

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:624.745.2-044.74

О. О. ДАВИДЕНКО*

* Кафедра «Мости і тунелі», Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (050) 471 33 99, ел. пошта oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0176-3256

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕГРАДАЦІЇ НА ОЦІНКУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АВТОДОРОЖНИХ МОСТІВ УКРАЇНИ

Мета. Проаналізувати вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу автодорожніх мостів України. **Методика.** Теоретичне дослідження. **Результати.** Доведено значний вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу як єдиного керуючого параметру Марковської моделі прогнозу. **Наукова новизна.** Вперше встановлено межі похибки прогнозу залишкового ресурсу при сталій натурній швидкості деградації. **Практичне значення.** Отримані результати являються практичним інструментом управління надійністю і ресурсом залізобетонних автодорожніх мостів.

Ключові слова: автодорожні мости; довговічність; життєвий цикл; інтенсивність відмов; залишковий ресурс; швидкість деградації

Вступ

Є загально визнаним що стратегія експлуатації споруд має опиратися на реалістичний прогноз ресурсу елементів. Саме моделі прогнозування дадуть теоретичний базис фінансування експлуатації споруд таким, щоби протягом терміну служби зберегти параметри функціональності, надійність, безпеку експлуатації, зберегти оточуюче середовище, архітектурні, естетичні і історичні цінності споруди.

Досвід експлуатації залізобетонних мостів показав, що в Україні середній мінімальний строк служби більшості прогонових будов складає всього 36 років [7]. По даним обласних експлуатаційних організацій кількість мостів, стан яких не відповідає нормальним умовам експлуатації, вимагають капітального ремонту або реконструкції, в 1996 році становила 220, за станом на 01.01.2001 р. кількість таких мостів збільшилася до 330, а на 01.01.2004 р. становила вже 428. Сьогодні 90-95 % залізобетонних прогонових будов мостів мають дефекти бетону й арматури, які знижують довговічність і несучу здатність.

Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруд. Низький технічний стан та мала довговічність залізобетонних мостів пояснюються, в першу чергу, низькою якістю будівництва та відсутністю належної системи експлуатації.

Проблема безпечної експлуатації мостів стала нагальною ще в часи Радянського Союзу. В останнє десятиріччя проблема ще загострилася в силу низки несприятливих причин. Наведемо деякі з них: система експлуатації не відповідає сучасним технічним нормам і не володіє потрібними ресурсами для правильного та своєчасного догляду за спорудами; система фінансування дорожньої мережі України не дає змоги застосовувати сучасні та інноваційні технології з експлуатації і будівництва мостів; в Україні немає чіткого стратегічного плану вдосконалення, підтримання та експлуатації автодорожніх мостів.

Проблема довговічності залізобетонних елементів є предметом вивчення великої кількості науковців, в тому числі і українських. В сучасних умовах з'являється можливість і потреба в поєднанні наукового базису досліджень деградації залізобетону з настановами з проектування, умовами будівництва і експлуатації та отримання теоретичної моделі оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів, які стали б основою в розробці практичного апарату управління життєвим циклом мостів.

Мета

Метою роботи є аналіз впливу швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу залізобетонних автодорожніх мостів, як єдиного керуючого параметра моделі оцінки ресурсу елемента.

Методика

Фундаментальні принципи розбудови марковських моделей накопичення пошкоджень

Більше 100 років тому, було опубліковано стохастичну теорію [13] академіка Російської академії наук А. А. Маркова. За цей час теорія інтенсивно розвивалася по всьому світу і стала базою не тільки для моделей накопичення пошкодження, а і в багатьох інших напрямках науки – від управління економікою до медичних прогнозів.

В загальному випадку випадковий процес $X(t)$, $t \in T$ називається марковським, якщо для будь-яких значень $t_1 < t_2 < \dots < t_N$, що належать T , визначена одновимірна умовна функція розподілу.

$$F_1(x_N; t_N / x_1, \dots, x_{N-1}; t_1, \dots, t_{N-1}) = F_1(x_N; t_N / x_{N-1}; t_{N-1}). \quad (1)$$

Тобто, процес є марковським, якщо стан випадкового процесу $X(t)$ в поточний момент часу t_N залежить лише від стану в момент часу t_{N-1} .

Поширеними критеріями класифікації марковських випадкових процесів є тип області T визначення аргументу і тип простору станів S .

В моделях накопичення пошкоджень, що застосовуються для прогнозування довговічності транспортних споруд, прийнято тип області T приймати за час в роках, а тип простору S , приймати за процес деградації, який може бути визначений технічним станом споруди.

Зазвичай виділяють 4 основні класи марковських випадкових процесів: ланцюг Маркова; марковські послідовності; дискретні марковські процеси; неперервні марковські процеси.

Найпоширеніша модель накопичення пошкоджень базується на ланцюгу Маркова. Вважається, що марковські послідовності, з достатньою для практичних цілей точністю, можна розглядати як ланцюги Маркова з неперервним часом [1, 5, 14, 15]. Вибір саме ланцюга Маркова як моделі деградації в дослідженнях багатьох вчених пояснюється такими перевагами:

– розгляд відношення дискретного стану до наслідків деградації в повністю ймовірнісний спосіб;

– можливість опису паралельних процесів деградації, що залежать від часу (наприклад: корозія арматури і одночасно руйнування захи-

сного шару), як захист споруд лакофарбовим покриттям, які знаходяться в процесі зносу;

– можливість ефективно об'єднати послідовно процеси деградації, такі, наприклад, як депасивація арматури від карбонізації та забруднення хлоридами;

– служити інструментом оцінки ризику шляхом чисельного визначення ймовірності виникнення подій (відмов).

В рамках дослідження систему відмов, що є наслідком зносу елемента споруди, будемо розглядати як потік випадкових дискретних подій марковського ланцюга. Розглядається процес з «якісними станами». Роль випадкової події відіграє «випадковий дискретний стан системи».

Еволюцію системи будемо описувати марковським дискретним процесом з безперервним часом [1, 6]. Система може знаходитися послідовно у станах S_1, S_2, \dots, S_n , а переходи з одного дискретного стану в інший здійснюються у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_{n-1} .

Результати

Функція інтенсивності відмов

Принципово важливий аспект моделі прогнозу залишкового ресурсу – питання про визначення функції інтенсивності відмов $\lambda(t)$ – швидкості деградації іншими словами [1, 5]. Принципово важливий тому, що в представленій марковській моделі процес управляється тільки одним параметром.

Для дослідження скористаємося сучасним підходом в теорії надійності в функції часу (time-dependent reliability), так званою «функцією інтенсивності відмов» (hazard function) [1, 4, 5, 17, 18, 20]. В сучасній класичній теорії надійності поняття випадкової функції вводиться як ще одна міра надійності [22]. Дослідження обмежується залізобетонними елементами мостів.

В сучасній теорії надійності поняття «функція інтенсивності відмов» сьогодні є класичним і вводиться як ще одна міра надійності в функції часу [22, 28]. Тут кількісною мірою надійності, параметром надійності, виступає ймовірність того, що відмова елемента споруди не відбудеться протягом часу експлуатації. В інших термінах – це функція часу, яка дає аналітичну залежність росту ймовірності відмови протягом життєвого циклу експлуатації.

Поняття «функція інтенсивності відмов» відомо давно, застосовувалось вже на початку минулого сторіччя в багатьох сферах, починаючи з електротехнічних пристроїв або медичних прогнозів до соціальних проблем, наприклад в такій екзотичній задачі як «прогноз часу повернення рецидивіста до тюрми». Проте в оцінці надійності конструкцій термін вперше з'являється в авіації США тільки в 50-х роках.

У загальному випадку швидкість деградації є випадкова функція часу.

$$\frac{dP(i, t)}{dt} = P(i, t) \cdot E, \quad (2)$$

де $P(i, t)$ – матриця ймовірності переходу; E – матриця інтенсивностей переходу (швидкостей деградації).

Однак прийняття швидкості деградації як функції часу, призводить до того, що диференціальні рівняння (2) моделі стають нелінійними, не мають розв'язку в замкнутій формі і розробнику доводиться вдаватися до досить складного чисельного розв'язку [1]. З іншого боку, сьогодні мало відомо якою насправді є функція інтенсивності відмов елементів споруд $\lambda(t)$. Тому для простоти розв'язку часто застосовується припущення $\lambda(t) = \text{const}$.

Все-таки отримання значення постійного параметра інтенсивності відмов є не простим завданням. В принципі можна отримати цей параметр регресивним аналізом даних спостереження накопичення пошкоджень [26, 27], проте в реальних випадках елементів споруд розкид настільки великий, що скористатися отриманим не можна. Тут також немає стандартної процедури і доводиться досліднику шукати спеціальні прийоми визначення цього основного параметра моделі.

Якою в дійсності є $\lambda(t)$ – функція інтенсивності відмов конструкцій споруд невідомо. Популярним є теза про те, що параметр $\lambda(t)$ описується випадковою функцією часу, яка має форму приблизно таку, як показано на рис. 1 (В. В. Болотін в [4]).

На рис. 1 T_0 – початковий період експлуатації, T – основний період, бездефектної експлуатації, T_k – кінцевий період експлуатації, характерний інтенсивним розвитком пошкоджень.

Ніяких кількісних співвідношень між цими періодами не наводиться в монографії [4]. Складається враження, що наведена графічна залежність є характерною для механічних та електро-технічних систем. Якою є функція $\lambda(t)$ для елементів транспортних споруд відповідь може дати 25 регресивний аналіз виходу із ладу елементів споруд. Сьогодні ми маємо достатньо репрезентативні вибірки для такого аналізу. В роботі [12] була зроблена спроба встановити функцію інтенсивності відмов.

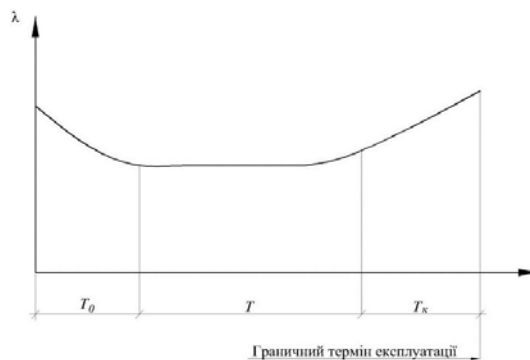


Рис. 1. Типова крива функції інтенсивності відмов [4]

Подібний вид мають криві функції інтенсивності відмов в класичних зарубіжних монографіях з надійності систем [1, 21, 23, 25, 28]. В англійській літературі крива має усталену назву – «U-подібна крива» (bathtub curve).

Виконаний аналіз великої кількості публікацій з проблеми дає підстави стверджувати що U-подібна крива функції інтенсивності відмов наведена В. В. Болотіним характерна для технічних систем механічних, електричних, електронних тощо. Що стосується кривої для елементів будівельних конструкцій то вона має дещо іншу форму – визначення яку саме – і є завданням цього дослідження.

В літературі англійською, французькою, російською мовами ми не знайшли прикладу кривої функції інтенсивності відмов елементів споруд. Показово, що навіть в монографії В. В. Болотіна [2] яка має назву «Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений» не наведено ні одного прикладу кривої з числовими параметрами для елементів будівельних конструкцій.

Натомість є публікації в яких взагалі виключається з розгляду період пристосування, а сама крива апроксимується ломаною лінією з двох відтинків, як наприклад, в монографіях [3,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

23] (рис. 2) де показані графіки функції інтенсивності відмов для електричних та механічних систем.

Очевидно, що параметричні характеристики функції інтенсивності відмов є ключом для коректного реалістичного прогнозу залишкового ресурсу елементів споруд. Нам необхідні теоретичні знання не тільки середньої інтенсивності відмов, а і визначення часу (періоду) життєвого циклу експлуатації протягом якого інтенсивності відмов є постійною. Для цього є потреба у визначенні не тільки виду функції інтенсивності відмов, а також її числових параметрів. Детально цю проблему висвітлено в дослідженні [10].

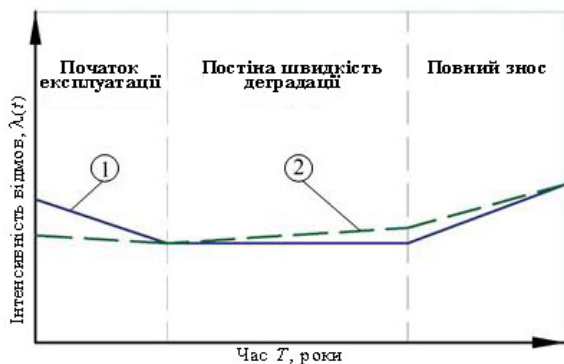


Рис. 2. Функції інтенсивності відмов для електричних та механічних систем:

1 – функція інтенсивності відмов для електричних систем; 2 – функція інтенсивності відмов для механічних систем

Наукова новизна та практична значимість

Вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу автодорожніх мостів

Для побудови функції інтенсивності відмов автодорожніх мостів України використаємо статистичні дані для всіх типів мостів отримані в дослідженнях [7, 8, 9].

В нашому дослідженні будемо використовувати натурні середні значення елементів мостів всіх типів табл. 1.

Таблиця 1

Швидкість деградації змінна у часі для всіх типів мостів

Швидкість деградації, λ			
Стан 2	Стан 3	Стан 4	Стан 5
0,028	0,030	0,036	0,042

З табл. 1 очевидно, що швидкість деградації в часі змінна для кожної групи мостів, що поді-

лені за технічними станами, це пояснюється наступними факторами: особливостями проекту, якістю будівництва, умовами експлуатації та ін.

У нашому експерименті, для більш наглядного відображення впливу швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу, робимо припущення, що швидкість деградації є стала, і визначальним фактором для групи є не технічний стан, а саме швидкість деградації. Тобто, початок визначення залишкового ресурсу для кожної групи мостів буде час досягнення технічного стану 2, 3, 4, 5, який фіксується на час обстеження. Для визначення залишкового ресурсу будемо користуватися методикою представленою в нормативному документі ДСТУ-Н [11].

Щоб дослідити вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу визначену інтенсивність відмов (табл. 1) підставимо в функцію деградації [11].

$$P_t = 0,008333(\lambda t)^k e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

де P_t – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$: λ – параметр процесу інтенсивності відмов (швидкість деградації).

За результатом розв'язку побудовано теоретичні криві при умові, що інтенсивність відмов є постійною на кожному з експлуатаційних станів (рис. 3).

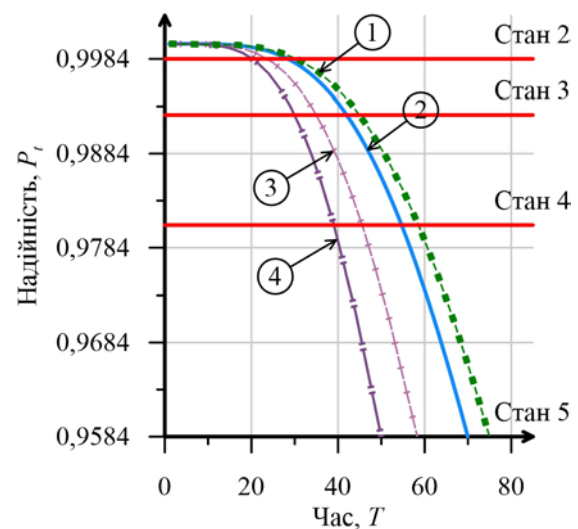


Рис. 3. Прогноз залишкового ресурсу:

$$1 - \lambda = 0,028; 2 - \lambda = 0,030;$$

$$3 - \lambda = 0,036; 4 - \lambda = 0,042$$

© О. О. Давиденко, 2017

Таблиця 2

Вплив швидкості деградації на прогноз життєвого циклу експлуатації

Швидкість деградації, λ	Прогноз життєвого циклу T , роки			
	Стан 2	Стан 3	Стан 4	Стан 5
0,028	30	45	59	75
0,030	28	42	56	70
0,036	24	35	46	58
0,042	20	30	40	50

У табл. 2 зведено показники прогнозу життєвого циклу експлуатації автодорожніх мостів для заданих швидкостей деградації. Основна діагональ таблиці – статистичні дані середнього віку мостів поділених за технічним станом. Вплив експлуатаційних втручань на підвищення надійності не враховується. Тобто є група мостів або конкретний міст для яких прогнозується час досягнення технічного стану за деяким режимом експлуатації при сталій швидкості деградації.

Таблиця 3

Вплив швидкості деградації на оцінку залишкового ресурсу

Швидкість деградації, λ	Залишковий ресурс T , роки		
	Стан 2-5	Стан 3-5	Стан 4-5
0,028	45	30	16
0,030	42	28	14
0,036	34	23	12
0,042	30	20	10

У табл. 3 наведено залишковий ресурс мостів, що поділені на групи за натурною швидкістю деградації [7, 8, 9, 10]. Мається на увазі, що при сталій швидкості деградації міст який знаходиться у другому технічному стані перейде у п'ятий технічний стан протягом 45 років.

Вплив експлуатаційних втручань (поточний ремонт, капітальний ремонт, реконструкція) на підвищення надійності мостів неможливо відобразити в моделі прогнозу ДСТУ-Н [11] через низку причин: відсутність таких статистичних даних в базі даних АЕСУМ; відсутність вимоги визначення надійності споруди у складі проектної документації на поточний ремонт, капітальний ремонт, реконструкцію; модель пристосована для оцінки залишкового ресурсу за умови сталої швидкості деградації.

Проблемою врахування експлуатаційних втручань на прогноз життєвого циклу мостів займається американський вчений Д. Франгопол. У своїй роботі [19] він відображає (рис. 4), як впливають експлуатаційні заходи на прогноз терміну служби моста.

Проблемою врахування експлуатаційних втручань на прогноз життєвого циклу мостів займається американський вчений Д. Франгопол. У своїй роботі [19] він відображає (рис. 4), як впливають експлуатаційні заходи на прогноз терміну служби моста.

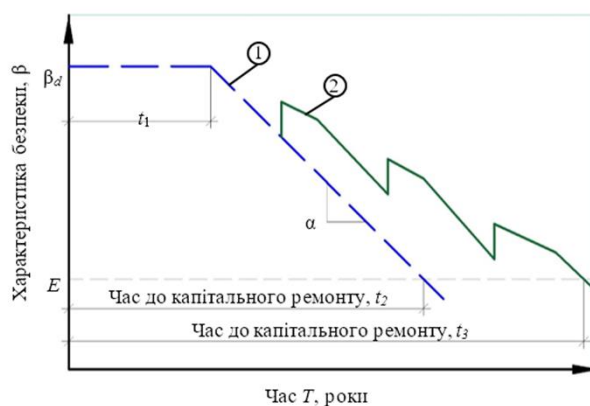


Рис. 4. Графік деградації за Д. Франгополом:

1 – крива деградації з експлуатаційними заходами; 2 – крива деградації без експлуатаційних заходів; t_1 – час до початку накопичення пошкоджень; α – показник швидкості деградації (кут нахилу лінії) при відсутності експлуатаційних заходів

На рис. 4 β_E – гранично допустимий рівень експлуатації, що для мостів України $\beta_E = 1,72$, після досягнення якого необхідно виконати капітальний ремонт або реконструкцію споруди. Час досягнення граничного рівня характеристики безпеки для мостів за відсутності експлуатаційних заходів – t_2 ; для мостів з врахуванням експлуатаційних заходів – t_3 .

Висновки

1. Швидкість деградації (інтенсивність відмов) є єдиним керуючим параметром Марковської моделі ДСТУ-Н [11] прогнозу залишкового ресурсу мостів. Швидкість деградації неопосередковано включає в себе всі можливі впливи (ширина розкриття тріщини, дефекти, недоліки будівництва та проекту, погодні умови тощо) на споруду протягом певного часу експлуатації і визначається на основі заключення технічного звіту обстеження мостів.

2. Швидкість деградації має значний вплив на прогноз залишкового ресурсу та життєвого циклу загалом. Виконані нами дослідження показують, що при заданих натурних значеннях

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

інтенсивності відмов залишковий ресурс знаходиться в межах 6-15 років, а прогноз життєвого циклу в межах 0-25 років. При змінній швидкості деградації діапазон прогнозу між моделлю ДСТУ-Н [11] і натурними даними буде в межах 3-25 років і це тільки для $\lambda = 0,028$. [10].

3. В моделі ДСТУ-Н [11], показник інтенсивності відмов приймається сталим, незалежним від часу $\lambda = \lambda(t)$. Така особливість моделі з одного боку спрощує її застосування, а з іншого не відповідає дослідженням, які вказують, що швидкість деградації є залежною від часу і в процесі експлуатації змінюється [10]. Застосування в моделі прогнозу змінної швидкості деградації може значно зменшити похибку в оцінці залишкового ресурсу мостів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богдановф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений [Текст] / Дж. Богдановф, Ф. Козин / пер. с англ. С. А. Тимашева / под ред. С. А. Тимашева. – Москва : Мир, 1989. – 344 с.
2. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1971. – 255 с.
3. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 312 с.
4. Болотин, В. В. Ресурс машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – Москва : Машиностроение, 1990. – 446 с.
5. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – Москва : Советское радио, 1972. – 552 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для студ. вузов. 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.
7. Давиденко, О. О. Аналіз довговічності автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. – Київ, 2013. – Вип. 78. – С. 225-235.
8. Давиденко, О. О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Автошляховик України. – Київ, 2014. – Вип. 237. – С. 29-35.
9. Давиденко, О. О. Статистичний прогноз технічного стану автодорожніх мостів України [Текст] / О. О. Давиденко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 10. – С. 4-13.
10. Давиденко, О. О. Функція інтенсивності відмов елементів споруд [Текст] / О. О. Давиденко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків, 2017. – Вип. 167. – С. 88-96. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664
11. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. [Текст]. – Надано чинності 2013-07-01. Вид. офіц. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – 116 с.
12. Лантух-Лященко, А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами [Текст] / А. І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ : Український транспортний університет, 1999. – Вип. 57. – С. 183-188.
13. Марков, А. А. Исчисление вероятностей. 2-е изд. [Текст] / А. А. Марков. – Санкт-Петербург : тип. Имп. акад. наук, 1908. – 284 с.
14. Романовский, В. И. Дискретные цепи Маркова [Текст] / В. И. Романовский. – Москва, Ленинград, 1949. – 436 с.
15. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения: в 2-х т. / пер. с англ. [Текст] – Москва : Мир, 1984. – Т. 1. – 528 с.
16. Ang A. H-S., Tang, W. H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability. Vol. II. New York: John Wiley and Sons, 1984. – 562 p.
17. Augusti G., Ciampoli M., Frangopol D. M. Optimal planning of retorting interventions on bridges in a highway network. *Engineering Structures*. 1998. Vol. 20. No. 11. – pp. 933-939.
18. Faber M. H. Basics of Structural Reliability Federal Highway Administration (FHWA). Recording and coding guide for the structure in venture and appraisal of the nation's bridges, U.S. Department of Transportation Washington D. C., 1988.
19. Frangopol D. M. A probabilistic model based on eight random variables for preventive maintenance of bridges. Presented at the progress meeting on optimum maintenance strategies for different bridge types, Highways Agency, London, U.K., 1998.
20. Kallen M. J., van Noortwijk, J. M. A study towards the application of Markovian deterioration processes for bridge maintenance modelling in the Netherlands. *Advances in Safety and Reliability: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference*, Esrel, 2005, Tri City, Gdynia-Sopot

- Gdansk, Poland, 27–30 June, 2005. Leiden, Netherlands, 2005. – pp. 1021-1028.
21. Leemis, L. M. *Reliability, Probabilistic Models and Statistical Methods*. NJ: Prentice Hall, 1995. 288 p.
 22. Melchers R. E. *Structural Reliability Analyses and Prediction*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1999. – 437 p.
 23. NG, S-K., Moses F. Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis. *Bridge Management. Inspection, Maintenance, Assessment and Repair: Proceedings of the Third International Conference*. – New York : Taylor & Francis, 1996. – pp. 26-33.
 24. Patev R. C. Introduction to Engineering Reliability. URL: <http://www.palisade.com/downloads/pdf/EngineeringReliabilityConcepts.pdf>. (Last accessed: 11.09.2018).
 25. Sánchez-Silva M., Klutke G.-A. Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. Springer Series in Reliability Engineering. Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 351 p.
 26. Shirole A. M., Winkler W. J., Hill J. J. Bridge management system state soft. *Transportation Research Record*. Washington D.C., TRB, 1991. No. 1180.
 27. Sobanjo J. O. Cost Estimating Under Uncertainty: Issues in Bridge Management. *8-th International Bridge Management Conference*, April, 1999. Structures. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998. – Vol. 124. – No. 12. – pp. 1448-1457.
 28. Thoft-Christensen P., Baker M. J. *Structural Reliability Theory and Its Applications*. Springer-Verlag, 1982. – 267 p.

А. А. ДАВЫДЕНКО*

* Кафедра «Мости и тоннели», Национальный транспортный университет, ул. М. Омеляновича-Павленка 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (050) 471 33 99, эл. почта oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0176-3256

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕГРАДАЦИИ НА ОЦЕНКУ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ УКРАИНЫ

Цель. Проанализировать влияние скорости деградации на оценку остаточного ресурса автодорожных мостов Украины. **Методика.** Теоретическое исследование. **Результаты.** Доказано значительное влияние скорости деградации на оценку остаточного ресурса как единого управляющего параметра Марковской модели прогноза. **Научная новизна.** Впервые установлены границы погрешности прогноза остаточного ресурса при постоянной натурной скорости деградации. **Практическое значение.** Полученные результаты являются практическим инструментом управления надежностью и ресурсом железобетонных автодорожных мостов.

Ключевые слова: автодорожные мосты; долговечность; жизненный цикл; интенсивность отказов; остаточный ресурс; скорость деградации

А. DAVYDENKO*

* Department of Bridges and Tunnels, National Transport University, 1, M. Omelyanovich-Pavlenko str., Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 471 33 99, e-mail oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0176-3256

THE INFLUENCE OF DEGRADATION SPEED ON ESTIMATION OF RESIDUAL RESOURCE OF REINFORCED CONCRETE HIGHWAY BRIDGES IN UKRAINE

Purpose. Analyze the effect of degradation rate on estimation of a remaining lifetime of Ukrainian highway bridges. **Methods.** Theoretical research. **Results.** The significant effect of degradation rate on the estimation of a remaining lifetime as the only control parameter of the Markov prediction model is proved. **Originality.** For the first time, the prediction error range of a remaining lifetime have been set at a constant natural rate of degradation. **Practical value.** The obtained results are a practical tool for managing the reliability and resource of reinforced concrete highway bridges.

Keywords: degradation rate; durability; hazard rate; highway bridges; life cycle; remaining lifetime

© О. О. Давиденко, 2017

REFERENCES

1. Bogdanoff Dzh., Kozin F. *Verojatnostnye modeli nakoplenija povrezhdenij* [Probabilistic Damage Accumulation Models], per. s angl. S. A. Timasheva, pod. red. S. A. Timasheva. Moscow, Mir Publ., 1989. 344 p.
2. Bolotin V. V. *Primenenie metodov teorii verojatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij* [Application of the methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1971. 255 p.
3. Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij* [Forecasting the resource of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1984. 312 p.
4. Bolotin V. V. *Resurs mashin i konstrukcij* [Resource machines and designs]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1990. 446 p.
5. Ventcel' E. S. *Issledovanie operacij* [Operations research]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 552 p.
6. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. *Teorija verojatnostej i ee inzhenernye prilozhenija: ucheb. posobie dlja stud. vuzov. 3-e izd., pererab. i dop.* [Probability theory and its engineering applications: studies. allowance for stud. universities]. Moscow, Izdatel'skij centr «Akademija» Publ., 2003. 464 p.
7. Davydenko O. O. Analiz dovhovichnosti avtodorozhnikh mostiv Ukrainy [Analysis of longevity of Ukrainian highway bridges]. *Naukovo-tehnicni problemy suchasnoho zalizobetonu – Scientific and technical problems of modern reinforced concrete*. Kyjiv, 2013, issue 78, pp. 225-235.
8. Davydenko O. O. Ocinka tekhnichnogho stanu i prognozuvannja zalyshkovogho resursu avtodorozhnikh mostiv Ukra-jiny [Estimation of the technical condition and forecasting of the residual life of Ukrainian highway bridges]. *Avtoshljakhovyk Ukrainy – The car of Ukraine*. Kyjiv, 2014, issue 237. pp. 29-35.
9. Davydenko O. O. Statystychnyj prognoz tekhnichnogho stanu avtodorozhnikh mostiv Ukrainy [Statistical forecast of the technical condition of Ukrainian highway bridges]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2016, issue 10. pp. 4-13.
10. Davydenko O. O. Funkcija intensyvnosti vidmov elementiv sporud [The function of the intensity of failures of elements of structures]. *Zbirnyk nau-kovykh pracj UkrDUZT – Collection of scientific works of UkrDUZT*. Kharkiv, 2017, issue 167. pp. 88-96. ISSN 2413-3795, 1994-7852. GICID 71.0000.1500.3635. DOI 10.18664
11. *DSTU-N B.V.2.3-23-2012. Sporudy transportu. Nastanova z otsynuyvannya i prognozuvannya tehnicnogo stanu avtodorozhnikh mostiv* [State Standard B.V.2.3-23-2012. Transport constructions. Guidance evaluation and forecasting technical condition of road bridges]. Kyjiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2012. 116 p.
12. Lantukh-Ljashhenko A. I. Ocinka nadijnosti sporudy za modellju markovsjkogho vypadkovogho procesu z diskret-nymy stanamy [Estimation of the reliability of the construction on the model of random Markov process with discrete states]. *Avtomobiljni doroghy i dorozhnje budivnyctvo – Roads and road construction*. Kyjiv, Ukrajin'skij transportnyj universytet, 1999, issue 57. pp. 183-188.
13. Markov A. A. *Ischislenie verojatnostej. 2-e izd.* [Probability calculus]. Sankt-Peterburg, Printing house of the Imperial Academy of Sciences, 1908. 284 p.
14. Romanovskij V. I. *Diskretnye cepi Markova* [Markov discrete chains]. Moscow, Leningrad, 1949. 436 p.
15. Feller V. *Vvedenie v teoriju verojatnostej i ee prilozhenija: v 2-h t. / per. s angl.* [Introduction to probability theory and its applications: in 2 tons. Per. from English]. Moscow, Mir Publ., 1984. Vol. 1. 528 p.
16. Ang A. H-S., Tang W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability*. Vol. II. New York, John Wiley and Sons, 1984. 562 p.
17. Augusti G., Ciampoli M., Frangopol D. M. Optimal planning of retorting interventions on bridges in a highway network. *Engineering Structures*. 1998. Vol. 20. No. 11. pp. 933-939.
18. Faber M. H. *Basics of Structural Reliability* Federal Highway Administration (FHWA). Recording and coding guide for the structure in venture and appraisal of the nation's bridges, U.S. Department of Transportation Washington D. C., 1988.
19. Frangopol D. M. A probabilistic model based on eight random variables for preventive maintenance of bridges. Presented at the progress meeting on optimum maintenance strategies for different bridge types, Highways Agency, London, U.K., 1998.
20. Kallen M. J., van Noordwijk, J. M. A study towards the application of Markovian deterioration processes for bridge maintenance modelling in the Netherlands. *Advances in Safety and Reliability: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, Esrel, 2005, Tri City, Gdynia-Sopot-Gdansk, Poland, 27–30 June, 2005*. Leiden, Netherlands, 2005. pp. 1021-1028.
21. Leemis L. M. *Reliability, Probabilistic Models and Statistical Methods*. NJ, Prentice Hall, 1995. 288 p.

22. Melchers R. E. Structural Reliability Analyses and Prediction. Second Edition. New York, John Wiley & Sons, 1999. 437 p.
23. NG, S-K., Moses F. Prediction of bridge service life using time-dependent reliability analysis. Bridge Management. Inspection, Maintenance, Assessment and Repair: Proceedings of the Third International Conference. – New York, Taylor & Francis, 1996. pp. 26-33.
24. Patev R.C. Introduction to Engineering Reliability. URL: <http://www.palisade.com/downloads/pdf/EngineeringReliabilityConcepts.pdf>. (Last accessed: 11.09.2018).
25. Sánchez-Silva M., Klutke G.-A. Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. Springer Series in Reliability Engineering. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 351 p.
26. Shirole A. M., Winkler W. J., Hill J. J. Bridge management system state soft. Transportation Research Record. Washington D.C., TRB, 1991. No. 1180.
27. Sobanjo J.O. Cost Estimating Under Uncertainty: Issues in Bridge Management. 8-th International Bridge Management Conference, April, 1999. Structures. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998. Vol. 124. No. 12. pp. 1448-1457.
28. Thoft-Christensen P., Baker M. J. Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer-Verlag, 1982. 267 p.

Надійшла до редколегії 09.10.2017

Прийнята до друку 18.10.2017