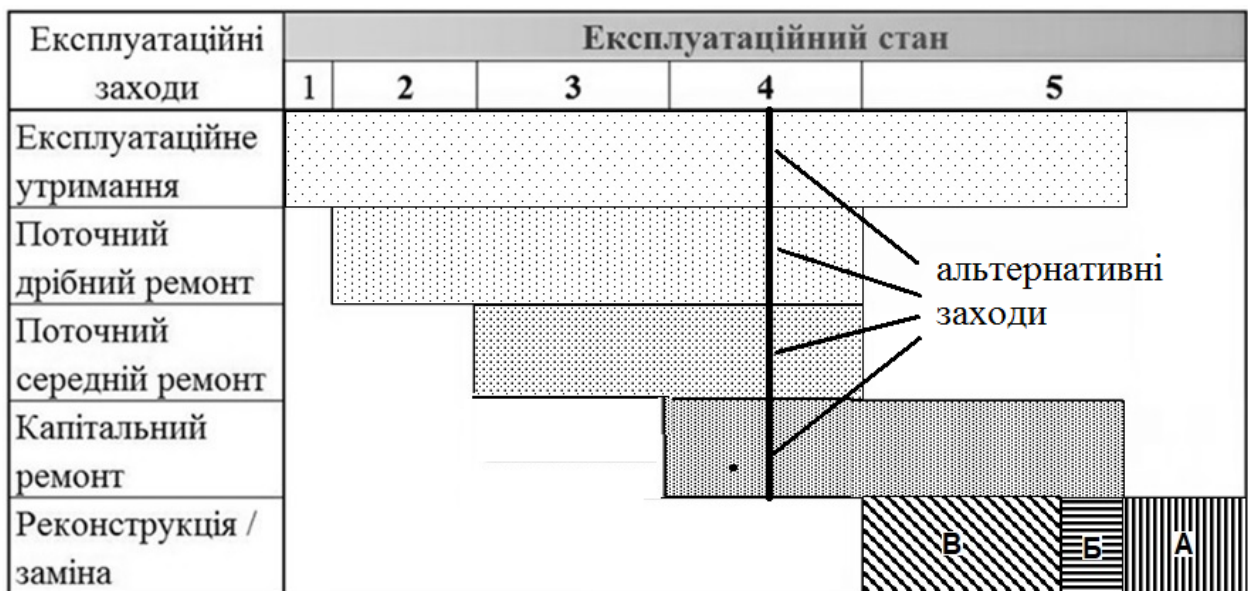
$$D(t) = D(t - 1) + \Delta D(t) - I_m(t), \quad (3.13)$$

де $D(t)$ – рівень деградації на кінець року t , $t \geq 1$;

$\Delta D(t)$ – збільшення рівня деградації за рік t , $t \geq 1$;

$D(t - 1)$ – рівень деградації на початок року t .

$I_m(t)$ – вплив ремонтного заходу m на зменшення рівня деградації в рік t .



А, Б, В – зони за критерієм доцільності

Рисунок 3.9 – Альтернативні види заходів. Джерело: власна розробка

Таблиця 3.11 – Вплив заходів на зменшення рівня деградації. Джерело: власна розробка

Код	Назва експлуатаційного заходу	Вплив
0	нічого не робити	0,000
1	експлуатаційне утримання	0,001
2	поточний дрібний ремонт + експлуатаційне утримання	0,005
3	поточний середній ремонт	0,400
4	капітальний ремонт	0,600
5	реконструкція	0,975

Значення $D(t)$ обчислюється таким чином: за відомим значенням показника інтенсивності відмов λ при $t = 1$ за формулою (2.7) розраховують надійність елементу P_t на кінець року t , по ній визначають номер i експлуатаційного стану та відповідний йому рівень деградації $D(t)$ з пропорції (рівень деградації збільшується, а надійність зменшується):

$$\frac{\Delta D(t)}{D_{i,n} - D_{i,v}} = \frac{P_{i,v} - P_t}{P_{i,v} - P_{i,n}}; \Delta D(t) = \frac{P_{i,v} - P_t}{P_{i,v} - P_{i,n}} (D_{i,n} - D_{i,v}), \quad (3.14)$$

де нижні індекси: v – верхнє, n – нижнє значення.

Вибір виду заходу здійснюється методом Монте-Карло з притаманній кожному стану множини альтернативних заходів за рівномірним законом розподілу їх ймовірності з урахуванням бюджетних обмежень.

Додаткові обмеження в моделі полягають в тому, що:

Умова 1. Капітальний ремонт елементу моста не допускається, якщо він знаходиться в першому, другому або третьому експлуатаційному стані (крім випадків реконструкції автомобільної дороги, де розміщений міст).

Умова 2. Поточний середній ремонт не допускається для першого, другого і п'ятого експлуатаційного станів.

Умова 3. Реконструкція або заміна новим мостом допускається тільки для п'ятого стану, крім випадку встановлення технічних параметрів моста

відповідно існуючій (або вищій за неї) категорії дороги (підмостовий габарит, ширина моста, підвищення вантажопідйомності).

Умова 4. Роботи по середньому і капітальному ремонтам та реконструкції здійснюються протягом одного року.

3.4 Математичні моделі оптимізації параметрів процесу відновлення стану мостів на мережі автомобільних доріг

Будемо розглядати задачу оптимізації параметрів процесу відновлення технічного стану мостів на мережі автомобільних доріг. Обґрунтування оптимальної стратегії ремонтів елементів мостів являє собою задачу дискретної оптимізації комбінаторного типу. В даному випадку, при наявності бюджетних обмежень, – задачу про одновірний ранець (knapsack problem). Кожному i -му мосту в рік t для включення в бюджет його відновлювального заходу j поставлено індекс ij , де i приймає значення від 1 до кількості мостів на мережі доріг N , а j приймає значення номеру заходу, притаманному певному експлуатаційному стану. Максимальна допустима вартість, яку здатен «витримати» бюджет в рік t , дорівнює C_t .

Сформулюємо математичну модель оптимізації експлуатаційного стану мостів на мережі автомобільних доріг в умовах обмеженого фінансування як задачу математичного програмування. Розглянемо дві цільові функції (критерії оптимізації):

Цільова функція Z_S – середньорічний за період T середньозважений за площею та пріоритетам мостів рівень деградації: мінімізувати

$$Z_S = \frac{\sum_{i=1}^N \left(S_i \cdot \left[\sum_{t=1}^T [\Pi_{it} \cdot (D_{it-1} + \Delta D_{it} - I_{it}(x_{it}))] \right] \right)}{\sum_{i=1}^N \left(S_i \cdot \sum_{t=1}^T \Pi_{it} \right)} \Rightarrow \min, \quad (3.15)$$

де Z_S – середній за період T зважений за площею і важливістю мостів рівень деградації мостів на кінець року t ;

S_i – площа i -го моста, m^2 ;

$\Delta D_{i,t}$ – прирощення рівня деградації i -го моста за рік t ;

$D_{i,t}$ – рівень деградації i -го моста на кінець t -го року;

$x_{i,t}$ – змінна рішення, яка приймає значення з множини видів робіт, $X_{i,t} \in \{0, \dots, 5\}$;

$P_{i,t}$ – пріоритет i -го моста на початок року t ;

$I_{i,t}(x_{i,t})$ – вплив ремонтного заходу $x_{i,t}$ на зменшення рівня деградації i -го моста в рік t .

При обмеженнях:

1) максимального рівня деградації

$$D_{t,i} \leq D_{\max}, \forall D_{t,i}, \quad (3.16)$$

де $D_{\max}$ – максимально допустимий рівень деградації. Це обмеження може порушуватись при недостатньому рівні фінансування;

2) бюджетні обмеження вартості ремонту та утримання всіх мостів мережі в рік t

$$C(t) = \sum_{i=1}^N C_{t,i,m} \leq B(t), \forall t, \quad (3.17)$$

де $C_{t,i,m}$ – вартість заходу m для i -го моста у рік t , тис. грн.;

$B(t)$ – бюджет у рік t , тис. грн. Це обмеження не може порушуватись.

3) обмеження максимально допустимого рівня деградації, яке не може порушуватись

$$D_{\max} < D_{гд}, \quad (3.18)$$

де $D_{гд}$ – гранично допустимий рівень деградації.

В першому, достатньому для практичних потреб, наближенні гранично допустимий рівень деградації $D_{гд}$ можна прийняти:

$$D_{гд} = 1. \quad (3.19)$$

Оптимізацію за критерієм вартості Z_C ремонтних заходів на стратегічний період часу T виконаємо за *методом функції штрафу* (виміряється в тисячах гривень). Відповідно, функцію цілі запишемо у вигляді: мінімізувати

$$Z_C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{i,t}}{(1+r)^t} \cdot PF_{i,t} \right) \Rightarrow \min, \quad (3.20)$$

де $PF_{i,t}$ – штрафна функція, яка визначається за формулою:

$$PF_{i,t} = \left[1 + \Pi_{i,t} \cdot \max \left(\frac{(D_{i,t-1} + \Delta D_{i,t} - I_{i,t}(x_{i,t})) - D_{\max}}{D_{\max}}, 0 \right) \right], \quad (3.21)$$

де $C_{i,t}$ – вартість ремонту та утримання моста i в рік t , тис. грн.;

r – ставка дисконту, скоригована з урахуванням темпу інфляції;

$\Pi_{i,t}$ – пріоритет i -го моста за формулою (3.10) на початок року t ;

$I_{i,t}(x_{i,t})$ – вплив ремонтного заходу $x_{i,t}$ на зменшення рівня деградації i -го моста в рік t .

Отже, цільова функція – це приведена вартість ремонтів та утримання мостів, скоригована на коефіцієнт штрафів. При перевищенні рівня деградації заданої максимально допустимої величини значення функції буде зростати, що слугує бар'єром для невиправданого зменшення витрат на ремонти мостів. Через штрафи враховується досягнутий стан мостів, а кращий стан означає мінімізацію транспортних витрат і максимізацію зовнішніх позитивних ефектів.

Максимально допустимий рівень деградації $D_{\max}$ задається виходячи з економічного обґрунтування, проте він не може бути гіршим ніж гранично допустимий з вимог безпеки руху і збереження елементу.

Слід зважити на те, що в першу чергу, в рік ініціювання програми відновлення стану мостів може бути отримана проектно-кошторисна документація на мости, які вимагають негайного ремонту, тому $C_{t,i,m}$ – вартість заходу m з ремонту i -го моста у рік t вибирається зі зведеного кошторисного

розрахунку. В тому випадку, коли проектно-кошторисна документація відсутня, потрібно скористатись укрупненими показниками вартості робіт.

3.5 Розв’язання задачі відновлення технічного стану мостів на основі пріоритезації

Найбільш простим методом розв’язання задачі (3.15) – (3.21) є метод, в основі якого використовується упорядкування мостів за їх пріоритетом. Проте, наголос тільки на заміну дефектних мостів (poor) з ігноруванням при цьому можливості їх збереження в доброму (good) або задовільному (fair) стані буде неефективним і витратним в довгостроковій перспективі. Ухвалення підходу означеного методу до управління станом мостів також може дати негативні результати, тому що дозволяє мостам в хорошому стані перейти в дефектні категорії, які, як правило, пов'язані з більш високими витратами та іншими проблемами [178, с. 44] (рис. 3.10).

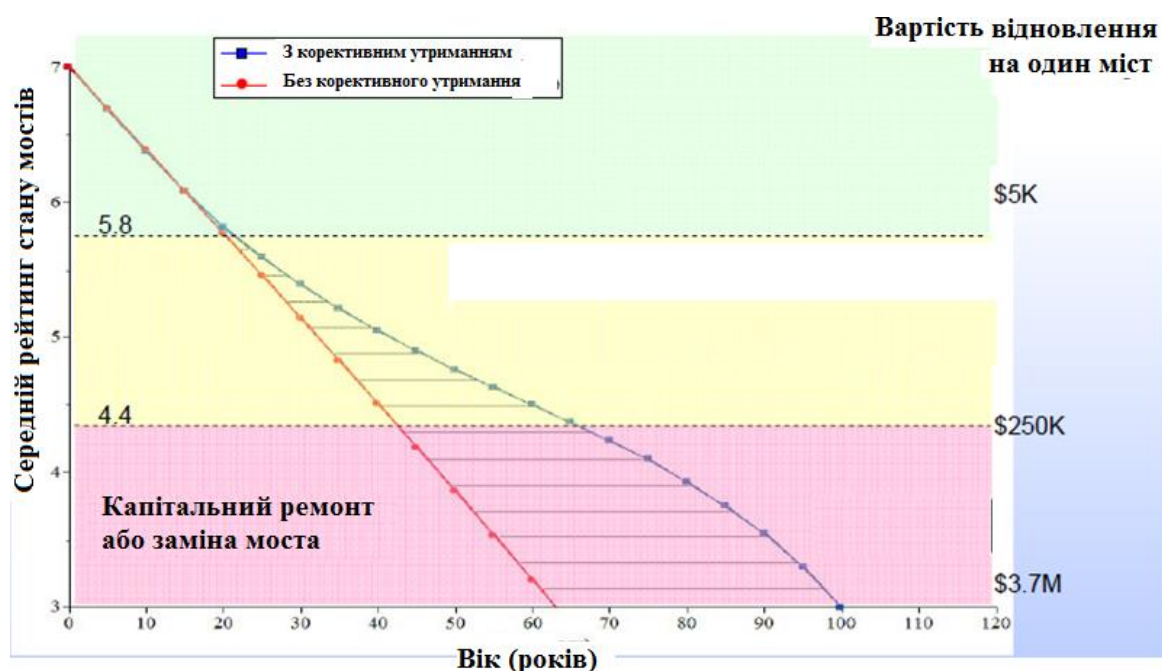


Рисунок 3.10 – Важливість своєчасного утримання мостів (тут К – тисячі, М – мільйони). Джерело [178]: адаптовано автором

Пріоритет (важливість) моста повинен відображувати його значимість для функціонування мережі доріг [89, 95, 111]. Він може бути визначений за формулою (3.5).

В роботі [91] представлено три методи, що вирішують схожу проблему, які можна адаптувати до формування процесу відновлення технічного стану мостів:

- алгоритм методу гілок і границь;
- «наївні» евристичні алгоритми, засновані на принципі максимального чистого вкладу;
- «жадібні» евристичні алгоритми, засновані на максимізації граничного чистого внеску.

Алгоритм гілок і границь починається з можливої порожньої множини обраних мостів, потім розробляється бінарне дерево. Кожна частина рівня відноситься до конкретної дії. На кожному вузлі на рівні $a - 1$ двійкового дерева, алгоритм ділить простір рішень на дві підмножини: розділ, який включає в себе рішення вибрати міст ($X = 1$), і розділ, який включає в себе рішення не вибирати міст ($X = 0$).

Розділи, які порушують обмеження, виключаються. Розмірність $O(2^A)$ свідчить про обчислювальну складність методу гілок і границь, мотивуючи вживання ефективних евристик (A – добуток кількості мостів мережі доріг, кількості років та кількості варіантів експлуатаційних заходів, O – обчислювальна складність).

«Наївна евристика» заснована на концепції вибору всіх мостів, які можуть індивідуально привести до чистого поліпшення значення цільової функції. Її обчислювальна складність обмежена $O(A)$. У деяких випадках наївна евристика може бути не вигідна і може вимагати додаткових коригувань.

Жадібний алгоритм починається з пустої множини вибраних мостів і циклічно оцінює включення кожного з ще не вибраних мостів, що задовольняють обмеженням. Вибирається міст, який призводить до найбільшого позитивного поліпшення цільової функції. Процес зупиняється,

коли жоден з решти мостів не може поліпшити цільову функцію, або всі мости вже були вибрані. Обчислювальна складність жадібної евристики обмежена $O(A^3)$.

Визначення параметрів процесу відновлення стану мостів далі розглядається на прикладі розв'язання задачі на основі пріоритезації методом «наївної евристики».

Для цього потрібна розробка окремих процедур або функцій, які будуть використані не тільки в такому розв'язку, але й у більш складних методах.

Після останнього оцінювання технічного стану моста до року початку прогнозного періоду може пройти певна кількість років, тому була розроблена процедура прогнозу стану елементу моста, наведена в табл. 3.12.

Наступним кроком є розробка функції визначення індексу важливості моста, доповнений індексом пропускної здатності КЗ, який обумовлює необхідність приведення вантажопідйомності, підмостового габариту і ширини моста у відповідність категорії дороги розміщення моста та дороги під шляхопроводом. Діаграма цієї функції наведений в табл. 3.13. Функція призначення виду ремонтно-відновлювального заходу наведена в табл. 3.14.

Таблиця 3.12 – Діаграма процедури визначення прогнозованого стану елементу моста (ПВПС). Джерело: власна розробка

Крок	Оператори алгоритму
1	Задати верхні та нижні значення надійності за експлуатаційними станами: $P[1] = 0.999844$; $P[2] = 0.998363$; $P[3] = 0.992461$; $P[4] = 0.979771$; $P[5] = 0.958351$ $P_{low}[1] = 0.998364$; $P_{low}[2] = 0.992462$; $P_{low}[3] = 0.979772$; $P_{low}[4] = 0.958352$; $P_{low}[5] = 0.950000$
2	Задати верхні та нижні значення рейтингу за експлуатаційними станами: $E[1] = 100$; $E[2] = 94$; $E[3] = 79$; $E[4] = 59$; $E[5] = 39$ $E_{low}[1] = 95$; $E_{low}[2] = 80$; $E_{low}[3] = 60$; $E_{low}[4] = 40$; $E_{low}[5] = 0$
3	Знайти запис останнього експертного визначення стану моста по матеріалам проведених обстежень
4	Визначити рік останнього обстеження моста T_0 .

5	Визначити рік будівництва (реконструкції) моста T_6 для розрахунку віку на час обстеження та час визначення прогнозованого стану					
	була реконструкція ?					
	Так		Ні			
	T_p = рік реконструкції		T_6 = рік будівництва			
6	Визначити розрахунковий вік моста на час обстеження: $t_0 = T_0 - T_6$					
7	Вибрати дані по рейтингу моста R_0 – розрахований та затверджений експертами по даним останнього обстеження.					
8	По рейтингу моста на момент обстеження розрахувати надійність елемента P_0					
	Визначити стан моста st_0 на час обстеження.					
	якщо рейтинг R_0					
	≥ 95	≥ 80	≥ 60	≥ 40	Інакше	
	$st_0 = 1$	$st_0 = 2$	$st_0 = 3$	$st_0 = 4$	$st_0 = 5$	
	$P_0 = \frac{P(st_0) - P_{low}(st_0)}{E(st_0) - E_{low}(st_0)} \cdot [E_0 - E_{low}(st_0)] + P_{low}(st_0).$					
9	Визначити інтенсивність відмов λ					
	$t_0 \geq 10$					
	так				ні	
	Задати робочу змінну X ($X = \lambda \cdot t_0$)				Для нових мостів задати термін служби 100 років $\lambda = 0.022$	
	Задати значення $X = 0.0$					
	$X = X + 0.0001$					
	Розрахувати розрахункову надійність $P_{calc} = 0.008333 \cdot X^5 \cdot e^{-X}$					
	Повторити поки $P_{calc} > P_0$					
$\lambda = X/t_0$						
10	Задати рік прогнозування стану моста T_{Π}					
11	Розрахувати вік моста на рік прогнозування: $t_{\Pi} = T_{\Pi} - T_6$					
12	Розрахувати прогнозовану надійність: $P_{\Pi} = 0.008333 \cdot (\lambda t)^5 \cdot (e^{-\lambda t}).$					

13	По надійності визначити прогнозований стан елемента моста st_{Π}				
	якщо надійність P_{Π}				
	$> P[2]$	$> P[3]$	$> P[4]$	$> P[5]$	Інакше
	$st_{\Pi} = 1$	$st_{\Pi} = 2$	$st_{\Pi} = 3$	$st_{\Pi} = 4$	$st_{\Pi} = 5$
14	Розраховувати прогнозований рейтинг елементу моста за формулою:				
	$E_n = \frac{E(st_n) - E_{low}(st_n)}{P(st_n) - P_{low}(st_n)} \cdot [P_n - P_{low}(st_n)] + E_{low}(st_n).$				

Таблиця 3.13 – Діаграма функції визначення індексу важливості моста КВ (ФІКВ). Джерело: власна розробка.

Оператори алгоритму	
Визначити середньорічний темп зростання середньодобової інтенсивності руху	
	$q = \left[\frac{B}{A} \right]^{(1/(T_F - T_0 + 1))} - 1, \%$
Визначити частку вантажних автомобілів у загальній середньодобовій інтенсивності руху N_B , авт./добу	
Визначити індекс середньодобової загальної інтенсивності руху N , авт./добу	$V_A = 2 \cdot (0.0707 \cdot \ln(N)) - 0.2534$
Визначити індекс майбутньої середньодобової інтенсивності руху автомобілів N_M , авт./добу	$V_B = 2 \cdot (0.0707 \cdot \ln(N_M)) - 0.2534$
Визначити індекс середньодобової інтенсивності руху N_C вантажних автомобілів	$V_C = 0.071397 \cdot N_B^{0.25978} - 0.2534$

Визначити індекс фактору впливу об'їзду моста при його закритті або при відверненні частини транспортного потоку на об'їзний маршрут $V_D = 0.0951 \cdot L + 0.1353$
Визначити коефіцієнт важливості моста KB: $KB = 0.30V_A + 0.10V_B + 0.15V_C + 0.20V_D + 0.05V_E + 0.20V_F.$ $V_E = 1$ для мостів на дорогах державного значення, інакше 0; $V_F = 1$ для мостів транспортного коридору, інакше 0

Таблиця 3.14 – Діаграма функції вибору та перевірки здійсненності ремонтно-відновлювального заходу (ФВПЗ) і-го моста в t-й рік. Джерело: власна розробка

Крок	Оператори	
1	Визначити рівень деградації $D_i(t)$ і-го моста на початок t-го року:	
	$D_i(t) = D_i(t - 1) + \Delta D_i(t) - I_i(t)$	
2	Визначити експлуатаційний стан на початок року S_i	
3	Встановити вид ремонтно-відновлювального заходу	
	3.1	Формування п'яти інтервалів рівнів деградації та відповідних ним заходів для вибору одного заходу: – стан 1 – тільки утримання (n = 1 варіант); – стан 2 – тільки утримання і поточний дрібний ремонт (n = 2 варіанта); – стан 3 – утримання + поточний дрібний ремонт + поточний середній ремонт + капітальний ремонт при невідповідності технічного рівня (ширина моста, підмостовий габарит, вантажопідйомність) категорії дороги (n = 4 варіанта); – стан 4 – всі види заходів (n = 5 варіантів); – стан 5 – капітальний ремонт + реконструкція (n = 2 варіанта).
	3.2	Методом Монте-Карло для даного експлуатаційного стану S_i визначити випадковий номер $m = \text{Random}(n)$ варіанту ремонтно-відновлювального заходу

4	Перевірити здійсненність заходу при обмеженому фінансуванні							
	4.1	Визначити вартість m-го заходу на 1 м ² моста c _{од} , грн.						
	4.2	Розрахувати вартість заходу C _i = c _{од} · L _i · W _i , де L _i – довжина моста, м; W _i – ширина моста, м						
	4.3	Якщо $C(t) = (\sum_{i=1}^N C_{t,i,m} + C_i) > B(t)$, та m > 0 нездійснений: m = m – 1, перейти до кроку 4.1 інакше здійснений: <table><tr><td>a)</td><td>Зменшити залишок бюджету B(t)= B(t) – C_i</td></tr><tr><td>b)</td><td>Розрахувати рівень деградації на кінець року D_i(t): $D_i(t) = D_i(t - 1) + \Delta D_i(t) - I_i(t),$</td></tr><tr><td>c)</td><td>Накопичити сумарні витрати в рік t: $C(t) = C(t) + C_i$</td></tr></table>	a)	Зменшити залишок бюджету B(t)= B(t) – C _i	b)	Розрахувати рівень деградації на кінець року D _i (t): $D_i(t) = D_i(t - 1) + \Delta D_i(t) - I_i(t),$	c)	Накопичити сумарні витрати в рік t: $C(t) = C(t) + C_i$
	a)	Зменшити залишок бюджету B(t)= B(t) – C _i						
b)	Розрахувати рівень деградації на кінець року D _i (t): $D_i(t) = D_i(t - 1) + \Delta D_i(t) - I_i(t),$							
c)	Накопичити сумарні витрати в рік t: $C(t) = C(t) + C_i$							

Таблиця 3.15 – Діаграма процедури визначення пріоритету моста (ПВПМ). Джерело: власна розробка

Якщо $t = 1$, встановити рівень деградації на початок прогнозного періоду за процедурою ПВПС
Встановити індекс важливості KB i-го моста за функцією ФІКВ: $KB_i = 0.30 \cdot V_A + 0.10 \cdot V_B + 0.15 \cdot V_C + 0.20 \cdot V_D + 0.05 \cdot V_E + 0.20 \cdot V_F$
Встановити коефіцієнт пропускної здатності споруди КЗ: ЗВ або ПГ, або ШМ приймаються рівними 1.0, якщо є невідповідність, інакше 0.00. $KZ = 0.35 \cdot ЗВ + 0.50 \cdot ПГ + 0.15 \cdot ШМ$
Встановити індекс рейтингу стану (РС) i-го моста: $PC_i(t) = 100 - \frac{20 \cdot [5 - \sum_{k=1}^{k=7} (\alpha_k \cdot D_{i,k}(t))] + 20}{100}.$
Функцією ФВПЗ розрахувати рівень деградації на кінець року $D_i(t)$: $D_i(t) = D_i(t-1) + \Delta D_i(t) - I_i(t),$
Встановити коефіцієнт ефективності KE:
Визначити пріоритет моста: $\Pi = 0.45 KB + 0.24 PC + 0.10 KZ + 0.21 KE$

3.6 Розв'язання задачі відновлення технічного стану мостів з застосуванням механізму оптимізації

В останні два десятиріччя в оптимізації стратегії ремонтів мостів і їх окремих елементів набули методи еволюційного моделювання, а саме генетичні алгоритми (далі – ГА) [1, 13, 26, 77, 100, 179, 138, 140, 144, 151]. Еволюційне моделювання загалом включає три основних різновиди моделей: генетичні алгоритми, еволюційне програмування і еволюційні стратегії, які прийнято узагальнювати під назвою еволюційних алгоритмів [77, с. 206]. З точки зору класифікації математичних методів оптимізації еволюційний метод – це евристичний метод пошуку оптимальних рішень з досить м'якими вимогами на вид цільових функцій та обмежень на значення їх аргументів. Укрупнена схема методу наведена на рис. 3.11

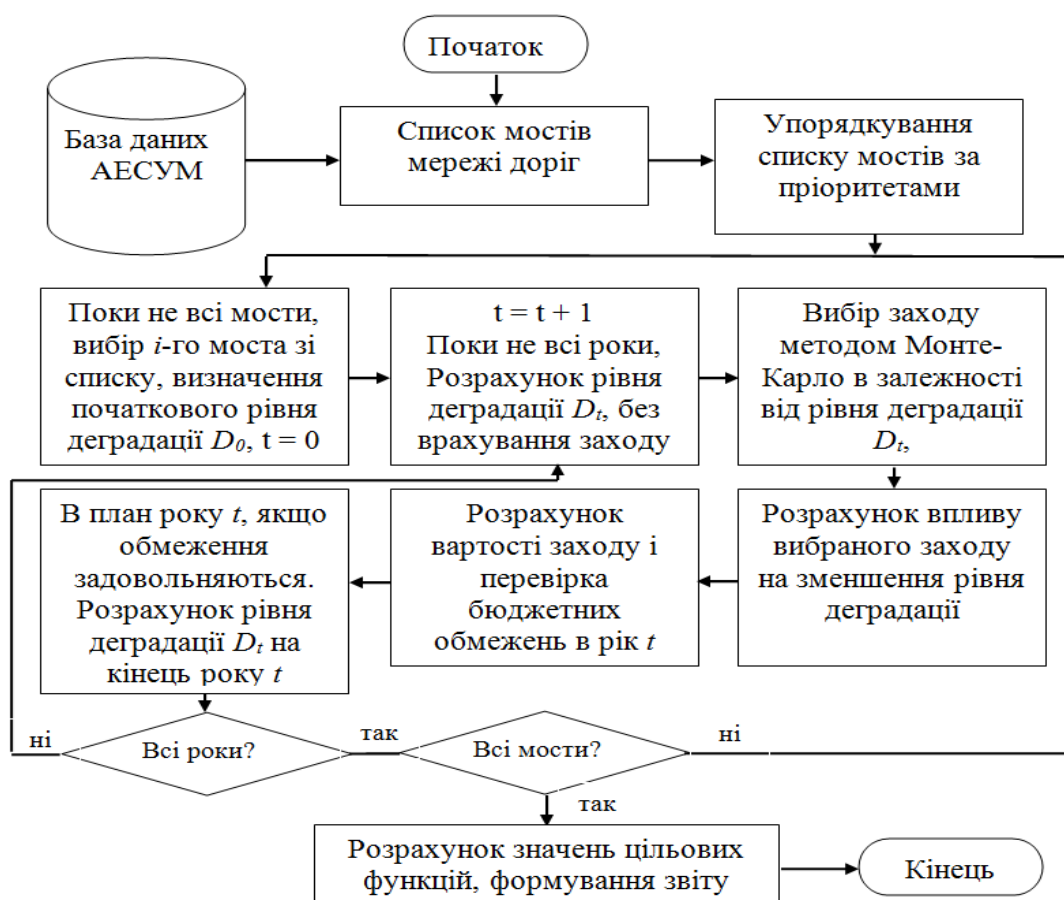


Рисунок 3.11 – Схема укрупненого алгоритму розв'язання задачі за пріоритетами. Джерело: власна розробка

Таблиця 3.16 – Діаграма процедури формування рішення (ПФР).

Джерело: власна розробка

Вибрати з бази даних АЕСУМ необхідні дані по всім N мостам мережі.
Встановити прогнозний період T років
Встановити порядковий номер моста: $i = 1, i = 1, \dots, N$
Встановити порядковий номер року: $t = 1, t = 1, \dots, T$
Поки $t \leq T$ цикл 1
5.1 Поки $i \leq N$ цикл 1.1 5.1.1 Якщо $t = 1$, встановити рівень деградації на початок прогнозного періоду за процедурою ПВПС 5.1.2 Встановити індекс важливості KB і-го моста за функцією ФІКВ: $KB_i = 0.30 \cdot V_A + 0.10 \cdot V_B + 0.15 \cdot V_C + 0.20 \cdot V_D + 0.05 \cdot V_E + 0.20 \cdot V_F$ 5.1.3 Встановити індекс рейтингу стану (РС) і-го моста: $PC_i(t) = 100 - \frac{20 \cdot [5 - \sum_{k=1}^{k=7} (\alpha_k \cdot D_{i,k}(t))]}{100}.$ 5.1.4 Встановити коефіцієнт пропускної здатності споруди КЗ: ЗВ або ПГ, або ШМ приймаються рівними 1.0, якщо є невідповідність, інакше 0.00. $KЗ = 0.35 \cdot ЗВ + 0.50 \cdot ПГ + 0.15 \cdot ШМ$ 5.1.5 Функцією ФВПЗ розрахувати рівень деградації на кінець року $D_i(t) = D_i(t-1) + \Delta D_i(t) - I_i(t)$ 5.1.6 Встановити коефіцієнт ефективності КЕ: 5.1.7 Перерахувати пріоритет моста процедурою ПВПМ Кінець циклу по мостам
Кінець циклу по рокам

В академічних дослідженнях термінологія і сутність понять еволюційного моделювання частково прийшли з біологічних наук, наприклад, такі терміни, як «популяція», «ген», «хромосома», «селекція», «рекомбінація (кросовер, схрещування)», «мутація» тощо [1, 77, 82, 84, 116]. В інженерному використанні ці терміни – незвичні, тому доцільно дати їм більш технічне тлумачення, пояснивши їх зміст і порядок застосування.

Як і багато інших методів розв'язання оптимізаційних задач, еволюційний метод здійснюється ітеративно, послідовністю наближень до оптимального значення заданого критерію. На відміну від інших ітераційних алгоритмів, де процес пошуку починається з однієї точки (рішення) у просторі допустимих рішень, пошук оптимального рішення еволюційним методом починається з формування певної множини можливих рішень, яка в еволюційній теорії називається популяцією, а в інженерній практиці її доцільно назвати початковою множиною можливих рішень.

В розробленій в дисертації процедурі оптимізації параметрів відновлювального процесу технічного стану мостів поняттю однієї хромосоми відповідає поняття одного рішення [26]. Відомо, що хромосома складається з генів, які визначають генотип особини в популяції. Рішення в пропонованій процедурі складається з призначеного для кожного моста в кожний рік виду відновлювального заходу, який має код згідно табл. 3.9:

Кожне можливе рішення являє собою множину значень шуканих параметрів – кодів видів ремонтів мостів у прогностичному періоді розміром R_{ch} :

$$R_{ch} = N_{br} \cdot T_{pl}, \quad (3.22)$$

де N_{br} – кількість мостів, що розглядаються в прогностичному періоді, штук;

T_{pl} – тривалість прогностичного періоду, років.

Графічно множину рішень – популяцію можна відобразити, як показано на рис. 3.12. Кожна клітина – елемент рішення (або ген) містить в собі код виду ремонту моста $\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$. Ці значення не можуть бути довільними. Вони обумовлюються процесом деградації кожного моста, отже залежать від рівня деградації, фінансової спроможності здійснення вибраного виду ремонту.

З елементом рішення – геном пов'язана деяка структура даних, яка необхідна для реалізації правил призначення виду ремонту конкретного моста у конкретний рік періоду. Це множина даних про міст і його стан, а також множина даних про ефективність і вартість різних видів ремонтів мостів та

розмір щорічних бюджетних асигнувань, виділених для ремонтів та утримання мостів.

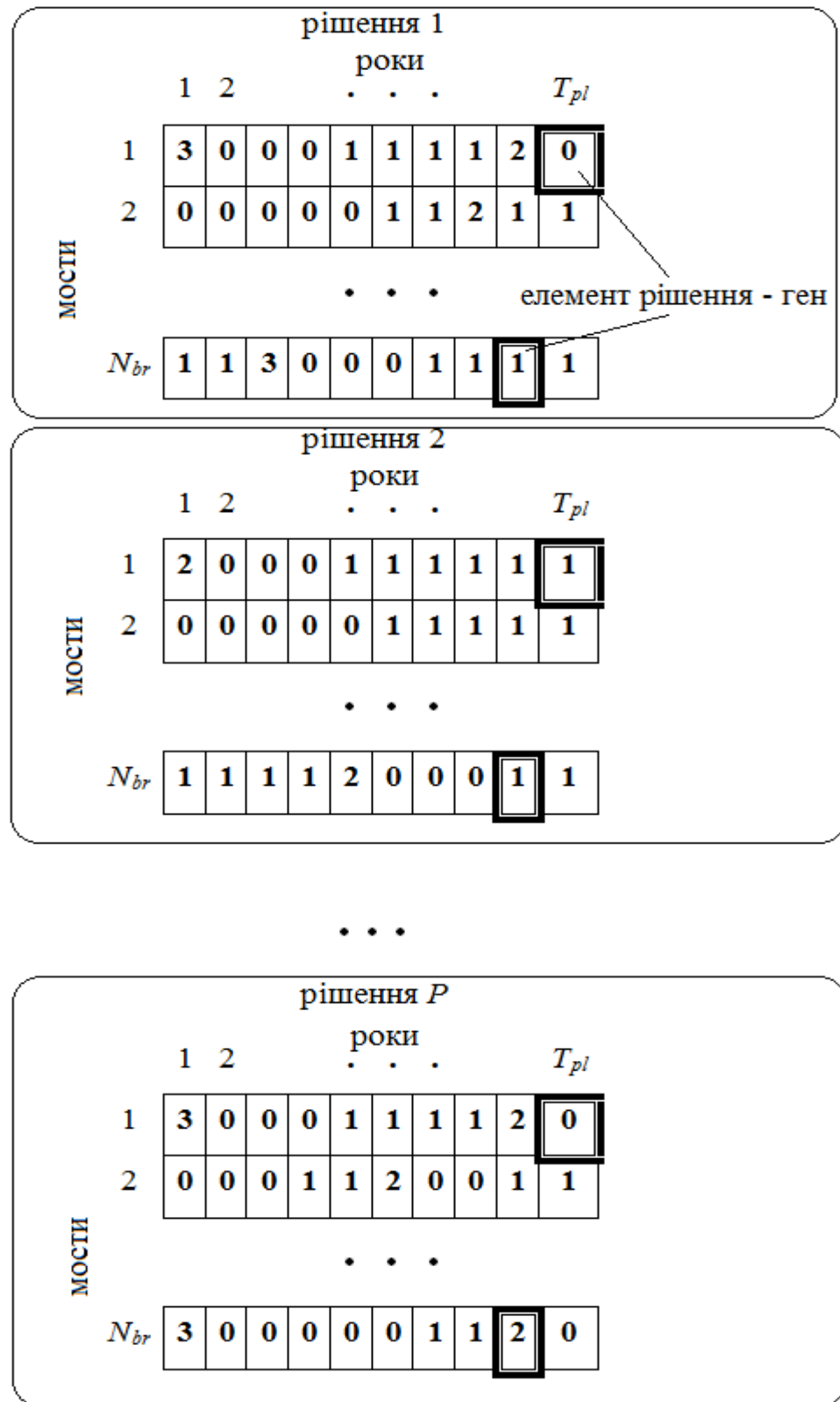


Рисунок 3.12 – Множина рішень розміром P . Джерело: власна розробка

Стан моста змінюється по роках прогнозного (модельного) періоду T_{pl} під впливом процесу деградації і виконання ремонтів. Кожному мосту і окремим його елементам притаманна власна швидкість зміни стану (параметр інтенсивності відмов λ), час їх послідовного перебування в тому чи іншому експлуатаційному стані, які визначаються розв'язанням задачі визначення часу переходу елементів моста з одного експлуатаційного стану до іншого, нижчого рівня, згідно [8, 68]. Згідно [47], вихідними даними для визначення залишкового ресурсу елементу моста є його надійність P_i та час, що пройшов від початку експлуатації до стану i , який визначається часом t_i . Ці дані отримуються на підставі оглядів і обстежень, перевірочних розрахунків вантажопідйомності, обчислення реальної характеристики безпеки β та класифікації експлуатаційних станів.

Від розміру початкової множини рішень залежить ефективність пошуку оптимального рішення, тому що вона породжує різноманіття варіантів рішення. Проте, збільшення розміру множини рішень поступово втрачає свою ефективність, тому що кількість можливих рішень обмежена умовами задачі.

Призначення виду ремонту здійснюється виходячи з поточного стану моста і рівня щорічного бюджетного фінансування, причому методом Монте-Карло здійснюється вибір виду дії у тих випадках, коли для одного і того ж стану існують конкуруючі альтернативні варіанти. Ясно, що ці види дій розрізняються за вартістю і впливом на експлуатаційний стан моста.

Центральна ідея еволюційної оптимізації, застосованої в дисертації, полягає в тому, що з початкової множини можливих рішень вибираються у циклі по два рішення (так званий турнірний відбір), з яких за допомогою спеціальних операторів шляхом обміну виділених певним чином однакових для вибраної пари рішень частин формується нова пара рішень, що наслідує одну частину елементів рішення з першого рішення, а другу частину – з другого рішення і навпаки. Цей процес називається рекомбінацією рішень або, якщо використовувати термінологію еволюційного методу, – розділенням хромосом і

кросовером або схрещуванням. Такий процес здійснюється відносно множини можливих рішень із заданою ймовірністю.

Нами пропонується таке *правило* розділення рішень. Точки розділення в множині рішень завжди робляться *між двома суміжними мостами* (рис. 3.12), тому що всіляке розділення двох рішень у середині окремого моста призводить до несумісності кривих деградації моста в прогностичному періоді для різних частин рішення для даного моста.

Окрім того, значення частини елементів знов отриманої множини можливих рішень можна варіювати, якщо для даного стану моста існує можливість застосування альтернативних варіантів дій. Вибір дії здійснюється методом Монте-Карло випадковим чином. В термінології еволюційних методів цей процес називається мутацією.

Процес поступового покращення множини можливих рішень здійснюється або задану кількість разів – генерацій (епох, поколінь), або при виявленні збіжності результатів розрахунку цільової функції з заданою точністю (коли наступні наближення не змінюють суттєво величину цільової функції – функції пристосованості).

Застосовується також елітизм. Він означає, що найкраще рішення, отримане в черговому наближенні, не втрачається, а переходить в множину рішень наступного наближення.

На основі наведеного підходу для застосування в АЕСУМ була створена процедура (табл. 3.15) і відповідний їй програмний модуль [4, 13], який реалізує еволюційний метод розв’язання задачі на основі вітчизняної моделі деградації елементів мостів [47].

Параметри рішення складаються зі змінних задачі, які задають значення цільової функції, що встановлює напрям пошуку в процесі розв’язання задачі. Змінні рішення описують послідовність ремонту мостів мережі доріг. Вони містять інформацію про час і вид ремонту, який повинен виконуватись на кожному мосту, як показано на рис. 3.10.

Позиція моста в рішенні залишається постійною при виконанні всіх операторів алгоритму. Схема еволюційного циклу наведено на рис. 3.13.

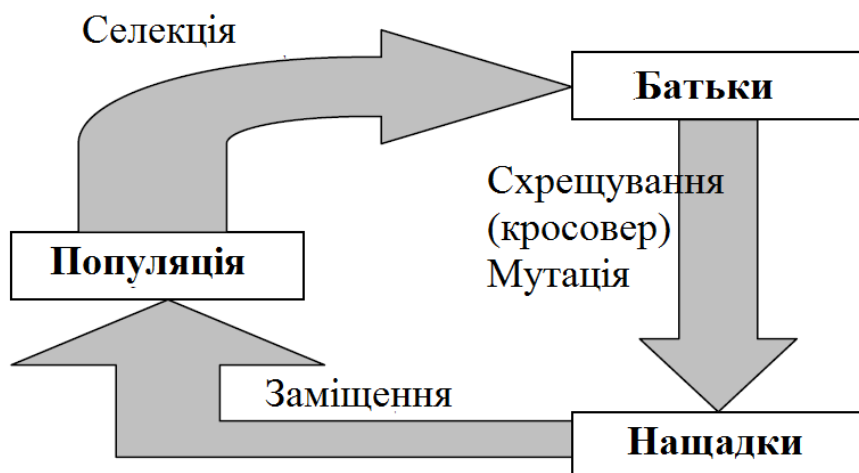


Рисунок 3.13 –
Еволюційний цикл.
Джерело: [84, с.
209]

В якості алгоритму багатокритеріальної оптимізації стратегії ремонтів в дисертаційній роботі вибраний алгоритм VEGA [164] (рис. 3.14). В процесі направленого відбору ідентифікуються недомінуємі рішення у множині рішень. Такий підхід забезпечує виживання кращих рішень відносно кожного критерію і одночасно підвищує ймовірність відбору рішень, які є кращими у середньому по двом критеріям. Визначення недомінованих рішень, які належать фронту Парето, здійснюється спеціальним алгоритмом, сутність якого наведена на рис.3.14.

На рис. 3.15. видно, що точка А домінована точками, що лежать у виділеному прямокутнику з вершиною в точці А, а точка В – недомінована, тому що у виділеному прямокутнику з вершиною в точці В відсутні домінуючі її рішення.

Процедура пошуку оптимальної стратегії експлуатації мостів наведена в табл. 3.15. Вихідні дані отримуються з бази даних АЕСУМ, основні параметри розрахунку (кількість рішень в популяції, кількість генерацій, ймовірності кросоверу і мутації, включення обмежень, режим розрахунку тощо) задаються користувачем за допомогою розробленого інтерфейсу.



Рисунок 3.14 – Векторний вибір рішень. Джерело: [102, с. 31]

Важливим компонентом програмного модуля є функція призначення виду ремонту або утримання (заходу) для кожного моста в кожний рік виконання програми. Цей вибір здійснюється методом Монте-Карло в залежності від рівня деградації моста або його елемента, який має місце на початок року прогнозного періоду, який розглядається. Вибір здійснюється за рівномірним законом розподілу.

При врахуванні бюджетних обмежень здійснюється перевірка можливості виконання вибраного заходу. Якщо бюджетних коштів недостатньо для виконання, то захід відміняється, а якщо коштів достатньо, то він включається в програму експлуатації моста, а залишки бюджетних коштів зменшуються на величину вартості заходу. У випадку, коли бюджетних коштів не залишається навіть на утримання моста, призначається варіант «нічого не робити».

На рис. 3.15, 3.16 та 3.17 наведені основні графіки процесу оптимізації рішень за двома вибраними критеріями, кожний окремо, і на основі двох критеріїв за алгоритмом VEGA, причому кожний з цих графіків може бути отриманий для умов без фінансових обмежень і з фінансовими обмеженнями.

Виходячи з викладеного, автором був розроблений програмний модуль у складі АЕСУМ, який дозволяє отримати необхідні для дослідження запропонованих алгоритмів оптимізації результати.

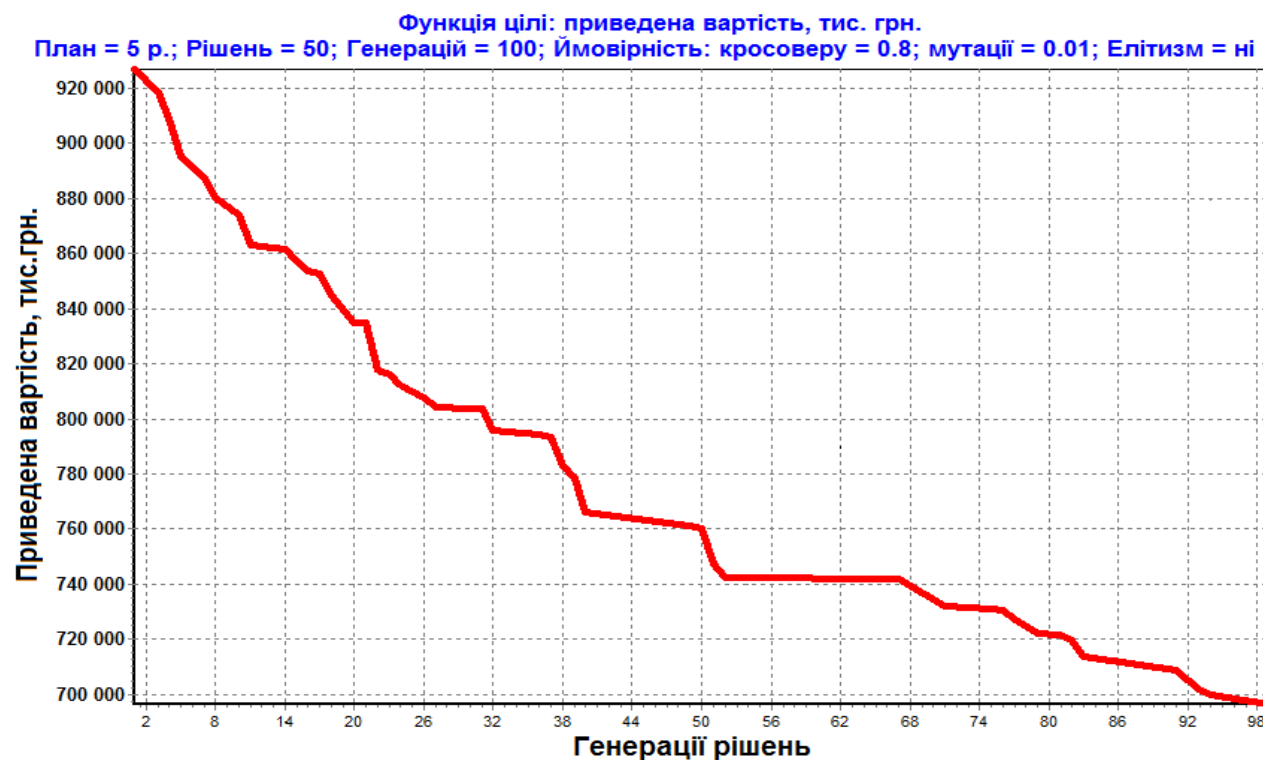


Рисунок 3.15 – Хід оптимізації за критерієм вартості ремонтів мостів.
Джерело: власна розробка

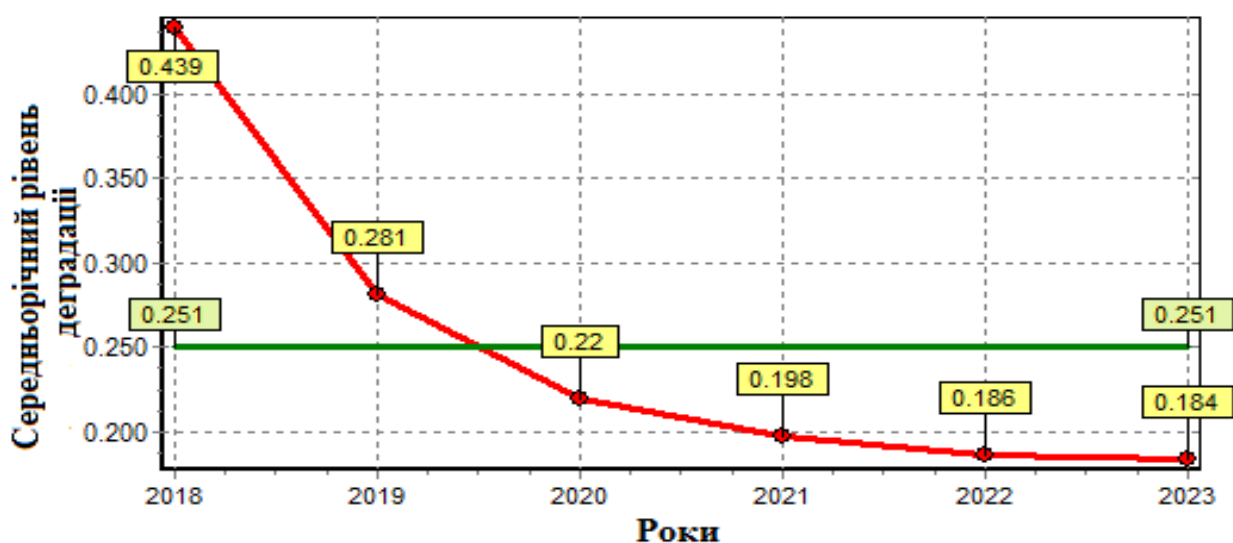


Рисунок 3.16 – Зміна по роках планового періоду середньорічної середньозваженої деградації мостів. Джерело: власна розробка

Таблиця 3.17 – Діаграма процедури еволюційного методу оптимізації параметрів процесу відновлення технічного стану мостів (ПЕМО). Джерело: власна розробка

Задати мережу доріг. Вибрати дані по мостам мережі. Підготувати всі необхідні вихідні дані	
Встановити: D_s – кількість рішень в множині рішень (пулі); N_b – кількість мостів; T – кількість років прогнозного періоду; G_e – кількість генерацій (епох) ГА; P_c – ймовірність рекомбінації (кросоверу); P_m – ймовірність мутації; r – ставку дисконту; індекс інфляції	
Цикл ініціалізації початкової множини рішень $ch=1, D_s$:	
Встановити залишки коштів рівними річним бюджетам: $R(t)=B(t), t=1, T$	
Цикл по мостам, $i=1, N_b$	
Визначити початковий рівень деградації i -го моста процедурою ПВПС табл. 3.12. Цикл по рокам прогнозного періоду, $t=1, T$:	
Встановити вид заходу для i -го моста в t -й рік процедурою ПФР з визначенням вартості та перевіркою його здійсненності	
Визначити пріоритет i -го моста в t -й рік процедурою ПВПМ	
Розрахувати значення функції пристосованості Z :	
Розрахувати значення цільової функції за усередненим станом:	
$Z_S = \frac{\sum_{i=1}^N \left(S_i \cdot \left[\sum_{t=1}^T \left[\Pi_{i,t} \cdot (D_{i,t-1} + \Delta D_{i,t} - I_{i,t}(x_{i,t})) \right] \right] \right)}{\sum_{i=1}^N \left(S_i \cdot \sum_{t=1}^T \Pi_{i,t} \right)},$	
Розрахувати значення цільової функції за вартістю:	
$Z_C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{C_{i,t}}{(1+r)^t} \times \left(\left[1 + \Pi_{i,t} \cdot \max \left(\frac{(D_{i,t-1} + \Delta D_{i,t} - I_{i,t}(x_{i,t})) - D_{\max}}{D_{\max}}, 0 \right) \right] \right)$	
Сортування списку мостів по убаванню пріоритетів	
Вибір найкращого рішення Best з початкової множини рішень	
Цикл пошуку оптимального рішення, $g=1, G_e$:	
Перевірка на збіжність рішень: якщо $\text{cnt} \geq \text{cntMax}$, то вихід з циклу	
Моделювання однієї генерації ГА процедурою ОЕГА, табл. 3.18	
Вибір поточного найкращого рішення (хромосоми) chr	
Якщо $ \text{Best.Z} - \text{chr.Z} < \text{EPS}$, то $\text{cnt} = \text{cnt} + 1$ – збільшити лічильник; інакше $\text{cnt} = 0$ – очистити лічильник збігів;	
Якщо $\text{Best.Z} > \text{chr.Z}$, то $\text{Best} = \text{chr}$ – змінити найкраще рішення.	
Сформулювати звіти та графіки за результатами розв'язання задачі.	

Таблиця 3.18 – Діаграма процедури моделювання однієї генерації ГА оптимізації параметрів процесу відновлення технічного стану мостів (ОЕГА).

Джерело: власна розробка



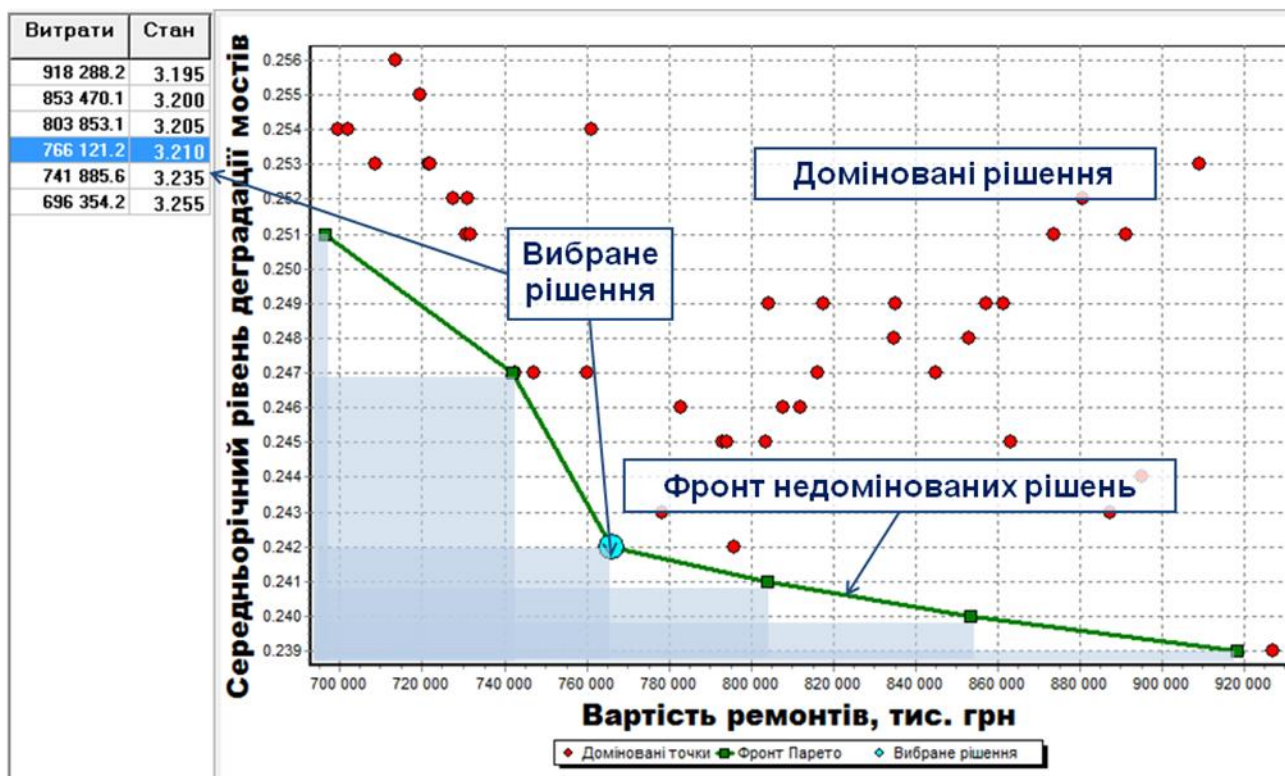


Рисунок 3.17 – Вибір рішення з фронту Парето. Джерело: програмний комплекс АЕСУМ, власна розробка

3.7 Дослідження впливу параметрів еволюційного механізму на ефективність пошуку оптимальної стратегії ремонтів мостів

Головними параметрами, які досліджувались, були:

- кількість хромосом (або рішень) в популяції;
- тривалість планового періоду, яка може бути прийнята в роках або, для деяких елементів, в місяцях;
- ймовірність кросоверу;
- ймовірність мутації;
- застосування або ні стратегії елітизму [32, 33];
- правила зупинки обчислювань;
- кількість генерацій (поколінь, епох) алгоритму;
- кількість серій випробувань алгоритму при однакових вхідних параметрах;

– власне залежність мінімального значення функції цілі від допустимого рівня деградації елементу дороги.

Дослідження виконувались на звичайному персональному комп'ютері.

При дослідженні одного з параметрів інші фіксувались на певному рівні. Нижче наведені результати деяких з перерахованих вище досліджень. Застосовувались дві стратегії пошуку: стратегія елітизму та стратегія без елітизму. Остання використовувалась для подолання передчасної збіжності обчислень. В цьому випадку, як правило, виконуються всі генерації поколінь, які задані вхідним параметром.

В першу чергу, був досліджений вплив впливу кількості хромосом (рішень) в популяції, результати якого наведені в табл. 3.19 і на рис. 3.18.

Таблиця 3.19 – Параметри дослідження впливу розміру популяції

$T_{пл}$	P_k	P_m	D_{max}	Генерацій	Серій	Елітизм
5	0,8	0,1	0,5	100	1	ні

В табл. 3.19:

$T_{пл}$ – кількість інтервалів планового періоду (років);

P_k – ймовірність кросоверу;

P_m – ймовірність мутації;

D_{max} – допустимий рівень деградації, який враховується в функції цілі;

Генерацій – максимальна кількість поколінь ГА;

Серій – кількість повторів алгоритму;

Елітизм – стратегія формування наступного покоління.

Відносно невелике зниження знайденого мінімального значення функції цілі при значному збільшенні розміру популяції свідчить про можливість обмежитись розміром популяції в 200 – 250 рішень-хромосом, що дозволяє скоротити витрати часу на моделювання.

Далі був досліджений вплив кількості генерацій на мінімальне значення цільової функції, його результати наведені на рис. 3.19. Параметри моделювання наведені в табл. 3.20.

Таблиця 3.20 – Параметри дослідження впливу кількості генерацій

$T_{пл}$	P_k	P_m	D_{max}	Популяція	Серій	Елітизм
5	0,8	0,1	0,5	50	1	ні

Кількість генерацій майже не впливає на пошук стратегії з мінімальним значенням цільової функції. Цей факт, у випадку незастосування стратегії елітизму можна пояснити невеликим розміром варіацій видів заходів, а у випадку застосування стратегії елітизму, дуже швидко досягається збіжність алгоритму.

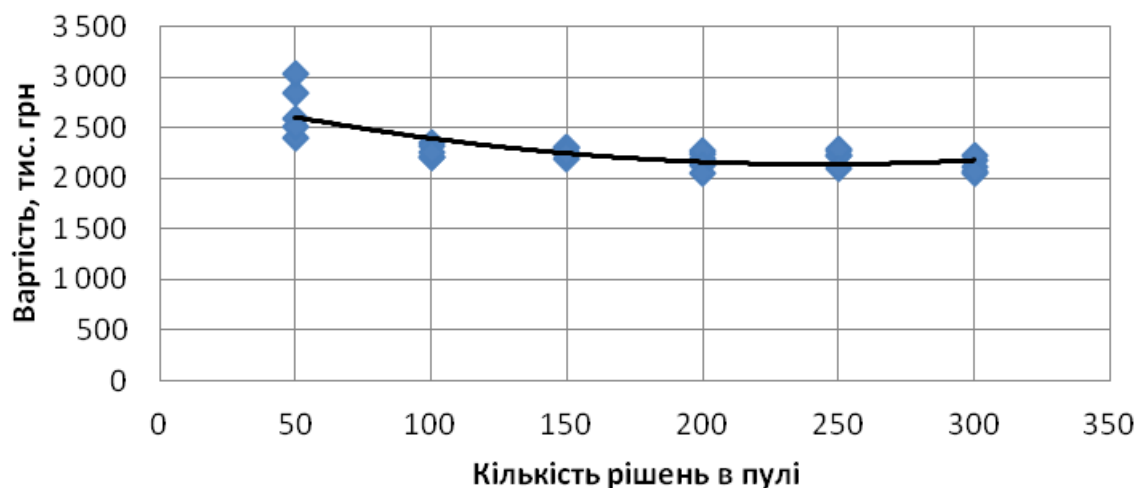


Рисунок 3.18 – Вплив розміру популяції на значення функції цілі.

Джерело: власна розробка

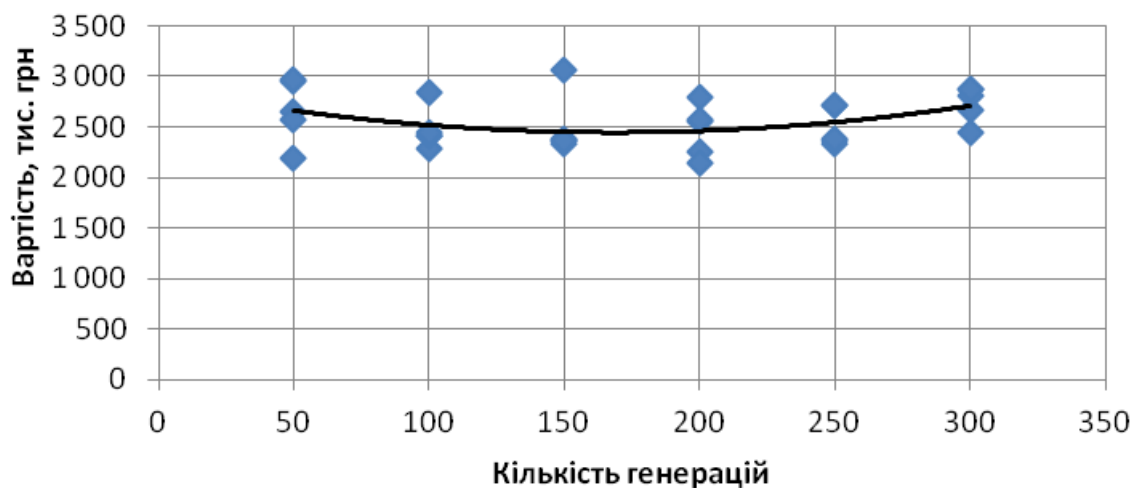


Рисунок 3.19 – Вплив кількості генерацій на значення функції цілі.
Джерело: власна розробка

Вплив ймовірності кросоверу досліджувався при виключенні мутації, результати дослідження наведені на рис. 3.20.

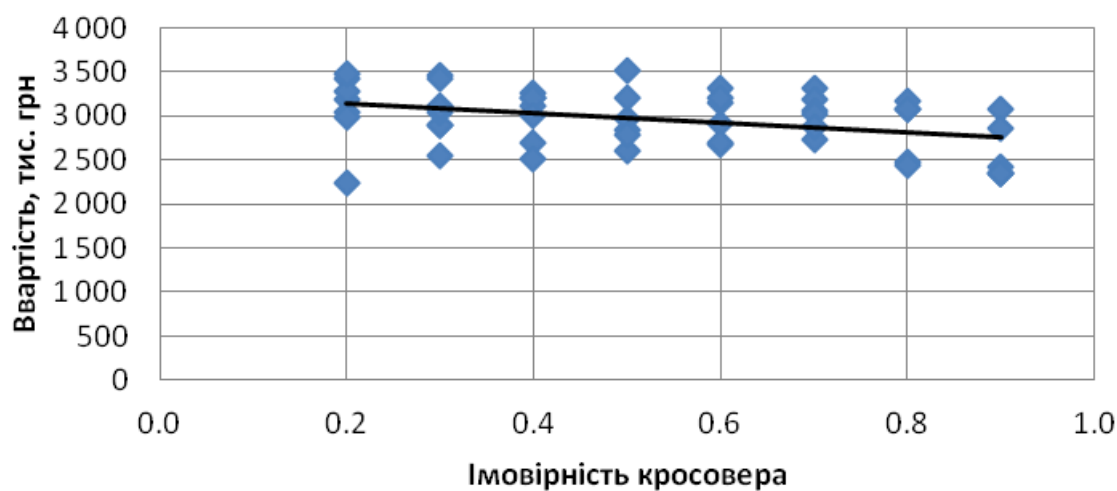


Рисунок 3.20 – Вплив ймовірності кросоверу. *Джерело:* власна розробка

Вплив ймовірності мутації досліджувався при виключеному режимі кросоверу. Результати дослідження наведені на рис. 3.21.



Рисунок 3.21 – Вплив ймовірності мутації на значення функції цілі.
Джерело: власна розробка

Виявлені тенденції і з кросовером і з мутацією можна пояснити впливом фундаментальної проблеми призначення експлуатаційних заходів в залежності від поточної деградації елементу. Заміна правої частини хромосоми або мутація гену потребують перевірки і перерахунку кривої деградації приєднаної правої частини хромосоми у випадку кросоверу або наступних за геном, який змінився в результаті мутації, генів. Перерахунок деградації і перепризначення експлуатаційних заходів робить застосування операторів кросоверу і мутації не зовсім очевидними.

Дослідження максимально допустимого рівня деградації D_{max} наведені на рис. 3.22. При невеликих рівнях D_{max} кількість випадків його перевищення зростає, що призводить до збільшення суми штрафу. При збільшенні D_{max} таких випадків стає значно менше, що приводить до зменшення оптимального значення функції вартості за рахунок зменшення суми штрафів у функції (3.10). тут важливо правильно вибрати показник, який враховує важливість врахування стану мостів.

Як видно з графіку отриманий результат відповідає очікуваному: зниженню значення цільової функції.

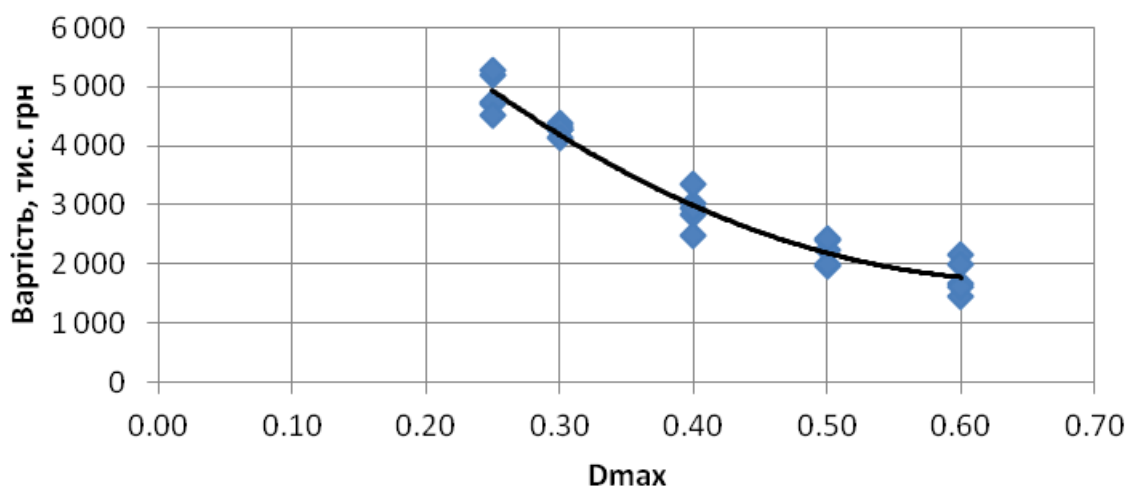


Рисунок 3.22 – Вплив максимально допустимого рівня деградації.

Джерело: власна розробка

3.8 Висновки до розділу 3

1. Сформульовано базові принципи стратегії ремонтів мостів: взаємної обумовленості процесів деградації мостів та їх відновлення, альтернативності заходів з відновлення мостів, узгодженості – відповідності граничних параметрів процесу деградації і обмежень на ресурси, обмеженої раціональності – вибору найкращого варіанту стратегії ремонтів мостів з множини розглянутих, домінування рішень мережевого рівня над рішеннями проектного рівня, принцип пріоритезації – врахування відносної важливості кожного моста, принципом корисності – врахування зовнішніх ефектів у критеріях вибору варіанту стратегії.

2. Запропонована система пріоритезації мостів на мережі автомобільних доріг. Пріоритет моста є функцією часу, тому що залежить від змін середньодобової інтенсивності дорожнього руху та змін технічного стану мостів в результаті виконання відновлювальних заходів. Модель пріоритезації дозволяє впорядкувати розгляд мостів у процесі відновлення їх технічного стану та можливої заміни у відповідності з пріоритетами мостів.

3. Розглянуті теоретичні передумови обґрунтування стратегії ремонтів мостів. На основі аналізу класифікації робіт з експлуатаційного утримання, поточного дрібного, поточного середнього і капітального ремонтів мостів,

наведеної в нормативних документах СОУ 42.1-37641918-105:2013 [56], ГБН Г.1-218-182:2011 [75] і ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [47], співставлення їх із зарубіжними класифікаціями виділені такі заходи: експлуатаційне утримання, поточний дрібний ремонт, поточний середній ремонт, капітальний ремонт мостів, а також реконструкція або заміна новим мостом.

4. Для зручності запропоновано характеризувати рівень деградації елементів мостів безрозмірним показником, який приймає значення в інтервалі від 0 до 1 і, зв'язаний з характеристикою безпеки елементів мостів (табл. 5.1 ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 [47]). Запропоноване відповідне рекурентне правило розрахунку рівня деградації по рокам життєвого циклу або прогнозу відновлення технічного стану мостів та альтернативні види заходів в залежності від експлуатаційного стану.

5. Розроблені математичні моделі оптимізації стратегії ремонтів мостів на рівнях: мережі автомобільних доріг, окремої ділянки дороги та одного моста, які враховують процеси деградації елементів мостів і процес відновлення їх технічного стану шляхом вибору оптимальної, відносно заданих умов, послідовності експлуатаційних заходів. Задача відноситься до класу комбінаторних задач дискретної оптимізації як однокритеріальна або багатокритеріальна. В якості критеріїв прийняті: мінімум середньозваженого по роках прогнозного періоду рівня деградації мостів при бюджетних обмеженнях і мінімум штрафної функції вартості ремонтів та експлуатаційного утримання мостів, яка враховує досягнутий рівень деградації мостів. При перевищенні рівня деградації заданої максимально допустимої величини значення функції буде зростати, що слугує бар'єром для невиправданого зменшення витрат на ремонти мостів. При одночасному використанні двох критеріїв будується фронт Парето-оптимальних рішень.

6. Складність пошуку оптимального рішення задачі обґрунтування стратегії експлуатації мостів на рівні мережі доріг, обумовлена великою кількістю мостів в комбінації з варіантами експлуатаційних заходів та кількістю років прогнозного періоду, спричинила розробку механізму

розв'язання задачі, яким природньо враховується необхідна послідовність виконання експлуатаційних заходів, що залежить від фактичного і прогнозованого рівня деградації моста і не вимагає штучних обмежень на міжремонтні періоди, властиві відомим генетичним алгоритмам [138].

7. Комп'ютерні експерименти, виконані за допомогою розробленої автором дисертаційної роботи комп'ютерної програми, яка реалізує запропонований механізм оптимізації стратегії ремонтів мостів, дозволили визначити раціональні параметри моделювання: кількість рішень в початковій множині 200 – 250, кількість генерацій алгоритму 150 – 200. Ймовірність рекомбінації рішень 0,7 – 0,9; ймовірність мутації 0,005 – 0,010.

РОЗДІЛ 4

РОЗБУДОВА ПІДСИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРАТЕГІЇ РЕМОНТІВ МОСТІВ В АЕСУМ

4.1 Підсистема оптимізації процесу відновлення технічного стану мостів на мережі автомобільних доріг в архітектурі АЕСУМ

У дисертаційній роботі запропонована наступна архітектура АЕСУМ з впровадженням власних розробок автора (рис. 4.1).

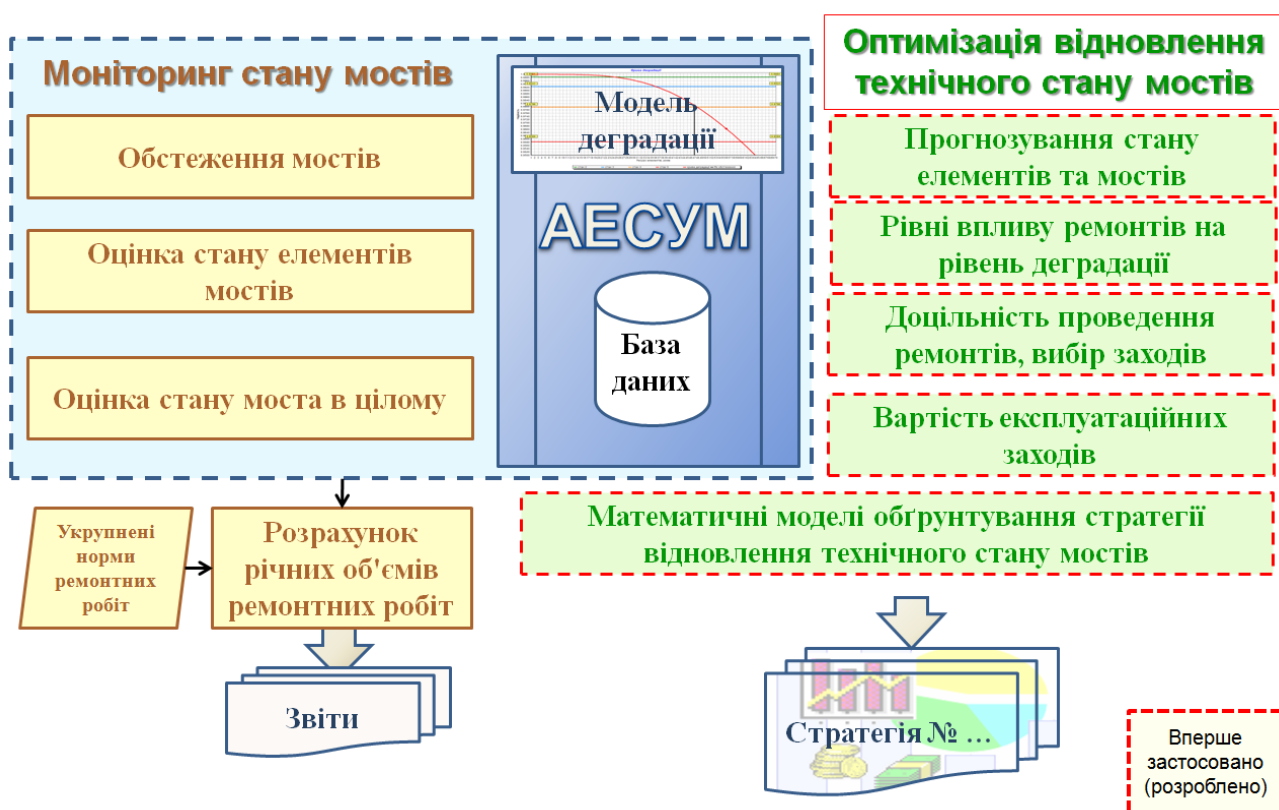


Рисунок 4.1 – Запропонована схема АЕСУМ. Джерело: власна розробка

В розрахунковому модулі можна виділити дві складові проведення розрахунку:

- розрахунок (прогноз) деградації об'єктів в часі;
- призначення відновлювальних заходів з розрахунком їх вартості та з

урахуванням бюджетних обмежень.

Ці частини є незалежними, що надає можливість виправляти, змінювати або доповнювати розрахунки новими модулями, не порушаючи інші.

Експерт при проведенні розрахунків задає вихідні параметри, необхідні для обґрунтування стратегії виконання ремонтів.

АЕСУМ має сучасну базу даних, у якій зберігається велика кількість графічної, текстової, числової інформації тощо:

- технічні дані про споруди та їх елементи, розрахунки, креслення, фото;
- дані випробовувань, обстежень, опис дефектів, фото, дані обчислень надійності, прогнозу довговічності;
- схеми дорожньої мережі, розташування споруд, технічні характеристики доріг;
- дані пошуку оптимальної стратегії ремонтів;
- нормативні вимоги з експлуатації споруд, їх обстежень і випробовувань;
- база ціноутворення;
- довідково-аналітичну систему;
- дані про інвесторів, наукові, юридичні особи проєктантів, будівельників та субпідрядників.

АЕСУМ сьогодні містить близько 40 функцій двох груп: інформаційні та аналітично-експертні, завдяки яким генеруються рекомендації з управління мостами.

Головні інформаційні функції АЕСУМ включають:

- зберігання та обробку інформації про споруду в цілому і конструктивні елементи споруд (проектна та виконавча документація);
 - зберігання та обробку систематизованої інформації про реконструкції та ремонти елементів споруди;
 - зберігання та обробку інформації стосовно нагляду, випробовувань та обстежень, дефектів споруди;
 - генерацію паспортів споруди;
 - статистичні та інформаційні функції;
 - підготовку форм статистичної звітності;
 - підготовку довідок, які містять показники, передбачені базою даних.
- Домінуючими в АЕСУМ є аналітичні експертні функції. Головні з них:

- формалізована оцінка експлуатаційного стану автодорожніх мостів;
- прогноз залишкового ресурсу споруд;
- формалізована експертна оцінка (рейтинг), що слугує для ранжирування мостів у рамках дорожньої мережі за потребою ремонту або реконструкції;
- складання орієнтовних планів обстежень на 10 років, на 1 рік з урахуванням обмеженого фінансування;
- оцінка безпеки руху по споруді;
- аналіз вантажопідйомності мостів та можливості пропуску понаднормативних вантажів;
- визначення орієнтовної вартості ремонтних робіт та експлуатаційного утримання по областях;
- експертне визначення доцільності проведення капітального ремонту/реконструкції або будівництва нового моста.

База даних створена на основі системи управління базами даних (СУБД) Microsoft SQL Server, яка забезпечує реалізацію реляційних баз даних, дозволяє зберігати великі об'єми даних та будувати досить складні вибірки даних.

База даних АЕСУМ складається з таких підрозділів:

довідники – забезпечують створення реляційної бази даних на основі класифікацій властивостей головних об'єктів предметної області. Наприклад, довідники областей, адміністративного значення доріг, матеріалів, типів споруд, прогонових будов і таке інше. До цієї частини відносяться також довідкові таблиці, що необхідні для виконання розрахунків. Наприклад, значення параметрів інтенсивності відмов, коефіцієнти варіації міцності бетону і тому подібне. Вони не можуть бути змінені користувачами, а створюються в центральній базі даних;

мережа доріг – дані, що відображують систему доріг України з необхідними характеристиками. До цієї мережі відносяться (прив'язуються) мости користувача;

У сукупності ці частини бази даних створюють модель предметної області АЕСУМ.

4.2 Методика застосування підсистеми оптимізації стратегії ремонтів мостів в програмному комплексі АЕСУМ

Модуль управління ремонтами мостів АЕСУМ призначений для оптимізації довгострокової стратегії ремонтів мостів. Він включає інтерфейс уведення вихідних даних та інтерфейс задання вихідних параметрів, які дають користувачу можливість дослідити вплив змінних рішення на значення критеріїв стратегії ремонтів.

Запуск модулю у складі АЕСУМ здійснюється з режиму роботи «Розрахунок вартості ремонтів», яка визивається верхнім меню «Вартість ремонтів, експлуатаційний стан споруд (рис. 4.2).

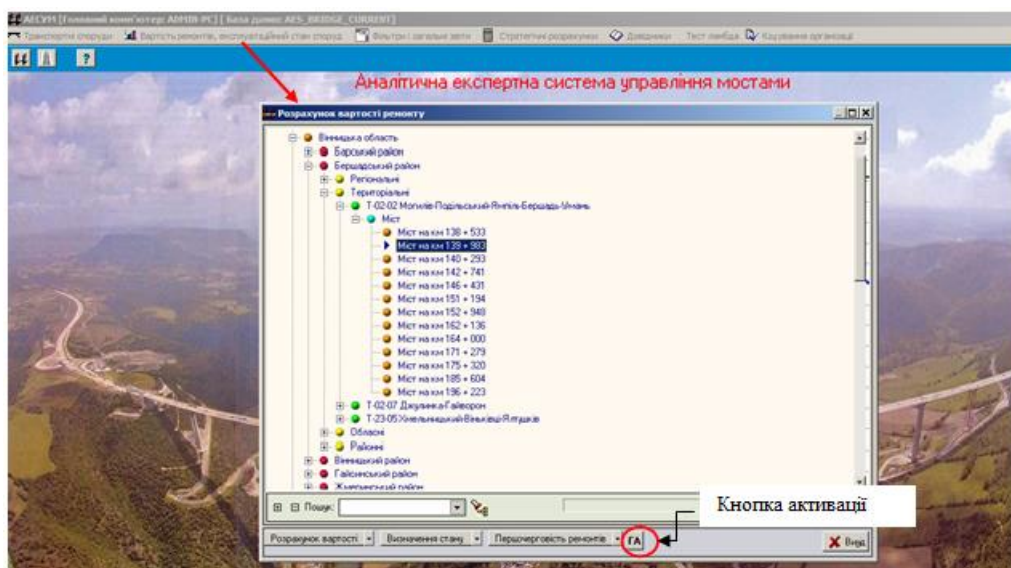


Рисунок 4.2 – Вибір режиму оптимізації. Джерело: власна розробка

Розрахунки виконуються для мостів, що відповідають вибору рівня в верхній частині екранної форми (на рисунку це окремий міст на ділянці дороги Т-02-02 територіального значення у Бершадському районі Вінницької області. Можливо виконати оптимізацію стратегії ремонтів та утримання в таких режимах:

- всі мости, мости області, мости району області;
- мости доріг певного значення (міжнародні, національні тощо);

- мости ділянки дороги в межах району і певного значення;
- окремого моста.

З бази даних АЕСУМ відбираються тільки мости, які мають дані про рік будівництва (реконструкції або капітального ремонту), рік обстеження і експертні оцінки експлуатаційного стану і рейтингу. Після запуску режиму пошуку рішення визивається форма роботи з підсистемою (рис. 4.3).

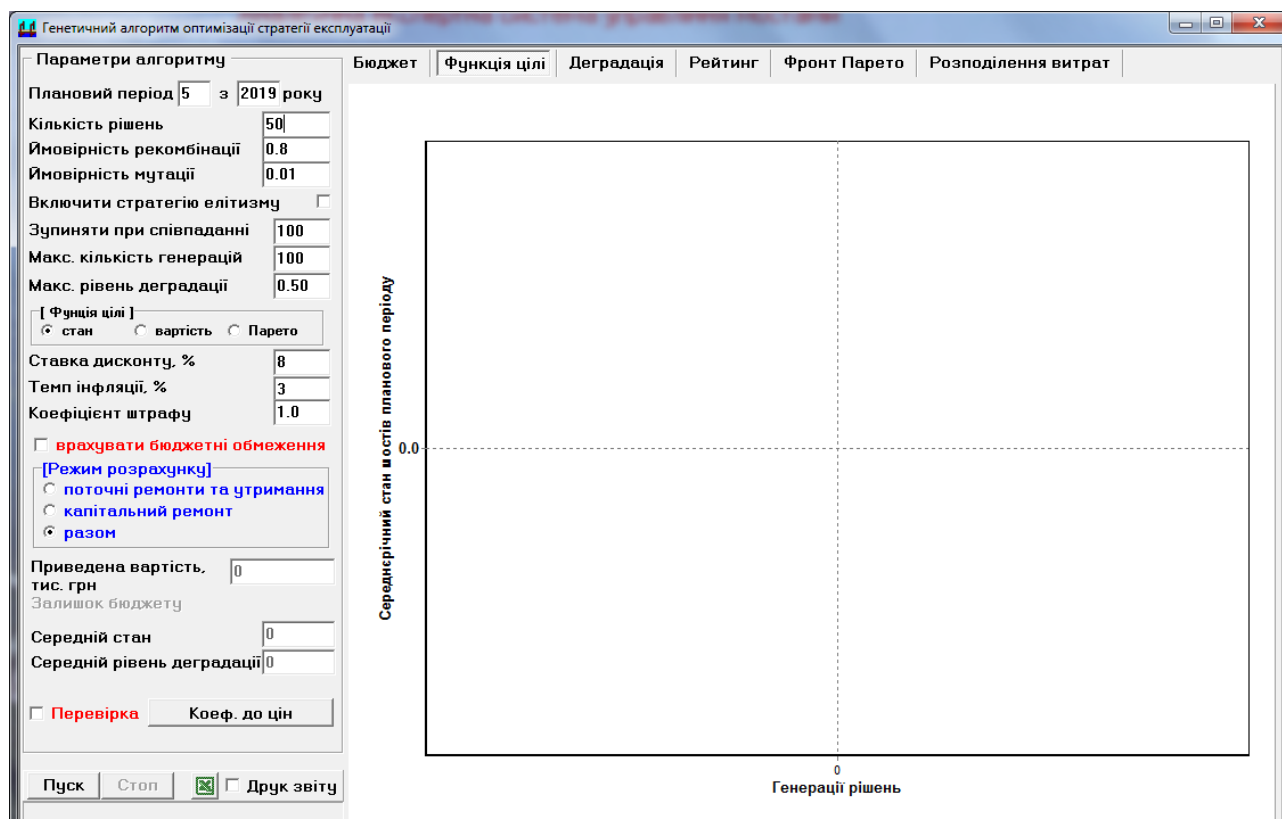


Рисунок 4.3 – Головна форма завдання параметрів еволюційного моделювання. Джерело: власна розробка

Вводяться параметри оптимізації стратегії ремонтів:

- кількість рішень в множині рішень (популяції);
- тривалість прогностного періоду, років;
- ймовірність рекомбінації (кросоверу) та мутації;
- ознака використання стратегії елітизму;
- правило зупинки;
- максимальна кількість епох;

- гранично допустимий рівень деградації D_{max} ;
- рік початку періоду;
- ставка дисконту;
- коефіцієнт інфляції;
- вид функції цілі та інші параметри.

Головна форма модуля включає панель управління і шість закладинок, на яких розміщуються графіки, що відображують результати моделювання.

Панель управління головної форми призначена для управління процесом розрахунків: введенням параметрів, їх коригування, вибором різних режимів обчислень, запуском виконання алгоритму (рис. 4.4).

Розрахунки можна виконувати як з бюджетними обмеженнями, так і без обмежень (рис. 4.4). Останнє корисне тим, що дозволяє обчислити максимальну потребу у фінансуванні, котра, в свою чергу, обмежується самим процесом деградації.

В якості вихідних даних були прийняті дані обслідувань мостів на автомобільних дорогах загального користування, які накопичені в базі даних АЕСУМ.

Для випробувань моделі використовувались дані про деградацію прогонових будов мостів, як найбільш повні.

Для запуску процесу оптимізації потрібно виконати режим «Пуск» (рис. 4.4).

Необхідно вибрати режим оптимізації:

- за середньозваженим станом;
- за вартістю;
- за двома критеріями (фронт Парето).

Після закінчення пошуку оптимального рішення можна вивести отримані результати, подібні наведеним на рис. 4.7 – 4.10.

Параметри алгоритму

Плановий період з року

Кількість рішень

Ймовірність рекомбінації

Ймовірність мутації

Включити стратегію елітизму ☐

Зупиняти при співпаданні

Макс. кількість генерацій

Макс. рівень деградації

[Функція цілі]

☒ стан ☐ вартість ☐ Парето

Ставка дисконту, %

Темп інфляції, %

Коефіцієнт штрафу

☐ **врахувати бюджетні обмеження**

[Режим розрахунку]

☐ поточні ремонти та утримання

☐ капітальний ремонт

☒ **разом**

Приведена вартість, тис. грн

Залишок бюджету

Середній стан

Середній рівень деградації

☐ **Перевірка**

☒

Callouts:

- Вибір режиму оптимізації (points to 'Включити стратегію елітизму' and 'Зупиняти при співпаданні')
- Вибір режиму врахування бюджетних обмежень (points to 'врахувати бюджетні обмеження')
- Вибір режиму формування звітів Excel (points to 'Друк звіту')
- Дані про результат (points to 'Приведена вартість, тис. грн')
- Запуск (points to 'Пуск' button)

Рисунок 4.4 – Завдання вихідних параметрів. Джерело: власна розробка

Спочатку визначається потреба при умові відсутності фінансових обмежень (корективна стратегія) (рис. 4.5), тобто скільки потрібно при вибраній дії з урахуванням поточного рівня деградації. Після цього можна включити режим врахування бюджетних обмежень і, при необхідності, скоригувати його, як потрібно (рис. 4.6).

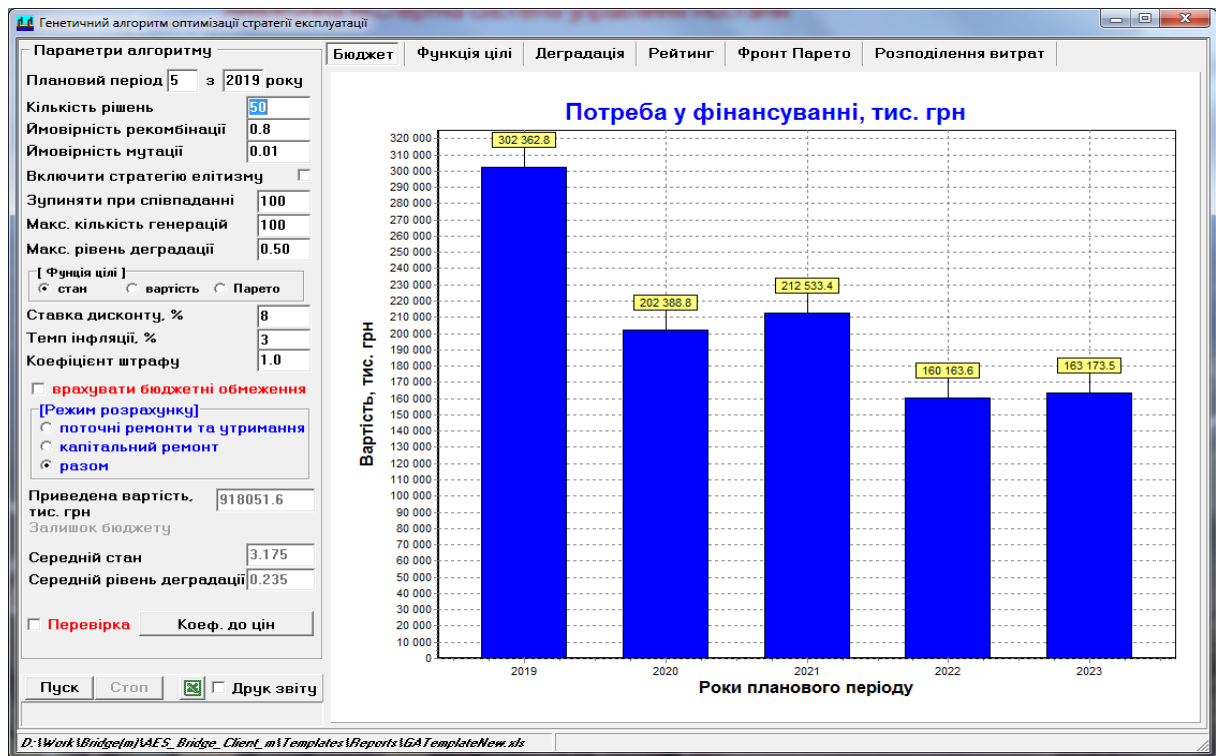


Рисунок 4.5 – Визначення потреби у фінансових ресурсах. Джерело: власна розробка

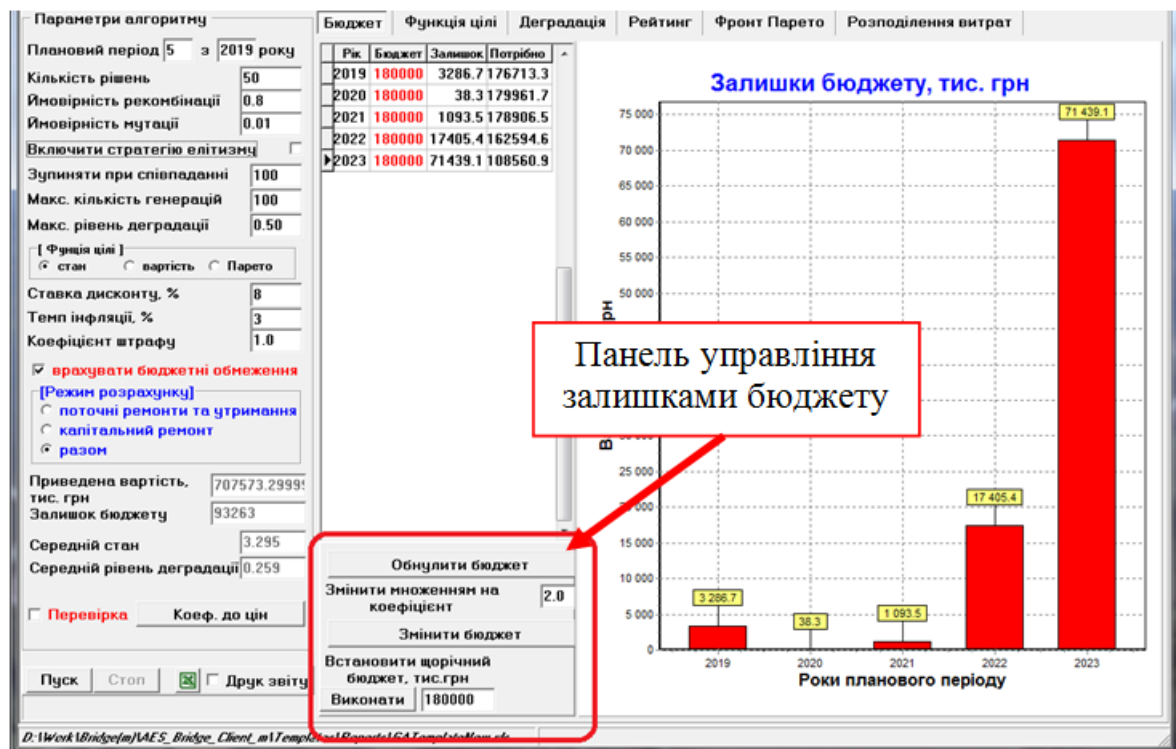


Рисунок 4.6 – Редагування потреби у фінансових ресурсах. Джерело: власна розробка

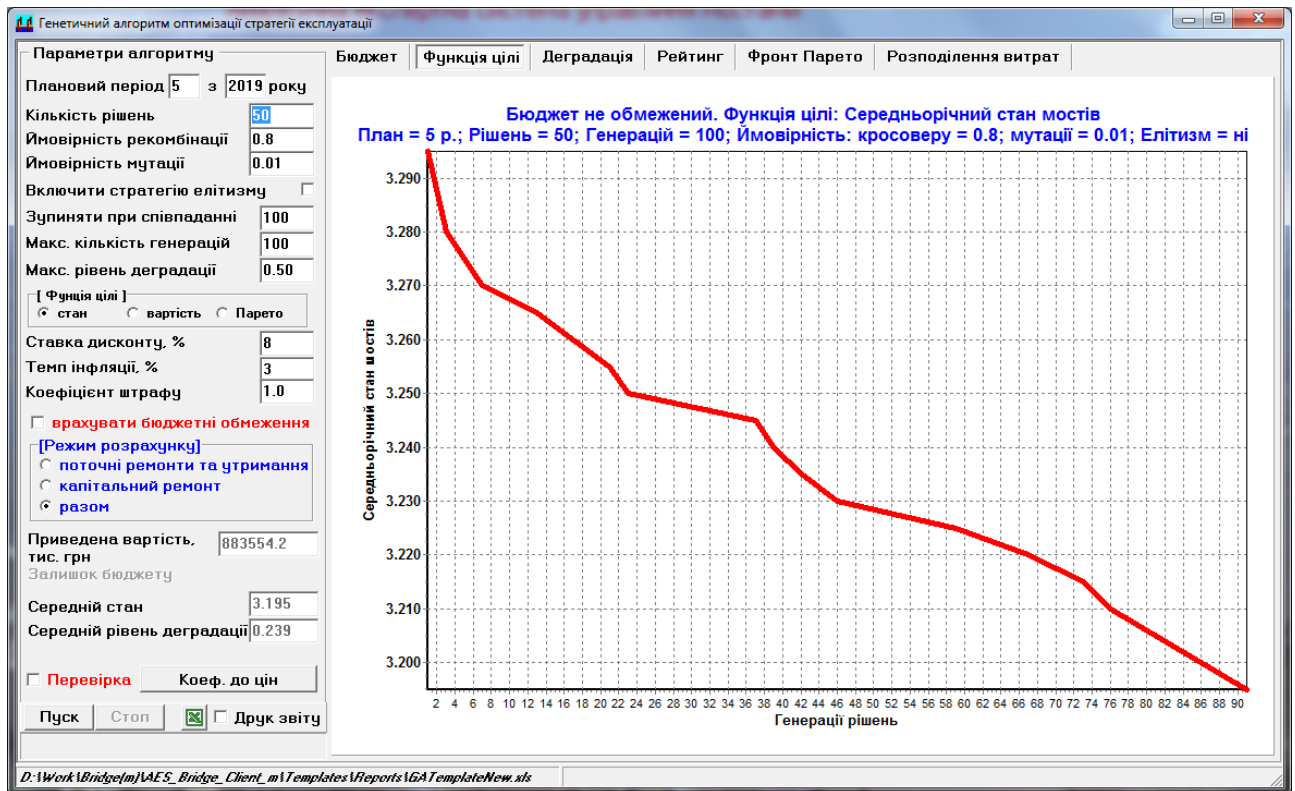


Рисунок 4.7 – Моделювання за критерієм стану мостів. Джерело: власна розробка

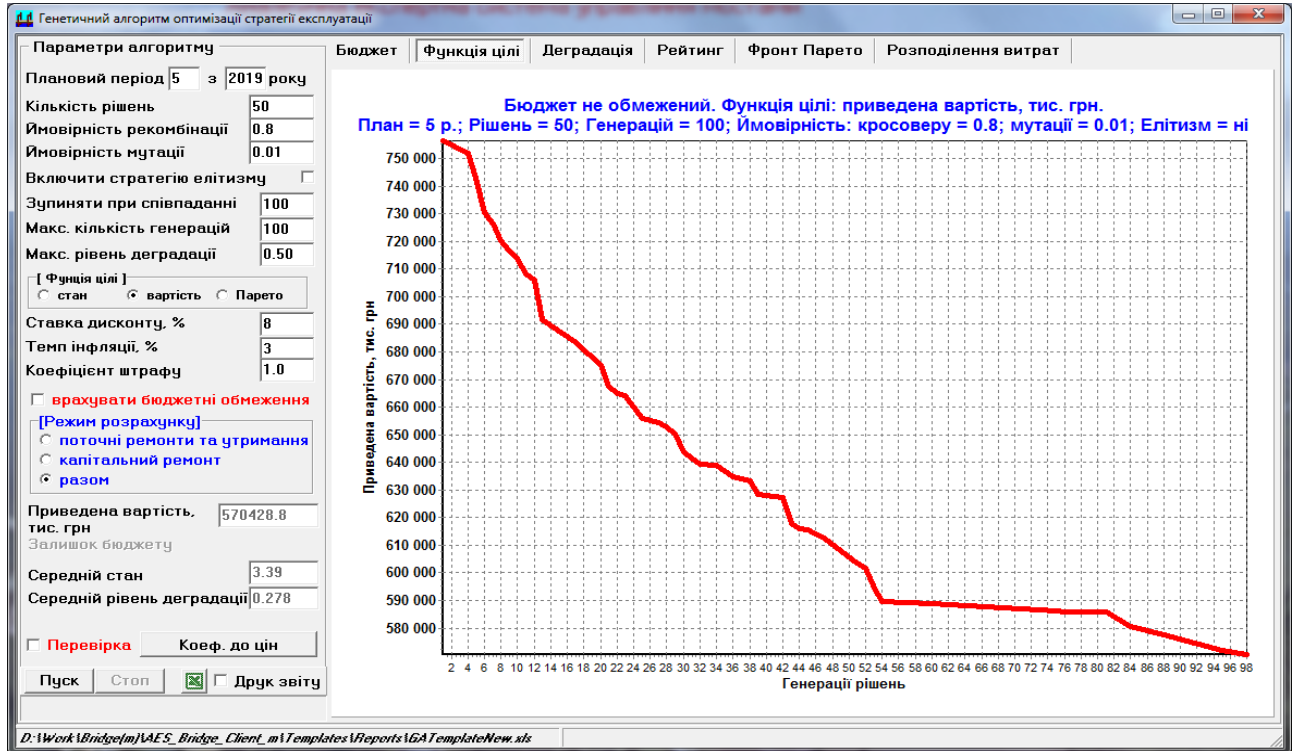


Рисунок 4.8 – Моделювання за критерієм вартості. Джерело: власна розробка

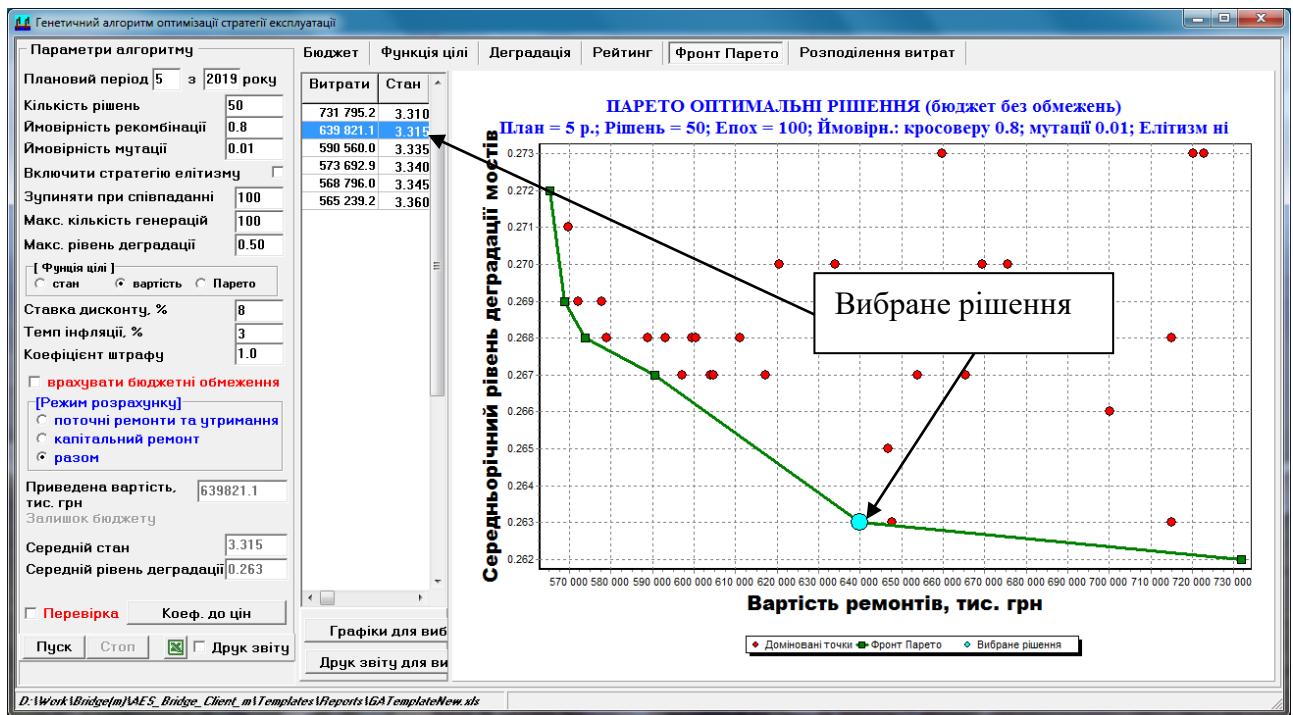


Рисунок 4.9 – Результати моделювання з побудовою фронту Парето.
Джерело: власна розробка

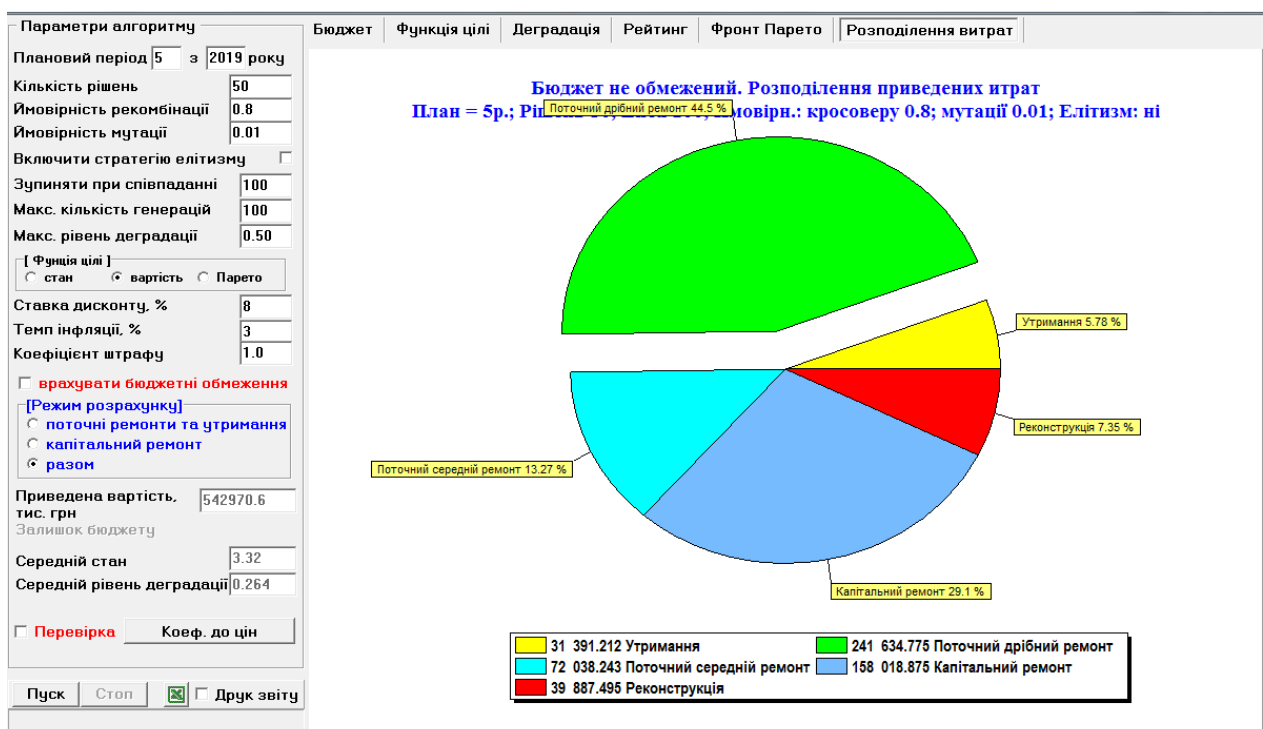


Рисунок 4.10 – Розподілення витрат за всіма їх видами. Джерело: власна розробка

Детальні пояснення функцій панель управління залишками бюджетних коштів наведені на рис. 4.11.

The interface displays a table with budget data and a control panel below it. The table has columns: Рік, Бюджет, Залишок, and Потрібно. The control panel includes buttons for 'Обнулити бюджет', 'Змінити множенням на коефіцієнт', 'Змінити бюджет', 'Встановити щорічний бюджет, тис.грн', and 'Виконати'.

Рік	Бюджет	Залишок	Потрібно
2019	180000	3286.7	176713.3
2020	180000	38.3	179961.7
2021	180000	1093.5	178906.5
2022	180000	17405.4	162594.6
2023	180000	71439.1	108560.9

Обнулити бюджет

Змінити множенням на коефіцієнт 2.0

Змінити бюджет

Встановити щорічний бюджет, тис.грн

Виконати 180000

Заданий спочатку бюджет по рокам

Бюджет по рокам, отриманий після розрахунку

Цю колонку можна редагувати безпосередньо в таблиці

Задати бюджет рівним нулю для відображення процесу деградації без відновлювальних заходів (нічого не робити)

В цьому режимі можна збільшити або зменшити річні бюджети множенням на заданий коефіцієнт

В цьому режимі можна встановити річні бюджети заданої величини

Рисунок 4.11 – Панель управління залишками бюджетних коштів.
Джерело: власна розробка

Окрім цього, для оцінки рішення виводяться графіки середнього рівня деградації і середнього рейтингу мостів по рокам реалізації програми робіт на мережевому рівні (рис. 4.12 і 4.13).

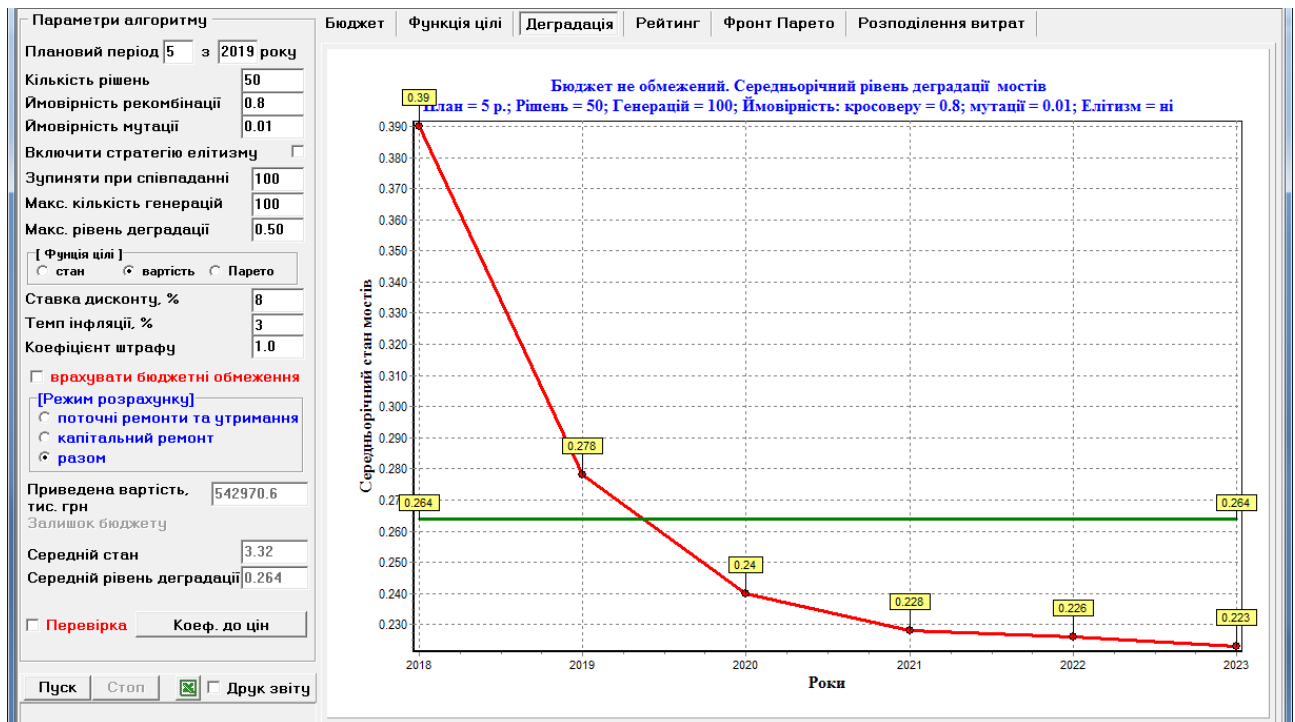


Рисунок 4.12 – Середній рівень деградації по рокам періоду. Джерело: власна розробка

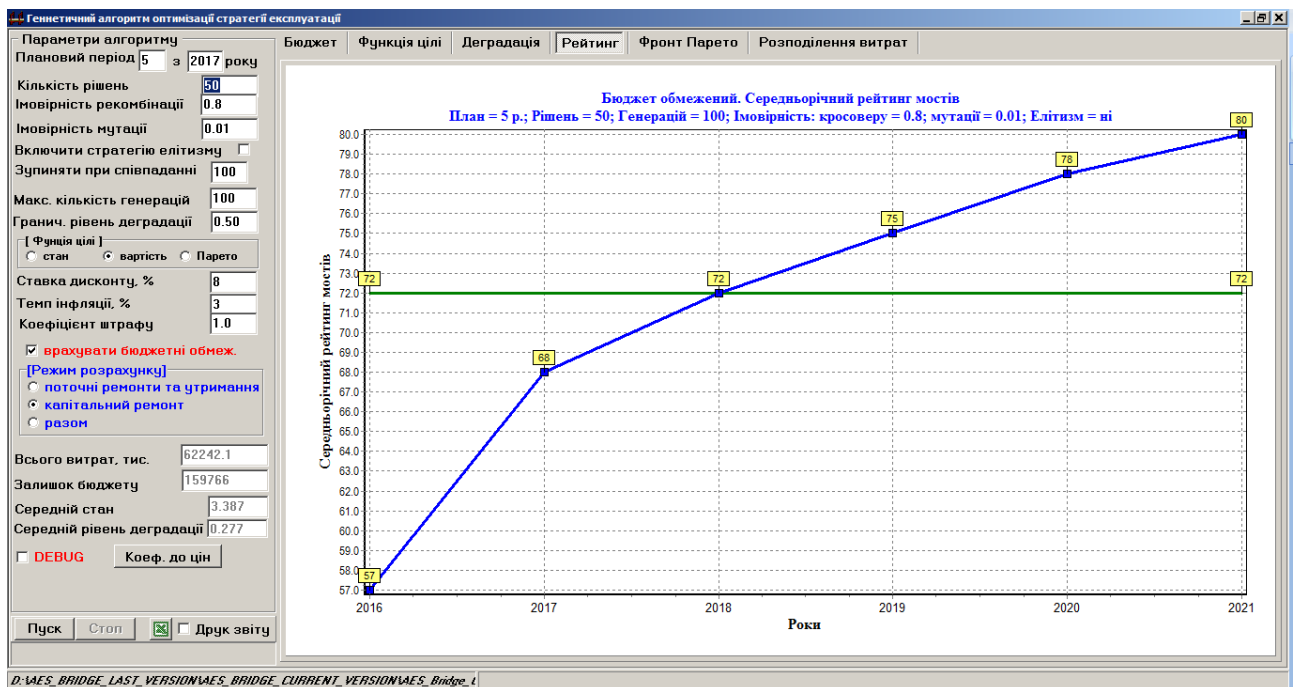


Рисунок 4.13 – Середній рівень рейтингу по рокам періоду. Джерело: власна розробка

За допомогою розробленого алгоритму можливо дослідити вартість життєвого циклу окремого моста на стадії його експлуатації, так би мовити «хвоста» життєвого циклу моста. На рис. 4.14 – 4.15 наведені графіки стратегії відновлення моста та потрібні для цього витрати (рис. 4.16) на дорозі четвертої категорії (рис. 4.2) у Вінницькій області, який знаходиться в п'ятому стані, на період 50 років.

Аналіз результатів розрахунків показує, що обов'язково потрібно виконати реконструкцію моста, після чого міст буде мати достатньо високий рейтинг протягом 50-річного періоду.

Результати всіх розрахунків виводяться у книгу Excel, фрагменти таблиці.

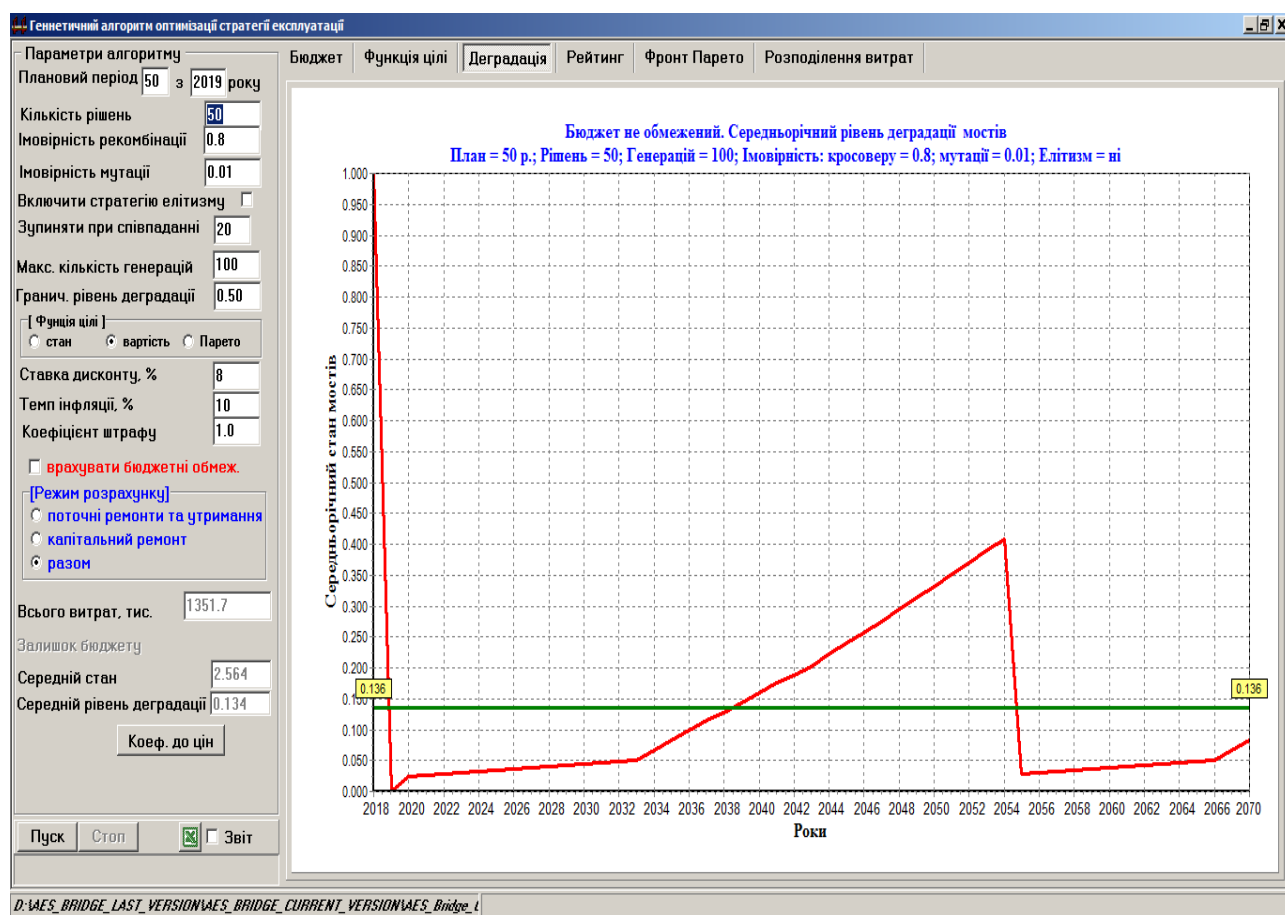


Рисунок 4.14 – Крива рівня деградації моста за 50 років. Джерело: власна розробка

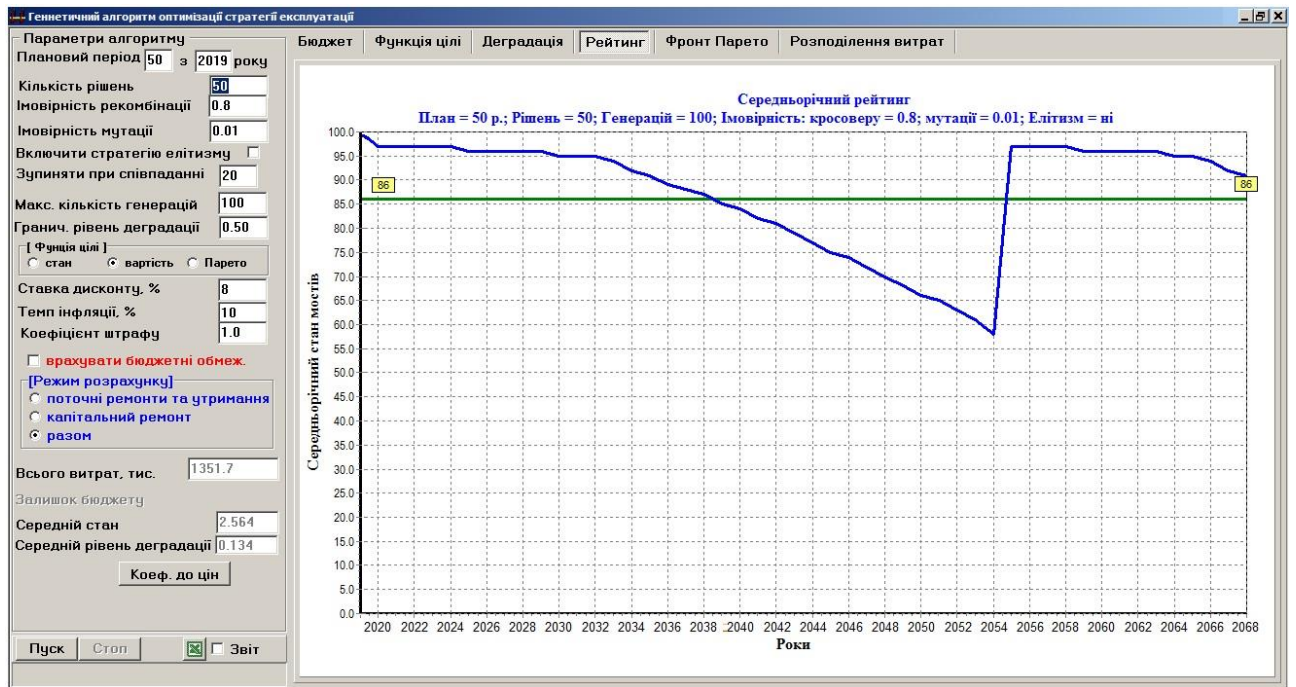


Рисунок 4.15 – Крива рейтингу за 50 років. Джерело: власна розробка

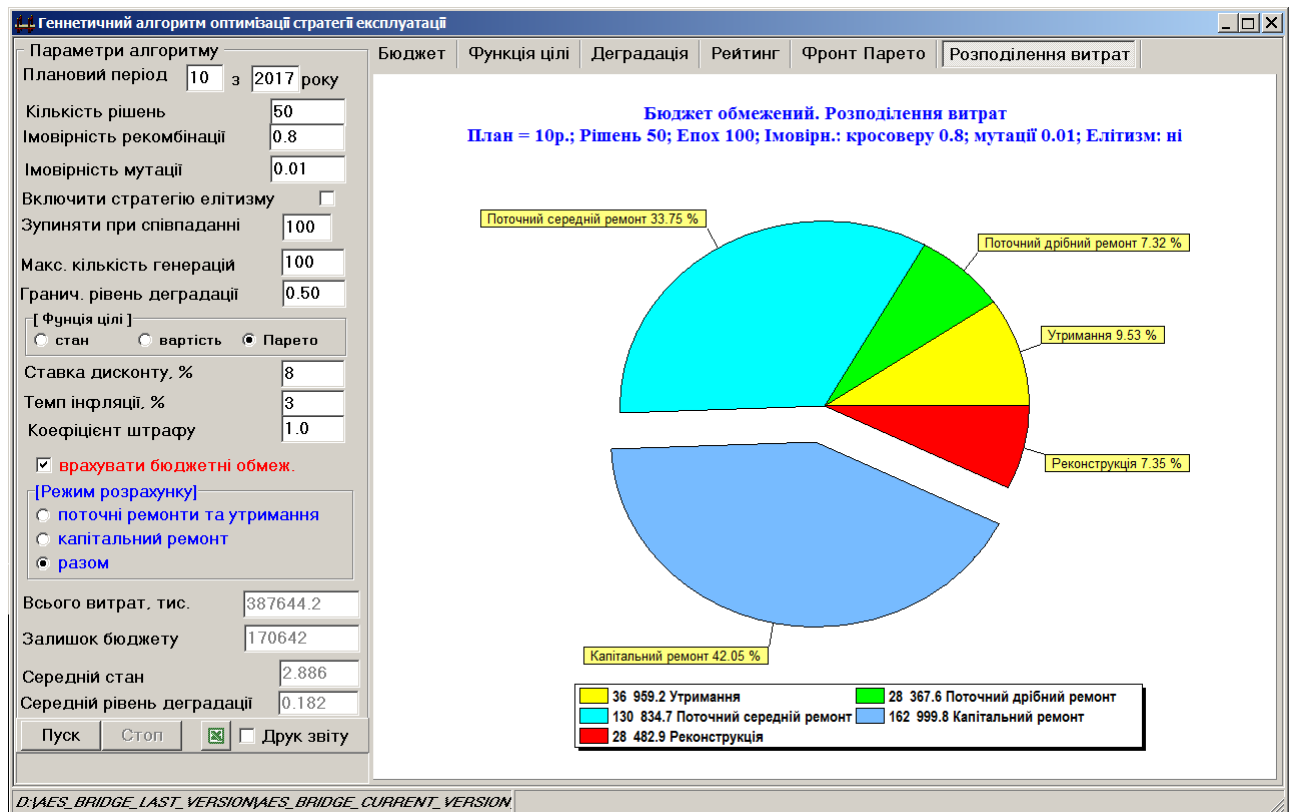


Рисунок 4.16 – Структура витрат на міст за 50 років. Джерело: власна розробка

Фрагмент розрахунку стратегії ремонтів та утримання мостів наведений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Приклад частини звіту про стратегію ремонтів. Джерело: власна розробка

Рік	Стан на початок року	Рівень деградації на початок року	Вид робіт	Стан на кінець року	Рівень деградації на кінець року	Вартість, тис. грн
2018			(40040) Міст на км 55 + 578, вік – 60 р.	5 (В)	0.741	
2019	5	0.741	Капітальний ремонт	3	0.208	1011.9
2020	3	0.208	Експлуатаційне утримання	3	0.221	15.8
2021	3	0.221	Експлуатаційне утримання	3	0.234	15.8
2022	3	0.234	Експлуатаційне утримання	3	0.247	15.8
2023	3	0.247	Експлуатаційне утримання	3	0.260	15.8
			Т-19-04 Білопілля-Терни-Липова Долина-Гадяч			
2018			(39661) Міст на км 0 + 782, вік – 65 р.	4	0.414	
2019	4	0.414	Експлуатаційне утримання	4	0.423	20.2

4.3 Методика визначення питомої вартості ремонтів мостів

Для попередньої оцінки потреби в фінансових ресурсах в рамках будь-якої аналітичної експертної системи, особливо в стратегічних планах відновлення стану мостів, достатньо мати *усереднені орієнтовні оцінки* вартості комплексів ремонтно-відновлювальних заходів, які дозволять відшукати оптимальну стратегію [93].

Визначення витрат засноване на принципі визначення обсягів ремонтних робіт на мостах в залежності від виявлених під час обстеження дефектів. Кожен дефект в залежності від його типу, конструктивного елементу та величині поширення передбачає проведення робіт в певному обсязі. Таким чином з'являється можливість визначити склад та обсяг ремонтних робіт по мосту в залежності від наявних дефектів, які передбачають їх усунення.

Знаючи склад та обсяг ремонтних робіт ми з допомогою кошторисних розрахунків маємо можливість розрахувати загальну вартість ремонту по об'єкту.

Для реалізації цієї методики в ПК була здійснена прив'язка кошторисних наборів робіт до фактичних дефектів мостів, виявлених в результаті обстежень (паспортизації). Таким чином, для кожного дефекту було створено набір робіт, який складається з окремих робіт (розцінок), які направлені на усунення дефектів.

В ПК АЕСУМ був розроблений модуль роботи з наборами робіт (рис. 4.17). Причому, є можливість корегувати склад та вартість робіт по мірі необхідності, а, при потребі, – завантажувати з кошторисів в напівавтоматичному режимі.

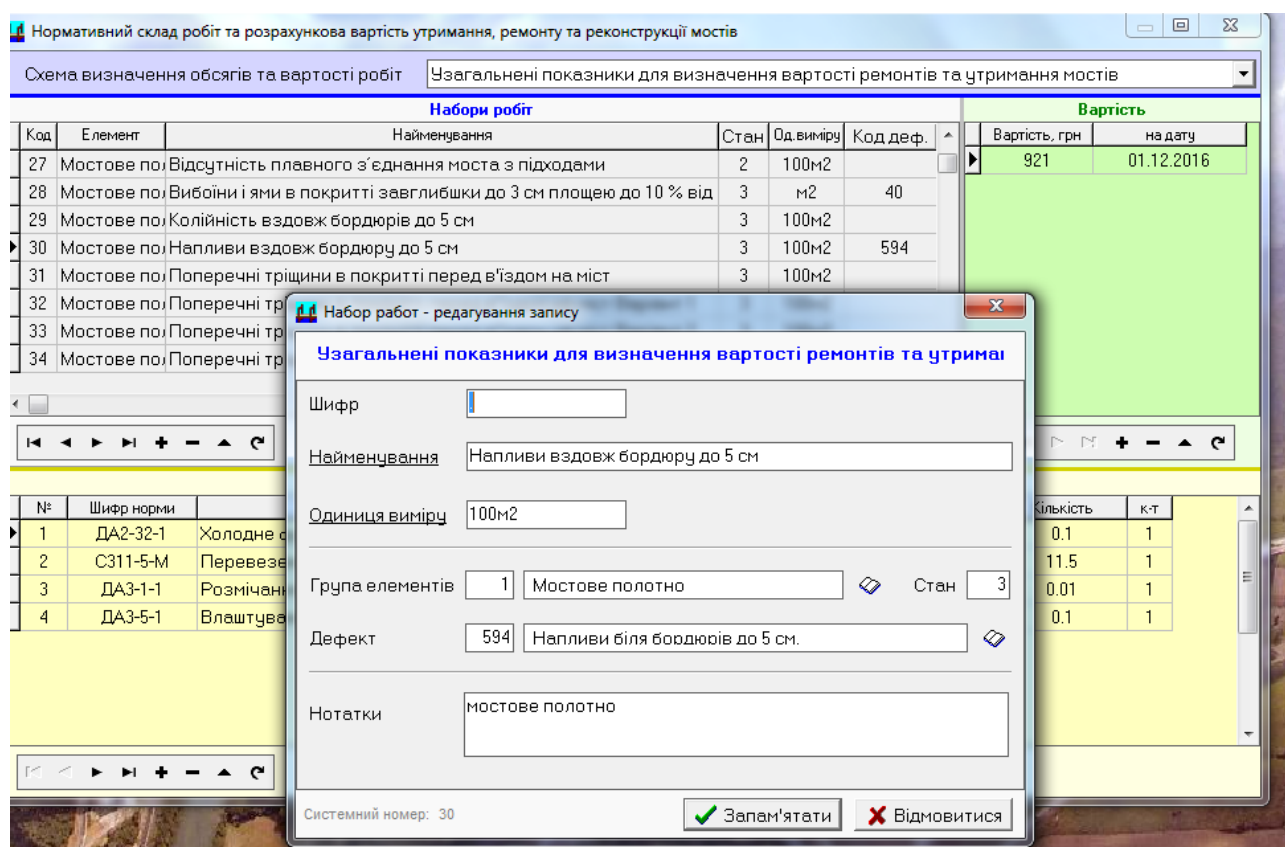


Рисунок 4.17 – Програмні вікна роботи з наборами робіт. Джерело: власна розробка

Були розроблені укрупнена та детальна (рис. 4.18) розрахункові відомості.

Дорога 'Т-17-07' Мала Рубілка-Палтава Міст на км 3 + 718 L = 86.00 м.											
Полтавська область (Котелевський район)											
Група елементів	№ п/п	Дефект			Набір робіт / роботи				Об'єм	Кількість всього	Прямі витрати, грн.
		Назва	Од. виміру	Стан	Назва	Од. виміру	Кільк-ть на одиницю	Ціна за одиницю, грн.			
	6	Пішкодження тіла стовпів на глибину до 70 мм з оголенням арматури на великих площках.	м2	4	Пішкодження тіла стовпів на глибину до 70 мм з оголенням та корозією арматури на великих площках	м2		1167	40		46680
					ДА4-2-1 Підготовка бетонних поверхонь елементів литихих силовуд, що підлягають ремонту	1 м2	1			40,00	
					ДА4-3-1 Очищення арматури та металоконструкцій за допомогою піскоструменного апарату з улаштуванням антикорозійного захисту	1 м2	1			40,00	
					Б13-13-13 Групування бетонних і обштукатурених поверхонь, комплексу БД-20, перший шар	100м2	0,01			0,40	
					ДА4-1-1 Влаштування пінобетонного захисного шару залізобетонних прогонових конструкцій вручну при товщині шару ремонтного матеріалу 20 мм	1 м2	1			40,00	

Рисунок 4.18 – Фрагмент детальної відомості розрахунку витрат на усунення дефектів. *Джерело:* власна розробка

В ході створення цього підходу були виявлені проблеми, а саме:

- при обстеженні/паспортизації переважно не визначаються обсяги дефектів;
- часткова невідповідність одиниць виміру дефектів одиницям виміру в наборах робіт.

Визначення точних обсягів дефектів потребує значного збільшення трудовитрат при обстеженні/паспортизації мостів і, відповідно, фінансування. Але ці обсяги змінюються в часі, тому вважаємо, що точне значення обсягів дефектів доцільно визначати при детальному обстеженні у складі проектних робіт з ремонтів мостів.

Для визначення орієнтовної вартості ремонтних робіт було запропоновано визначати усереднені обсяги дефектів, які б розраховувалися шляхом експертної оцінки.

По-перше, був проведений аналіз наявності дефектів на окремих конструктивних елементах (рис 4.19).

код деф.	1 - Мостове полотно	стан	Мостове полотно									
			Покриття	Деформаційні шви	Огородження бар'єрне	Гідроізоляція	Система водовідводу	Смуги безпеки	Розмітка	Настил		
										Металевий настил	Дерев'яний настил	
			11	12	13	14	15	16	17	18 1	18 2	
42	Засміченість асфальтобетоном водовідвідних трубок.	3										
44	Відсутність водовідвідних трубок.	4										
45	Повне руйнування деформаційних швів.	5										
46	Значна корозія водовідвідних трубок.	4										
49	Повне руйнування гідроізоляції.	5										
50	Руйнування асфальтобетонного покриття в місцях розташування деформаційних швів.	3										
51	Тріщини в покритті над деформаційними швами	3										
52	Пошкодження елементів деформаційних швів.	3										
..	Тріщини в покритті тротуарів в стиках тротуарних плит											

Рисунок 4.19 – фрагмент вибірки наявності дефектів по елементах мостових конструкцій. Джерело: власна розробка

Для ряду типових дефектів експертною групою розроблені усереднені обсяги дефектів (рис. 4.20).

Назва дефекта	Експл. стан	Формула розрахунку обсягів
Засміченість асфальтобетоном водовідвідних трубок.	3	$4 \times n$
Повне руйнування деформаційних швів.	5	$(\Gamma + 2 \times T) \times n$
Значна корозія водовідвідних трубок.	4	$4 \times n$
Повне руйнування гідроізоляції.	5	$L \times \Gamma$
Руйнування асфальтобетонного покриття в місцях розташування деформаційних швів.	3	$\Gamma \times 1 \text{ м} \times n$
Тріщини в покритті над деформаційними швами	3	$(\Gamma + 2 \times T) \times n$
Пошкодження елементів деформаційних швів.	3	$(\Gamma + 2 \times T) \times n$
Тріщини в покритті тротуарів в стиках тротуарних плит з розкриттям до 1 мм.	2	$2 \times T \times l \times n$
Руйнування покриття на тротуарах.	3	$2 \times T \times L$
Розладнання деформаційних швів.	4	$(\Gamma + 2 \times T) \times n$
Відсутність покриття на тротуарах.	4	$2 \times T \times L$
Пошкодження захисного шару залізобетонної бар'єрної огорожі.	2	$L \times 0.5 \times 2 \times 50\%$
Відсутність секцій поручневої огорожі.	4	$L \times 30\%$
Корозія металевої поручневої огорожі.	3	$50\% \times L \times 1.5$
Пошкодження гідроізоляції проїзної частини.	4	$L \times \Gamma$

L - довжина моста
l - довжина прогону
n - кількість прогонів
T - ширина тротуару
Γ - габарит моста
Ш - ширина моста

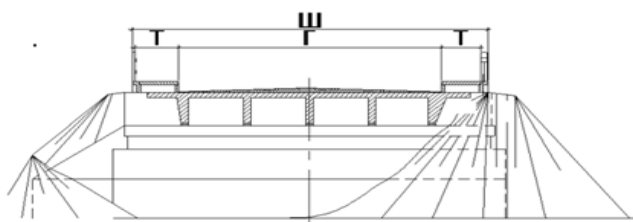


Рисунок 4.20 – Фрагмент відомості для розрахунку усереднених обсягів дефектів. Джерело: власна розробка

Було також змінено механізм прив'язки наборів робіт та дефектів (рис. 4.21) з одночасним визначенням формули розрахунку об'єму розповсюдження дефектів.

Опис дефекту	
Засміченість асфальтобетоном водовідвідних трубок.	
Вплив на експлуатаційні характеристики	
Застій води, відсутність водовідводу.	
Експлуатаційні заходи	
Відновлення працездатності елементів водовідводу.	
Експлуатаційний стан	3
Од.виміру	
шт.	
Дані для розрахунку вартості робіт по усуненню	
Ступінь ваги	
☐ недопустимий ■ ☒ обмежено допуст. ■ ☐ допустимий ■ ☐ не враховується ■	
Набор робіт	51
Заповнення водовідвідних трубок асфальтобетоном	
к-т переходу до одиниці виміру дефекту: шт. / 1 = шт.	
Набор робіт часткового усунення	
Формула для визначення обсягу	
(1) n кількість прогонів × 4	
Коефіцієнт: 4 Точність: 0	
Примітка	
4*n	

Рисунок 4.21 – Прив'язки дефектів та наборів робіт для їх усунення/
Джерело: власна розробка

Наступним кроком був перегляд та ранжирування дефектів за їх важливістю (тобто впливом на стан споруди) та повноти їх усунення, що дозволить враховувати різні обсяги фінансування. Наприклад, визначити який обсяг фінансування необхідний для часткового або повного усунення дефектів, що мають найбільший ступінь ваги, тобто можуть викликати аварію.

Для цього доцільно провести експертний розподіл дефектів в залежності від їх впливу на технічний стан конструкцій або споруди в цілому:

– *Недопустимі*. Дефекти, які відносяться до даної групи потребують першочергового обов'язкового повного або часткового усунення, навіть в умовах обмеженого фінансування. Ігнорування цих дефектів може привести до аварійних ситуацій, тобто до руйнувань і обрушень основних несних конструкцій мостів.

– *Обмежено допустимі*. Дефекти цієї групи не обмежують нормального функціонування споруди, але приводять до того, що елементи моста частково не відповідають вимогам проекту і при цьому не порушуються вимоги першої групи граничних станів.

– *Допустимі*. Всі інші дефекти, які не ввійшли в попередні дві групи. Дефекти цієї групи не обмежують нормального функціонування споруди, але приводять до того, що елементи моста частково не відповідають вимогам проекту, знижують довговічність споруди, і при цьому не порушуються вимоги ані першої, ані другої групи граничних станів.

Наприклад дефекти «обрив робочої арматури» та «наскрізні пролами в плитах» пропонуємо відносити до групи недопустимі, дефект «пошкодження захисного шару бетону» до групи обмежено допустимі, а дефект «сітка тріщин від усадки» до групи допустимі.

Також необхідно здійснити вибір варіантів наборів робіт з усунення дефектів в залежності від рівня фінансування. Це актуально у разі можливості усунення дефектів кількома різними наборами робіт (рис. 4.22).

Під час перенесення враховуються і будуються всі зв'язки між наборами робіт, їх детальним складом та вартістю, що дозволяє отримати повноцінну довідкову систему (рис. 4.23, 4.24).

Сама методика викладена в таблиці 4.2.

Нормативний склад робіт та розрахункова вартість утримання, ремонту та реконструкції мостів

Схема визначення обсягів та вартості робіт: Узагальнені показники для визначення вартості ремонтів та утримання мостів

Набори робіт					Вартість	
Код	Елемент	Найменування	Стан	Од.виміру	Вартість, грн	на дату
32	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 1	3	100м2	17277	01.12.2016
33	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 2	3	100м2		
34	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 3	3	100м2		
35	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 4	3	100м2		
36	Мостове полотно	Руйнування асфальтобетонного покриття в місцях розташуван	3	100м2		
37	Мостове полотно	Пошкодження елементів деформаційних швів Варіант 1	3	10м.п.		
38	Мостове полотно	Пошкодження елементів деформаційних швів Варіант 2	3	10м.п.		
39	Мостове полотно	Пошкодження елементів деформаційних швів Варіант 3	3	10м.п.		

Склад наборів робіт					Вартість	
№	Шифр норми	Найменування	Од.виміру	Кількість	к-т	
1	Е30-80-2	Улаштування заповненого деформаційного шва спряження прогонових конст	100м шва	0,1	1	

Набори робіт					Вартість	
Код	Елемент	Найменування	Стан	Од.виміру	Вартість, грн	на дату
32	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 1	3	100м2	52349	01.12.2016
33	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 2	3	100м2		
34	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 3	3	100м2		
35	Мостове полотно	Поперечні тріщини в покритті перед в'їздом на міст Варіант 4	3	100м2		
36	Мостове полотно	Руйнування асфальтобетонного покриття в місцях розташуван	3	100м2		
37	Мостове полотно	Пошкодження елементів деформаційних швів Варіант 1	3	10м.п.		
38	Мостове полотно	Пошкодження елементів деформаційних швів Варіант 2	3	10м.п.		
39	Мостове полотно	Пошкодження елементів деформаційних швів Варіант 3	3	10м.п.		

Склад наборів робіт					Вартість	
№	Шифр норми	Найменування	Од.виміру	Кількість	к-т	
1	ДА4-22-2	Відновлення заповнення деформаційних швів із заміною компенсаторів	1 м	10	1	

Рисунок 4.23 – Приклад багатоваріантності наборів робіт для усунення дефектів/ Джерело: власна розробка

Набори робіт					Вартість	
Код	Елемент	Найменування	Стан	Од.виміру	Вартість, грн	на дату
16	Мостове полотно	Ремонт поперечних тріщин	2	м.п.	856	01.12.2016
17	Мостове полотно	Ремонт похилих тріщин	2	м.п.		
18	Мостове полотно	Колійність вздовж бордюрів до 3 см	2	100м		
19	Мостове полотно	Напливи вздовж бордюрів до 3 см	2	100м		
20	Мостове полотно	Ремонт тріщин у стиках тротуарних плит	2	м.п.		
21	Мостове полотно	Фарбування поручневого огороження	2	10м.		
22	Мостове полотно	Фарбування бар'єрного огороження	2	10м.		
23	Мостове полотно	Незначна погнутість заповнення поручневої огорожі	2	1 ел		
24	Мостове полотно	Незначна погнутість заповнення стрічки металевої бар'єрної с	2	100м		
25	Мостове полотно	Відсутність болтів	2	шт		
26	Мостове полотно	Недостатня довжина водовідвідних трубок	2	шт		
27	Мостове полотно	Відсутність плавного з'єднання моста з підходами	2	100м		

Склад наборів робіт					Вартість	
№	Шифр норми	Найменування	Од.виміру	Кількість	к-т	
1	ДА2-32-1	Холодне фрезерування асфальтобетонного покриття із застосуванням фрез	1000 м2	0,1	1	
2	ДА3-1-1	Розмічання [точкування] покриття автомобільної дороги вручну перед нанесі	1км	0,01	1	
3	ДА3-5-1	Влаштування горизонтальної дорожньої розмітки фарбою вручну, нанесення	100 м	0,1	1	
4	С311-5-М	Перевезення сміття до 5 км	т	9,2	1	

Рисунок 4.24 – Форма ПК АЕСУМ «Нормативний склад робіт та їх розрахункова вартість/ Джерело: власна розробка

Таблиця 4.2 – Схема методики визначення витрат на проведення ремонтних робіт мостів за об'ємами, які розраховуються з урахуванням наявних дефектів розрахунку вартості робіт

Крок	Оператори алгоритму
1	Задати умови розрахунку: а) визначення обсягів – TypeV: 1 – за даними обстежень 2 – розрахунок по експертним формулам 3 – змішаний (застосування формул в разі відсутності обсягів в матеріалах обстежень) б) рівень фінансування – TypeF: 1 – усунення всіх дефектів 2 – залишаємо допустимі 3 – залишаємо допустимі та обмежено допустимі в) усунення дефектів TypeFull 1 – повне 2 – часткове
2	Задати (завантажити з бази даних) для врахування при розрахунку сумарної вартості ремонту індекс інфляції (I_i) та індекс цін (I_u)
3	Ініціалізувати змінну вартості $Cost = 0.0$
4	Відкрити таблицю з і інформацією наявних дефектів по споруді
5	Стати на перший запис таблиці дефектів
6	Зчитати дані з поточного запису таблиці дефектів: Кд Код дефекту; Вд Обсягу розповсюдження дефекту
7	Знайти запис в довіднику дефектів по коду Кд та зчитати розрахункові дані: DefectFinType Ранжирування (важливість) дефекту 1 – недопустимий 2 – обмежено допустимий 3 – допустимий 4 – не враховується NaborRabotCode Код набору зі складом робіт, що забезпечує повне усунення дефекту NaborRabotCodeLight Код набору зі складом робіт, що забезпечує часткове усунення дефекту Якщо NaborRabotCodeLight IsNULL тоді: NaborRabotCodeLight = NaborRabotCode CalcBase Базова формула (показник) для орієнтовного визначення обсягу дефектів VolBase CalcRate Коефіцієнт приведення значення за базовою формулу до розрахункового

Крок	Оператори алгоритму
	EdIzmRate Коефіцієнт приведення до одиниць виміру об'ємів в наборах робіт (наприклад: м2 – 100м2) 1 – 1 10 – 10 100 – 100 1000-1000 CalcRound Точність розрахунку (знаки після коми) [0, 1, 2, 3]
8	Перевірити на необхідність усунення дефекта: Якщо (DefectFinType = 4) або (TypeF = 3 та DefectFinType > 1) або (TypeF = 2 та DefectFinType > 2) тоді по усуненню дефекту роботи не проводяться – перехід до кроку 14
9	Визначити обсяг робіт по усуненню поточного дефекту V: а) Об'єм береться з результатів досліджень Якщо (TypeV = 1) або (TypeV = 3 та Vд <> NULL) тоді V = Vд б) В іншому випадку розрахунок по експертній формулі: V = ОКРУГЛИТИ (VolBase · CalcRate · EdIzmRate, CalcRound)
10	Визначаємо код набору робіт Кнр: Якщо TypeFull = 1 тоді Кнр = NaborRabotCode В іншому випадку Кнр = NaborRabotCodeLight
11	Прочитати по коду набору робіт Кнр вартість одиниці об'єму в таблиці вартості робіт – Ц
12	Розрахувати вартість робіт по усуненню поточного дефекту: C = Ц · V
13	Збільшити загальну вартість по споруді на вартість робіт по усуненню поточного дефекту: Cost = Cost + C
14	Перейти на наступний запис таблиці укрупнених показників вартості утримання мостів
15	Поки не останній запис таблиці укрупнених показників вартості утримання мостів
16	Обчислити коефіцієнт D приведення витрат до терміну T: $D = (1 + d)^t$, де d – дисконтний коефіцієнт (в транспортному будівництві d = 0,08)
17	Обчислити сумарну вартість ремонту моста з приведенням витрат до терміну T: $Cost = Cost \cdot I_i \cdot I_{\text{ц}} \cdot D$

Джерело: власна розробка

В табл. 4.3 наведено фрагмент відомості стратегії ремонтів

Таблиця 4.3 – Фрагмент відомості стратегії ремонтів

Рік	Стан на початок року	Рівень деградації на початок року	Вид робіт	Стан на кінець року	Рівень деградації на кінець року	Вартість робіт, тис. грн.
			Р-44 Суми-Путивль-Глухів		$E = 36; \lambda = 0.0318;$ $Ke = 11.3;$	
2018			(40040) Міст на км 55 + 578, вік - 60 р.	5 (В)	0.741	
2019	5	0.741	Капітальний ремонт	3	0.208	1011.9
2020	3	0.208	Експлуатаційне утримання	3	0.221	15.8
2021	3	0.221	Експлуатаційне утримання	3	0.234	15.8
2022	3	0.234	Експлуатаційне утримання	3	0.247	15.8
2023	3	0.247	Експлуатаційне утримання	3	0.260	15.8

Розрахункова економічна ефективність від оптимізації стратегії ремонтів мостів визначається як відношення економії приведених витрат при виборі варіанту з мінімальною вартістю $C_0 - C_{min}$ до початкового варіанту приведених витрат C_0 , сформованому за підходом «найгірші – перші» (рис. 4.25)

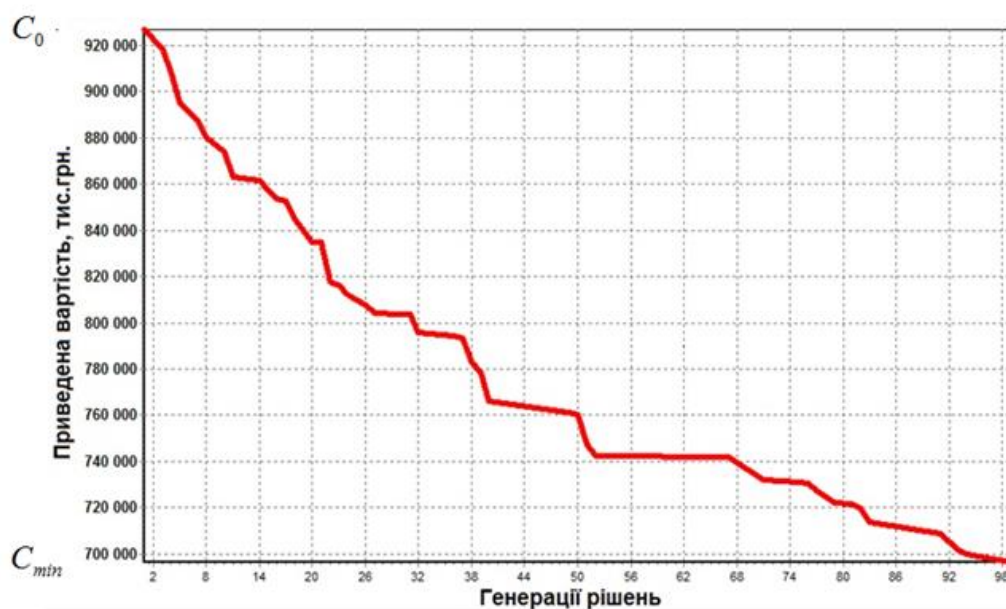


Рисунок 4.25 – Схема до розрахунку економічної ефективності

$$EE = \frac{C_0 - C_{min}}{C_0} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

Транспортну складову витрат враховуємо побічно через пріоритет моста.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Основним полем впровадження результатів дисертаційних досліджень є програмний комплекс АЕСУМ. Сьогодні цей програмний комплекс функціонує як *система з локальною базою даних* на рівні служб автомобільних доріг в областях і *центральною базою даних* в Укравтодорі. Система має багато необхідних функцій та можливості експорту локальних даних в центральну базу даних Укравтодору шляхом передачі файлів в узгоджених форматах на магнітних носіях або через інтернет.

2. Удосконалена система містить єдину центральну базу даних, тобто в цьому варіанті системи всі дані про наявність та стан мостів зберігаються на сервері ДП «ДерждорНДІ. Програмний комплекс має модульну структуру, Управління базою даних виконується модулем адміністрування. Модуль виконує функції наповнення бази та формування запитів. Модуль також відповідає за безпеку даних шляхом створення резервних копій.

3. В рамках дисертаційні роботи запроектовано і підключено до АЕСУМ підсистему обґрунтування стратегії відновлення технічного стану мостів. Розроблено інтерфейс оперування процесом оптимізації з використанням еволюційного методу пошуку рішень та аналізу отриманих результатів. Кінцевим виходом роботи модуля є звіт про оптимальну стратегію відновлення технічного стану мостів на вибраній мережі доріг або по окремому мосту.

4. За допомогою запропонованого в дисертації програмного модулю на основі реальних даних з АЕСУМ (305 мостів Вінницької області) отримані важливі результати відносно структури розподілення витрат на експлуатаційне утримання, дрібний поточний, поточний середній, капітальний ремонт і

реконструкцію мостів. Капітальні витрати складають 40 – 70 % від загальної суми витрат, в залежності від реального стану мостів на досліджуваній мережі доріг державного значення.

5. Економічна ефективність від оптимізації стратегії ремонтів мостів знаходиться в межах 15 – 25 %.

6. Для роботи фінансово-економічного модуля у складі АЕСУМ важливим вихідним параметрам для створення стратегічних програм з відновлення технічного стану мостів на мережевому рівні є вартість 1 м² кожного виду ремонтів мостів. Від точності визначення цього параметру буде залежати достовірність прогнозу необхідних фінансових ресурсів для досягнення певного стану мостів за показниками надійності, рівня деградації тощо.

7. Запропоновано методику визначення вартості 1 м² ремонтів мостів, засновану на визначенні складу робіт, необхідних для усунення дефектів споруди, виявлених в результаті обстеження/паспортизації, що дозволить розрахувати орієнтовну вартість проведення ремонтів на об'єктному рівні. В подальшому буде можливо визначати усереднену вартість ремонтно-експлуатаційних робіт мостів більш деталізовано – окремо на рівні доріг державного, місцевого значення, в розрізі областей, окремих доріг, за матеріалом, за типом споруди, її конструкцією, за довжиною тощо.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішене актуальне науково-практичне завдання удосконалення проектування ремонтів автодорожніх мостів з урахуванням їх впливу на довговічність і тривалість експлуатації мостів. Цим дослідженням доведено, що проектування раціональної стратегії ремонтів автодорожніх мостів за показниками довговічності і тривалості експлуатації може бути ефективним інструментом підтримання технічного стану мостів в умовах недостатнього фінансування на їх утримання.

Виконані теоретичні дослідження та їх практична реалізація дозволяють зробити такі висновки:

1. Виконаний аналіз публікацій показав, що більшість відомих підходів проектування ремонтів мостів орієнтовані на ліквідування дефектів і пошкоджень елементів, тоді як у сучасних умовах є необхідність оцінювання в процесі проектування впливу ремонтів на залишковий ресурс.

2. Встановлений кількісний критерій для мостів, що перебувають у п'ятому (непрацездатному) стані, який дозволяє на основі даних обліку в АЕСУМ швидко визначити доцільність капітального ремонту або реконструкції моста замість його закриття і заміни новим. Величина критерію доцільності K_E має інтервали значень: група А ($K_E < 3$), група Б ($3 \leq K_E < 6$) і група В ($K_E \geq 6$).

3. Розроблена модель визначення пріоритетів мостів, які потрібно враховувати при обґрунтуванні параметрів процесу відновлення їх технічного стану на рівні мережі автомобільних доріг.

4. Розроблені моделі і механізм обґрунтування стратегії ремонтів мостів на мережі автомобільних доріг за критеріями мінімуму середньорічного рівня деградації або приведеної вартості експлуатаційних заходів, а також одночасно за цими двома критеріями з урахуванням бюджетних обмежень, що дозволяє збільшити тривалість життєвого циклу мостів у фазі експлуатації та знизити вартість їх утримання. Встановлені раціональні значення параметрів еволюційного алгоритму обґрунтування: вихідна кількість рішень 200 – 250,

кількість генерацій алгоритму 150 – 200. Імовірність рекомбінації рішень 0,8 – 0,9, імовірність регенерації рішень 0,008 – 0,010.

5. Розроблено інструментарій оцінювання і прогнозування технічного стану мостів, механізму обґрунтування стратегії ремонтів у програмному комплексі АЕСУМ, чим розширюється практична можливість пошуку ефективної стратегії ремонтів мостів. Створено методику використання розробленого інструментарію. Розрахункова економічна ефективність від оптимізації стратегії ремонтів мостів може складати 15 – 25 % порівняно зі стратегією «найгірші – перші».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные технологии компьютерное моделирование в прикладной математике». Нижний Новгород, 2007. – 85 с.
2. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин ; [пер. с англ.] – М.: Мир, 1989. – 344 с.
3. Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами Украины // Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск: 2015. Вып. № 2 (16). С. 18-23 (Беларусь).
4. Боднар Л.П. Генетичні алгоритми в оптимізації стратегій ремонтів мостів. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна*. Вип. 6, Дніпр.: 2014, с. 18 – 23.
5. Боднар Л.П. Критерії формування планів обстежень мостів / Боднар Л.П., Коваль П.М., Степанов С.М. // *Автошляховик України*, №2 (254), 2018. С.34-42.
6. Боднар Л.П. Свідоцтво серія № 68663 Комп'ютерна програма «Оптимізація стратегії експлуатації мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 16.11. 2016 р.
7. Боднар Л.П. Свідоцтво серія № 68904 Науковий твір «Критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 06.12. 2016 р.
8. Боднар Л.П. Теоретичні засади управління довговічністю автодорожніх мостів / Л.П. Боднар // *Автошляховик України*, №4 (240), 2014. – с.37–40.

9. Боднар Л.П., Лантух-Лященко А.І., Канін О.П., Коваль П.М., Фаль А.Є. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження // *Дорожня галузь України*. 2011. №7. С. 42-47.

10. Боднар Л.П., Редченко В.П. Про посібник до національного стандарту щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів // *Автошляховик України*, №1 (257), 2019. С. 40 - 45.

11. Боднар Л.П., Канин А.П. Задача обоснования стратегий эксплуатации мостов на автомобильных дорогах. *Международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги: безопасность и надежность»*. Сборник докладов. (24-25 ноября 2016 г), Минск. С. 179-183.

12. Боднар Л.П., Канін О.П., Панібратець Л.Г., Степанов С.М. Оптимізація стратегій експлуатації мостів // *Дороги і мости*: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 54-65.

13. Боднар Л.П., Канін О.П., Халай Т.О. Модель обґрунтування стратегії ремонтів мостів // *Вісник Національного транспортного університету*: В 2-х частинах: Ч.1. – К.: НТУ, 2012. – Випуск 26. – 47–52 с.

14. Боднар Л.П., Кушнір О.В., Коваль П.М., Панібратець Л.Г. Робота асфальтобетонного покриття в зоні примикання деформаційних швів на автодорожніх мостах // *Дороги і мости*: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 74- 80.

15. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М., Стабровський О.О. Визначення прогнозованої вартості проведення ремонтів мостів з використанням Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ) // *«Дороги і мости»*: зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2016. Вип.16. С. 28-35.

16. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М. Обстеження мостів та вдосконалення критеріїв планів з обстежень // *«Дороги і мости»*: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2017. Вип.17. С. 42-53.

17. Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами. Опыт внедрения. Современное положение. Перспективы развития / Л.П. Боднар // Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука –

будущее Литвы» ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК. – Вильнюс: Техника, 2013. – с. 263–268.

18. Боднар Л.П. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження / Л.П. Боднар, А.І. Лантух-Лященко, О.П. Канін, П.М. Коваль, А.Є. Фаль // *Дорожня галузь України*. – 2011. – №7. – с. 42–47.

19. Боднар Л.П. Досвід впровадження Аналітичної експертної системи управління мостами. / Л.П. Боднар, П.М. Коваль, А.Є. Фаль, Л.Г. Панібратець // *«Дороги і мости»*: зб. наук. пр. – К.: ДП «ДерждорНДІ», 2010. – Вип.13. – с. 39–46.

20. Боднар Л.П. Моделі оптимізації стратегії експлуатації автодорожніх мостів LXXII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету (м. Київ, травень 2016 р). – с. 162.

21. Боднар Л.П. Обґрунтування рівнів утримання залізобетонних мостів в управлінні програмами їх експлуатації / Л.П. Боднар // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА БУДІВНИЦТВА*. – Львів : Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2010. – № 662. – с. 65–69.

22. Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку / Л.П. Боднар // *«Дороги і мости»*: зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2010. – Вип.12. – с. 31–39.

23. Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ: досвід впровадження, сучасний стан та напрями подальшого розвитку / Л.П. Боднар, О.П. Канін, Л.Г. Панібратець // *Вестник ХНАДУ*: сб. научн. трудов. – Харьков, 2012. – Вып. 58. – с. 20–23.

24. Боднар Л.П. Сучасний інструмент управління мостами / Л.П. Боднар, Панібратець Л.Г., Завгородній С.С., Чурсін О.П. // *Дорожня галузь України*. – 2016. - №4. - С. 46-51.

25. Боднар Л.П. Управління утриманням елементів залізобетонних мостів на основі моделей нечіткої логіки // *Вісник Дніпропетровського*

національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. Вип.33. С. 39-42.

26. Larysa Bodnar, Alex Kanin, Sergii Stepanov. Genetic Algorithm to optimize the strategies for bridge repair works. 2018. 10 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://zenodo.org/record/1485402#.XDX1nGmLmUk..>

27. Бородай Д.И. Проектирование жизненного цикла изгибаемых элементов железобетонных автодорожных мостов / Д.И. Бородай // *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. – Т. 8, № 4. – 2012. – с. 205–215.

28. ВБН Г.1-218-530:2006 Класифікація робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. – Київ, 2006.

29. ВБН В.3.1-218-190-2004 «Утримання мостових споруд на автомобільних дорогах загального користування». – Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), К.: 2004.

30. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология.–2–е изд., стер.–М.: Наука. Гл. ред. физ–мат лит., 1988.–208 с.

31. Гамеляк І. П. Надійність встановлення розрахункових параметрів навантаження на конструкції дорожніх одягів. Зб. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 76. –К.: 2009 – с.3–9.

32. Генетические алгоритмы. – URL: http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/UFLP/uflp_ga.html.

33. Гончаров Е. Н., Кочетов Ю. А. Поведение вероятностных жадных алгоритмов для многостадийной задачи размещения. *Дискретный анализ и исследование операций*. Сер. 2. т6 (1999), № 1, с. 12–32.

34. Давиденко О.О. Моделювання життєвого циклу автодорожніх мостів/: дис. канд. техн. наук: 05.23.17 Давиденко Олександр Олександрович; Національний транспортний університет – К., 2017. – 170 с.

35. ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво». – Мінрегіонбуд України, К.:2014.

36. ДБН В.1.2-14:2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд», Мінрегіон України. «Укрархбудінформ», К.: 2018.

37. ДБН В.1.3-14:2006. «Мости і труби. Правила проектування» – Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства. – К.: 2006.

38. ДБН В.2.3_14:2006 «Мости та труби. Правила проектування». – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с.

39. ДБН В.2.3-22:2009 «Мости і труби. Основні вимоги проектування». – Мінрегіонбуд України, К.: 2009.

40. ДБН В.2.3–6:2009 Мости та труби. Обстеження і випробування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.

41. Дехтяр А.С. Оптимальна експлуатація залізобетонних мостів // *Системні методи керування, технології та організації виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів.* – 2001, в.12. – с.385 – 392.

42. Дехтяр А.С. Оптимальні терміни і об'єми ремонту залізобетонних мостів // *Ремонт та експлуатація мостів* Наукові праці Фізико – технічного інституту НАНУ ім. Карпенка (Львів).–2001.– с.17–24.

43. Дехтяр А.С. Планування експлуатації залізобетонних мостів // *Збірник наукових праць № 5 "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій".* – Львів, 2002 р. – с. 471 – 477.

44. Дехтяр В.Г., Лантух-Лященко А.І. До проблеми оцінки зносу елементів моста.// *Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво.* Вип.59. Український транспортний університет. Київ, 2000.– с. 33 – 36.

45. Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Гамеляк І. П., Райковський В. Ф., Якименко Я. М. Надійність конструкцій дорожнього одягу / М. Ф. Дмитриченко, М. М. Дмитрієв, І. П. Гамеляк, В. Ф. Райковський, Я. М. Якименко // *Навч. посібник.* – К.: НТУ. – 2012. – 206 с.

46. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій. (EN 1990:2002, IDN) // Київ, Мінрегіонбуд України, 2010.

47. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». – Мінрегіонбуд України, К.: 2013.

48. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов.// – М.: НИЦ «Инженер», 1999. – 294 с.

49. Канін О.П. Аналіз вартості життєвого циклу автомобільних доріг / О.П. Канін, В.В. Діденко // *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. – К.: НТУ – 2011. – Вип. 9. – с. 67–71.

50. Канін О.П. Генетичний алгоритм оптимізації програм ремонту дорожнього одягу автомобільних доріг. / О.П. Канін, В.В. Ігнатюк // *Управління проектами, системний аналіз і логістика*: Науковий журнал. Вип. 10. – К.: НТУ, 2012, 635 с.

51. Канін О.П. Інформаційно-аналітична система управління довгостроковими контрактами на основі рівнів обслуговування доріг / О.П. Канін // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: Науково-технічний збірник. Вип. 94. – К.: НТУ, 2015. – С. 112-123.

52. Канін О.П. Інформаційно-аналітична система управління дорожнім господарством / О.П.Канін, Н.М. Соколова, А.М. Харченко // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип.84. – Київ, 2012. – с.133–139.

53. Канін О.П. Інформаційно-аналітична система управління дорожнім господарством на основі веб-технології / О.П.Канін // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: Науково-технічний збірник. Вип. 95. – К.: НТУ, 2016. – С. 129-142.

54. Канін О.П. Оптимізація життєвого циклу автомобільних доріг за допомогою генетичного алгоритму / О.П. Канін, В.В. Діденко // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. – К.: НТУ – 2011. – Вип. 80. – с. 73–78.

55. Канін О.П. Шляхи оптимізації програми дорожньо-ремонтних робіт/ О.П. Канін, В.В. Ігнатюк // Науково-технічний збірник: «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Вип 81. – К: НТУ, 2011. с.108–114.

56. Класифікація робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування СОУ 42.1-37641918-105:2013. К.: Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), 2013.

57. Коваль П. Внедрение аналитической экспертной системы управления мостами в Украине / П. Коваль, А. Лантух-Лященко, С. Сидун // Материалы юбилейной научно-технической конференции «80 лет Белорусской дорожной науке 1928–2008». – Минск, 2008. – с. 156 – 165.

58. Кожушко В.П. Повышение долговечности автодорожных мостов: монография / В.П. Кожушко, А.В. Бильченко, А.Г. Кислов и др.; под. ред. В.П. Кожушко. – Харьков: ХНАДУ, 2016. – 236 с.

59. Королюк В. С., Броди С, М., Турбин А. Ф. Полумарковские процессы и их применение / В. С. Королюк, С. М. Броди, А. Ф. Турбин // Издательство «Наукова думка», Киев —1976, 184 стр.

60. Лантух-Лященко А. І. До розробки галузевої аналітичної експертної системи управління мостами // Зб. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип. 69. – К.: 2004. – с. 120–126.

61. Лантух-Лященко А.І., Медведев К.В. К вопросу определения граничного износа сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста. Сборник *Вестник ХНАДУ* № 58 Х.: 2012 – с. 90–95.

62. Лантух-Лященко А.І О прогнозе остаточного ресурса моста. - Зб. *Дороги і мости*. – К.: ДерждорНДІ, вип. 7, т.1. 2007.– с. 3–9.

63. Лантух-Лященко А.І. До проблеми оцінки зносу елементів моста Зб. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Вип.59. Український транспортний університет. Київ, 2000.– с. 33–36.

64. Лантух-Лященко А.І. До проекту державних будівельних норм з оцінки технічного стану мостів. // Зб. *Діагностика, довговічність та*

реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Вип.1., Львів: Каменяр, 2000.– с.78–83.

65. Лантух-Лященко А.І. Марковские модели накопления повреждений. *Наука и искусство. Промислове будівництво та інженерні споруди*, №2. К.: 2009.– с. 22–25.

66. Лантух-Лященко А.І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації /А.І. Лантух-Лященко// *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. зб.* – К.:УТУ, 2001. – Вип.61. – с.33–36.

67. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. // *Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво.* – 1999, вип.57 – с.183–188.

68. Лантух-Лященко А.І. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений. Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», М.: МИИТ, 2006.– с. 259–265.

69. М – 218-03450778-615 – 2007 «Методика прогнозування витрат на утримання і ремонт мостів». – Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор) , К.: 2007.

70. М 218-03450778-425:2005 «Методика оцінки обсягів та структури робіт з поточного утримання мостів». – Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор) , К.: 2005.

71. Методика визначення обсягу фінансування будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг. Затверджено Наказом Міністерства інфраструктури України, Міністерства фінансів України 21.09.2012 № 573/1019.

72. Мозговий В. В Підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття проїзної частини південного мостового переходу через р. Дніпро в Києві / Мозговий В. В., Бесараб О. М., Богданов О. І., Онищенко А. М., Прудкий О. В., Мозговий О. В. // *Механіка і фізика*

руйнування будівельних матеріалів та конструкцій – 2005. – Вип. 6 – с. 709–715.

73. П-Г.1-218-118:2005 Єдині правила зимового утримання автомобільних доріг.

74. Радовский Б.С. Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США / Б.С. Радовский // *Дорожная техника*. – 2006. – URL: <http://library.stroit.ru/articles/dorpokr/> (дата звернення 10.01.2015).

75. Ремонт автомобільних доріг загального користування. Види ремонтів та перелік робіт ГБН Г.1-218-182:2011. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2011.

76. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с.

77. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

78. СААТИ Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. СААТИ // Перевод с английского Р. Г. Вачнадзе Москва «Радио и связь» 1993. – 278 с.

79. СОУ 42.1-37641918 – 093:2012 Мости та труби. Варіантне проектування мостів.

80. СОУ 45.2 – 00018112 - 026:2007 Споруди транспорту. Дефекти автодорожніх мостів. Класифікація.

81. Справочная энциклопедия дорожника. Ремонт и содержание автомобильных дорог // М. – 2004. – 1129 с.

82. Стариков А. Генетические алгоритмы. URL: http://www.basegroup.ru/library/optimization/ga_math/ (Last accessed: 05.05.2019).

83. Харченко А.М. Удосконалення методів проектування річної програми робіт дорожньо-ремонтних організацій: дис. канд. техн. наук: 05.13.22 Харченко Анна Миколаївна; Національний транспортний університет – К., 2010. – 183 с.

84. Эволюционные методы моделирования и оптимизации сложных систем: Конспект лекций, Авторы-составители: Е.С. Семенкин, М.Н. Жукова, В.Г. Жуков, И.А. Панфилов, В.В. Тынченко, Красноярск 2007. – 310 с. – URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/22/u_lectures.pdf (Last accessed: 05.05.2019).

85. Янчук Л.Л. Прогнозування технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах: дис. канд. техн. наук: 05.22.11 Янчук Леонід Леонідович; Національний транспортний університет – К., 2016. – 166 с.

86. Яцко Ф.В. Моделювання і прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах: дис. канд. техн. наук: 05.23.17 Яцко Федір Володимирович; Національний транспортний університет – К., 2015. – 237 с.

87. Al-Assar, R., He, Z., Tighe, S., and Haas, R. (2000), “Simplified User Delay Cost Model for Pavement and Bridge Life Cycle Analysis”, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Alberta. URL: <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2003/pdfs/wilson.pdf>

88. AL-Subhi, K., Johnston, D. and Farid, F. (1989), “Optimizing System-Level Bridge Maintenance, Rehabilitation and Replacement Decisions”. Report, HWA/NC/89-001. FHWA, Department of Transportation, U.S. URL: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1490/1490-004.pdf>.

89. Amini A. Identifying and evaluating the effective parameters in prioritization of urban roadway bridges for maintenance operations / A. Amini, N. Nikraz, A. Fathizadeh // *Australian Journal of Civil Engineering*, 2016 V.. 14,. 1, 23–34. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/14488353.2015.1092640?needAccess=true> (Last accessed: 20.03.18).

90. Base, G.D., “Control of Flexural Cracking in Reinforced Concrete,” Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia, Vol. CE 18, No.1, 1976, pp. 20–23.

91. Ben-David I. Economic Optimization of Project Risk Management Efforts / Itzhak Ben-David, Gad Rabinowitz, Tzvi Raz. Project Risk Management Optimization, 2001. – 14 p.

URL: <http://fisher.osu.edu/fin/faculty/Ben-David/articles/BDRR2002.pdf>.

92. Benjamin, Jack R. and Lind, N.C. (1969). “A Probabilistic Basis for a Deterministic Code,” ACI Journal Proceedings. V. 66. No. 11. pp. 857–865.

93. Bortot F., Zonta D. & Zandonini R. A bridge management strategy based on future reliability and semi-markov deterioration model / F. Bortot, D. Zonta & R. Zandonini // University of Trento, Italy, 2006. - 8 p.

94. Bridge Preservation Guide. Maintaining a State of Good Repair Using Cost Effective Investment Strategies // FHWA Publication Number: FHWA-HIF-11042 2011. – 30 p. URL:

<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/preservation/guide/guide.pdf>.

95. Bridge Prioritization Formula , 2017. – 21 p. – URL: http://www.virginiadot.org/business/resources/bridge/SGR_PrioritizationFormula_Description_08-31-2018.pdf (Last accessed: 20.05.19).

96. Calgaro, J.A. Introduction aux Eurocodes – Securite des Construction et Bases de la Theorie de la Fiabilite/ Presses de l'ENPC, Peris : 1996.

97. CEB-FIP “Model Code 1990”, Thomas Telford, 1993, 437 pp.

98. Chase, S.B. Synthesis of National and International Methodologies Used for Bridge Health Indices / Chase, S.B., Adu-Gyamfi, Y., Aktan, A.E., and Minaie, E. // Report No. FHWA-HRT-15-081, 2016. – 56 p. – URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/15081/15081.pdf> (Last accessed: 20.03.17).

99. Chen, C-J., and Jonston, D. (1987), “Bridge Management under a Level of Service Concept Providing Optimum Improvement Action, Time and Budget Prediction”, FHWA/NC/88-004. Center for Transportation studies, Civil Engineering Department, North Carolina State University, 383 pages.

100. Cheung, S., Thomas K., and Tam, C., (2002), "Site Pre-Cast Yard Layout Arrangement Through Genetic Algorithms", *Automation in Construction*, 11 (1), January, pp. 35–46.
101. CIRIA (1977). Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes.
102. Coello C.A. Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization / Carlos A. Coello Coello // *CINVESTAV-IPN, Depto. de Ingenier'ia El'ectrica Secci'on de Computaci'on Av. Instituto Polit'ecnico Nacional*, Mexico, 2001. – 77 p. URL: http://ftp.bstu.by/ai/To-dom/My_research/Papers-0/For-lecture/Moga/tutorial-slides-coello.pdf (Last accessed: 20.05.19).
103. Collines, L. (1972), "An introduction to Markov Chain Analysis", CATMOG, Geo Abstracts Ltd. University of East Anglia, Norwich.
104. Comit  Euro-Internationale du Beton. CEB-FIP Model Code 1990. 1993 CEB Bulletin d'Information No. 213/214.
105. Cornell, A.C. A Probability Based Structural Code // *ACI Journal* No. 12, Vol. 66, 1969, pp. 974–985.
106. Corotis, Ross B. (1985). Probability Based Design Codes, *Concrete International*, Vol. 7, No. 4, April 1985, pp. 42-49.
107. Das P.S. New Development in Bridge Management Methodology // *Structural engineering international*.-1998, v.8, N4.– p. 299 – 302.
108. DuraCrete, Probabilistic Methods for Durability Design, Document BE95- 1347/R0, The European Union - Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1999.
109. El-Behairy H., Hegazy T., Elbeltagi E.. Bridge Deck Management System with Integrated Life Cycle Cost Optimization. // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1866, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 44-50. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/b47b/7f44f668beb6725548c00408a8368c524f76.pdf>
110. Elbehairy Hatem Bridge Management System with Integrated Life Cycle Cost optimization / Hatem Elbehairy // A thesis submitted for the degree of Doctor

of Philosophy, Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2007. – 193 p. – URL: <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/3017/Hatem%20Thesis.pdf?sequence=1> (Last accessed: 20.05.19).

111. Elkhalek H. A. Framework for Bridges Maintenance in Egypt / Hesham Abd Elkhalek, Sherif M. Hafez, Yasser El Fahham // *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 6, Issue 1, (Part - 5) January 2016, pp.48-54. – URL: http://www.ijera.com/papers/Vol6_issue1/Part%20-%205/F61054854.pdf.

112. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design. European Committee for Standardization. Brussels: – 2003.

113. Estes A.C. A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges // Full text for the Doctor of Philosophy degree, 1997. -420 p. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a331297.pdf>.

114. Estes A.C., Frangopol D. M. Repair Optimization of Highway Bridges using System Reliability Approach / Allen C. Estes, Dan M. Frangopol // ASCE, 1999.

115. ETSI PROJECT (Stage 1) Bridge Life Cycle Optimisation / Editors: Jutila A. & Sundquist H. Helsinki University of Technology Publications in Bridge Engineering. Espoo 2007. – 167 p. – URL: http://etsi.aalto.fi/Etsi3/PDF/Reports/ETSI_Stage1.pdf. (Last accessed: 20.05.19).

116. Forrest, S. (1993), “Genetic Algorithms: Principles of Natural Selection Applied to Computation”, *Science*, Vol. 261, pp. 872–878.

117. Frangopol D. Reliability Deterioration and Lifetime Maintenance Cost Optimization *Journal of computing in Civil Engineering*. 2001), pp. 27–34. - URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.600.4357&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed: 20.05.19).

118. Frangopol D.M. (1999). Life-cycle cost analysis for bridges. In D.M. Frangopol, editor, *Bridge Safety and Reliability*, pages 210-236. ASCE, Reston, Virginia. URL: <https://www.worldcat.org/title/bridge-safety-and-reliability/oclc/41326662> (Last accessed: 20.05.19).

119. Frangopol D.M. Multiobjective Optimization for Risk-Based Maintenance and Life-Cycle Cost of Civil Infrastructure Systems / D.M. Frangopol, M. Liu // IFIP-TC7, 2005. - P. 123-137. - URL: <http://dl.ifip.org/db/conf/ifip7/ifip7-2005/FrangopolL05.pdf> (Last accessed: 20.05.19).

120. Frangopol D.M., Dong Y., Sabatino S. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making / Dan M. Frangopol, You Dong, Samantha Sabatino // *Structure and Infrastructure Engineering. Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, Volme 13, 2017. - URL:

<https://pdfs.semanticscholar.org/f2a5/3079069556ba59e0c7ecfa2f9360ca8128a4.pdf>

121. Frangopol, D., Kong, J., and Gharaibeh, E. (2001), "Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges", *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 15 (1), pp. 27–34. - URL: <http://www.ce.cmu.edu/~hsm/im2003/readings/Frangopol-cce-01.pdf>.

122. Frangopol, D.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions / Dan M Frangopol, Maarten-Jan Kallen and Jan M van Noortwijk // *Prog. Struct. Engng Mater.* 2004; 6:197–212. URL: <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=attachment&id=3186>.

123. Frangopol, D.M., and Liu, M. (2007). "Maintenance and Management of Civil Infrastructure Based on Condition, Safety, Optimization, and Life-Cycle Cost," *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, pp. p. 29–41. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732470500253164>.

124. Harper W.V., Al-Salloum A., Al-Sayyari S., Al-Theneyan S., Lam J., Helm C. Selection of Ideal Maintenance Strategies in a Network-Level Bridge Management System / W.V. Harper, A. Al-Salloum, S. Al-Sayyari, S. Al-Theneyan, J. Lam, C. Helm // *Transportation Research Record* 1268, 1990. Pp. 59 – 67. – URL:

125. Hawk H. Development of Life-Cycle Activity Profiles in BRIDGIT Bridge Management System. URL:

URL:<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/conf/1995/cp7/cp7v2.pdf>.

126. Hawk H., (1999), “BRIDGIT: User-Friendly Approach to Bridge Management”, Transportation Research Circular, 498, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. E-7/1 - E-7/15. URL: <https://trid.trb.org/view/500564>

127. Hearn. G Condition Data and Bridge Management System // Structural engineering international.-1998, v.3, N8.– P. 216–221.

128. Holický M. The target reliability and design working life // WIT Transactions on the Built Environment, Vol 117, 2011 WIT Press. – 10 p. URL: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SAFE11/SAFE11015FU1.pdf> (Last accessed: 20.05.19).

129. Hu X. Reliability-Based Optimization for Maintenance Management in Bridge Networks / Xiaofei Hu // Thesis for the Doctor of Philosophy degree, University of California, Berkeley, 2014. – 61 p. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/7257/e93a941eea0c277e929703ce18a4a3682035.pdf> (Last accessed: 20.05.19).

130. ISO 13822 (2003) Bases for design of structures – Assessment of existing structures. URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/912505/>.

131. ISO 2394. - General principles on reliability for structures. - European Committee for Standardization. Brussels.1998: – 62 p. URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/918604/>.

132. Klein, F., Hoffman, E.S., and Rice, P.F., Application of Strength Design Methods to Sanitary Structures, *Concrete International*, Vol. 3, No. 4, April 1982, pp. 35–40.

133. Lantoukh-Liachtchenko A.I. Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures Proceeding “EKO MOST 2006. *Durable bridge structures in the environment*”, Kielce, 16-17 May 2006/ WARSZAWA 2006. – ISBN 83-89252-85-6: p. 255–261.

134. Lauridsen J., Bjerrun J, Andersen N.H. , Lassen B. Creating a bridge management system // Structural engineering international.-1998, v.3, N8.– p. 216 – 221.

135. Lay S.: Service Life Design of Reinforced Concrete Structures Exposed to Deicing Salts –A Case Study, Proceedings of “3rd International IABMAS Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems and fib WP 5.3-1, TG 5.6.

136. Life-365: Service Life Prediction Model. Computer program for predicting the service life and Life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides. Silica Fume Association, 2001. URL: <https://www.nrmca.org/research/Life365v2UsersManual.pdf> (Last accessed: 20.05.2019).

137. Liu C. Evolutionary Multiobjective Optimization in Engineering Management: An Empirical Study on Bridge Deck Rehabilitation / Chunlu Liu // 2005. - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1579027> (Last accessed: 20.05.2019).

138. Liu Chunlu., Hammad Amin, Iton Yoshito. Cost optimization of Bridge Decks Using Genetic Algorithm. – URL: <http://users.encs.concordia.ca/~hammad/papers/J11.pdf> (Last accessed: 20.05.2019).

139. Liu H. Adaptive Optimization Methods in System-Level Bridge Management / Haotian Liu // Thesis for the Doctor of Philosophy degree, University of California, Berkeley, 2013. – 95 p. URL: <https://escholarship.org/content/qt0dm7g2d2/qt0dm7g2d2.pdf>.

140. Liu, C., Hammad, A. and Itoh, Y. Multiobjective optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using a Genetic Algorithm / C. Liu, A. Hammad and Y. Itoh // *Microcomputers in Civil Engineering*, 12(6), 1997. - pp. 431–443. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/0885-9507.00075>.

141. Liu, M., and Frangopol, D.M. (2004). Optimal Bridge Maintenance Planning Based On Probabilistic Performance Prediction, *Engineering Structures*, Elsevier, pp. 991–1002. URL: https://www.researchgate.net/publication/222197273_Optimal_bridge_maintenance_planning_based_on_probabilistic_performance_prediction.

142. Lounis Z. Optimization of Bridge Maintenance Management Using Markovian Models / Z. Lounis, D. Vanier // Proceedings of the International Conference on Short and Medium Span Bridges, 1998, Calgary, pp.1045-1053, URL:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.6.4092&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed: 20.05.2019).

143. Lounis, Z., and Madanat, M.S. "Reliability-based service life prediction of deteriorating concrete structures".- Pros/ 3rd Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions, Vol.1, 2001. pp. 965–972. URL: <http://www.zndxzk.com.cn/down/paperDown.aspx?id=2057337>.

144. Lounis Z. Risk-based maintenance optimization of aging highway bridge decks / Zjubir Luonis // NRCC-48383, *Building Science Insight*, 2006. –12 p. URL: <https://www.gla.ac.uk/external/asranet/publicarea/Session/Session%205/53.pdf>.

145. Lwambuka L. Bridge Management Strategy Based on Extreme User Costs for Bridge Network Condition / Ladislaus Lwambuka and Primus V.Mtenga // Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Civil Engineering*, 2014. URL: <http://www.hindawi.com/journals/ace/2014/390359/> (Last accessed: 20.05.2019).

146. Marková J. Reliability elements in the assessment of existing bridges // Proceedings of the third international conference ISBN 123456789 "*Reliability, safety and diagnostics of transport structures and means 2008*" University of Pardubice, Czech Republic, 25-26 September 2008/ URL: http://web.cvut.cz/ki/mosty/file_download/4 (Last accessed: 20.08.2019).

147. Matsumoto T. Beng S. S. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. - 2005, p. 23–36. - URL: https://www.researchgate.net/publication/328569384_Survival_Analysis_of_Bridge_Superstructures_in_Wisconsin (Last accessed: 20.05.2019).

148. Mechanisms in Science // *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. First published Wed Nov 18, 2015. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/science-mechanisms/#ConMec> (Last accessed: 20.05.2019).

149. Methodology for Ranking Relative Importance of Structures to Virginia's Roadway Network , 2017. – 21 p. – URL: http://www.viriniadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/16-r19.pdf.
150. Miyamoto A. Bridge Management System and Maintenance Optimization for Existing Bridges / A. Miyamoto, K. Kawamura, H. Nakamura // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, V. 15, Issue 1, 17 DEC 2002. URL: <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00170> (Last accessed: 20.05.2016).
151. Multiobjective Optimizations of bridge Deck Rehabilitation Using a Genetic Algorithm. *Microcomputers in Civil Engineering*, 12, 1997, pp. 431-443. URL: <http://users.encs.concordia.ca/~hammad/papers/J13.pdf>.
152. NCHRP REPORT 483, Bridge Life-Cycle Cost Analysis. Part II. NCHRP 12-43 Bridge Life-cycle Cost Analysis Guidance Manual / Hugh Hawk // Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. – 100 p.–URL: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_483.pdf.
153. Neves, L.A., Life-cycle analysis of bridges considering condition, safety and maintenance cost interaction. PhD Thesis. University of Minho. Portugal 2005. 191 p.
154. Ozbay, K., Parker, A., Jawad, D. & Hussain, S., Guidelines for Life Cycle Cost Analysis. FINAL REPORT July 2003. Department of Civil Engineering, City College of the City University of New York. 130 p. <https://cait.rutgers.edu/files/FHWA-NJ-2003-012.pdf> (Last accessed: 20.05.2019).
155. Pontis (1992), Technical Manual Report, FHWA, U.S. Department of Transportation.
156. Pontis, Version 4.0 Technical Manual Report, FHWA, U.S. Department of Transportation, August 13, 2001.
157. Probabilistic Model Code ISBN 978-3-909386-79-6. URL: <http://www.jcss.byg.dtu.dk>. (Last accessed: 20.05.2019).
158. Rao, S. V. K. M. and Dilger, W. H. Control of flexural crack width in cracked prestressed concrete members. *ACI Structural Journal*, No.2, 1992, pp. 127–138.

159. Report of RILEM Technical committee 130-CSL [Durability design of concrete structures]. Edited by A.Sarja and E.Vesicary. E&SPON RILEM-TC-119. URL:http://www.rilem.org/gene/main.php?base=600025&id_publication=331&id_papier=6684 (Last accessed: 20.05.2019).

160. Robelin C.-A. Network-Level Reliability-Based Bridge Inspection, Maintenance and Replacement Optimization Model / C.-A. Robelin, S. M. Madanat // *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 1, No. 1, 2007. – P. 59 – 72. URL: <https://elearning.just.edu.jo/jjce/issues/paper.php?p=5.pdf>.

161. Robelin, C.A. and Madanat, S.M. (2006), Dynamic Programming based Maintenance and Replacement Optimization for Bridge Decks using History-Dependent Deterioration Models, AATT . – URL: <http://www.uctc.net/research/papers/558.pdf> (Last accessed: 20.05.2019).

162. Saito M., Sinha K. C. Timing for Bridge Replacement, Rehabilitation, and Maintenance / M. Saito, K. C. Sinha // TRR 1268, 1990. Pp. 75 – 83. URL: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1990/1268/1268-010.pdf>.

163. Sarja, Asko & Vesikari, Erkki (Editors). Durability design of concrete structures. RILEM Report of TC 130-CSL. RILEM *Report Series* 14. E&FN Spon, Chapman & Hall, 1996. 165 pp.

164. Schaffer J.D. Multi-objective learning via genetic algorithms / J. David Schaffer, John J. Grefenstette // 1985. – 3 p. – URL: <http://www.ijcai.org/Proceedings/85-1/Papers/113.pdf>. (Last accessed: 20.05.2019).

165. Shneiderman Ben. A short history of structured flowcharts (Nassi-Shneiderman Diagrams). Draft, May 27, 2003. URL: <https://www.cs.umd.edu/hcil/members/bshneiderman/nsd/> (Last accessed: 20.05.2019).

166. Sinha K.C. Multi-Objective Optimization for Bridge Management Systems / K.C. Sinha, V. Patidar, S. Labi, P. Thompson // NCHRP Report 590, Transportation Research Board, Washington, D.C. 2007. – 139 p. – URL: onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_590.pdf (Last accessed: 20.04.2019).

167. Sinha Kumares C. The Development of Optimal Strategies for Maintenance Rehabilitation and Replacement of Highway Bridges. Final Report Vol. 6: Bridge Performance and Optimization / Kumares C. Sinha // FHWA/IN/JHRP-89/13 Final Report, Vol. 6. 1989. – 101 p. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/41f6/e20435fb8342ac35ea66dd4edab700db2eaa.pdf>.
168. Soderkvist M.-K. , Veijala M. The Finnish Bridge Management System // *Structural engineering international*, – 1998, v. 8, N 4.– p. 315–320.
169. Sørensen, J.D. Reliability Based Optimization of Structural Systems. Proceedings of the 13th IFIP conference, Vol.113: 1987.. *Structural Safety*, Vol. 14, 1994, pp. 197–208.
170. Sørensen, J.D., I.B. Kroon and M.H. Faber: Optimal Reliability-Based Code Calibration. *Structural Safety*, Vol. 14, 1994, pp. 197–208.
171. Stephen, L.A. et al.: Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology. *ACI Structural Journal*/, 95: 27-36 (1998). <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=540> (Last accessed: 20.05.2019).
172. Strauss A., Vidovic A., Zambon I., Dengg F., Tanasic N., Matos J.C. Performance indicators for roadway bridges. 2016. - URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/55642147.pdf> (Last accessed: 20.05.2019).
173. Sykora M. & Holicky M. Target reliability levels for the assessment of existing structures. URL: http://www.leonardo.cvut.cz/download/target-reliabilities_2.pdf (Last accessed 16.06.2019).
174. Thoft-Christensen, P. (1998). Assessment of the reliability profiles for concrete bridges. *Engineering Structures*, 20(11): p.1004-1009. – URL: <https://vbn.aau.dk/en/publications/assessment-of-the-reliability-profiles-for-concrete-bridges> (Last accessed: 20.05.2019).
175. Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J., Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer Verlag: 1982. URL: https://books.google.fr/books/about/Structural_reliability_theory_and_its_ap.html?id=BNdRAAAAMAAJ&redir_esc=y (Last accessed: 20.05.2019).

176. Thompson P., Small E.P. , Johnson M. , Marshall A.R The Pontis Bridge Management System. *Structural engineering international*.-1998, v.8, N4.– p.303–308. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2749/101686698780488758>.

177. van Noortwijk Jan M., Frangopol Dan M. Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures / Jan M. van Noortwijk, Dan M. Frangopol // *Probabilistic Engineering Mechanics* 19, 2004. – Pp. 345–359. URL:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.189.3541&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed: 20.05.2019).

178. Weykamp P. Bridge Maintenance Strategies / Peter Weykamp. *Bridge Maintenance Training Reference Manual*. URL: http://mceer.buffalo.edu/education/bridge_speaker_series/2009-2010/presentations/Peter%20Weykamp%20presentation.pdf.

179. Whole of life cycle cost analysis in bridge rehabilitation. Report 2002-005-C-03, 2002. – 31 p. – URL: http://www.construction-innovation.info/images/pdfs/Research_library/ResearchLibraryC/Project_Reports/Whole_of_life_cycle_cost_analysis_in_bridge_rehabilitation.pdf.

180. Yanev B. Yanev, B. The Management of Bridges in New York City. *Engineering Structures*. – 1998, – vol. 20, N 11. – Pp. 1020 – 1026. URL http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/circ498/v1_C05.pdf.

181. Yanev B., Testa R., Garvin M. Maintenance Strategy to Minimize Bridge Life-Cycle Costs. *Transportation Research Circular E-C049: 9th International Bridge Management Conference*. – 2003.– p.189–198. URL: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec049.pdf>.

182. Yanev B.S. Bridge Maintenance Strategy assessment // *Proc. of International Symposium on advances in operation and maintenance of large infrastructures projects*. – Copenhagen, Denmark. –10–13 May 1998. URL: https://www.academia.edu/15543259/Bridge_Maintenance_Level_Assessment.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Стратегія ремонтів мостів на автомобільних дорогах міжнародного
значення Вінницького району Вінницької області

Таблиця А.1 Оптимальна стратегія ремонтів мостів

Плановий період, років	10
Кількість початкових рішень	50
Ймовірність кросоверу	0.8
Ймовірність мутації	0.01
Рівень втручання (Dmax)	0.5
Ставка дисконту витрат, %	8
Коеф. інфляції, %	3

Рік	Стан на початок року	Рівень деградації на початок року	Вид робіт	Стан на кінець року	Рівень деградації на кінець року	Вартість робіт, тис.грн
1	2	3	4	5	6	7
			Вінницька область			
			Вінницький район			
			М-12 Стрий-Тернопіль-Кіровоград-Знам'янка			
2018			(3175) Міст на км 385 + 698, вік - 13 р.	2	0.150	
2019	2	0.150	Поточ дрібний ремонт	2	0.155	390.4
2020	2	0.155	Поточ дрібний ремонт	2	0.160	401.4
2021	2	0.160	Поточ дрібний ремонт	2	0.165	397.2
2022	2	0.165	Поточ дрібний ремонт	2	0.170	408.0
2023	2	0.170	Поточ дрібний ремонт	2	0.175	432.0
2024	2	0.175	Поточ дрібний ремонт	2	0.180	374.5
2025	2	0.180	Поточ дрібний ремонт	2	0.185	401.7
2026	2	0.185	Утримання	2	0.194	258.7
2027	2	0.194	Поточ дрібний ремонт	2	0.199	395.1
2028	2	0.199	Поточ дрібний ремонт	3	0.232	505.2
2018			(3169) Шляхопровід на км 385 + 987, вік - 13 р.	2	0.150	
2019	2	0.150	Поточ дрібний ремонт	2	0.155	191.3
2020	2	0.155	Поточ дрібний ремонт	2	0.160	189.4
2021	2	0.160	Поточ дрібний ремонт	2	0.165	183.5
2022	2	0.165	Поточ дрібний ремонт	2	0.170	188.6
2023	2	0.170	Поточ дрібний ремонт	2	0.175	162.6
2024	2	0.175	Поточ дрібний ремонт	2	0.180	172.2

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7
2025	2	0.180	Утримання	2	0.189	128.6
2026	2	0.189	Утримання	2	0.198	133.2
2027	2	0.198	Утримання	3	0.207	118.4
2028	3	0.207	Утримання	3	0.208	112.0
2018			(3170) Шляхопровід на км 390 + 685, вік - 45 р.	4	0.414	
2019	4	0.414	Капітальний ремонт	2	0.050	13793.7
2020	2	0.050	Утримання Коштів недостатньо	2	0.060	0.0
2021	2	0.060	Поточ дрібний ремонт	2	0.066	332.1
2022	2	0.066	Поточ дрібний ремонт	2	0.072	284.0
2023	2	0.072	Поточ дрібний ремонт	2	0.078	336.9
2024	2	0.078	Поточ дрібний ремонт	2	0.084	313.1
2025	2	0.084	Поточ дрібний ремонт	2	0.090	318.2
2026	2	0.090	Утримання	2	0.100	183.3
2027	2	0.100	Утримання	2	0.110	207.8
2028	2	0.110	Поточ дрібний ремонт	2	0.116	342.7
2018			(3171) Шляхопровід на км 399 + 244, вік - 7 р.	4	0.459	
2019	4	0.459	Капітальний ремонт	2	0.050	8307.6
2020	2	0.050	Утримання	2	0.059	127.9
2021	2	0.059	Утримання	2	0.068	121.1
2022	2	0.068	Поточ дрібний ремонт	2	0.073	175.2
2023	2	0.073	Утримання	2	0.082	106.9
2024	2	0.082	Поточ дрібний ремонт	2	0.087	164.4
2025	2	0.087	Поточ дрібний ремонт	2	0.092	185.1
2026	2	0.092	Поточ дрібний ремонт	2	0.097	165.0
2027	2	0.097	Поточ дрібний ремонт	2	0.102	177.1
2028	2	0.102	Утримання	2	0.111	111.8
2018			(3172) Шляхопровід на км 399 + 395, вік - 40 р.	4	0.440	
2019	4	0.440	Поточ середній ремонт	2	0.055	3038.3
2020	2	0.055	Поточ дрібний ремонт	2	0.062	199.4
2021	2	0.062	Поточ дрібний ремонт	2	0.069	180.3
2022	2	0.069	Поточ дрібний ремонт	2	0.076	205.4
2023	2	0.076	Поточ дрібний ремонт	2	0.083	220.4
2024	2	0.083	Поточ дрібний ремонт	2	0.090	181.2
2025	2	0.090	Утримання	2	0.101	140.8
2026	2	0.101	Поточ дрібний ремонт	2	0.108	184.0
2027	2	0.108	Утримання	2	0.119	117.8
2028	2	0.119	Утримання	2	0.138	120.8
			М-21 Житомир-Могилів-Подільський			
2018			(16459) Міст на км 113 + 742, вік - 45 р.	4	0.581	

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7
2019	4	0.581	Капітальний ремонт	2	0.050	14581.3
2020	2	0.050	Утримання	2	0.063	226.1
2021	2	0.063	Поточ дрібний ремонт	2	0.072	313.5
2022	2	0.072	Поточ дрібний ремонт	2	0.081	301.5
2023	2	0.081	Поточ дрібний ремонт	2	0.090	308.1
2024	2	0.090	Утримання	2	0.103	215.3
2025	2	0.103	Утримання	2	0.116	205.8
2026	2	0.116	Поточ дрібний ремонт	2	0.125	310.9
2027	2	0.125	Поточ дрібний ремонт	2	0.134	320.2
2028	2	0.134	Утримання	2	0.151	214.8
2018			(16461) Міст на км 114 + 032, вік - 36 р.	4	0.512	
2019	4	0.512	Капітальний ремонт	2	0.050	8465.2
2020	2	0.050	Утримання	2	0.066	114.9
2021	2	0.066	Утримання	2	0.082	123.9
2022	2	0.082	Поточ дрібний ремонт	2	0.094	193.5
2023	2	0.094	Утримання	2	0.110	114.9
2024	2	0.110	Поточ дрібний ремонт	2	0.122	195.2
2025	2	0.122	Утримання	2	0.138	137.1
2026	2	0.138	Поточ дрібний ремонт	2	0.150	188.8
2027	2	0.150	Утримання	2	0.166	117.0
2028	2	0.166	Утримання	2	0.182	123.8
2018			(16466) Міст на км 130 + 046, вік - 35 р.	4	0.558	
2019	4	0.558	Капітальний ремонт	2	0.050	9147.0
2020	2	0.050	Утримання	2	0.064	127.3
2021	2	0.064	Поточ дрібний ремонт		0.074	207.9
2022	2	0.074	Поточ дрібний ремонт	2	0.084	184.4
2023	2	0.084	Поточ дрібний ремонт	2	0.094	221.9
2024	2	0.094	Поточ дрібний ремонт	2	0.104	203.6
2025	2	0.104	Утримання	2	0.118	124.3
2026	2	0.118	Поточ дрібний ремонт	2	0.128	227.5
2027	2	0.128	Поточ дрібний ремонт	2	0.138	208.8
2028	2	0.138	Утримання	2	0.152	148.4

				Всього:	80191.9
				Утримання:	4333.9
				Поточ. дріб. ремонт:	12820
				Поточ. серед. ремонт:	3038.3
				Капітальний ремонт:	59999.7
				Реконструкція:	0
				Приведена вартість:	73242.9

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Питома вартість ремонтів мостів

Сумська область

Прогноз на 2019 рік

№	Назва споруди	Стан моста	Е	Площа, м2	Вартість робіт, тис.грн	Питома вартість, тис.грн/м2
1	2	3	4	5	6	7
М-02 Кіпті-Глухів-Бачівськ (на Брянськ)						
1	Шляхопровід на км 150 + 619	справний	94	941.0	2548.9	2.709
2	Міст на км 161 + 450	обмежено справний	86	401.8	1520.0	3.783
3	Міст на км 178 + 232	обмежено справний	84	1028.4	4880.2	4.745
4	Шляхопровід на км 208 + 007	обмежено справний	85	1198.0	5943.8	4.961
5	Шляхопровід на км 208 + 373	справний	94	735.3	3813.5	5.186
6	Шляхопровід на км 221 + 626	справний	96	919.3	3552.1	3.864
Всього по дорозі				5223.8	22258.5	4.261
Н-07 Київ–Суми-Юнаківка (на м.Курськ)						
7	Міст на км 213 + 449	працездатний	69	445.2	3991.4	8.965
8	Міст на км 217 + 681	працездатний	69	445.2	3157.0	7.091
9	Міст на км 244 + 092	обмежено працездатний	44	418.0	9969.0	23.849
10	Міст на км 254 + 697	працездатний	66	89.8	986.5	10.985
11	Міст на км 256 + 270	працездатний	67	86.7	818.0	9.435
12	Міст на км 258 + 309	працездатний	63	158.0	1916.1	12.127
13	Міст на км 258 + 532	обмежено працездатний	57	74.4	950.5	12.776
14	Міст на км 260 + 170	працездатний	69	181.5	1860.7	10.252
15	Міст на км 266 + 346	працездатний	70	104.9	1174.9	11.200
16	Міст на км 270 + 036	працездатний	69	529.0	4577.3	8.653
17	Міст на км 281 + 033	працездатний	64	92.6	1262.8	13.638
18	Міст на км 342 + 185	працездатний	70	414.8	2542.8	6.130
19	Міст на км 350 + 672	працездатний	71	218.4	1456.6	6.669
20	Міст на км 363 + 662	працездатний	63	49.7	1377.8	27.723
21	Міст на км 370 + 614	працездатний	71	505.4	4212.0	8.334
Всього по дорозі				3813.6	40253.4	10.555
Н-12-01 Суми-Полтава. Обхід м. Суми						
22	Шляхопровід на км 5 + 164	працездатний	67	1499.2	8373.9	5.586
23	Міст на км 7 + 264	працездатний	71	959.2	5289.5	5.515
24	Міст на км 9 + 594	працездатний	70	2884.1	15010.5	5.205
25	Міст на км 18 + 082	працездатний	72	902.9	4466.1	4.946
Всього по дорозі				6245.4	33140.0	5.306
Н-12 Суми-Полтава						
26	Міст на км 16 + 510	працездатний	71	591.5	4580.0	7.743

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7
27	Міст на км 16 + 973	працевдатний	71	164.0	1300.7	7.931
28	Міст на км 41 + 054	обмежено справний	85	219.3	1140.3	5.200
29	Міст на км 43 + 348	працевдатний	77	387.4	2025.9	5.229
30	Міст на км 56 + 563	обмежено справний	83	288.3	1849.6	6.416
31	Міст на км 57 + 692	обмежено справний	82	55.8	224.6	4.025
32	Міст на км 58 + 048	працевдатний	77	52.0	906.2	17.428
33	Шляхопровід на км 58 + 339	обмежено справний	82	630.0	2669.3	4.237
34	Міст на км 59 + 473	працевдатний	69	1125.5	6913.4	6.143
35	Міст на км 60 + 855	обмежено справний	80	77.5	812.3	10.481
36	Міст на км 61 + 699	працевдатний	68	103.5	2260.4	21.840
37	Міст на км 70 + 838	обмежено працевдатний	50	1751.2	44559.4	25.445
38	Міст на км 92 + 010	обмежено справний	86	196.5	636.3	3.238
39	Міст на км 96 + 610	справний	96	385.9	23.2	0.060
Всього по дорозі				6028.4	69901.6	11.595
Р-44 Суми-Путивль-Глухів						
40	Міст на км 45 + 961	працевдатний	68	483.3	5155.7	10.668
41	Міст на км 47 + 175	працевдатний	69	262.2	2127.9	8.116
42	Шляхопровід на км 47 + 824	обмежено працевдатний	59	421.1	2950.7	7.007
43	Міст на км 51 + 764	працевдатний	75	177.6	1304.3	7.344
44	Міст на км 55 + 578	обмежено працевдатний	50	98.8	1133.7	11.475
45	Міст на км 65 + 883	працевдатний	62	260.6	2317.6	8.893
46	Міст на км 83 + 964	непрацевдатний	33	2454.5	113146.7	46.098
47	Міст на км 110 + 081	працевдатний	77	1101.1	5693.2	5.170
48	Міст на км 129 + 945	працевдатний	73	371.2	1981.7	5.339
Всього по дорозі				5630.4	135811.5	24.121
Р-45 Суми-Краснопілля-Богодухів						
49	Міст на км 20 + 796	працевдатний	73	240.5	2229.7	9.271
50	Міст на км 27 + 689	працевдатний	70	63.6	785.8	12.356
51	Міст на км 30 + 693	працевдатний	68	57.0	1498.7	26.293
52	Міст на км 40 + 876	працевдатний	76	253.4	1528.9	6.034
53	Міст на км 58 + 965	працевдатний	76	300.6	2950.8	9.816
54	Міст на км 65 + 137	працевдатний	68	217.4	4513.6	20.762
55	Міст на км 66 + 093	обмежено справний	80	115.2	1516.1	13.160
56	Міст на км 68 + 716	обмежено справний	81	312.7	2726.5	8.719
57	Міст на км 70 + 372	працевдатний	75	47.5	565.5	11.905
58	Міст на км 74 + 019	працевдатний	63	35.0	264.8	7.565
59	Міст на км 76 + 280	працевдатний	79	945.8	4290.1	4.536
60	Міст на км 87 + 151	обмежено справний	86	1557.7	1785.7	1.146
61	Міст на км 89 + 216	обмежено працевдатний	57	32.8	690.0	21.038
62	Міст на км 105 + 310	працевдатний	77	138.6	1495.0	10.786
Всього по дорозі				4317.8	26841.2	6.216
Р-60 Кролевець-Конотоп-Ромни-Пирятин						
63	Міст на км 1 + 030	працевдатний	68	92.4	674.1	7.296

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7
64	Міст на км 17 + 419	працевдатний	70	132.1	1138.5	8.618
65	Міст на км 18 + 776	працевдатний	71	3631.1	16214.1	4.465
66	Міст на км 21 + 031	працевдатний	70	1402.9	7374.7	5.257
67	Міст на км 36 + 034	працевдатний	69	54.0	825.6	15.289
68	Міст на км 74 + 363	обмежено справний	91	153.3	1102.5	7.192
69	Міст на км 83 + 281	працевдатний	69	284.2	2736.7	9.629
70	Міст на км 97 + 128	обмежено справний	81	76.2	1012.2	13.283
71	Міст на км 133 + 358	працевдатний	69	391.1	3667.4	9.377
72	Міст на км 140 + 734	працевдатний	73	96.0	1350.5	14.068
73	Міст на км 143 + 800	працевдатний	69	373.5	2808.7	7.520
74	Міст на км 149 + 935	обмежено справний	80	192.5	1249.5	6.491
75	Міст на км 151 + 441	працевдатний	72	192.5	970.8	5.043
Всього по дорозі				7071.8	41125.3	5.815
Р-61 Батурин-Конотоп-Суми						
76	Міст на км 24 + 100	обмежено працевдатний	48	240.5	3006.5	12.501
77	Міст на км 46 + 773	працевдатний	75	271.7	235.7	0.867
78	Міст на км 67 + 245	працевдатний	64	80.0	773.4	9.668
79	Міст на км 73 + 573	працевдатний	69	107.0	1339.7	12.521
80	Міст на км 97 + 910	обмежено справний	85	319.0	2660.3	8.339
81	Міст на км 109 + 937	працевдатний	75	253.4	1992.8	7.864
82	Міст на км 118 + 365	обмежено справний	91	184.0	87.4	0.475
83	Міст на км 128 + 800	працевдатний	75	139.2	1138.8	8.181
84	Міст на км 143 + 429	працевдатний	69	193.7	1870.9	9.659
85	Міст на км 145 + 160	працевдатний	75	103.5	1071.4	10.352
86	Міст на км 151 + 121	працевдатний	70	68.3	1391.2	20.369
87	Міст на км 153 + 222	працевдатний	72	32.2	211.4	6.565
Всього по дорозі				1992.5	15779.5	7.919
Р-65 КПП "Миколаївка"-Семенівка-Новгород-Сіверський-Глухів-КПП "Катеринівка"						
88	Міст на км 82 + 258	працевдатний	73	167.3	1877.2	11.221
89	Міст на км 104 + 878	працевдатний	69	61.5	886.6	14.416
90	Шляхопровід на км 108 + 371	працевдатний	67	544.5	4230.0	7.769
91	Міст на км 115 + 004	працевдатний	70	160.4	1309.2	8.162
92	Міст на км 118 + 756	працевдатний	68	68.2	1660.8	24.351
93	Міст на км 124 + 601	працевдатний	68	110.8	2243.9	20.252
94	Міст на км 130 + 924	працевдатний	70	430.9	3254.2	7.552
95	Міст на км 143 + 731	працевдатний	68	49.0	1143.3	23.332
96	Міст на км 147 + 475	обмежено працевдатний	56	590.2	7297.0	12.364
Всього по дорозі				2182.8	23902.2	10.950
Т-17-05 Лохвиця-Гадяч-Охтирка-контрольно-пропускний пункт "Велика Писарівка"						
97	Міст на км 87 + 818	працевдатний	63	720.0	7016.8	9.746
98	Міст на км 114 + 923	працевдатний	64	57.0	434.6	7.624
99	Міст на км 117 + 157	справний	97	1731.6	7382.0	4.263
100	Міст на км 135 + 431	працевдатний	75	100.3	851.3	8.487
101	Міст на км 142 + 296	працевдатний	70	217.8	1658.4	7.614

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7
102	Міст на км 144 + 995	працевдатний	63	368.2	6841.9	18.582
103	Міст на км 152 + 397	обмежено працевдатний	53	60.0	747.1	12.451
104	Міст на км 153 + 263	працевдатний	61	246.3	5116.8	20.775
105	Міст на км 154 + 542	працевдатний	73	77.6	405.5	5.226
106	Міст на км 159 + 392	працевдатний	68	294.7	5921.2	20.092
107	Міст на км 161 + 434	обмежено працевдатний	53	185.6	2466.4	13.289
108	Міст на км 166 + 212	працевдатний	68	64.8	1408.1	21.730
109	Міст на км 169 + 293	працевдатний	63	60.0	1271.5	21.192
110	Міст на км 172 + 998	працевдатний	70	608.1	3623.2	5.958
111	Міст на км 174 + 773	працевдатний	64	70.8	1431.9	20.224
Всього по дорозі				4862.8	46576.7	9.578
Т-19-01 Суми-Миропілля-Осоївка-/Р-45/						
112	Міст на км 31 + 300	працевдатний	69	1778.3	9958.8	5.600
113	Міст на км 35 + 032	працевдатний	62	2816.7	15227.9	5.406
114	Міст на км 37 + 429	працевдатний	68	60.0	1532.9	25.549
115	Міст на км 40 + 954	працевдатний	65	150.0	1645.5	10.970
116	Міст на км 46 + 400	обмежено справний	85	96.4	1538.7	15.962
117	Міст на км 50 + 212	працевдатний	68	48.6	1274.7	26.228
118	Міст на км 52 + 378	працевдатний	70	63.0	710.5	11.278
119	Міст на км 53 + 349	працевдатний	70	123.6	994.2	8.044
120	Міст на км 62 + 378	працевдатний	68	535.2	2358.4	4.407
Всього по дорозі				5671.8	35241.6	6.213
Т-19-04 Білопіль-Терни-Липова Долина-Гадяч						
121	Міст на км 0 + 782	працевдатний	68	74.0	1710.4	23.113
122	Міст на км 27 + 379	працевдатний	79	435.4	2754.5	6.326
123	Міст на км 34 + 916	справний	96	160.0	123.1	0.769
124	Міст на км 49 + 045	справний	99	1267.0	3582.3	2.827
125	Міст на км 49 + 577	обмежено працевдатний	55	48.8	1278.5	26.198
126	Міст на км 66 + 212	працевдатний	69	167.1	1635.4	9.787
127	Міст на км 72 + 812	працевдатний	69	467.5	4444.4	9.507
128	Міст на км 87 + 925	працевдатний	75	142.3	1177.2	8.273
Всього по дорозі				2762.1	16705.8	6.048
Т-19-06 Контрольно-пропускний пункт "Рижівка"-Білопіль-Миколаївка-Лебедин-Лантратівка						
129	Міст на км 15 + 626	працевдатний	69	394.7	3530.9	8.946
130	Міст на км 15 + 974	працевдатний	68	658.0	11898.8	18.083
131	Міст на км 21 + 336	обмежено працевдатний	59	92.6	2101.8	22.698
132	Міст на км 23 + 317	працевдатний	68	72.0	1458.6	20.259
133	Міст на км 30 + 465	працевдатний	68	218.6	4452.2	20.367
134	Міст на км 42 + 251	працевдатний	72	438.5	4001.8	9.126
135	Міст на км 55 + 251	працевдатний	68	109.6	2405.4	21.947
136	Міст на км 61 + 845	працевдатний	72	312.7	5911.9	18.906
137	Міст на км 67 + 681	обмежено працевдатний	55	61.2	1599.1	26.130

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7
138	Міст на км 81 + 378	працевдатний	76	223.9	1256.0	5.610
139	Міст на км 86 + 729	працевдатний	72	55.7	1150.2	20.650
140	Міст на км 94 + 558	працевдатний	69	1662.8	13294.6	7.995
141	Міст на км 113 + 907	працевдатний	73	275.1	2506.7	9.112
142	Міст на км 134 + 041	працевдатний	65	367.0	3220.5	8.775
Всього по дорозі				4942.4	58788.5	11.895
Т-19-07 Шостка-Кролевець						
143	Міст на км 10 + 129	справний	94	148.2	449.2	3.031
Т-19-08 Шостка-Зноб Новгородське-Середина Буда						
144	Міст на км 14 + 637	працевдатний	69	1135.7	8630.8	7.600
145	Міст на км 36 + 574	працевдатний	68	269.9	2694.4	9.983
146	Міст на км 59 + 077	працевдатний	70	108.5	997.0	9.189
147	Міст на км 71 + 435	працевдатний	68	66.0	1688.5	25.584
148	Міст на км 74 + 190	працевдатний	68	60.0	1529.8	25.497
149	Міст на км 79 + 148	працевдатний	68	60.0	1532.8	25.546
150	Міст на км 82 + 344	працевдатний	73	486.8	4126.6	8.477
151	Міст на км 88 + 796	працевдатний	69	144.0	1511.8	10.499
Всього по дорозі				2330.9	22711.7	9.744
Т-19-09 Суми-Лебедин						
152	Міст на км 42 + 558	працевдатний	73	2530.4	2834.7	1.120
Т-19-10 Конотоп-Буринь-Чумакове						
153	Шляхопровід на км 51 + 512	працевдатний	65	658.1	5831.0	8.860
154	Міст на км 54 + 190	обмежено працевдатний	59	72.1	1818.3	25.220
Всього по дорозі				730.2	7649.3	10.476
Т-19-11 Мути́н-Пути́вль						
155	Міст на км 8 + 693	працевдатний	62	111.5	2564.1	22.997
156	Міст на км 17 + 381	працевдатний	69	893.6	7289.0	8.157
157	Міст на км 19 + 129	працевдатний	73	960.9	7787.7	8.105
Всього по дорозі				1966.0	17640.8	8.973
Т-19-13 Ромни-Липова Долина-Тростянець-Мезенівка						
159	Міст на км 11 + 670	працевдатний	75	154.1	1303.3	8.458
160	Міст на км 20 + 568	обмежено справний	80	217.4	3918.0	18.022
161	Міст на км 33 + 920	працевдатний	70	1062.2	6217.5	5.853
162	Міст на км 41 + 597	працевдатний	69	156.4	1707.3	10.916
163	Міст на км 46 + 132	обмежено працевдатний	56	60.0	1272.5	21.208
164	Міст на км 52 + 600	працевдатний	69	132.4	1434.7	10.836
165	Міст на км 55 + 060	працевдатний	73	72.0	1012.1	14.056
166	Міст на км 56 + 745	працевдатний	69	787.0	5018.3	6.376
167	Міст на км 78 + 945	працевдатний	68	2436.6	40548.1	16.641
168	Міст на км 102 + 990	працевдатний	66	238.2	1695.4	7.118
169	Міст на км 111 + 165	працевдатний	68	123.0	2724.9	22.153
170	Міст на км 124 + 835	працевдатний	73	64.5	908.2	14.081
171	Міст на км 152 + 353	працевдатний	69	339.2	3089.8	9.109
Всього по дорозі				5843.0	70850.1	12.126

ДОДАТОК В

Акти впровадження

Результати дослідження були впроваджені в:

- в Аналітичній експертній системі управління мостами Державного агентства автомобільних доріг України (Довідка від 30.08.2016 № 13-8-64);
- в Аналітичній експертній системі управління мостами Служби автомобільних доріг у Хмельницькій області (Акт про впровадження, вихідний від 31.08.2016 № 1230);
- в Аналітичній експертній системі управління мостами Служби автомобільних доріг у Черкаській області (Акт про впровадження, вихідний від 19.10.2016 № 2465/02);
- в Аналітичній експертній системі управління мостами Служби автомобільних доріг у Вінницькій області (Акт про впровадження, вихідний від 26.08.2016 № 1078/1).



ДОВІДКА

про впровадження наукових розробок аспіранта
Національного транспортного університету
Боднар Лариси Петрівни

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри управління виробництвом і майном Національного транспортного університету Боднар Л.П. були впроваджені в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідних робіт за темами: «Розробити модуль аналізу залишкового ресурсу визначальних елементів мостів з оцінкою доцільності виконання ремонтів чи нового будівництва» (договір від 04.08.2011 № 142-11, номер державної реєстрації 0111U007312); «Провести дослідження та розробити модуль управління ремонтами та експлуатаційним утриманням мостів» (договір від 25.09.2012 № 145-12, номер державної реєстрації 0111U007312); «Провести модернізацію паспорта моста в АЕСУМ та розробити модуль для аналізу і визначення поточного та перспективного експлуатаційного стану мостів із врахуванням рівня фінансування» (договір від 29.08.2014 № 115-14, державний реєстраційний номер 0114U006224).

В дисертаційній роботі автором запропоновано критерії оптимізації з урахуванням пріоритезації, моделі та алгоритми для формування оптимальних програм проведення ремонтних робіт для підтримки технічного стану мостів в безпечному для їх експлуатації стані з врахуванням обмеженого фінансування. На цих теоретичних засадах був розроблений програмний модуль, який дозволяє знаходити оптимальні рішення щодо обґрунтування видів ремонтів та строків їх проведення.

Наукові та програмно-інформаційні напрацювання, викладені у дисертації, мають практичне значення для складання стратегічних, науково обґрунтованих, оптимальних програм проведення ремонтів в системі експлуатації мостів для підтримки їх на належному для функціонування рівні.

Директор Департаменту розвитку
мережі доріг Укравтодору

Сергій Цепелев

Начальник Управління експлуатації
доріг Укравтодору

Олег Федоренко





АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспірантки
Національного транспортного університету

Боднар Лариси Петрівни

Комісія в складі:

Заступник начальника з
експлуатаційного утримання доріг

Л.А. Гураль

Начальник відділу з ремонту,
експлуатаційного утримання доріг та
штучних споруд

М.П. Пастухов

склала цей акт про те, що в Службі автомобільних доріг у Хмельницькій області впроваджені результати дисертаційної роботи аспірантки Боднар Л.П.

На основі теоретично обґрунтованих моделей експлуатації мостів, алгоритмів та критеріїв оптимізації був розроблений програмний модуль у складі Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ), який дозволяє формувати оптимальні стратегії експлуатації мостів, володіючи інформацією з їх технічного стану.

Запропоновані моделі та автоматизований модуль дозволяють отримувати оптимальну стратегію експлуатації мостів області, по окремій дорозі, по окремій ділянці дороги, по окремому мосту, що має значну наукову та практичну цінність. Завдяки цій роботі створено інструмент для прийняття керівних рішень щодо раціональної експлуатації мостів області, визначення необхідних фінансових ресурсів на проведення ремонтів та аналізу зміни експлуатаційного стану мостів при проведенні робіт в умовах обмеженого фінансування.

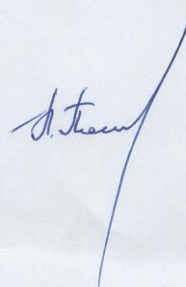
Впровадження модуля дає підстави для позитивної оцінки результатів дисертаційної роботи та створює необхідний та потужний інструмент для практичного застосування, особливо цінним є те, що в результаті вибору оптимальної стратегії експлуатації мостів можливо отримати програму ремонтів по кожному мосту на задану кількість років.

Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Заступник начальника з
експлуатаційного утримання доріг

 Л.А. Гураль

Начальник відділу з ремонту,
експлуатаційного утримання доріг та
штучних споруд

 М.П. Пастухов

Державне агентство
автомобільних доріг України
(УКРАВТОДОР)
Служба автомобільних доріг
у Черкаській області
18006, м. Черкаси, бул. Шевченка, 389
19.10.2016 № 2465/02
За № _____ від _____ 20__ р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспірантки
Національного транспортного університету

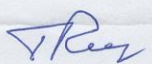
Боднар Лариси Петрівни

Комісія в складі:

Заступник начальника з ремонту та
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг САД у Черкаській
області

 Г.Ю. Андрєєв

Начальник відділу ремонту та
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг і штучних споруд,
організації та безпеки дорожнього руху,
охорони навколишнього середовища САД у
Черкаській області

 Р.І. Гребенюк

Заступник начальника відділу ремонту та
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг і штучних споруд,
організації та безпеки дорожнього руху,
охорони навколишнього середовища САД у
Черкаській області

 І.М. Безкровний

склала цей акт про те, що в Службі автомобільних доріг у Черкаській області
впроваджені результати дисертаційної роботи аспірантки Боднар Л.П.

На основі теоретично обґрунтованих моделей експлуатації мостів,
алгоритмів та критеріїв оптимізації був розроблений програмний модуль у
складі Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ), який

дозволяє формувати оптимальні стратегії експлуатації мостів, володіючи інформацією з їх технічного стану.

Запропоновані моделі та автоматизований модуль дозволяють отримувати оптимальну стратегію експлуатації мостів області, по окремій дорозі, по окремій ділянці дороги, по окремому мосту, що має значну наукову та практичну цінність. Завдяки цій роботі створено інструмент для прийняття керівних рішень щодо раціональної експлуатації мостів області, визначення необхідних фінансових ресурсів на проведення ремонтів та аналізу зміни експлуатаційного стану мостів при проведенні робіт в умовах обмеженого фінансування.

Впровадження модуля дає підстави для позитивної оцінки результатів дисертаційної роботи та створює необхідний та потужний інструмент для практичного застосування, особливо цінним є те, що в результаті вибору оптимальної стратегії експлуатації мостів можливо отримати програму ремонтів по кожному мосту на задану кількість років.

Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Заступник начальника з ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг САД у Черкаській області



Г.Ю. Андрєєв

Начальник відділу ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг і штучних споруд, організації та безпеки дорожнього руху, охорони навколишнього середовища САД у Черкаській області

Р.І. Гребенюк

Заступник начальника відділу ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг і штучних споруд, організації та безпеки дорожнього руху, охорони навколишнього середовища САД у Черкаській області

І.М. Безкровний



АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспірантки
Національного транспортного університету

Боднар Лариси Петрівни

Комісія в складі:

Заступника начальника з експлуатаційного
утримання автомобільних доріг САД у
Вінницькій області

І.В. Явдошака

Заступника начальника відділу
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг, штучних споруд,
організації та безпеки дорожнього руху
САД у Вінницькій області

М.П. Варцаби

Провідного інженера відділу
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг, штучних споруд,
організації та безпеки дорожнього руху
САД у Вінницькій області

В.Г. Чуракова

склала цей акт про те, що в Службі автомобільних доріг у Вінницькій області
впроваджені результати дисертаційної роботи аспірантки Боднар Л.П.

На основі теоретично обґрунтованих моделей експлуатації мостів, алгоритмів та критеріїв оптимізації був розроблений програмний модуль у складі Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ), який дозволяє формувати оптимальні стратегії експлуатації мостів, володіючи інформацією з їх технічного стану.

Запропоновані моделі та автоматизований модуль дозволяють отримувати оптимальну стратегію експлуатації мостів області, по окремій дорозі, по окремій ділянці дороги, по окремому мосту, що має значну наукову та практичну цінність. Завдяки цій роботі створено інструмент для прийняття керівних рішень щодо раціональної експлуатації мостів області, визначення необхідних фінансових ресурсів на проведення ремонтів та аналізу зміни експлуатаційного стану мостів при проведенні робіт в умовах обмеженого фінансування.

Впровадження модуля дає підстави для позитивної оцінки результатів дисертаційної роботи та створює необхідний та потужний інструмент для практичного застосування, особливо цінним є те, що в результаті вибору оптимальної стратегії експлуатації мостів можливо отримати програму ремонтів по кожному мосту на задану кількість років.

Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Заступник начальника з експлуатаційного
утримання автомобільних доріг САД у
Вінницькій області



І.В. Явдошак

Заступник начальника відділу
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг, штучних споруд,
організації та безпеки дорожнього руху
САД у Вінницькій області

М.П. Варцаба

Провідний інженер відділу
експлуатаційного утримання
автомобільних доріг, штучних споруд,
організації та безпеки дорожнього руху
САД у Вінницькій області

В.Г. Чураков

УКРАЇНА



• ДЕРЖАВНА СЛУЖБА • • ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ •
• ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ •

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

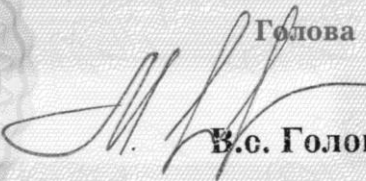
№ 68663

Комп'ютерна програма "Оптимізація стратегії експлуатації мостів"
(вид, назва твору)

Автор(и) Канін Олександр Петрович, Боднар Лариса Петрівна, Давиденко Олександр Олександрович
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 16.11.2016



 Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.С. Голови А.А. Малиш

УКРАЇНА



• **УКРАЇНА •** **ДЕРЖАВНА СЛУЖБА** **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ** **• УКРАЇНА •**

• **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ** •

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 68904

Науковий твір "Критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів"

(вид, назва твору)

Автор(и) Боднар Лариса Петрівна, Давиденко Олександр Олександрович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 06.12.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.О. Голови А.А. Малиш

*
М.П. Гриніш

ДОДАТОК Г

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами Украины // Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск: 2015. Вып. № 2 (16). С. 18-23 (Беларусь).

Статті у наукових фахових виданнях:

2. Боднар Л.П. Управління утриманням елементів залізобетонних мостів на основі моделей нечіткої логіки // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. Вип.33. С. 39-42.

3. Боднар Л.П., Канін О.П., Халай Т.О. Модель обґрунтування стратегії ремонтів мостів // Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах: Ч.1. К.: НТУ, 2012. Випуск 26. С.47-52.

4. Боднар Л.П. Теоретичні засади управління довговічністю автодорожніх мостів // Автошляховик України, №4 (240), 2014. С.37- 40.

5. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М, Стабровський О.О. Визначення прогнозованої вартості проведення ремонтів мостів з використанням Аналітичної експертної системи управління мостами (АЕСУМ) // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2016. Вип.16. С. 28-35.

6. Боднар Л.П., Степанов С.М., Коваль П.М. Обстеження мостів та вдосконалення критеріїв планів з обстежень // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2017. Вип.17. С. 42-53.

7. Боднар Л.П., Коваль П.М., Степанов С.М. Критерії формування планів обстежень мостів // Автошляховик України, №2 (254), 2018. С.34-42.

8. Боднар Л.П., Редченко В.П. Про посібник до національного стандарту щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів // Автошляховик України, №1 (257), 2019. С. 40-45.

Список опублікованих праць апробаційного характеру:

9. Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДерждорНДІ, 2010. Вип.12. С. 31-39.

10. Боднар Л.П., Коваль П.М., Фаль А.Є., Панібратець Л.Г. Досвід впровадження Аналітичної експертної системи управління мостами // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2010. Вип.13. С. 39-46.

11. Боднар Л.П. Обґрунтування рівнів утримання залізобетонних мостів в управлінні програмами їх експлуатації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА БУДІВНИЦТВА. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. № 662. С. 65-69.

12. Боднар Л.П., Лантух-Лященко А.І., Канін О.П., Коваль П.М., Фаль А.Є. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження // Дорожня галузь України. 2011. №7. С. 42-47.

13. Боднар Л.П., Канін О.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Досвід впровадження, сучасний стан та напрями подальшого розвитку. Матеріали міжнародної научно-практичної конференції з участю студентів і молодих учених «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов». Х.: ХНАДУ, 2012. С. 30-35.

14. Боднар Л.П. Аналитическая экспертная система управления мостами. Опыт внедрения. Современное положение. Перспективы развития. Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы» Инженерия транспорта и организация перевозок. Вильнюс: Техника, 2013. С. 263-268.

15.Боднар Л.П. Генетичні алгоритми в оптимізації стратегії ремонтів мостів // Збірник наукових праць Дніпропетровського університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. Вип.6. С. 18 - 23.

16.Боднар Л.П., Канін О.П., Панібратець Л.Г., Степанов С.М. Оптимізація стратегій експлуатації мостів // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 54-65.

17.Боднар Л.П., Кушнір О.В., Коваль П.М., Панібратець Л.Г. Робота асфальтобетонного покриття в зоні примикання деформаційних швів на автодорожніх мостах // Дороги і мости: зб. наук. пр. К.: ДП «ДерждорНДІ», 2015. Вип.15. С. 74-80.

18.Боднар Л.П., Панібратець Л.Г., Завгородній С.С., Чурсін О.П. Сучасний інструмент управління мостами // Дорожня галузь України. 2016. №4. С. 46-51.

19.Боднар Л.П. Моделі оптимізації стратегії експлуатації автодорожніх мостів. LXXII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету. Київ: НТУ, 2016. С. 162.

20.Боднар Л.П., Канин А.П. Задача обоснования стратегий эксплуатации мостов на автомобильных дорогах. Международная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги: безопасность и надежность». Сборник докладов. (24-25 ноября 2016 г), Минск. С. 179-183.

21.Larysa Bodnar, Alex Kanin, Sergii Stepanov. Genetic Algorithm to optimize the strategies for bridge repair works. 2018. 10 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://zenodo.org/record/1485402#.XDX1nGmLmUk>.

22. Боднар Л.П. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження та перспективи розвитку. Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми ремонтів та утримання мостів». Збірник тез. (20-21 червня 2018 року), м. Ужгород. С. 33-36.

Свідоцтва та патенти:

23. Свідоцтво серія № 68663 Комп'ютерна програма «Оптимізація стратегії експлуатації мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 16.11.2016.

24. Свідоцтво серія № 68904 Науковий твір «Критерій доцільності виконання капітального ремонту/реконструкції/нового будівництва автодорожніх мостів» / Канін О.П., Боднар Л.П., Давиденко О.О. Дата реєстрації 06.12.2016.