УДК 69.058.8

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ МОСТОВОЇ СПОРУДИ ЯК ПОКАЗНИКА, ЩО ВИЗНАЧАЄ ВИМОГИ ЇЇ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.В. Полярус, професор, д.т.н., В.В. Барчан, асистент, ХНАДУ

Анотація. *Представлено методику визначення мінімуму ймовірності помилкових рішень при проведенні діагностики мостів, що може забезпечити необхідні умови для безпечної експлуатації мостової споруди.*

Ключові слова: *мостова споруда, граничне значення коефіцієнта динамічності, безпечна експлуатація.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ КАК ПОКАЗАТЕЛЯ, КОТОРЫЙ ОПРЕДЕЛЯЕТ ТРЕБОВАНИЯ ЕЁ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

О.В. Полярус, профессор, д.т.н., В.В. Барчан, ассистент, ХНАДУ

Аннотация. *Представлена методика определения минимума вероятности ошибочных решений при проведении диагностики мостов, что может обеспечить необходимые условия для безопасной эксплуатации мостовых сооружений.*

Ключевые слова: *мостовое сооружение, предельное значение коэффициента динамичности, безопасная эксплуатация.*

DETERMINATION OF THE BOUNDARY VALUE OF THE DYNAMIC AMPLIFICATION FACTOR FOR BRIDGE STRUCTURES AS AN INDICATOR DETERMINING THE REQUIREMENTS OF THEIR SAFE OPERATION

A. Polyarus, Professor, Doctor of Engineering Science,
V. Barchan, Teaching Assistant, KhNAHU

Abstract. *The article describes the technique for determining the minimum probability of false decisions during the diagnostics of bridge structures that can provide necessary conditions for the safe operation of bridges.*

Key words: *bridge structures, boundary value of dynamic amplification factor, safe exploitation.*

Вступ

Утримання мостових споруд здійснюється протягом року і являє собою комплекс профілактичних, планово-попереджувальних робіт та нагляду за мостовими спорудами. Якість утримання мостів характеризується комплексом показників, багато з яких безпосередньо пов'язані з вимогами охорони праці. Необхідний рівень транспортно-експлуатаційного стану мостових споруд забезпечують спеціально створені мостові служби. Вони виконують великий обсяг робіт із забезпечення безпечного руху транспортних засобів зі встановленими швидкостями і навантаженнями.

Згідно з [1, 3] існує велика кількість показників, за якими можна оцінити стан мостової споруди. Особливо цінними є узагальнені

показники, що характеризують стан мосту в цілому, тобто опосередковано враховують наявність пошкоджень в елементах мостів. До них, насамперед, відноситься коефіцієнт динамічності мостових споруд.

Аналіз публікацій

У вітчизняній галузі діагностики, спрямованій на визначення поточного стану мостових споруд, спостерігається деяке пожвавлення. Про це свідчить поява ряду публікацій [1 – 5], присвячених питанням розрахунку та врахування динамічного впливу транспортних потоків на мостові споруди. В них показано, що цей вплив можна враховувати з допомогою коефіцієнта динамічності, який визначається з експерименту.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є представлення методики визначення мінімуму ймовірності помилкових рішень при проведенні діагностики мостів.

Визначення граничного значення коефіцієнта динамічності мостової споруди

Згідно з визначенням [1] коефіцієнт динамічності являє собою відношення динамічного прогину $l_{\text{Д}}$ моста до статичного $l_{\text{С}}$

$$K_{\text{Д}} = \frac{l_{\text{Д}}}{l_{\text{С}}}. \qquad (1)$$

Вимірювання статичного прогину здійснюється механічними або цифровими прогиномірами і забезпечує точність (близько 0,001 мм при прогині від 0 до 10 мм). Для вимірювання $l_{\text{Д}}$ використовують п'єзоелектричні віброметри. При цьому похибка вимірювання динамічного прогину внаслідок інерційності датчиків знижується на $20 – 30\%$, що призводить до зниження точності вимірювання $K_{\text{Д}}$.

Для кожної мостової споруди існує деяке унікальне граничне значення $K_{\text{Д}_{\text{ГР}}}$, яке розраховується при проектуванні та корегується при введенні споруди в експлуатацію. Отже, повинна виконуватись нерівність

$$K_{\text{Д}} \le K_{\text{Д}_{\text{ГР}}}. \qquad (2)$$

Внаслідок неточності вимірювання $K_{Д}$ відомими засобами [4] можуть статися дві ситуації: D_1 – міст знаходиться у справному стані і коефіцієнт динамічності не перевищує граничного значення; $D_2 - K_{\text{Д}} > K_{\text{Д}_{\text{ГР}}}$ і мостова конструкція є несправною, тобто небезпечною для експлуатації. В кожній ситуації перевіряється нерівність

$$\text{при} \begin{matrix} K_{\text{Д}} \le K_{\text{Д}_{\text{ГР}}}, K_{\text{Д}} \in D_1 \\ K_{\text{Д}} > K_{\text{Д}_{\text{ГР}}}, K_{\text{Д}} \in D_2 \end{matrix}. \qquad (3)$$

Виберемо чотири гіпотези H_{ij}, де $i, j = 1,2$, які відповідають чотирьом рішенням за правилом (3). Нехай перший індекс гіпотези H_{ij} (тобто i) відповідає індексу прийнятого рішення, а другий (тобто j) – індексу дійсного стану. Розглянутий підхід широко використовується в математичній статистиці і добре описаний в літературі, наприклад, в [6].

Отже, може виникнути чотири ситуації:
H_{11} – мостова споруда є справною ($K_{\text{Д}} \le K_{\text{Д}_{\text{ГР}}}$), і приймається рішення, що вона є справною (правильне діагностичне рішення);
H_{12} – мостова споруда є несправною (індекс 2), а приймається рішення, що вона є справною (пропуск дефекту);
H_{21} – мостова споруда є справною, а приймається рішення, що вона є несправною (хибна тривога);
H_{22} – мостова споруда є несправною, і приймається рішення, що вона є несправною (правильне діагностичне рішення).

Рішення про справність або несправність мостової споруди приймається на основі виконання умов (3), тобто на основі прийнятого способу вимірювання $K_{\text{Д}}$. При цьому за будь-якого способу будуть спостерігатись похибки вимірювання, що приводить до реалізації гіпотез H_{12} і H_{21}. При реалізації гіпотези H_{12} (пропуск дефекту) збільшується небезпечність експлуатації споруди, що за певних умов, може призвести до виникнення аварійних ситуацій (обрушення). При реалізації гіпотези H_{21} (хибна тривога) виникне потреба в необґрунтованій призупинці руху транспорту по мосту для виконання необхідних ремонтних робіт, вартість яких є, як правило, високою. Отже, вимоги до точності вимірювання $K_{\text{Д}}$ є високими, на практиці похибки вимірювання коефіцієнта динаміч-

ності мостової конструкції споруди залишаються відносно великими.

Ймовірності гіпотез $p(H_{21})$ та $p(H_{12})$ визначимо за формулами

$$p(H_{21}) = p(D_1)\cdot p\left(K_Д > K_{ДГР} / D_1\right) = \\ = p_1 \int_{K_{ДГР}}^{\infty} f\left(K_Д / D_1\right)\cdot dK_Д; \quad (4)$$

$$p(H_{12}) = p(D_2)\cdot p\left(K_Д \le K_{ДГР} / D_2\right) = \\ = p_2 \int_{\infty}^{K_{ДГР}} f\left(K_Д / D_2\right)\cdot dK_Д. \quad (5)$$

У співвідношеннях (4), (5) позначено: $p(D_1) = p_1, p(D_2) = p_2$ – апріорні ймовірності станів D_1 (міст є справним) і D_2 (міст є несправним); $p\left(K_Д > K_{ДГР} / D_1\right)$ – умовна ймовірність того, що виміряний коефіцієнт динамічності перевищить граничне значення у випадку справного моста; $p\left(K_Д \le K_{ДГР} / D_2\right)$ – умовна ймовірність того, що при несправному мості (стан D_2) виміряний коефіцієнт динамічності не перевищить граничного значення $K_{ДГР}$; $f\left(K_Д / D_1\right), f\left(K_Д / D_2\right)$ – щільності ймовірностей, що відповідають зазначеним умовним ймовірностям.

За ідеально точного вимірювання $K_{ДГР}$ ймовірність ситуацій H_{12} і H_{21} дорівнює нулю. Приклад гаусівського розподілу умовних щільностей імовірності приведено на рис. 1.

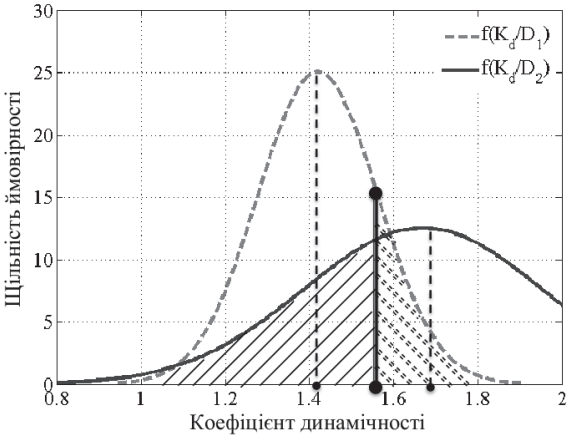

Рис. 1. Приклад розподілу щільностей імовірності $f\left(K_Д / D_1\right), f\left(K_Д / D_2\right)$

Площа під однією кривою щільностей імовірностей дорівнює 1, тобто максимальній імовірності. На рисунку 1 похилими лініями заштриховано площу під кривою $f\left(K_Д / D_1\right)$, яка характеризує хибну тривогу, а пунктирною похилою штриховкою – площу під кривою $f\left(K_Д / D_2\right)$, що характеризує ймовірність пропуску дефекту. Зазначені криві можна отримати при статистичній обробці результатів багатьох вимірювань на однотипних мостах. Крім того, визначення порогу, тобто $K_{ДГР}$, також супроводжується похибками, що обумовлено умовами експлуатації моста та іншими чинниками.

Крім того, віднесення $K_{ДГР}$ до узагальненого параметра, що визначає справність всієї мостової споруди, також є приблизним. Отже, на практиці виникає потреба в підвищенні точності вимірювання коефіцієнта динамічності мосту і визначенні його граничного значення. Це граничне значення коефіцієнта динамічності є узагальненим параметром, що характеризує справність споруди. Вважаємо, що існують надійні статистичні дані про характер розподілу $K_Д$.

Важливе для практики завдання зводиться до мінімізації числа помилкових рішень при діагностиці. Для цього розрахуємо ймовірність помилкового рішення для розв'язуючого правила (3)

$$p_{пом} = p_1 \int_{K_{ДГР}}^{K_{ДГР_{max}}} f\left(K_Д / D_1\right)\cdot dK_Д + \\ + p_2 \int_{K_{ДГР_{min}}}^{K_{ДГР}} f\left(K_Д / D_2\right)\cdot dK_Д. \quad (6)$$

Нехай умовні щільності ймовірності підпорядковані нормальному закону, що у випадку невідомих для дослідника законів є прийнятним. Отже,

$$f\left(K_Д / D_2\right) = \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \mathrm{E}^{-\frac{\left(K_Д - \overline{K}_{Д1}\right)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad (7)$$

$$f\left(K_Д / D_2\right) = \frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} \mathrm{E}^{-\frac{\left(K_Д - \overline{K}_{Д2}\right)^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (8)$$

де σ_1^2, σ_2^2 – дисперсії коефіцієнтів динамічності для випадків, коли мостова споруда є справною $\left(\sigma_1^2\right)$ або несправною $\left(\sigma_2^2\right)$.

У формулі (6) апріорні ймовірності p_1 і p_2 характеризують ймовірності справного або несправного станів і можуть бути визначені на основі досвіду експлуатації мостів. Для нового якісно зробленого мосту $p_1 \gg p_2$.

Для мінімізації $p_{\text{пом}}$ в формулі (6) необхідно підставити в цю формулу вирази (7) та (8), задати середні значення $\overline{K_{\text{Д1}}}$ і $\overline{K_{\text{Д2}}}$, причому $\overline{K_{\text{Д1}}} < \overline{K_{\text{Д2}}}$, а потім побудувати залежність $p_{\text{пом}}\left(\sigma_1^2, \sigma_2^2\right)$. Подібні залежності побудуємо для декількох ситуацій $\overline{K_{\text{Д1}}}$ і $\overline{K_{\text{Д2}}}$. Звідси визначимо значення σ_1^2, σ_2^2, за яких забезпечується мінімальне число помилкових рішень, а значить, і вимоги до точності вимірювання $K_{\text{Д}}$.

Розглянемо випадок, коли $\sigma_2 = 0{,}02$, $\overline{K_{\text{Д1}}} = 1{,}42$, $\overline{K_{\text{Д2}}} = 1{,}67$, $K_{\text{ДГР}} = 1{,}47$, $K_{\text{ДГР}_{\max}} = 1{,}75$, $K_{\text{ДГР}_{\min}} = 1$. Результати розрахунків приведено на рисунку 2.

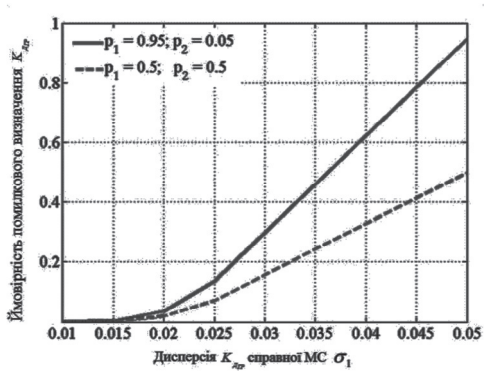

Рис. 2. Залежність імовірності помилкового визначення $K_{\text{ДГР}}$ від середньоквадратичної похибки σ_1 (за справної МС)

Апріорні ймовірності p_1 і p_2 дорівнюють 0,95 та 0,05 відповідно (суцільна крива, рисунок 2). За умов, коли зовсім нічого не відомо про стан споруди, обрано $p_1 = 0{,}5$ і $p_2 = 0{,}5$ (штрихова крива, рис. 2).

Аналогічний вигляд мають графіки для інших важливих для практики випадків.

Висновки

Таким чином, за умови, коли стан мосту в значній мірі визначається за величиною коефіцієнта динамічності, для істотного зменшення ймовірності помилкових діагностичних рішень при оцінці стану мосту необхідно забезпечити при вимірюванні мінімальне значення середньоквадратичної похибки коефіцієнта динамічності. Це забезпечить необхідні умови безпечної експлуатації мостової споруди.

Література

1. Редченко В.П. Динамічний коефіцієнт автодорожніх мостів. Проблеми натурного визначення / В.П. Редченко // Дороги та мости: зб. наук. ст. – 2006. – Вип. 6. – С. 122 – 133.
2. Редченко В.П. Визначення структурних параметрів прогонових будов мостів за результатами їх випробувань рухомим навантаженням / В.П. Редченко // Автошляховик України. – 2009. – № 4. – С. 43 – 46.
3. Рекомендації з діагностики стану прогонових будов мостів за динамічною дією рухомого навантаження: РВ.2.3–218–03450778–711:2007. – К.: Укравтодор, 2007. – 28 с.
4. Кулябко В.В. Динамика конструкций, зданий и сооружений / В.В. Кулябко. – Запорожье: ЗГИА, 2005. – 232 с.
5. Редченко В. П. Динамічні випробування автодорожніх мостів. Розвиток методів та проблеми / В.П. Редченко // Автошляховик України. – 2010. – № 1. – С. 39 – 41.
6. Боровков А.А. Математическая статистика / Боровков А.А. – Новосибирск : Наука, 1997. – 772 с.

Рецензент: Е.Б. Угненко, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 25 липня 2012 р.