



УДК 658.012.1:624.01

• © Л.П. Боднар, зав. сектору управління станом мостів (ДП “ДерждорНДІ”)

## ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ ДОВГОВІЧНІСТЮ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

**Анотація.** Присвячено проблемі управління ресурсом транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. Аналізується модель оцінки ресурсу елементів автодорожніх мостів, яка реалізована в галузевій Аналітичній експертній системі управління мостами Укравтодору (АЕСУМ). Формулюються пропозиції з подальшого розвитку моделі.

**Ключові слова:** автодорожні мости, управління довговічністю, життєвий цикл, залишковий ресурс.

**Аннотация.** Посвящено проблеме управления ресурсом транспортных сооружений находящихся в эксплуатации. Анализируется модель оценки ресурса элементов автодорожных мостов, реализованная в отраслевой Аналитической экспертной системе управления мостами Укравтодора (АЭСУМ). Формулируются предложения по дальнейшему развитию модели.

**Ключевые слова:** автодорожные мосты, управление долговечностью, жизненный цикл, остаточный ресурс.

**Annotation.** Paper is devoted to the resource management problem of highway bridges are in service. Is an analysed model resource estimation element of highway bridges, implemented in Analytical Expert Bridges Management System of Ukravtodor (AEBMS). Is suggestions on further development of the model.

**Keywords:** highway bridges, durability management, life cycle, residual resource.

### Вступ

Останні два-три десятиріччя наукова проблема оцінки ресурсу елементів мостів, як інструментарію управління довговічністю транспортної інфраструктури є предметом дослідження не тільки науковців, а великої кількості інженерів всіх розвинених країн світу.

Актуальність проблеми є беззаперечною. Сьогодні для України проблема стає особливо значущою внаслідок низки несприятливих причин. Серед них тяжкий економічний стан країни, жорстко обмежене фінансування галузі, загрозливий технічний стан транспортних споруд, одне з останніх місць в Європі за розвитком дорожньої мережі.

Останнім часом стрімко зростає кількість морально та фізично застарілих мостів, проектний строк служби яких має складати 70 – 100 років. Фактичний середній строк служби автодорожніх мостів сьогодні складає 45 – 50 років. Так за десять останніх років кількість мостів, що очікують ремонту або реконструкції, зросла майже в п'ять разів, з 428 од. у 2004 р. до 2 045 од. у 2013 р. За цей період обстежено 4 916 мостів (30 % від загальної кількості у 16 156 од.), тоді як за вимогами нормативного документу системи експлуатації ДБН В.2.3-6:2009 “Мости і труби. Обстеження і випробування” [1] всі автодорожні мости мали би бути обстежені двічі.

У системі експлуатації в межах дорожньої мережі України не визначені пріоритети ремонтів. Немає розуміння того, що негативні соціально-економічні наслідки аварії одного моста або зупинки його на ремонт є незрівнянно більші ніж при ремонті великої ділянки дороги без мостів. Проблема, в першу чергу, економічна. Розвиток та інтеграція економіки України в світові й європейські структури, вимагає нових підходів в управлінні транспортними спорудами. Є і друга сторона проблеми – соціальна. Експлуатація мостів в тому вигляді, як це має місце останні 20 років призводить до зменшення строку їх служби, зниження надійності, збільшення ризику.

У цих умовах, для безаварійної експлуатації та стратегічного планування ремонту і реконструкції мостів, зростає потреба в уточненні науково-методичних підходів у оцінці технічного стану елементів споруд, у розширенні досліджень з обґрунтування критеріїв рівня надійності, ризику та алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу елементів. Саме в такій постановці розглядається тут проблема управління довговічністю автодорожніх мостів.

**Метою цієї роботи** є аналіз моделі оцінки ресурсу елементів автодорожніх мостів, яка реалізована в галузевій Аналітичній експертній системі управління мостами Укравтодору (далі – АЕСУМ) та формулювання перспективних, на думку автора, пропозицій з її подальшого розвитку.



*Огляд публікацій.* Науковою домінантою в експлуатації мостів є проблема оцінки технічного стану та прогнозування їх залишкового ресурсу, тобто, в інших термінах, пошук *важелів управління* довговічністю мостів. У країнах Європи та США ця проблема розглядається як нагальна в розробленні теоретичних засад системи експлуатації споруд, тому публікацій є багато. Вже у 70-х роках минулого століття проблема довговічності споруд в розвинених країнах стала предметом широких досліджень. Серед численних закордонних публікацій назвемо декілька, найбільш відомих.

Передусім назвемо численні публікації видатного вченого США, професора університету Ліхай (Lehigh University) Д. Франгопола [2, 3] з проблем експлуатації мостів та розбудови моделей прогнозування залишкового ресурсу на основі статистичних даних історії експлуатації. Відомі публікації присвячені проблемі прогнозування й оптимізації життєвого циклу транспортних споруд [4, 5] належать д-ру професору А. Сарія (Asko Saria) та його співробітникам із Фінського Технічного дослідницького центру. Відомі роботи професора Чеського Технічного Університету “Клокнер Інститут” М. Голіцьки та учнів його школи з проблеми надійності [6, 7].

Широкі дослідження українських науковців з проблеми довговічності належать до початку нового століття. Це роботи професора А.І. Лантух-Ляценка [8 – 10] та його учнів [11 – 15]. Роботи [8 – 10] присвячені теоретичному дослідженню з прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів, що перебувають в експлуатації, послужили теоретичною базою для розроблення новітнього нормативного документу системи експлуатації мостів ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2009 “Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів” [16, 17], що став методичним ядром АЕСУМ [18].

#### Основна частина

Теоретичною базою АЕСУМ є новітня модель оцінки та прогнозування залишкового ресурсу елементів мостів, що сформульована в роботах [8 – 10]. Наступні дві гіпотези становлять теоретичну базу моделі.

**А.** Критерієм технічного стану елемента є *числовий параметр надійності*, який служить кількісною інтегральною оцінкою технічного стану споруди в процесі експлуатації.

**Б.** Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується моделлю, яка базується на теорії випадкових марковських процесів.

Ідейною основою є поділ споруди на елементи та дискретні стани їх деградації. Життєвий цикл елемента поділено на п'ять дискретних станів.

Кожен зі станів описується добіркою якісних і кількісних показників деградації, що характеризують ієрархію відмов елемента [8, 9].

Завдання оцінки надійності споруди формулюється як визначення ймовірності переходу системи з дискретного стану  $S_i$  в  $S_{i+1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$  за умови, що час переходу є неперервна функція (рис. 1). У такій постановці зношення елементів споруди трактується, як *дискретний марковський процес із безперервним часом*.

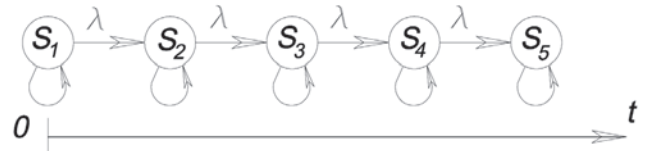


Рис. 1. Граф процесу деградації елемента

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

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

при початкових умовах  $p_{ij}(0) = \delta_{ij}$ , де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. Тут  $\lambda_{ik}$  – параметр процесу, показник інтенсивності відмов. Цей параметр приймають постійним, незалежним від часу.

Моделлю деградації встановлюється також зв'язок між надійністю та часом експлуатації елемента. Перехід із одного дискретного стану в інший описується, як процес Пуассона з дискретними станами та неперервним часом. Це окремий випадок марковського процесу. Інтегральна функція розподілу  $P(t)$  для часу  $T_n$ , котрий протікає доки стануться всі  $n$  подій процесу, має вигляд:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – параметр – інтенсивність відмов.

У термінах дискретних станів  $P(t)$  – ймовірність того, що елемент перейде в стан  $k$  протягом часу  $t < T_k$ . У загальній формі функція деградації елемента (2) описується нелінійним рівнянням:

$$P_i = 1 - p_i(t, \lambda), \quad (3)$$

де  $p_i(t, \lambda)$  – щільність розподілу процесу Пуассона – експоненціальна функція, що залежить від параметра  $a = \lambda t$ . Для випадку п'яти дискретних станів, залежність (3) має вигляд:



$$P_i = 1 - 0,008333 (\lambda t)^5 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Таким чином, при заданій інтенсивності відмов  $\lambda$ , залежністю (4) встановлюється зв'язок між надійністю елемента  $P_i$  в  $i$ -му стані та часом  $t$ , що пройшов від початку експлуатації до стану  $i = 2, \dots, 5$ .

У межах моделі запропоновано спеціальний прийом, який дозволяє визначити для кожного елемента споруди параметр інтенсивності відмов  $\lambda$  виходячи з функції деградації (4) при відомому строку експлуатації  $t = T$ .

Інтенсивність відмов  $\lambda_i$  знаходять для кожного окремого елемента з рівняння (4), як його розв'язок при відомих початкових умовах:

- надійності елемента в  $i$ -му дискретному стані  $P_{t,i}$ , що отримується з класифікаційної таблиці дискретних станів;
- часу  $t_i$ , що пройшов від початку експлуатації елемента до моменту класифікації його дискретного стану.

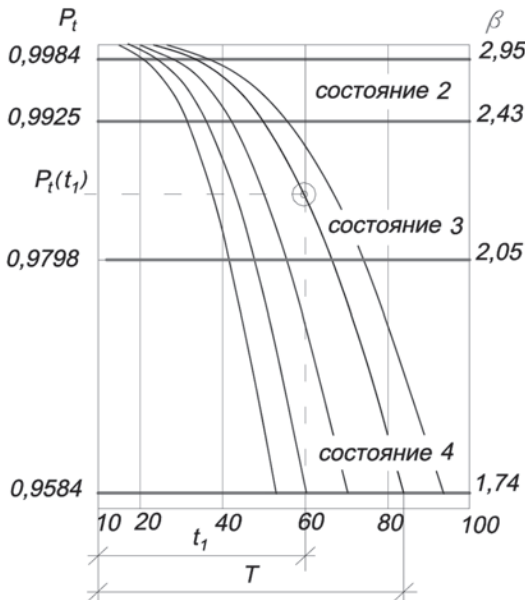


Рис. 2. До визначення параметра інтенсивності відмов  $\lambda$

Ці дані отримуються інженером на підставі оглядів й обстежень, класифікації дискретного стану, перевірочних розрахунків вантажопідйомності та характеристики безпеки  $\beta$ . Графічна інтерпретація процедури визначення параметра  $\lambda$  наведена на рис. 1.

**Аналіз моделі.** Практика застосування моделі в АЕСУМ продемонструвала її ефективність як інструмента оцінки надійності та довговічності елементів мостів, що перебувають в експлуатації. Досвід експлуатації програмного комплексу показав що АЕСУМ сьогодні є не тільки дійовим апаратом управління мостами, а і науковою платформою методичного забезпечення системи експлуатації [18]. Аналіз моделі, який базується на статистиці бази даних, дає підґрунтя сформулювати наші

пропозиції стосовно подальшого вдосконалення моделі в частині прогнозування залишкового ресурсу елементів мостів.

**Узагальнений граф.** Недавні дослідження [12] показують, що фактична крива деградації не співпадає за формою з прийнятою теоретичною кривою (рис. 3).

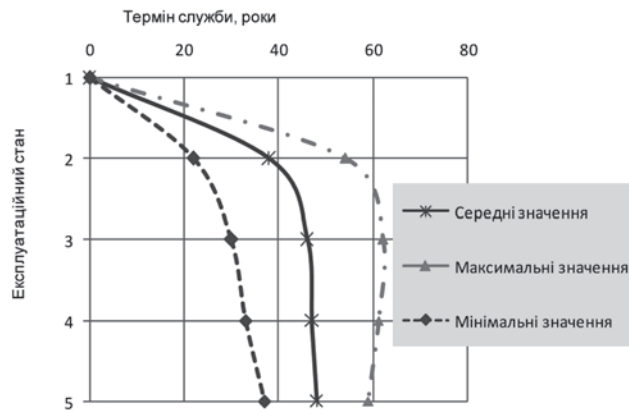


Рис. 3. Графіки фактичних деградаційних кривих залізобетонних елементів мостів всіх типів

Як видно, форма вікової кривої різко змінюється після третього експлуатаційного стану (рис. 3). Дані АЕСУМ свідчать, що сьогодні мости, які перебувають у третьому, четвертому і п'ятому експлуатаційних станах, практично мають один і той же вік. А це означає дуже високі темпи втрат початкових функціональних характеристик, зниження безпеки експлуатації, різке збільшення потреб фінансування на ремонт споруд.

Із іншого боку, ці результати дають можливість вважати, що нормативна модель [16, 17] з графом процесу, який зображений на рис. 1, в умовах України, є недостатньо точною. Для збільшення точності моделі тут пропонується застосувати узагальнений граф роботи, що наведений на рис. 4 [9] – граф процесу з “проскоками”. Очевидно, що марковська модель з таким графом дасть можливість більш реалістичного прогнозування залишкового ресурсу. Цю модель можна було би застосувати в АЕСУМ паралельно нормативній у випадках коли в історії елемента не відбувались ремонти у другому і третьому експлуатаційних станах.

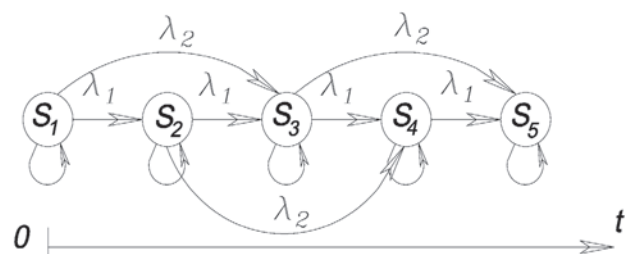


Рис. 4. Граф процесу деградації з “проскоками”



**Швидкість деградації.** Загалом швидкість деградації є випадковою функцією часу. Однак прийняття такого твердження призводить до того, що диференціальні рівняння моделі (1) стають нелінійними, не мають розв'язку в замкнутій формі і досліднику доводиться вдатися до досить складного числового розв'язання. Водночас сьогодні невідомо якою насправді є функція інтенсивності відмов елементів споруд  $\lambda(t)$ . Тому в нормативній моделі [16, 17] параметр швидкості деградації (інтенсивність відмов) прийнято постійним (2), (4).

Виконаний нами та в роботі [13] детальний аналіз фактичних кривих деградації, отриманих з бази даних АЕСУМ, показує, що швидкість деградації значно збільшується в третьому і подальших експлуатаційних станах. Цей факт дає підстави вважати, що в межах АЕСУМ було би доцільним мати ще одну паралельну модель деградації з параметром швидкості деградації в (2), (4), що залежить від часу. Таку модель потрібно застосовувати для прогнозування залишкового ресурсу елементів у тих випадках, коли не виконувались ремонти в третьому – четвертому експлуатаційних станах.

Швидкість деградації пропонується визначати числовими методами, дискретно, для кожного експлуатаційного стану. Тоді фундаментальні диференціальні рівняння моделі (2) зостануться лінійними й алгоритми оцінки ресурсу в АЕСУМ не будуть змінюватися. Формулу швидкості деградації отримуємо з розподілу Пуассона:

$$\lambda(t) = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)}, \quad (5)$$

де  $T$  – час життєвого циклу, ресурс споруди;

$f_T(t)$  – щільність розподілу часу життєвого циклу  $T$ ;

$F_T(t)$  – інтегральна функція розподілу часу життєвого циклу  $T$ .

#### Висновки

Викладений у роботі теоретичний базис управління довговічністю транспортних споруд – марковська стохастична модель накопичення пошкоджень у результаті природного зношування є досить універсальною і має практичну спрямованість, як інструмент оцінки технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу споруди. Проте, як і будь-яка феноменологічна модель, має бути підкріплена даними узагальненого досвіду застосування.

У роботі показано, що такими узагальненнями, подальшим розвитком нормативної моделі, може бути більш реалістичний новий граф марковського процесу та прийняття змінної швидкості деградації, що залежить від часу. Такі модернізовані варіанти моделі могли би застосовуватись для прогнозування залишкового ресурсу споруд, які недостатньо ремонтувались, що відповідало би сучасним українським реаліям.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.3-6:2009. Мости і труби. Обстеження і випробування. – К.: Мінрегіон України, 2009.
2. Frangopol, D.M. Life-cycle cost analysis for bridges. Bridge Safety and Reliability. – ASCE, Reston, Virginia, 1999. P. 210–236.
3. Frangopol, D.M. A probabilistic model based on eight random variables for preventive maintenance of bridges. – In London U.K. Agency, Highways, editor, Optimum Maintenance Strategies for Different Bridge Types, 1998.
4. Sarja, Asko & Vesikari, Erkki. Durability design of concrete structures. RILEM Report of TC 130-CSL. RILEM Report Series 14. E&FNSpon, Chapman & Hall, 1996. – 165 p.
5. Vesikari, E. Statistical Condition Management and Financial Optimisation Lifetime Management of Structures. Part 1: Markov Chain Based Life Cycle Cost (LCC) Analysis. Part 2: Reference Structure Models for Prediction of Degradation. LIFECON Deliverable D2.2 <http://www.vtt.fi/rte/strat/projects/lifecon/>
6. Holický, M., Markova, J. and Sýkora, M. Partial factors for assessment of existing reinforced concrete bridges. Proceedings of the 6-th International Probabilistic Workshop, Darmstadt 2008.
7. Holický, M. Reliability analysis for structural design. ISBN 978-1-920338-11-4, SUNMeDIA, Stellenbosch, South Africa, 2009. – 199 p.
8. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації // Вісник Транспортної Академії України. – 1999. – № 3. – С. 59–63.
9. Лантух-Лященко А.І. Марковские модели накопления повреждений. Наука и искусство // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2009. – №2. – С. 22–25.
10. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності елементів мостів. Нелінійний підхід // 36. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Вип. 8. – Львів: Каменяр, 2009. – С. 676–685.
11. Бородай Д.И. Прогноз долговечности типовых железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали. – Вип. 1 (87). – 2011. – С. 169–176.
12. Бородай Д.И. Модель прогноза долговечности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 33. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 43–48.
13. Давиденко О.О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону”. – №78, том 2. – К., 2013. – С. 225–235.
14. Янчук Л.Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – № 664. – Львів, 2010. – С. 365–371.
15. Яцко Ф.В. Прогноз довговічності залізобетонних елементів мостів. Статистичний підхід // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – № 664. – Львів, 2010. – С. 371–378.
16. ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2009. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
17. ДСТУ-Н Б.В.1.3-23:2013. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – К.: Мінрегіон України, 2013.
18. 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.