УДК 624.1

Лантух-Лященко А.І., д-р техн. наук

ПРОБЛЕМА КРИТЕРІЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД

Анотація. Стаття присвячена нагальній проблемі управління надійністю і довговічністю транспортних споруд. Розглядаються сучасні наукові підходи оцінки технічного стану транспортних споруд засновані на аналізі деградації елементів протягом життєвого циклу експлуатації.
Ключові слова: критерій деградації, модель життєвого циклу, марковська модель, тріщиностійкість, надійність.

УДК 624.1

Лантух-Лященко А.И., д-р техн. наук

ПРОБЛЕМА КРИТЕРИЯ ДЕГРАДАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Статья посвящена насущной проблеме управления надежностью и долговечностью транспортных сооружений. Рассматриваются современные научные подходы оценки технического состояния транспортных сооружений основанные на анализе деградации элементов в течение жизненного цикла эксплуатации
Ключевые слова: критерий деградации, модель жизненного цикла, марковская модель, трещиностойкость, надежность.

UDC 624.1

Lantuh-Liashchenko A. I., Dr. Tech. Sci.

THE PROBLEM OF THE DEGRADATION CRITERIA OF THE ENGINEERING STRUCTURES ELEMENTS

Abstract. The article is devoted to the pressing problem of managing the reliability and durability of transport constructions. Modern scientific approaches to assessing the technical condition of transport facilities based on an analysis of element degradation during the life cycle of operation are considered.

Keywords: degradation criterion, life cycle model, Markov model, crack resistance, reliability.

Проблема

Сьогодні є очевидною потреба в нових моделях теорії споруд, які б відображали еволюцію напружено-деформованого стану в функції часу. Саме моделі, що описують деградацію елементу на всіх етапах життєвого циклу з плином часу, мають відкрити шлях до проектування елементів споруд на заданий термін служби, прогнозувати життєвий цикл елемента в експлуатації. Такі моделі дадуть змогу, в інтересах суспільства, проектувати і експлуатувати конструктивні елементи транспортних споруд керованої довговічності.

В умовах вкрай обмеженого фінансування системи експлуатації транспортних споруд в Україні, стратегічне планування видатків на їх утримання має опиратися на реалістичний прогноз ресурсу елементів. Моделі життєвого циклу дадуть теоретичний базис фінансування будівництва і експлуатації споруд таким, щоби протягом терміну служби зберегти параметри функціональності, надійність, безпеку експлуатації, зберегти оточуюче середовище, архітектурні, естетичні і історичні цінності споруди.

Принципово важливим моментом в формулюванні моделі оцінки і прогнозу життєвого циклу є прийняття критерія деградації, тобто міри накопичення пошкоджень. Теоретично критерій є складовою фундаментальної проблеми управління надійністю і довговічністю будівельних об’єктів. В теорії споруд відомо не менше десятка різних за своєю фізичною сутністю критеріїв. Назвемо деякі з них.

У будівельній механиці з 50–х років минулого століття, широко використовувалась універсальна модель накопичення пошкоджень відома під назвою «теорія лінійного підсумовування пошкоджень Пальмгрена-Майнера», в якій використовується принцип лінійної суперпозиції пошкоджень [21]. Як критерій тут виступає «*цикл навантаження – розвантаження*». Ця проста і прозора модель набула широкого поширення в машинобудуванні. У меншій мірі модель використовувалася для оцінки життєвого циклу елементів споруд [4,18]. Очевидно, що для використання моделі необхідно мати достовірну оцінку кількості циклів навантаження, тобто для прогнозу ресурсу в процесі експлуатації необхідно мати повні дані історії вантаження. Стосовно елементів автодорожніх мостів та і інших елементів конструкцій необхідні початкові дані визначаються настільки приблизно, що втрачається достовірність моделі. Є і інші недоліки, які стримують застосування моделі Пальмгрена-Майнера, такі як, наприклад, ігнорування ефектів взаємодії циклів навантаження з малою і великою амплітудами.

Досить розповсюдженою сьогодні є моделі життєвого циклу залізобетонних елементів в якій деградація залізобетону описується критеріями накопиченням певної «*критичної кількості хлоридів*», що проникають через захисний шар по капілярній системі та мікротріщинам. Процес дифузії хлоридів тут описується загальними законами аналітичної теорії дифузії, відомими як рівняння першого і другого законів Адольфа Фіка.

Інший напрям розбудови моделей накопичення пошкоджень елементів будівельних конструкцій ґрунтується на фундаментальних дослідженнях механіки руйнування. В Україні це дослідження школи академіка НАНУ В.В. Панасюка [16, 17]. В цих роботах критеріями деградації матеріалу елементів споруд є «*коефіцієнти інтенсивності* , що трактуються як фізичні константи матеріалу. Безумовно моделі, засновані на класичній теорії механіки руйнування, теоретично найбільш досконалі, проте, поки шо не набули широкого застосування в практичній оцінці ресурсу елементів споруд.

В останні 20 – 30 років виявляється що універсальним, найбільш ефективними критерієм деградації елементів будівельних конструкцій є «*параметр надійності*». Нижче ми наводимо детальне обґрунтування прийняття надійності як критерія деградації та приклад - відповідну модель, чинну в системі експлуатації автодорожніх мостів України.

Нарешті ще один широко вживаний критерій деградації – «*геометричний параметр (параметри) тріщини в матеріалі*» для оцінки і прогнозу життєвого циклу. Геометричні параметри тріщин (ширина, довжина, глибина) давно застосовуються в моделях деградації металевих елементів машин і механізмів, елементів стальних конструкцій споруд. Ми в цій роботі наводимо приклад моделі життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд в якій критерієм деградації слугує ширина розкриття тріщин.

Параметр надійності – універсальний критерій деградації.

Ідея застосування скалярного параметра - ймовірності як критерія процесу, еволюція якого в часі визначається ймовірнісними законами, належить видатному математику, члену Російської академії наук А.А. Маркову. В монографії опублікованій в 1908р. «Исчисление вероятностей» [15] вперше повністю була опублікована марковська теорія процесів (ланцюгів), саме ймовірність і є фундаментальною основою теорії. Марковська стохастична теорія швидко розповсюдилася в світі, перш за все в банківській і страховій справах. За 100 з лишнім років, що пройшли з часу опублікування, стохастична теорія А.А. Маркова інтенсивно розвивалась у всьому світі і стала базою для моделей еволюції систем в часі не тільки в банківській справі, а й у всіх галузях знань – від управління економікою до медичних прогнозів. Проте знадобилося більш ніж 50 років щоби теорія почала застосовуватися для моделей накопичення пошкоджень в конструкціях машин, механізмів, будівель і споруд [3,4,22]. В останні 30-40 років феноменологічні стохастичні моделі, що описують накопичення пошкоджень як марковський процес. визнані універсальним апаратом опису поступового руйнування елементів споруд незалежно від матеріалу.

Доцільність і теоретична обґрунтованість застосування параметра надійності як критерія деградації є очевидною і витікає, перш за все, з сучасного трактування поняття надійності. Приведемо сучасне визначення терміну у формулюванні європейських учених. Так в стандарті ISO2394 [20] визначення наведено гранично коротко: «Надійність - здатність споруди або її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну служби». Подібні визначення наводяться також в стандарті 1988 р. [7] і в національних нормативних документах [8,9]. Ці визначення принципово відрізняються від визначення загально-технічного стандарту [6].

Дещо ширше поняття «*надійність*» представлено у Єврокоді EN 1990: 2002 [10]. Наведемо дослівну цитату: «*Здатність споруди або її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну служби.* ***Надійність зазвичай виражається в імовірнісних показниках***». В примітці до визначення терміну вказується, що надійність є одночасно мірою безпеки, експлуатаційної придатності та довговічності конструкції.

Надійність поряд зі своїм основним призначенням - характеризувати рівень безпеки споруди протягом життєвого циклу має й іншу функцію - служить інструментом оптимізації якості проекту. Так в EN 1990: 2002 [10], знаходимо: «*Слід зазначити, що значення параметра надійності є формальним або уявним показником ймовірності руйнування. Він використовується скоріше, як засіб для розвитку послідовних проектних правил, ніж для опису частоти руйнування конструкції*». Наведені визначення відкривають шлях до застосування надійності в якості критерія деградації – накопичення пошкоджень, оцінки експлуатаційної придатності в інших термінах.

В найбільш загальній формі сучасне наукове обґрунтування проблеми наведено в документі Об'єднаного комітету з безпеки споруд (Joint Committee on Structural Safety [23] – 2000 р. та в монографії Р. Мельчерса (Robert E.Melchers) [22] – 1999 р., де надійність трактується як ймовірність досягнення граничного стану за час *t*. Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу:

$$g(\boldsymbol{X},t) = R(\boldsymbol{X},t) - E(\boldsymbol{X},t), \tag{1}$$

де $R(\boldsymbol{X},t)$ – узагальнений опір елемента; $E(\boldsymbol{X},t)$ – узагальнений навантажувальний ефект; $\boldsymbol{X}$ – вектор базових змінних; t – змінна часу.

Тоді надійність в термінах функції граничного стану виражається так:

$$P(t) = \mathrm{Prob}[R(\boldsymbol{X},t) - Q(\boldsymbol{X},t) < 0]. \tag{2}$$

Таким чином, залежністю (2) технічний стан, тобто експлуатаційна придатність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Цей загальний підхід, в дещо іншій формі, було викладено також і в монографіях В.В. Болотіна [4].

Нижче, як приклад, наводиться марковська модель накопичення пошкоджень в якій саме надійність слугує критерієм деградації. Модель була запропонована нами в 1999 р. [13] і нині має репутацію адекватного апарату управління безпекою експлуатації, оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів України [9].

Марковська феноменологічна модель накопичення пошкоджень

Покажемо модель деградації елементів споруд основану на теорії випадкових марковських процесів. Систему відмов, що є наслідком зносу елемента споруди, будемо розглядати як потік випадкових дискретних подій марковського ланцюга і моделювати процесом з «*якісними станами*». Роль випадкової величини відіграє «*випадковий дискретний стан системи*» [3,5].

Моделлю деградації елемента встановлюється закон надійності в функції часу і, тим самим, встановлюється апарат прогнозу його технічного стану. Модель має дві принципові складові: феноменологічні класифікаційні таблиці дискретних станів та функцію деградації. Наступні чотири гіпотези становлять теоретичну базу моделі.

А. Критерієм технічного стану елемента є числовий параметр надійності.

В. Життєвий цикл елемента поділено на 5 експлуатаційних станів. Кожен із станів описується добіркою кількісних та неформалізованих якісних показників деградації, що характеризують ієрархію відмов елемента [12].

В. Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується дискретною моделлю випадкового марковського процесу з неперервним часом.

Г. Перехід із одного експлуатаційного стану в інший описується, як процес Пуассона з дискретними станами та неперервним часом.

Ми сформулюємо визначальні залежності для моделі, в якій блукання по дискретним станам здійснюється тільки в одному напрямку: від стану з меншим, до стану з більшим номером. Будемо вважати, що елемент знаходитися послідовно в дискретних станах S_1, S_2..., S_n, а переходи з одного експлуатаційного стану в інший здійснюються в моменти безперервного часу t_1; t_2;…t_{n-}. Ставиться завдання знайти ймовірності станів p_1 (t), p_2 (t), ..., $p_n(t)$, де n - кількість дискретних станів. Надійністю системи в кожному з станів визначається процес деградації.

Марковський ланцюг, що розглядається являє собою потік послідовних подій з однаково розподіленими проміжками часу. Граф потоку показаний на рис.1

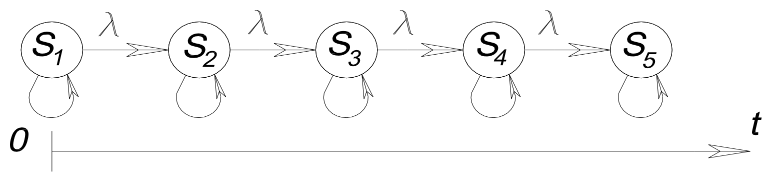

Рисунок 1 - Граф процесу деградації

У термінах марковського процесу завдання зводиться до пошуку *безумовних ймовірностей* перебування системи ***S*** на довільному кроці k в стані S_i: k = 1, 2, …, n:

$$p_i(k) = \mathrm{Prob}[S(k) = S_i]; \ k = 1, 2 ., n; \ i = 0, 1 ., n - 1 \quad (3)$$

Ймовірності $p_i(k)$ виражаються через умовні ймовірності переходу системи ***S*** на кроці k в стан S_j, за умови, що на кроці k -1 система була в стані S_i:

$$p_{ij}(k) = \mathrm{Prob}[S(k) = S_j \,|\, S(k\text{-}1) = S_i]; \ i,j = 0, 1 ., n - 1 \quad (4)$$

Еволюція системи характеризується щільністю ймовірності переходу (*інтенсивність відмов, швидкість деградації*) $\lambda_{i,i+1}$. Цей параметр є граничним відношенням ймовірності переходу системи за час Δt зі стану S_i в стан $S_{i,i+1}$

$$\lambda_{i,i+1} = \lim \frac{p_{i,i+1}(\Delta t)}{\Delta t}, \tag{5}$$

де $p_{i,i+1}(\Delta t)$ – ймовірність того, що система перейде за час Δt із стану S_i в стан $S_{i,i+1}$.

Шукані ймовірності марковської ланцюга $p_1(t)$, $p_2(t)$., $P_n(t)$ - функції часу є ймовірністю того, що система в момент t знаходиться в стані S_i. і визначаються з системи звичайних диференціальних рівнянь зі змінними, в загальному випадку, коефіцієнтами. Це відомі рівняння Колмогорова - Чепмена, що описують еволюцію дискретного марковського процесу з неперервним часом

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum \lambda_{ik}\, p_{kj}(t), \quad i,j,k = 1,2,\ldots,n, \tag{6}$$

До цих рівнянь приєднуються початкові умови

$$p_{ij}(0) = \delta_{ij}, \tag{7}$$

де δ_{ij} – символ Кронекера.

Крім того, в розв'язку системи диференціальних рівнянь використовується умова нормування, яка є наслідком того, що події марковської ланцюга несумісні і утворюють повну групу

$$\sum_{i=1}^{n} p_i(t) = 1, \tag{8}$$

Розв'язок системи рівнянь (6) при початкових умовах (7) дає *матрицю ймовірностей переходів* $p_{ik}(t)$, якою описується марковська ланцюг. Цю матрицю часто називають скорочено *матрицею переходів*.

Надійність елемента обчислюється як ймовірність того, що в момент часу t елемент вийде зі стану k, тобто відбудеться відмова $k + 1$:

$$P_i(t) = \sum_{k=l}^{N} p_k\, p_{ik}(t), \tag{9}$$

де N - кількість дискретних станів протягом життєвого циклу елемента; p_k - надійність елемента, що приписана йому в k-тому дискретному стані; $p_k(t)$ - перехідна ймовірність k-того дискретного стану, що отримується розв'язком системи рівнянь (6) при початкових умовах (7).

Як видно з (9), в загальному випадку ймовірності переходу складають квадратну матрицю переходів розміром n, де n - кількість дискретних станів. Позначимо її **Р**. На головній діагоналі матриці **Р** стоять ймовірності затримки системи в даному стані S_i на кроці k, на бічних діагоналях - ймовірності переходу системи зі стану S_i в стан S_j - p_{ij} (k). В силу того, що на кожному кроці система може перебувати тільки в одному з двох взаємовиключаючих станів, сума всіх ймовірностей однієї строки дорівнює одиниці:

$$\sum_{j=1}^{n} p_{ij}(k) = 1 \tag{10}$$

Диференціальні рівняння марковського ланцюга (6), відповідні графу потоку рис.1, запишемо в матричній формі

$$\frac{d\mathbf{P}(i,t)}{dt} = \mathbf{P}(i,t) \cdot \mathbf{E}\,, \tag{11}$$

де $\mathbf{P}(i,\ t)$ - матриця ймовірностей переходу; **E** - матриця інтенсивностей відмов, тут прийнята постійною $\mathbf{E} = \lambda$.

У випадку моделі за лінійним графом потоку (рис.1) де блукання по станам відбувається в одному напрямку – від стану з меншим номером до стану з більшим номером матриця переходу стає трикутною наддіагональною, мало заповненою. Приклад розв'язку системи рівнянь за лінійним графом потоку наведено нижче:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.181 & 0.819 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.330 & 0.670 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.451 & 0.549 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.551 & 0.449 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

Зауважимо, що описана класична процедура отримання матриці переходу не єдина. Відомі прийоми отримання матриці переходу засновані на статистичних даних історії експлуатації (наприклад [24]), але це вже інша тема

Пошук ймовірностей переходу, які містить стохастична матриця **P** є домінантою, центральним місцем у розробці моделі деградації елемента споруди, описуваної дискретним марковским процесом. Коли матриця **P** знайдена, за відомими значеннями умовних ймовірностей переходу і початкового значення безумовної ймовірності перебування системи в стані S_1 всі інші безумовні ймовірності знаходяться за рекурентною формулою:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^{n} p_i(k-1)\,p_{ij}\,,\ k = 1, 2\ .;\ j = 1, 2\ ., n \tag{13}$$

Моделлю деградації встановлюється 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 вид:

$$P_t = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \tag{14}$$

де λ - параметр процесу – інтенсивність відмов; k – номер дискретного стану; $P(t)$ – ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_k$.

Для випадку лінійного графу з п’яти дискретних станів, залежність (14) має вид:

$$P_t = 1 - 0{,}008333\,(\lambda t)^5 e^{-\lambda t} \tag{15}$$

Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ, залежністю (15) встановлюється зв’язок між надійністю елемента P_t в i-му стані та часом t, що пройшов від початку експлуатації до стану i = 2,...5

Марковська стохастична модель накопичення пошкоджень в результаті природного зносу є досить універсальною і має практичну спрямованість, як інструмент оцінки технічного стану та прогнозу залишкового ресурсу споруди. Модель виявилася в Україні затребуваною і сьогодні успішно використовується в системі експлуатації автодорожніх мостів як інструмент управління безпекою, оцінювання і прогнозування технічного стану елементів транспортних споруд.

Відкриті питання

Як видно з наведеного формулювання, модель теоретично достатньо строго обґрунтована. Однак її практичне застосування багато в чому являє собою мистецтво, залежить від суб'єктивних вольових рішень дослідника.

А. Перш за все, це - феноменологічна модель, і за визначенням, потребується, що би дослідник мав достатню кількість теоретичних або натурних даних, які дозволяють лінгвістично і кількісно описати кожен із дискретних станів. Цей опис є фундаментальною основою моделі. Потрібне глибоке проникнення в фізичну суть процесу деградації, необхідно не тільки адекватно описати кожен з дискретних станів, а й коректно встановити границі зміни параметрів в межах одного дискретного стану, тоді як процес, що моделюється, є безперервним.

Б. Досить суб'єктивним є рішення про кількість дискретних станів, якими представляються життєвий цикл елемента. Ясно, що чим більше прийнято дискретних станів, тим точніше описується безперервний процес накопичення пошкоджень. З іншого боку, для опису великої кількості дискретних станів потрібно значне розширення бази дослідних, натурних даних. Де розумне задоволення цих суперечливих вимог вирішує розробник моделі.

В. Важливою теоретичною стороною моделі є граф процесу деградації елемента. Коли граф процесу розроблено дослідником, запис рівнянь моделі (6), що визначають ймовірнісну природу деградації, видається цілком формалізованим. Тому розробка графа моделі, що залежить від кількості дискретних станів і зв'язків між ними, завжди буде предметом особливої уваги з боку дослідника, завжди буде відображати його суб'єктивне уявлення про сутність і закономірності перебігу процесу деградації.

Г. Ще один, принципово важливий аспект моделі - питання про визначення розробником функції інтенсивності відмов $\lambda(t)$. Принципово важливий тому, що в представленій моделі процес керується тільки одним параметром. У загальному випадку інтенсивність відмов є випадковою функцією часу. Як слідство цього, диференціальні рівняння моделі (15) стають нелінійними, не мають розв'язку в замкнутій формі і розробнику доводиться звертатись до досить складного чисельного рішення. З іншого боку, нині невідомо якою насправді є функція інтенсивності відмов елементів споруд. Тому для простоти розв'язку часто застосовується припущення $\lambda(t)$ = const.

Д. Сьогодні, є чимало критиків, які ставлять під сумнів практичну цінність марковских моделей накопичення пошкоджень. Критиці піддається основна гіпотеза марковського ланцюга про залежність «*майбутнього*» тільки від «*сучасного*» [5]. Як приклад такої критики, пошлемося на роботу [19], видного теоретика США в області довговічності споруд, Д.Френгопола (D. Frangopol). Дійсно, теоретично модель описує стохастичний процес «*без пам'яті*». У той же час, марковський випадковий процес не є повністю незалежним від минулого. В певній мірі дещо філософське формулювання цієї залежності є таким [5]: «для марковского випадкового процесу« *майбутнє*» залежить від «*минулого* » тільки через «*сучасне*». Отже, мова не йде про повну незалежність «*майбутнього*» від «*минулого*», бо в загальному випадку, відправним є даний стан (при $t = t_0$) який в принципі залежить від того як протікав процес деградації в минулому.

Зауважимо шо в нашому, окремому випадку нормативного документу, запропонований прийом отримання значення керуючого параметра моделі життєвого циклу елемента з «*сучасного*», тобто i-го дискретного стану, дає повну інформацію про історію навантаження в «*минулому*», і не тільки.

Визначений процедурі документа [9]: параметр інтенсивності відмов несе в собі багато іншої інформації яка відноситься до умов експлуатації, утриманні споруди, якості будівництва, особливостям конструкції, тощо.

Далі наводиться новітня модель деградації залізобетонних елементів в якій критерієм слугує ширина розкриття тріщин.

Модель деградації основана на фізико-механічних характеристиках матеріалу.

Представлена тут альтернативна модель оцінювання і прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів будується в функції одного параметра - ширини розкриття нормальних тріщин [14]. Ширина розкриття тріщин, в свою чергу, є функцією параметрів фізико-механічних характеристик матеріалів елемента. У такій постановці модель може бути застосовна на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування. Завдання обмежується залізобетонними згинаними елементами мостів.

Теоретичний базис моделі містить дві гіпотези:

А. Критерієм технічного стану елемента приймається числовий параметр ширини розкриття тріщини, який слугує для кількісної інтегральної характеристикою процесу деградації.

Б. Параметр ширини розкриття тріщини є достатньо інформативним для побудови закону деградації залізобетонного згинаного елемента в функції часу.

Процес деградації - зростання ширини розкриття тріщини будемо описувати одновимірним диференціальним рівнянням

$$\frac{dA(t)}{dt} = \gamma A(t), \tag{16}$$

де $A\,(t)$ - ширина розкриття тріщин, функція часу; γ - швидкість деградації, константа; t - час.

Розв’язок диференціального рівняння (16) має вид:

$$A(t) = a_0\exp(-\gamma t), \tag{17}$$

тут a_0 - початкове значення ширини розкриття тріщин суть постійна інтегрування, яка визначається з початкової умови: при t = 0 $A\,(t) = a_0$.

Початкове значення ширини розкриття тріщин при проектуванні визначається функцією О.Я. Берга [1,2]:

$$a_0 = f_a(H, R, E, \sigma, \Psi), \tag{18}$$

де H - геометричні характеристики перерізу; R, E - фізико-механічні характеристики перетину; σ - напруження в перерізі; Ψ - коефіцієнт типу перетину. Параметри (H, R, E, σ, Ψ) визначаються відповідно до вимог ДБН [8].

Проектний строк експлуатації T отримаємо з розв'язку (17) поклавши $A(t) = A_{lim}$, де A_{lim} - скаляр, граничне значення ширини розкриття тріщин в експлуатації:

$$T = \frac{1}{\gamma}\ln\left(\frac{A_{\lim}}{a_0}\right), \tag{19}$$

Для використання в проектній практиці прогнозу (17) введемо коефіцієнт надійності як 5% квантиль нормально розподіленої змінної T:

$$T_{\mathrm{d}} = T\cdot\gamma_{\mathrm{t}} \tag{20}$$

де T_{d} – проектний строк експлуатації T елемента; γ_{t} – коефіцієнт надійності часу життєвого циклу.

Коефіцієнт надійності визначається залежністю;

$$\gamma_{\mathrm{t}} = \exp(0{,}8\cdot\beta\cdot V_{\mathrm{R}} - 1{,}645\cdot V_{\mathrm{Q}} \tag{21}$$

де β · - граничне значення характеристики безпеки, обчислене за характеристичною шириною розкриття тріщин A_{lim}; V_{R} і V_{Q} - узагальнені коефіцієнти варіації елемента і навантаження відповідно.

Висновки

Модель, що базується на засадах фундаментальних принципів стохастичної теорії надійності є універсальною і придатна для всіх типів елементів будівельних конструкцій. Модель в цьому випадку керується одним параметром – інтенсивністю відмов. Саме цей факт є визначальною характеристикою і робить модель універсальною. З іншого боку, тільки один ймовірнісний параметр є недоліком, звужує можливості моделі як апарата керування довговічністю і потребує від дослідника не стандартних, специфічних прийомів апріорного визначення інтенсивності відмов. Один із ефективних способів визначення інтенсивності відмов був запропонований нами для нормативного документу з експлуатації автодорожніх мостів [9] в роботі [11] і визначається експертом на основі оглядів та обстежень споруди, що знаходиться в експлуатації. Очевидно, що в такому випадку модель, в якій надійність є критерієм деградації не може застосовуватись на етапі проектування.

Представлена нова модель прогнозування технічного стану елементів автодорожніх мостів [14] базується на аналізі тріщиностійкості згинальних залізобетонних елементів може стати найбільш обґрунтованою, з точки зору фізики руйнування залізобетону, основою для розробки простого інженерного апарату прогнозування ресурсу на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування. Очевидно, що в силу великої кількості фізико-механічних та геометричних параметрів, що входять до формули оцінки ширини розкриття тріщини, прогноз розкриття ширини є найбільш обґрунтованою формою аналізу довговічності.

Модель відкриває шлях управління ресурсом варіюючи механічні характеристики матеріалів. В системі експлуатації автодорожніх мостів запропонована модель, з єдиним керуючим параметром - шириною розкриття тріщин, дозволяє прогнозувати термін служби залізобетонних елементів мостів на всіх етапах життєвого циклу експлуатації, може значно спростити процес оцінки їх технічного стану. Недолік такої моделі один – модель придатна тільки для залізобетонних елементів.

Література

1. Берг О.Я. Исследование процесса трещинообразования в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля / О. Я. Берг // – М: Трансжелдориздат, 1954. – №44. – с. 5 – 10.
2. Берг О.Я. О предельном состоянии по трещинам в железобетонных мостовых конструкциях / О.Я. Берг // Вопросы проектирования и строительства железнодорожных мостов. М.: Трансжелдориздат, 1951. – Вып. 3. – 11 с.
3. Богданоф Дж. Вероятностные модели накопления повреждений. / Дж. Богданофф, Ф. Козин; пер. с англ. д-ра техн. наук С.А. Тимашева. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
4. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. (). Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высш. шк., 2000
6. ГОСТ 27.410-89. Надежность в технике. Основные понятия. – М.: Изд-во стандартов. 1990. – 37 с.
7. ГОСТ 27751 – 88 [СТ СЭВ 384-87]. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. – М.: Изд-во стандартов. 1988. – 10 с.
8. ДБН В.2.3-14:2006 «Мости та труби. Правила проектування ». – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006
9. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». - Мінрегіонбуд України, К.: 2013
10. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008«Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT)»
11. Лантух-Лященко А.І. Вероятностная модель оценки технического состояния и прогноза остаточного ресурса элементов автодорожных мостов / Лантух-Лященко А.І. – М.:

Дороги и мосты. Российский дорожный научно-исследовательский институт. 2007. – с. 103–111

12. 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.
13. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. //Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: 1999
14. Лантух-Лященко А.І. Новая модель прогноза жизненного цикла железобетонных элементов мостов. //Зб. Сучасні проблеми технічного регулювання у будівництві – К.: КНУБА, 2016. вип.2. – С. 33 - 40
15. Марков А.А. Исчисление вероятностей. 2-е издание. СПб. 1908
16. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991.
17. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. пос. в 4-х т. под. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988-1990.
18. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. М.: Транспорт, 1980.
19. Frangopol D. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges / Frangopol D. et al. // Journal of computing in Civil Engineering –January (2001), –pp. 27 – 34.
20. ISO 2394: 1998. General principles on reliability for structures. 2nd ed. Geneve, Switzerland: ISO, 1998.
21. Miner, M. A., Cumulative damage in fatigue, J. Applied Mech., 12 (1945) pp. 159-164.
22. Melchers, R.E. Structural Reliability Analyssis and Prediction/ Second Edition. John Wiley & Sons.- New York: 1999, 437 p.
23. Probabilistic Model Code ISBN 978-3-909386-79-6. Интернет ресурс: http://www.jcss.byg.dtu.dk
24. Zhang Z., Sun X., Wang X. Determination of Bridge Deterioration Matrices with State National Bridge Inventory Data (IBMC03-042). - 9th International Bridge Management Conference, Orlando, Florida, 2003 p.207 – 219

Рецензенти:
Гамеляк І.П., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.
Марчук О.В., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Reviewers:
Gameliak I.P., Dr. Tech. Sci., National Transport University.
Marchuk O.V., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції**: 12.03.2017 р.**