УДК 624.21

А.И. Лантух-Лященко

ПРОБЛЕМА НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ПРОГОНОВИХ БУДОВ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

Задача дослідження

Проблема надійності і довговічності споруд складна. Її коректна постановка потребує врахування мінливості матеріалів і навантажень в часі, чутливості до деградації конструктивної форми споруди, умов будівництва, умов експлуатації, характеристик навколишнього середовища, соціально-економічних вимог. Процес погіршення функціональних властивостей конструкції потребується описати випадковою функцією, залежною від часу. При такій великій кількості початкової інформації задача стає громіздкою і практично не піддається розв’язку.

Визначення надійності елементів мостів, що проектуються або знаходяться в експлуатації, базується на фундаментальному принципі, вперше запропонованому О.Р. Ржаніциним [1] у 40-х роках минулого сторіччя. Згідно цього принципу надійність елемента визначається, як ймовірність неруйнування, інакше кажучи, ймовірність того, що величина узагальненого резерву міцності *S(t)* буде мати додатне значення:

$$P_t = P(S(t) \geq 0);\ S(t) = R(t) - Q(t), \tag{1}$$

де *R(t)* - випадкова функція часу узагальненої опірності елемента; *Q(t)* - випадкова функція часу узагальненого навантаження елемента. Принцип (1) сьогодні є класичним і наведений нами щоби формулювати проблему.

Коли О.Р.Ржаніцин сформулював свій принцип, теорія випадкових функцій ще не набула широкого застосування, і в пошуках придатного на той час інженерного методу оцінки надійності ним було показано, що для елементів споруд, які проектуються, з достатньою для практики точністю при $t=0$, можна прийняти функції в (1) випадковими змінними. Одночасно постулювалось, що закон розподілу випадкових змінних *R* і *Q* є нормальним. Таким чином залежність (1) застосовується в формі змінних незалежних від часу:

$$P = P(S \geq 0); \; S = R - Q, \tag{2}$$

де R - випадкова змінна узагальненої опірності елемента; Q - випадкова змінна узагальненого навантаження елемента.

Це припущення виявилося слушним, його використання дало змогу теоретично обґрунтувати систему коефіцієнтів надійності будівельних норм колишнього СРСР, а в 60-х роках і в країнах Західної Європи.

Пізніше принцип став широко використовуватися в роботах закордонних дослідників G. Augusti, A.Baratta [2], A.C.Cornell [3], R.E Melchers [4], D.Venziano [5].

Метод є прозорим, зрозумілим інженерам, використовується і буде використовуватись ще довгі роки, проте мінімум три фундаментальні проблеми зостаються відкритими:

- як проектувати елемент з наперед заданою надійністю?
- як проектувати елемент з наперед заданим терміном служби?
- як визначити надійність і залишковий ресурс елемента в процесі експлуатації для $t > 0$?

Саме ці проблеми і є предметом розгляду в нашій статті.

Надійність елементів, що проектуються

Сьогодні є звичним записувати принцип (2) в такій формі:

$$P_s = P[(R(\mathbf{X}) - Q(\mathbf{X})) \langle 0]; \;\; S(\mathbf{X}) = R(\mathbf{X}) - Q(\mathbf{X}) \; ; S(\mathbf{X}) \langle 0, \tag{3}$$

де $R(X)$ - випадкова функція узагальненої опірності елемента; $Q(X)$ - випадкова функція узагальненого навантаження елемента;

$\mathbf{X} = [X1 \;\; X2 \;\; ...X_n]^{\mathrm{T}}$ - n-мірний вектор незалежних випадкових змінних - топологічних, механічних параметрів елемента та параметрів навантаження.

В сучасній концепції надійності елементів є усталеним класифікувати визначення надійності елементів споруд за трьома рівнями в залежності від гіпотез, прийнятих в імовірнісних розрахунках .

Рівень І. Це класичний підхід в якому узагальнені опір R та навантаження Q розглядаються як детерміновані змінні, а принцип оцінки надійності в формі (2) використовується для визначення встановлених нормами коефіцієнтів надійності. Надійність елемента, в цьому випадку, забезпечується відповідними коефіцієнтами надійності та перевіркою нерівностей граничних станів *у всіх можливих небезпечних розрахункових сполученнях навантажень* :

$$S \langle R - Q \rangle k, \tag{4}$$

де k - кількість небезпечних розрахункових сполучень навантажень.

В розрахунках цього рівня проектувальник не відслідковує показників надійності, не керує ними і, взагалі, ці показники зостаються невідомими. Застосування методики рівня 1 не потребує від проектанта виконання будь-яких імовірнісних розрахунків.

Розрахунки мають вигляд детермінованих, а всі необхідні обчислення в рамках теорії ймовірностей і математичної статистики, у цьому випадку, виконані укладачами норм і реалізуються введенням відповідних коефіцієнтів надійності. Вимоги надійності формулюються як виконання нерівності:

$$Q(F_k, \gamma_k) \leq R(a_k, f_k, \gamma_k)\,, \tag{5}$$

де: Q - узагальнена зовнішня дія на споруду; R - узагальнений опір споруди; F_k - зовнішнє навантаження; a_k - геометричні параметри; f_k - механічні характеристики; γ_k - коефіцієнти надійності.

Графічна інтерпретація коефіцієнтів надійності в просторі випадкових змінних Q, R наведена на рис.1 (тут G - область надійної роботи і L - область відмов).

Новітній перспективний підхід дає проектувальнику апарат визначення проектної надійності, вільний, з одного боку, від зазначених вище обмежень (2), з іншого боку - можливість використати кількісний параметр надійності, як критерій якості проекту. Такі розрахунки виконуються на базі гіпотез рівня ІІ та ІІІ.

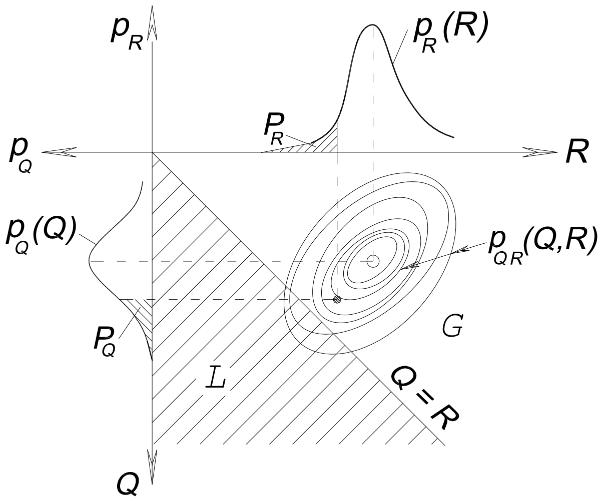

Рисунок 1 - Графічна інтерпретація розрахунків на надійність на рівні І

Рівень ІІ. Гіпотезами рівня ІІ постулюється, що функції $S(\mathbf{X})$, $R(\mathbf{X})$, $Q(\mathbf{X})$ (3) є залежними від двох функцій розподілу - узагальнених опору та навантаження: $S(\mathbf{X})=S(p_R(R), p_Q(Q))$, $R(\mathbf{X})= R(p_R(R))$, $Q(\mathbf{X})=Q(p_Q(Q))$. В практичних розрахунках ця залежність виражається через два параметри розподілу: μ_R, μ_Q - математичні сподівання та σ_R, σ_Q - середні квадратичні відхилення. Розрахунки рівня ІІ мають виконуватися паралельно класичним детермінованим. Вони дають можливість проектувати елементи з наперед заданою надійністю і служать цілям оптимізації якості проекту.

Для скорочення запису будемо визначати надійність, як подію, протилежну (1): ймовірність P_s того, що буде перевищеним граничний стан (мале число $1 >> P_s > 0$). Окрім того, в місцях, де це не викличе двозначності, будемо писати функції твердження (3), опускаючи їхній аргумент: $S(\mathbf{X}) \Rightarrow S$; $R(\mathbf{X}) \Rightarrow R$; $Q(\mathbf{X}) \Rightarrow Q$.

Загальна форма визначення надійності елемента за гіпотезами рівня ІІ згідно [6] є:

$$P_S = P(R - Q) \le 0 = \int\limits_D p_{RQ}(R,Q)dR\,dQ\,, \tag{6}$$

де $p_{RQ}(R,Q)$ - функція сумісної щільності розподілу узагальнених опору та навантаження; D - область інтегрування.

Приймаючи апріорно, що функції R та Q незалежні, функція спільної щільності розподілу $p_{RQ}(R,Q)$ є добуток функцій спільної щільності розподілу кожної із них: $p_{RQ}(R,Q) = p_R(R)p_Q(Q)$, надійність елемента (6) записується у вигляді:

$$P_S = P(R - Q \le 0) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \int\limits_{-\infty}^{Q \ge R} p_R(R)\, p_Q(Q)\, dR\, dQ, \tag{7}$$

де $p_R(R)$ - функція щільності розподілу узагальненого опору; $p_Q(Q)$ - функція щільності розподілу узагальненого навантаження.

Інтеграл (7) представляє собою надійність елемента, узагальнений опір і навантаження якого, вважаються незалежними випадковими функціями.

Для обчислення інтеграла (7) розроблені спеціальні числові процедури. Ми використовуємо широко розповсюджений прийом О.Р. Ржаніцина [6].

Числову процедуру практичної реалізації (7) покажемо, ні скільки не знижуючи загальність, на прикладі нормального розподілу функцій $S(\mathbf{X})$, $R(\mathbf{X})$, $Q(\mathbf{X})$. Для розрахунків вводиться параметр - характеристика безпеки β [6], котра визначається через параметри прийнятих законів розподілу функцій $R(\mathbf{X})$ та $Q(\mathbf{X})$.

Характеристика безпеки вводиться як відношення математичного сподівання до стандарту узагальненого резерву опору елемента:

$$\beta = \frac{\mu_S}{\sigma_S}\,, \tag{8}$$

де μ_S - математичне сподівання узагальненого резерву опору елемента; σ_S - середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого резерву опору елемента.

Визначаючи параметри розподілу узагальненого резерву опору елемента через параметри розподілу функцій *R(**X**)* та *Q(**X**)*, маємо:

$$\mu_S = \mu_R - \mu_Q\,,\ \sigma_S = \sigma_R + \sigma_Q \ \text{ та } \ \beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}, \tag{9}$$

де μ_R - математичне сподівання узагальненого опору елемента; μ_Q - математичне сподівання узагальненого навантаження елемента; σ_R - середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого опору елемента; σ_Q - середнє квадратичне відхилення узагальненого навантаження елемента.

Надійність елемента (7) виражається через характеристику надійності β і нормальну функцію розподілу:

$$P_S = \Phi(-\beta), \tag{10}$$

де Φ - стандартна функція розподілу.

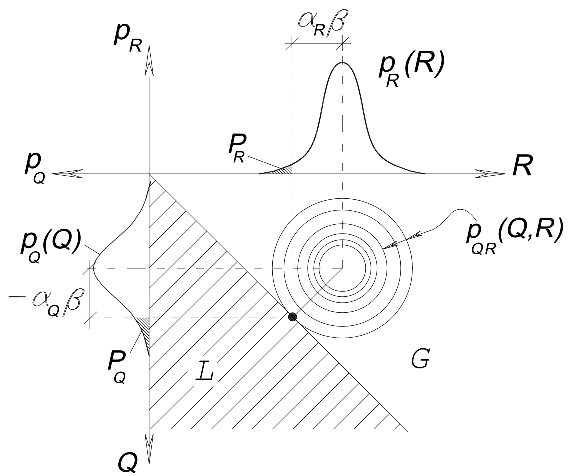

Рисунок 2 - Графічна інтерпретація розрахунків на надійність на рівні II

Графічна інтерпретація розрахунків надійності в просторі випадкових змінних *Q, R* наведена на рис.2.

Надійність споруди на рівні II досягається перевірками в граничних станах першої та другої груп. В необхідних випадках має бути здійснена перевірка за втомою. Розрахункові значення зовнішньої дії на споруду *Q* та опору споруди *R* визначаються так, щоб ймовірність отримання більш несприятливого значення була наступною:

$$P(Q > Q_d) = \Phi(+\alpha_Q \beta)$$

$$P(R > R_d) = \Phi(+\alpha_R \beta), \tag{11}$$

де α_Q, α_R - вагові коефіцієнти. Обчислюються вагові коефіцієнти через стандарти σ_Q та σ_R :

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R / \sigma_Q}{\sqrt{1-(\sigma_R / \sigma_Q)^2}}; \quad \alpha_Q = \frac{1}{\sqrt{1-(\sigma_R / \sigma_Q)^2}} \tag{12}$$

В практичних розрахунках рекомендується скористатися залежністю еквівалентною умові (5), записаною через параметри закону розподілу μ та σ :

$$\mu_Q - \alpha_Q \beta \sigma_Q \le \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \tag{13}$$

Як видно із наведених залежностей, закони розподілу функцій *R*(**X**) та *Q*(**X**) можуть бути різними. Такі залежності нескладно отримати для лог-нормального, Гумбеля чи іншого розподілу. Цей підхід дає можливість проектувати елементи мостів із наперед заданою надійністю. Інакше кажучи, надійність елементів стає керованою в процесі проектування, відкривається шлях до оптимізації проекту за характеристикою надійності, яка буде, окрім показника рівня безпеки експлуатації, відігравати ще одну роль - інтегрального показника якості проекту. Критерієм якості проекту буде вимога задоволення нерівності:

$$\beta \ge [\beta_{\min}], \tag{14}$$

де $[\beta_{\min}]$ - нормативне мінімальне значення характеристики надійності.

Мінімальні значення характеристики надійності визначені із умови 95% забезпеченості наведені в проекті ДБН України «Мости і труби. Правила проектування» [7] та в Єврокоді [10].

Рівень III. Гіпотези рівня III вільні від спрощувальних обмежень (3), орієнтовані на визначення надійності в рамках розрахунків за методом граничних станів . Надійність виражається тут в найбільш загальній формі [10], у вигляді *n*- кратного інтеграла:

$$P_s = P[S(\mathbf{X}) \leq 0] = \int \dots \int_{D \leq 0} p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \tag{14}$$

де **X** - *n*-вимірний вектор незалежних випадкових змінних - топологічних, механічних параметрів елемента та параметрів навантаження; $p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ - спільна щільність розподілу вектора незалежних випадкових змінних; *D* - область інтегрування, для якої $S(\mathbf{X})[\ 0$

Аналітичного інтегрування форми (14) не існує. У випадку незалежності випадкових змінних X_i підінтегральна функція спільної щільності розподілу $p_x(X)$ знаходиться за виразом:

$$p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n} p_x(X_i) = p_x(X_1) \cdot p_x(X_2) \cdot p_x(X_3) \dots, \tag{15}$$

де $p_x(X_i)$ - щільність розподілу змінної $X_{i.}$

Залежність (15) дає можливість одержати інтеграл (14) чисельно і визначити тим самим, ймовірність викиду за область $S(\mathbf{X})\langle\ 0,$ в інших термінах - ймовірність перевищення граничного стану. Проте сьогодні вважається за доцільне скористатися могутньою комп'ютерною технікою та розвинутим програмним забезпеченням, щоби одержати інтеграл (14) шляхом імітації за методом Монте-Карло.

Таким чином, визначення надійності за гіпотезами рівня III дає можливість запроектувати елемент з наперед заданою надійністю, відкриває шлях до оптимізації конструкції за параметром надійності. Як і за гіпотезами рівня II, розрахунки за гіпотезами цього рівня виконуються паралельно традиційним і мають за мету розробку проекту з керованими показниками надійності.

Проектна довговічність елементів

Теоретично довговічність T зв’язана з надійністю рівнянням [11]

$$T = \int_{0}^{\infty} P(\mathbf{X}, t)\,dt \qquad (16)$$

де $P(\mathbf{X},t)$ - функція надійності елемента, яка залежить від вектора генеральних параметрів **X** та часу t.

Проте практичної реалізації залежності (16) не існує. Описані вище підходи оцінки проектної надійності не можуть бути безпосередньо застосовані для визначення проектної довговічності, так як відносяться до консервативної системи, параметри якої не залежать від часу. В цьому випадку має розглядатись випадковий процес, що описується випадковою функцією, залежною від змінної часу, як це видно з (16). Спроба визначення випадкової функції, якою описується деградація залізобетонних елементів мостів надається нижче.

В загальному випадку проблема надійності *стохастичної* системи, яка описується рівнянням (6) формулюється так:

$$P_f(t) = Prob[\,min\,S(X(\tau)) \le 0 \text{ для } 0 < \tau < t\,], \qquad (17)$$

де символ Prob означає імовірність; $S(X(t))$ - узагальнений резерв міцності, залежний від часу; τ - змінна часу.

В термінах вектора незалежних випадкових базових змінних проблема (16) описується інтегралом, який дає імовірність того, що в період часу t буде досягнутий граничний стан конструкції:

$$P_f(t) = \int\limits_{S(X(t)) \le 0} f[X(t)]\,dX(t) \qquad (18)$$

де $f[X(t)]$ - щільність розподілу функції базових змінних.

Для прогнозу довговічності ми використаємо чисельний підхід, рекомендований Європейським об'єднаним комітетом безпеки споруд [12, 13]. Ідея його зводиться до моделювання функції узагальненого резерву міцності $S(.)$ і пошуку її мінімального значення, відповідного досягненню граничного стану.

Модель

В основу моделі прогнозу довговічності покладено гіпотезу про те, що інтегральним параметром, який визначає досягнення граничного стану, є стохастична характеристика безпеки, яа визначається за параметрами розкриття нормальних або похилих тріщин:

$$S(X(t)) = S(\beta(t)) \tag{19}$$

Прийняті звичайні допущення про нормальний розподіл функцій $R(t)$, $Q(t)$ і відсутності кореляції між ними.

Функція деградації (узагальнений резерв міцності) прийнята в формі:

$$S(\beta(t)) = \beta_0\, a(t - t_0)^{-\lambda} \tag{20}$$

де λ - параметр, який визначається регресійним аналізом статистичного ряду часу досягнення граничного стану; t_0 - початковий період; a - масштабний параметр моделі.

Для випадку оцінки довговічності за утворенням нормальних тріщин

$$\sigma_{bt} \le mR_{bt,ser} \tag{21}$$

початкова характеристика надійності має вид:

$$\beta(0) = \frac{\vartheta - 1}{\sqrt{(V_{bt}^2 + \vartheta^2 V_{Rbt}^2)}} \tag{22}$$

де $\vartheta = \mu_{Rbt} / \mu_{bt}$ - середня розрахункова і середня обчислена напруга бетону відповідно; V_{bt} и V_{Rbt} - коефіцієнти варіації бетону.

Середні значення визначаються за нормативними, по залежностям:

$$\mu_{Rbt} = \frac{mR_{bt,ser}}{1 - 1{,}64V_{Rbt}}; \; \mu_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{1 + 1{,}64V_{bt}} \tag{23}$$

Для випадку довговічності, яка визначається за розкриттям тріщин від дії тимчасового навантаження $a_{cr} \leq \Delta$ застосовується така ж сама процедура.

Щоби одержати значення параметрів моделі (20) виконано регресивний аналіз вибірки часу T переходу в п'ятий дискретний стан (перший капітальний ремонт або припинення експлуатації) 168 залізобетонних ребристих збірних залізобетонних прогонових будов мостів України.

На рис. 3 показано графіки функції деградації $S(\beta(t))$ для випадку початкової характеристики безпеки $\beta(0) = 3{,}0$. Мінімальне нормоване значення функції прийняте рівним $S(\beta(t))_{crt} = 1.5$ (табл. 1). Перетин кривої з лінією мінімального значення дає точку часу до першого капітального ремонту або припинення експлуатації T_{crt}. Для цього випадку одержуємо верхню оцінку $T_{crt,\ sup} = 92$ *роки*, нижню - $T_{crt,\ inf} = 34$ *роки*

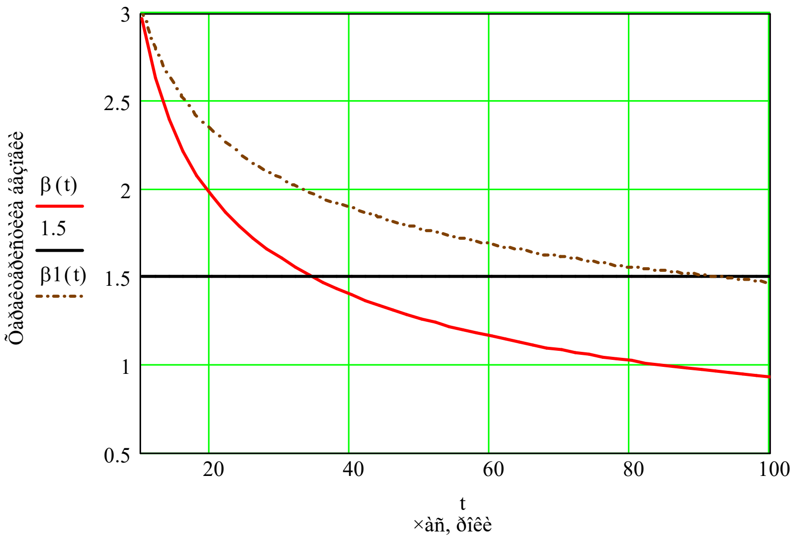

Рисунок 3 - Функція деградації, при $\beta(0) = 3{,}0$

Таблиця 1 - Нормативні вимоги до надійності елементів мостів [7].

	За першою групою граничних станів	За втомою чи іншим поступовим відмовам	За другою групою граничних станів
Характеристика безпеки, β	3,8	1,5 - 3,8	1,5
Надійність, p_f	0,0001	0,0668-0,0001	0,0668

Визначення надійності елементів споруд в процесі експлуатації

Задача визначення надійності і прогнозу залишкового ресурсу елементів транспортних споруд, які знаходяться в експлуатації, сьогодні має практичний розв'язок [14], оснований на новітній феноменологічній моделі деградації в якій встановлюється імовірнісний зв'язок надійності елемента, в момент часу експлуатації $t < T$, із остаточним ресурсом. Теоретичною базою є новий підхід визначення надійності та прогнозу остаточного ресурсу елементів мостів, сформульований в роботах [15 - 18].

Наступні чотири гіпотези є основою моделі.

А. Критерієм технічного стану елемента є числовий параметр надійності, який в моделі виконує, три функції:

- служить кількісною інтегральною оцінкою технічного стану споруди в процесі експлуатації;
- дає можливість виявити ступінь ризику експлуатації під дією прогонових навантажень;
- служить посереднім показником довговічності і критерієм в алгоритмі оптимізації витрат на експлуатацію і реконструкцію транспортних споруд в умовах обмежених ресурсів.

Б. Поняття надійності елемента визначається в класичному розумінні [1], як ймовірність того, що не буде досягнуто граничного стану:

$$P(t) = P(S < S_d) \tag{24}$$

В. Ідейною фізичною основою є поділ споруди на елементи та дискретні моделі їх деградації. Споруда розглядається як система конструктивних елементів п’яти груп:

- елементи мостового полотна;
- елементи прогонової будови;
- стояни і опори;
- фундаменти;
- підмостове русло і регуляційні споруди.

Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується моделлю, яка базується на теорії випадкових марковських процесів[15]. Життєвий цикл елемента поділено на 5 дискретних станів. Кожен із станів описується добіркою якісних та кількісних показників деградації, що характеризують ієрархію відмов елемента. Задача оцінки надійності споруди формулюється як визначення ймовірності переходу системи з дискретного стану $\boldsymbol{S_i}$ в $\boldsymbol{S_{i+1}}$, $i = 1,2,...5$ за умови, що час переходу є неперервна функція. В такій постановці знос конструкції трактується, як дискретний 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 диференційних рівнянь Колмогорова:

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{ik} p_{kj}(t), \quad i, j, k = 1,2,...,n \qquad (25)$$

при початкових умовах $p_{ij}(0) = \delta_{ij}$, де δ_{ij} - символ Кронекера.

Матриця перехідних ймовірностей дає можливість визначити надійність елемента в кожному із дискретних станів [12] за відомою початковою надійністю в першому стані. Для випадку початкової надійності $P(t=0)= 0.9998,\ (\beta = 3,8)$ в табл. 1 наведені значення надійності в кожному із дискретних станів.

Таблиця 2 - Дискретні стани елементів транспортних споруд

Номер і назва дискретного стану	Надійність		Середній знос елемента, в %
	P(t)	β	
1. Справний	0,999844	3,8	0
2. Обмежено справний	0,998363	3,0	8
3. Працездатний	0,992461	2,4	27
4. Обмежено працездатний	0,979771	2,1	42
5. Несправний	0,958351	1,7	65

Г. Процес деградації елемента протягом життєвого циклу описується одним параметром λ - показником інтенсивності відмов. Цей показник приймається постійнім, незалежним від часу. Принципово важливим є те, що *параметр* λ *визначається окремо для кожного елемента споруди.*

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 статнуться всі n подій процесу, має вид:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \tag{26}$$

де λ - параметр процесу - інтенсивність відмов.

В термінах таблиці дискретних станів (табл.2), *P(t)* - є ймовірність того, що елемент перейде в стан k протягом часу $t < T_{k.}$

З урахуванням (26) модель деградації елемента описується нелінійним рівнянням:

$$P_t = 1 - p_t(t, \lambda) \tag{27}$$

де $p_t(t, \lambda)$ - експоненціальна функція залежна від параметру λ :

$$P_t = 1 - 0{,}008333 \cdot (\lambda t)^5 \cdot \exp(-\lambda t) \tag{28}$$

Таким чином, при заданій інтенсивності відмов λ залежністю (28) встановлюється зв'язок між надійністю елемента P_t в i-му стані та часом t, що пройшов від початку експлуатації до стану $i+1 = 3, 4, 5$.

Розв'язком рівняння (28) відносно невідомої t - часу експлуатації визначається залишковий ресурс елемента.

Визначення параметра інтенсивності відмов

Принципово важливою стороною моделі є процедура визначення параметру інтенсивності відмов λ. Тут цей параметр знаходиться розв'язком рівняння (28) при відомих початкових умовах, *визначених для окремого елемента*, а саме:

- надійність елемента в i-му стані - $P_{t,i}$. Визначається на підставі класифікації за даними оглядів, обстежень, перерахунку несучої здатності та обчислення дійсної (на момент обстеження) характеристики надійності β [16];
- час, що пройшов від початку експлуатації до i-го стану - t_i.

Цим самим визначається параметр інтенсивності відмов λ, який присвоюється *тільки одному елементу*. В такому трактуванні параметр λ є не детермінованою, а випадковою змінною, яка характеризує тільки даний елемент. В подальшому параметр λ заноситься в паспорт елемента і служить технічним показником швидкості деградації. Процедура визначення параметру інтенсивності відмов застосовується також до елементів, які, внаслідок ремонту чи реконструкції повернулись до вищого стану.

За відомим значенням параметру λ та надійністю елемента в i-му стані - $P_{t,i}$., $i=2,3,4,5$, розв'язком рівняння (28) відносно невідомої t_i знаходиться час, що пройде від початку експлуатації до стану i. При $i=5$ визначається час до припинення експлуатації. Очевидно, що залишковий ресурс складатиме:

$$T_p = t_5 - t_i \, , \tag{28}$$

де t_5 - час, що пройде від початку експлуатації елемента до стану 5 (прогнозований час), в роках; t_i - час, що пройшов від початку експлуатації елемента до моменту складання прогнозу, в роках.

Модель легко узагальнюється на випадок процесу з відновленням, тобто на випадок ремонту, який повертає елемент із стану i до вищого стану $j<i$. В цьому випадку за алгоритмом, котрий наведено вище, вираховується нове значення параметру інтенсивності відмов $\lambda_j < \lambda_i$ і елемент отримує нові фізико-механічні властивості, які описуються іншою деградаційною кривою з ресурсом $T_{p,j} > T_{p,i}$.

Модель, що розглядається, є інтегральною. Вона не містить теоретичного апарату, чутливого до матеріалу елементу, його статичної схеми, технології спорудження, екологічних умов та такого іншого. (Зауважимо, що 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 стан елемента).

В силу того, що модель основана на гіпотезі надійності і застосовується для окремого елемента, її точність буде такою, як і точність розрахунків в проектуванні - в довірчому інтервалі 0,95-0,05. Точність моделі очевидно буде тим вище, чим нижче є наявний стан елемента в момент складання прогнозу.

За рахунок того, що параметр λ визначається для кожного даного елемента і має уточнюватись всякий раз після чергового обстеження, точність моделі підвищиться. Проте кількісну характеристику точності моделі може дати тільки регресійний аналіз даних доволі довгого періоду експлуатації споруд. Сьогодні такою базою, достатньою для аналізу, ми не володіємо.

Висновки і відкриті проблеми

1. Підсумовуючи викладене, наголосимо, що сучасні досягнення в теорії надійності елементів транспортних споруд дозволяють проектувати елементи з наперед заданою надійністю. Такий підхід дасть змогу проектувальнику свідомо визначити рівень безпеки елемента споруди та використати кількісний параметр надійності, який послужить цілям оптимізації якості проекту.

Теоретичні засади теорії надійності викладені в статті сьогодні є вже достатньо апробовані і внесені нами до проекту ДБН “Мости і труби. Правила проектування” [7].

2. Проблема прогнозу довговічності елементів залізобетонних елементів автодорожніх мостів, що проектуються - одна з найменш вивчених. Сьогодні ми не маємо апарату такого прогнозу, не маємо відповідних наукових розробок. Тому запропоновану в роботі модель слід розглядати як постановку задачі прогнозу довговічності, тобто можливий підхід до аналізу довговічності.

Запропонована інтегральна модель прогнозу довговічності, являє собою функцію деградації, єдиним аргументом якої є характеристика безпеки, одержувана за параметрами тріщиноутворення. Це проста, наочна і зручна для практичного вжитку модель.

Проте сьогодні неможливо рекомендувати модель для застосування в практиці проектування. Перша спроба її розробки виявила низку супутніх проблем. Назвемо дві з них.

А. Модель, що пропонується дає великий розрив між верхньою і нижньою оцінками довговічності викликаний, в більшій частині, конструктивними особливостями споруди. Ймовірно, не вдасться обмежитися однією єдиною функцією деградації. Може статися, що знадобиться декілька функцій, залежних від конструктивних особливостей елементів.

Б. Прийняте нині граничне значення характеристики безпеки за другим граничним станом β $= 1,5$ ($P_f = 0,9332$) вимагає наукового обґрунтовування. Таким обґрунтовуванням, на наш погляд, має бути дослідження довговічності на підставі кінетичних рівнянь корозії арматури і процесу карбонізації захисного шару.

3. Запропонована феноменологічна модель деградації дає змогу визначити надійність елемента в процесі експлуатації та його остаточний ресурс. В моделі числовий параметр надійності є посереднім показником довговічності і відкриває шлях до оптимізації витрат на експлуатацію і реконструкцію транспортних споруд в умовах обмежених ресурсів. Теоретичний апарат моделі алгоритмізований для практичного вжитку і внесено до нормативного документу [14].

Література

1. **Ржаницын А.Р.** Определение коэффициента запаса прочности сооружений. - “Строительная промышленность”, № 8. М.: 1947, - с. 17-25

2. **Augusti, G. and Baratta, A.** Limit analysis of structures with stochastic strength variations // J. Struct. Mech., 1 (1), 43-62, 1972

3. **Cornell, A.C**. A Probability Based Structural Code // ACI Journal No. 12, Proceedings V 66, 1969

4. **Melchers, R.E.** Reliability of parallel structural systems // J. Structural Div., ASCE, 109 (11) 1983, P.2651-2665,

5. **Venziano D.** New index of reliability // J. Engrg. Mech. Div., Proc. ASCE, N 105, - 1979. P. 277-296

6. **Ржаницын А.Р.** Теория расчета строительных конструкций на надежность.//М: Стройиздат. - 1978 - 239 с.

7. **Проект ДБН України** «Мости та труби. Правила проектування». - К.: Укравтодор, 2005, 348 с.

8. **ENV 1991-1-3: 1995**: Basis of design and action on structures. Part 3: Traffic Loads on Bridges. European Committee for Standardization. Brussels.- 67 p. (Єврокод 1-3: Основи проектування та навантаження.Частина 3. Навантаження мостів від транспортних засобів)

9. **Иосилевский Л.И.** Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. - М.: Науч.-изд. центр «Инженер», 2005.-324 с.

10. **EUROPEAN** PRESTANDARD ENV 1991-1-1. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1: Basis of design.- European Committee for Standardization. Brussels.- 85 p

11. **Болотин В.В.** Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М.: Стройиздат, 1982.- 351с.

12. **JCSS**. Probabilistic model code. The Joint Committee on Structural Safety, - Zurich, 2001.- 138 p.

13. **ISO ST 2394.** General Principles on Reliability for Structures.- Zurich: ISO, 1998.- 50 p.

14. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються. ВБН В.3.1-218-174-2002. - Державна служба автомобільних доріг України. - К.: 2002. 74 с.

15. 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.

16. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. Вісник Транспортної Академії України, № 3, Київ 1999. - С. 59 - 63.

17. Лантух-Лященко А.І. Визначення часу переходу елементів споруди із одного дискретного стану в інший.// Зб. Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. Вип.12. - К.: 2001 - С. 397-402.

18. Лантух-Лященко А.І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації // Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип.62. . К.:, 2001.- С.208 - 210.