

**Рис. 6.** Дефекти елементів мостового полотна бездіафрагмових

УДК 658.012.1:624.01

Боднар Л. П., м. Київ, Україна

Панібратець Л. Г., м. Київ, Україна

Івоненко О. Ю., м. Київ, Україна

ДП "ДерждорНДІ"

Цепелев С.Ю., м. Київ, Україна

Ролінська І.Л. м. Київ, Україна

Національний транспортний університет

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ**

Ефективність використання мережі автомобільних доріг суттєво залежить від забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності автодорожніх мостів. В ряді країн

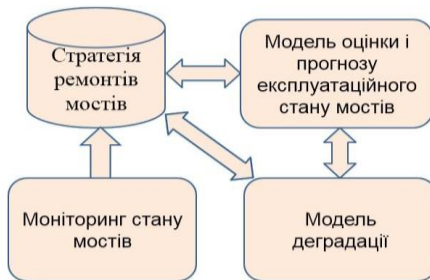
східної Європи, у тому числі в Україні, відбувається погіршення технічного стану мостів, обумовлене недостатнім рівнем витрат на їх утримання і ремонти. Проблема низького технічного стану мостів на автомобільних дорогах України особливо загострилась в останні 15-20 років, в міру того, як стрімко росте кількість фізично зношених споруд [1].

Середній вік мостів на автомобільних дорогах загального користування України зараз складає 57 років. Мостів, вік яких більший за 80 років, близько 12%, тоді як згідно с чинними нормами проектування строк служби мостів має бути 70-100 років в залежності від типу конструкції [2].

В 2004 році ДП "ДерждорНДІ" разом з Національним транспортним університетом розробив Аналітичну експертну систему управління мостами (АЕСУМ). Це головний інструмент системи експлуатації мостів України на автомобільних дорогах загального користування де централізовано зберігається інформація з обстежень мостів та виконуються необхідні процедури для підтримки їх в безпечному для експлуатації стані[1-4]. АЕСУМ постійно вдосконалюється і розвивається, база даних доповнюється і оновлюється.

Модель життєвого циклу моста. Науковим підґрунтям системи експлуатації є модель життєвого циклу моста, що дозволяє визначити час безпечного використання елементів (або споруди в цілому) при заданих навантаженнях у визначених умовах експлуатації. Системною базою дослідження стають моделі деградації, оцінки і прогнозу технічного стану мостів (рис.1). Стан мостів, який приведений до поточного стану – важлива

початкова умова при побудові стратегії ремонтів мостів. Стратегія ремонтів – це прийняття рішення щодо років та видів ремонтів для кожного моста для утримання всіх мостів на мережі автомобільних доріг на належному рівні.



**Рисунок 1** – Складові стратегії ремонтів мостів.

Аналіз життєвого циклу використано для оцінки нових та існуючих мостів, а також для оцінки стратегій ремонтів. Оцінка стану споруди зазвичай базується на детерміністичних моделях прогнозування експлуатаційних характеристик, які описують майбутній стан функціональною кореляцією між параметрами стану споруди, такими як вік, механічні, хімічні та термічні процеси та процеси навантаження [1-4]. Практична реалізація існуючих моделей потребує детальної інформації про її змінні, однак без розгляду невизначеностей у вхідних змінних (значення розсіювання) знижується якість прогнозування.

Модель деградації елементів моста була використана з метою відстеження зміни показників, які характеризують поточний стан споруди або окремих елементів (надійність, рівень деградації, залишковий ресурс) в часі (в процесі «старіння») та з урахуванням впливу проведених експлуатаційних заходів.

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

- моделі, в яких роль деградаційної міри відіграє надійність або характеристика безпеки в функції часу  $\beta(t)$  (Time-dependent reliability);
- стохастичні феноменологічні моделі, побудовані на засадах теорії марковських ланцюгів.

Подібні моделі, зв'язані з дискретними станами елемента споруди наводяться також в роботах [1-4]. Сучасні BMS, зокрема PONTIS, для прогнозування ймовірностей відмов використовують марковську стохастичну теорію [1-4].

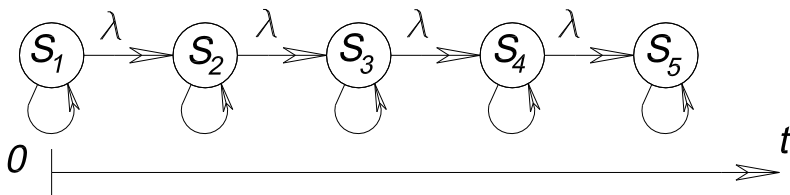
Мета роботи – розробити процедуру визначення прогнозованого експлуатаційного стану елементів та моста в цілому для використання в програмному комплексі АЕСУМ.

Визначення експлуатаційного стану моста. Теоретичним підґрунтям дослідження процесу деградації моста в програмному комплексі АЕСУМ є марковська феноменологічна модель накопичення пошкоджень професора А.І. Лантуха-Ляценка. В цій моделі знос елемента споруди описується марковським дискретним процесом з безперервним часом. Розглядається процес з кінцевою кількістю якісних станів. Роль випадкової змінної в ньому грає випадковий експлуатаційний стан системи.

Вважається, що елемент знаходиться послідовно в станах  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , а переходи з одного експлуатаційного стану в інший здійснюються в моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$ .

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

Визначальні залежності моделі отримані, слідуючи графові, в якому блукання по експлуатаційних станах здійснюється в одному напрямі: від стану з меншим, до стану з більшим номером. Це марковський ланцюг є потоком послідовних подій з однаково розподіленими проміжками часу. Графік потоку показаний на рис.2.



**Рис. 2** - Граф процесу деградації.

*Джерело:* Лантух-Лященко А.І.

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

$$P_i(t) = \sum_{k=1}^N p_k p_{ik}(t), \quad (1)$$

де  $N$  – кількість експлуатаційних станів протягом експлуатаційної фази життєвого циклу елемента;  $p_k$  – надійність елемента, що приписується йому в  $k$ -тому експлуатаційному стані;  $p_{ik}(t)$  – перехідна ймовірність  $k$ -того експлуатаційного стану.

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

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

де  $\lambda$  – параметр процесу інтенсивність відмов (швидкість деградації);  $e$  – основа натурального логарифму.

В термінах таблиці експлуатаційних станів (табл.2),  $P_t P(t)$  – ймовірність того, що елемент перейде в стан  $k$  протягом часу  $t < T_k$ . Таким чином, при заданій інтенсивності відмов  $\lambda$ , залежністю (2) встановлюється зв'язок між надійністю елемента  $P_t$  в  $i$ -му стані та часом  $t$ , що пройшов від початку експлуатації до стану  $I = 2, \dots, 5$ . При  $k = 5$  ( $1/k! = 1/120 = 0.008333$ ) функція має вид:

$$P_t = 1 - 0,008333(\lambda t)^5 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

Кількісним показником інтегральної оцінки технічного стану моста в цілому є формалізована експертна оцінка – рейтинг, яка служить показником для віднесення споруди до певного експлуатаційного стану та призначення певних експлуатаційних заходів [1-4].

Він визначається за шкалою у 100 балів та є узагальненою характеристикою експлуатаційної придатності за станом всіх його елементів. Він обчислюється за формулою (4).

Саме рейтинг є визначальним параметром для оцінки мостів за першочерговістю ремонтів. На основі рейтингу мости оцінюються за п'ятьма експлуатаційними станами (табл.2). Визначений стан споруди дозволяє призначати необхідні експлуатаційні заходи.

Елементи моста поєднуються у сім груп: мостове полотно, прогонові будови, опори, фундаменти, регуляційні споруди, підходи до моста, русла.

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

де  $D_i$  – номер експлуатаційного стану групи конструктивних елементів споруди згідно з методологією [21];  $\alpha_i$  – коефіцієнти впливу стану  $i$ -го елемента на загальний стан споруди (нормалізовані коефіцієнти ваги),  $i = 1, 2, \dots, 7$ .

В таблиці 2 надано інформацію щодо експлуатаційного стану мостів на дорогах державного значення, які обстежено і

інформацію по яких внесено в базу даних АЕСУМ. Викликає занепокоєння кількість мостів, які перебувають у найгірших станах (у 4 та 5).

Визначення прогнозованого експлуатаційного стану мостів. В Україні станом на 2021 рік налічується 16 152 моста на дорогах загального користування, з них обстежено близько 35 % (а саме 5 904 моста).

Про необстежені мости в базі даних АЕСУМ внесена обмежена інформація, така як кілометр розташування, рік побудови, довжина, ширина, схема моста, а вже детальна інформація щодо основних елементів відсутня, так як і інформація щодо дефектів на мостах, відповідно не визначено експлуатаційний стан моста.

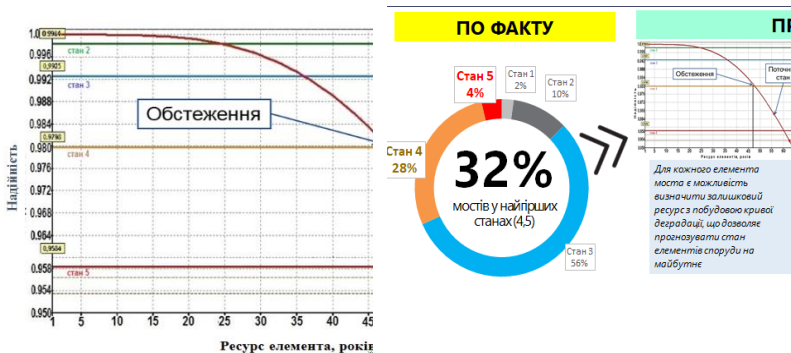
Ретроспективний аналіз проведення обстежень мостів та аналіз плану обстежень, який згенеровано в АЕСУМ на основі нормативної періодичності, показали, що кількість фактичних обстежень значно менша кількості обстежень, передбачених нормами. Це обумовлено умовами обмеженого фінансування.

У зв'язку з наведеним, збільшується потреба у використанні моделі деградації з метою прогнозування зміни стану мостів з часом.

Адаптація моделі деградації в програмний комплекс АЕСУМ здійснена за допомогою програмних засобів, написаних на мові програмування ObjectPascal.

Для кожного елемента моста є можливість визначати залишковий ресурс з побудовою кривої деградації, що дозволяє прогнозувати стан елементів споруди на певний період часу в

майбутньому (рис.3). Це дозволило отримати розподіл за експлуатаційними станами мостів за ймовірнісними оцінками. На першій діаграмі (рис.4) приведений розподіл за експлуатаційними станами на момент обстеження мостів, ці обстеження могли бути проведені по деяким мостам навіть більше 10 років тому назад. На другій діаграмі (рис.4) представлено розподіл за експлуатаційними станами за ймовірнісними оцінками приведеними до поточного 2021 року. Як видно, зміни відбулися суттєві, загрозливою є кількість мостів у 5 непрацездатному експлуатаційному стані. Отримані дані дозволяють обґрунтовано розробляти плани ремонтів та реконструкції мостів.



**Рис.3** – Крива деградації елемента моста

**Рис. 4** – Розподіл мостів на автомобільних дорогах державного значення України за експлуатаційними станами на момент обстеження мостів та за ймовірнісними оцінками приведений до поточного 2021 року.

Треба зауважити, що достовірність прогнозованої моделі необхідно досліджувати шляхом порівняння результатів з повторних обстежень мостів. Нажаль, через недостатнє фінансування в Україні ще ряд мостів не обстежено взагалі, а повторних обстежень обмаль – всього 50. При співставленні даних збіжність складає близька 90%.

Обстеження – важлива складова системи експлуатації автодорожніх мостів. Витрати на обстеження окупаються за рахунок оптимізації витрат на проведення експлуатаційних заходів та вчасного їх виконання.

Однак, в ході проведеного аналізу з'ясовано, що в Україні не витримується періодичність обстежень мостів, передбачена нормами внаслідок недостатнього фінансування цього виду робіт. Тому для певної кількості мостів відсутня достовірна інформація щодо їх поточного експлуатаційного стану.

Для того, щоб не допустити аварійних ситуацій на мостах, а також для того, щоб приймати ефективні управлінські рішення щодо стратегій експлуатації мостів на мережі автомобільних доріг, необхідно мати дієві, максимально наближені до достовірних, моделі прогнозування поточного експлуатаційного стану мостів.

Модель деградації мостів, яка прийнята в Україні як нормативна, та алгоритм адаптації її в програмний комплекс АЕСУМ дозволяє визначати ймовірнісний прогнозований експлуатаційний стан мостів в автоматичному режимі. Це дає можливість навіть при невчасному виконанні обстежень

отримувати прогнозований експлуатаційний стан мостів у необхідний момент часу.

### **Література**

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

2. ДБН В.1.3-22-2009 "Мости і труби. Основні вимоги проектування". – Мінрегіонбуд України, К.: 2009.

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

4. Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Досвід впровадження, сучасний стан та напрями подальшого розвитку / Л.П. Боднар, О.П. Канін // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції с участием студентов и молодых ученых «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов». – Х.: ХНАДУ, 2012. – С. 30-35.