

В. П. РЕДЧЕНКО (Дніпропетровський відділ ДерждорНДІ),
Ю. В. КРЮЧКОВ, Т. В. РЕДЧЕНКО (ПСП «Мост-сервіс»)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ МОСТІВ МЕТОДАМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ

В статті представлені результати практичних та теоретичних досліджень впливу пошкоджень конструкції на її модальні характеристики.

Ключові слова: міст, прогонова будова, дефект, вібродіагностика

В статье представлены результаты практических и теоретических исследований влияния поврежденной конструкции на ее модальные характеристики.

Ключевые слова: мост, пролетное строение, дефект, вибродиагностика

The article deals with the results of the practical and theoretical researches of impact of structural damage on its modal parameters.

Keywords: bridge, bridge span construction, damage, vibration monitoring

Вступ

Забезпечення безпечної експлуатації споруд цивільного будівництва, зокрема мостових переходів, є актуальним завданням, яке вирішується комплексом заходів на стадіях від проектування до ліквідації об'єкту. По розподілу причин аварійного руйнування конструкцій серед інших чинників, нарівні з помилками, що були допущені на стадії проектування та будівництва, майже третину складають чинники, пов'язані з проблемами експлуатації [1]. Саме тому в забезпеченні безаварійної експлуатації мостів важливу роль відіграє постійний моніторинг їх технічного стану, що робить можливим своєчасне виявлення та усунення пошкоджень конструкцій. Одним з перспективних методів, який дозволяє проводити моніторинг технічного стану мостів, є вібродіагностичний [2-4].

Проблема

Головним завданням при ідентифікації ушкодження шляхом вібродіагностики є визначення змін жорсткості ΔK через зміни динамічних характеристик споруди.

У матричній формі рівняння для визначення власних частот та форм коливань конструкції має наступний вигляд:

$$(K_{init} - \omega_{i,init}^2 M_{init}) \cdot \varphi_{i,init} = 0, \quad (1)$$

де K_{init} , M_{init} – відповідно матриця жорсткості та матриця мас конструкції; $\varphi_{i,init}$ – вектор-

стовпчик, що характеризує співвідношення між узагальненими координатами конструкції, тобто форму коливань.

Вплив дефекту на частотний спектр конструкції – функція чутливості до дефекту – виражається наступним рівнянням [5]:

$$\frac{\partial \omega_{i,red}^2}{\partial a_e} = \left(\frac{\partial K_{i,red}}{\partial a_e} - \omega_{i,red}^2 \frac{\partial M_{i,red}}{\partial a_e} \right) \cdot \varphi_{i,red} \cdot M_{i,red}^{-1}, \quad (2)$$

де $\omega_{i,red}$, $\varphi_{i,red}$ – відповідно власні частоти та їх форми для конструкції з дефектом; $K_{i,red}$, $M_{i,red}$ – відповідно матриці жорсткості та маси конструкції з дефектом; a_e – параметр, що враховує об'єм змін матриці податливості від наявного дефекту в елементі конструкції k_e .

Сучасні програмні комплекси дають можливість досить точно обчислювати вказані функції чутливості до дефекту. В той же час існують складнощі з реалізацією ідеї на практиці і, особливо, з визначенням місця розташування дефекту на досліджуваному об'єкті [4, 6, 7]. В першу чергу це пов'язано з тим, що визначення “напрямую” натурних матриць жорсткості через передаточні функції є складним і трудомістким завданням, навіть при активній вібродіагностиці, проведення якої само по собі також є складним завданням. Реєстрація змін власних частот споруди, що є значно простішим на практиці, дозволяє говорити лише про наявність змін у конструкції, але не дає відповіді на питання, де ці зміни відбулися.

Постановка завдання

Аналіз передаточної функції між двома точками споруди лише вкаже на те, що сталися певні зміни, але місце розташування можливого пошкодження буде залишатися невизначеним. Для того, щоб визначити зону пошуку дефекту, треба збільшити кількість точок, між якими визначаються передаточні функції, і на основі аналізу відносних їх змін робити висновок про зону розташування пошкодження. Чим меншу за розміром зону ми хочемо окреслити для локалізації дефекту, тим більшим повинно бути число точок, в яких проводимо вимірювання. Можна запропонувати іншу модель, в якій динамічна система описується власними формами коливань та їх параметрами. В цьому випадку функцію пошкодженень для кожної зони зручно представити двома матрицями: матрицею зміни частот власних форм коливань та матрицею зміни форми власних коливань (в нормалізованому виді). Оскільки для лінійних систем передаточна функція є комплексною сумою модальних передаточних функцій за всіма формами власних коливань, то обидві моделі цілком рівнозначні за інформативністю і відрізняються лише практичною стороною їх реалізації. В першому випадку за результатами експерименту визначаємо передаточні функції та працюємо з ними, в другому випадку визначаються частоти та форми власних коливань. Найпростіше розглянути другу модель на прикладі однопрогонової балки, модель якої досить часто є розрахунковою для прогонових будов мостів. Експериментальними дослідженнями МСЕ-моделі балки було встановлено [4], що наявність дефекту (тріщини), який впливає на несучу здатність більше ніж на 5 %, викликає відносні зміни власних частот від 0,1 % і більше, що можна досить точно визначити на практиці [8]. В той же час, для визначення зміни форми коливання необхідно виконувати вимірювання прогинів розмірністю 0,001 мм та менше – практично це реалізується дуже складно та зі значними похибками. Відповідно і визначення положення дефекту залишається проблемою. Були виконані подальші теоретичні та експериментальні дослідження, які описані нижче.

Результати досліджень

Моделлю найпростішої прогонової будови моста є одно прогонова балка. Для балки власна частота є відношенням двох інтегральних функцій, одна з яких залежить від функції жорсткості, а інша від функції маси [9]:

$$\omega_i^2 = \frac{\int_0^L I(x)[f_i''(x)]^2 dx}{\int_0^L m(x)[f_i(x)]^2 dx}, \quad (3)$$

де ω_i – кутова частота i -ї власної форми коливань; $I(x)$ – функція жорсткості; $m(x)$ – функція маси; $f_i(x)$ – нормалізована функція i -ї власної форми коливань.

Нехай на малій ділянці $\Delta\ell$ з координатою $x = a$ жорсткість зміниться на ΔI_a . Відносна зміна частоти, ігноруючи зміну форми коливань, виразиться наступним чином:

$$\frac{(\omega_i - \Delta\omega_i(a))^2}{\omega_i^2} \approx \frac{\int_0^L I(x)[f_i''(x)]^2 dx}{\int_0^L I(x)[f_i''(x)]^2 dx} - \frac{\Delta I_a [f_i''(a)]^2 \Delta\ell}{\int_0^L I(x)[f_i''(x)]^2 dx}. \quad (4)$$

Якщо знехтувати величинами меншого порядку, то для малих змін отримуємо залежність:

$$\frac{\Delta\omega_i(a)}{\omega_i} \approx \frac{\Delta I_a \Delta\ell [f_i''(a)]^2}{2 \int_0^L I(x)[f_i''(x)]^2 dx} = C_1 \cdot [f_i''(a)]^2, \quad (5)$$

де C_1 – константа для досліджуваного об'єкту.

Якщо аналогічно проаналізувати вплив додаткової локальної маси $M_a = \Delta m \Delta\ell$, отримаємо:

$$\frac{\Delta\omega_i(a)}{\omega_i} \approx \frac{M_a [f_i(a)]^2}{2 \int_0^L m(x)[f_i(x)]^2 dx} = C_2 \cdot [f_i(a)]^2, \quad (6)$$

де C_2 – константа для досліджуваного об'єкту.

Як бачимо, функція відносної зміни частоти в залежності від координати додаткової маси є подібною квадрату функції власної форми коливань. Отже, виконуючи заміри частот власних форм коливань при наявності на балці додаткової маси, можна отримувати інформацію про форми власних коливань та їх зміни при появі дефекту.

Слід пам'ятати про ті спрощення, які були прийняті при виведенні цих залежностей, і на-

самперед те, що результати будуть задовільними лише для малих змін, коли додаткова маса чи зміна жорсткості як мінімум вдсятеро менші від маси балки чи добутку жорсткості на довжину прольоту відповідно.

Для випадку, коли жорсткість балки та її маса є постійними по довжині балки, а функція i -ої власної форми коливань є синусоїдальної форми, маємо:

$$\frac{\Delta\omega_i(a)}{\omega_i} \approx \frac{\Delta I_a \Delta l \left(\frac{\pi i}{L}\right)^4 [\sin(\pi i \frac{a}{L})]^2}{2I \left(\frac{\pi i}{L}\right)^4 \int_0^L [\sin(\pi i \frac{x}{L})]^2 dx} = \frac{\Delta I_a \Delta l}{IL} \times [\sin(\pi i \frac{a}{L})]^2 \quad (7)$$

та

$$\frac{\Delta\omega_i(a)}{\omega_i} \approx \frac{M_a [\sin(\pi i \frac{a}{L})]^2}{2m \int_0^L [\sin(\pi i \frac{x}{L})]^2 dx} = \frac{M_a}{mL} \times [\sin(\pi i \frac{a}{L})]^2. \quad (8)$$

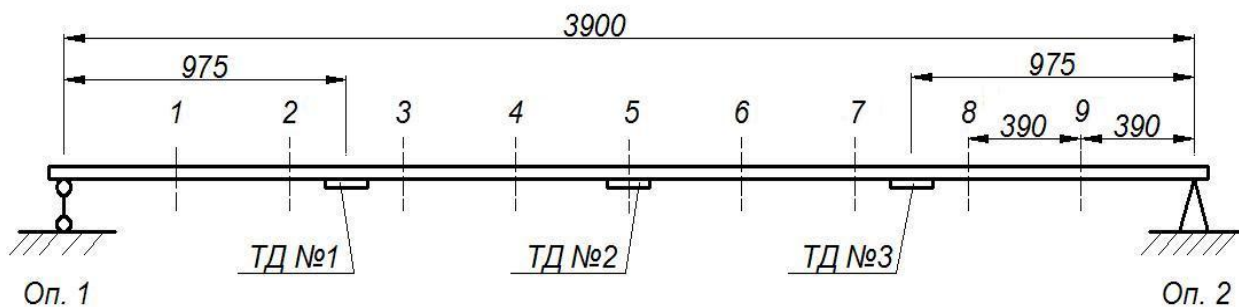


Рис. 1. Розташування умовних перерізів та тензодатчиків на балці

Перша частина експерименту полягала у дослідженні зміни параметрів балки (власних частот коливань) при наявності на ній додаткової маси 0,1 кг, що розташовувалася послідовно на кожному з дев'яти умовних перерізів по осі балки. Після встановлення додаткової маси до балки прикладався імпульсний вплив, реєструвалися коливання та визначалися власні частоти балки. Також на початку та в кінці експерименту були визначені власні частоти досліджуваної балки при вільних коливання (без додаткової маси).

Для визначення з підвищеною точністю частот трьох перших власних форм вертикальних коливань балки були використані уточнені алгоритми спектрального аналізу [8]. Спочатку розраховувався оціночний спектр для смуги

В даному випадку обидві залежності є подібними квадрату функції власної форми коливань (квадрату синусоїдальної функції).

Для натурального експерименту було вибрано сталеву балку коробчатого перерізу 40×80 мм з товщиною стінки 2 мм. Довжина балки – 4 м, погонна маса – 3,62 кг/м. Балку встановлено ширшою стороною на одну рухому (Оп. 1) і одну нерухому (Оп. 2) опорні частини, що розташовувались на відстані 5 см від торців балки. Тобто розрахунковий прольот складає 3,9 м. Реєстрація відгуку балки на збудження була реалізована вимірюванням напружень тензодатчиками. Тензодатчики наклеєні вздовж поздовжньої осі балки на її нижній грані. Всього використовувалось три тензодатчики (ТД): №1, 2, 3, що встановлені в чвертях довжини прольоту балки. Реєстрація напружень проводилась синхронно з усіх трьох датчиків апаратним комплексом «Spider» з частотою дискретизації 200 Гц.

Досліджувана балка умовно поділена на 10 частин (0,39 м кожна). Відповідно в прольоті визначилися перерізи 1...9 (рис. 1). Збуджувачий імпульсний вплив прикладався на відстані 0,49 м від Оп. 2 (1/8 довжини прольоту балки).

частот від 0 до 100 Гц, оскільки при частоті дискретизації в $f = 200$ Гц очікувані достовірні результати можна отримати на частотах менших від $f/2 = 100$ Гц (рис. 2). На спектрі наявні три виразні піка на частотах 8,8 Гц, 34,4 Гц, 76,4 Гц.

Для уточнення значення власних частот на більш вузьких ділянках спектру, визначалося «робоче вікно». Основні параметри вікна: його початковий час та тривалість. Тривалість вікна для розрахунку спектру призначалася різною для виявлення різних форм власних коливань. Для зменшення впливу шумів та інших гармонік, також застосовувався метод складання спектрів [10]. Все це дозволило визначати власні частоти з точністю $\pm 0,02$ %.

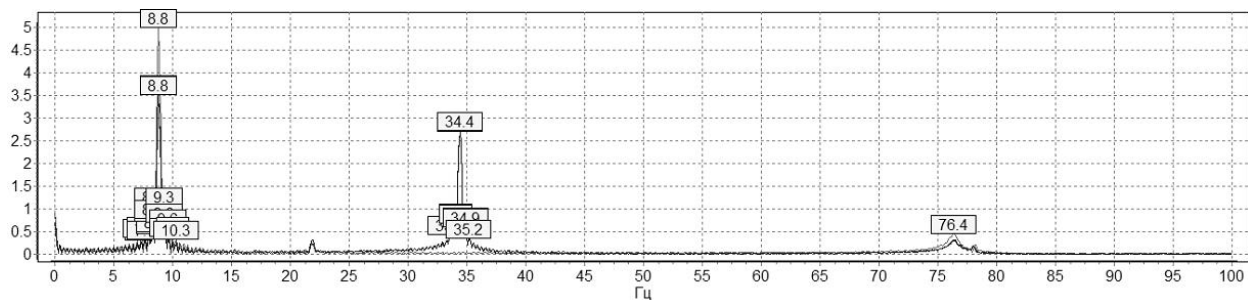


Рис. 2. Оціночний спектр для досліджуваної смуги частот

Лінії впливу додаткової маси 0,1 кГ, що складає близько 0,7 % від маси балки, на відносну зміну власних частот балки для перших трьох форм коливань представлені на рис. 3.

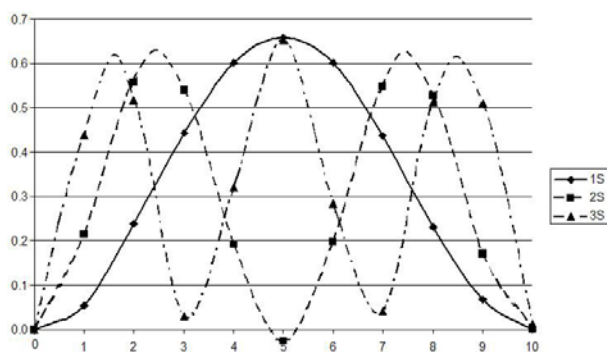


Рис. 3. Лінії впливу додаткової маси на зміну власних частот балки

Друга частина експерименту полягала у нанесенні на балку реального дефекту, що було реалізовано у вигляді пропилю верхньої грані балки на ділянці 7-8. Пропил виконувався в два етапи: спочатку було зроблено пропилю глибиною 1 мм, потім було виконано пропилю на глибину 2 мм (на повну товщину верхньої пластини балки). Поява пропилю призвела до зменшення частот власних коливань балки, що відображено у табл. 1.

Таблиця 1

Зміна частот вільних коливань			
	1-ша форма, Гц	2-га форма, Гц	3-тя форма, Гц
Вільні коливання до пропилю	8,807	34,502	76,358
Вільні коливання після пропилю 1 мм	8,806	34,477	76,306
Зміна у %	0,011	0,072	0,068
Вільні коливання після пропилю 2 мм	8,694	33,702	75,659
Зміна у %	1,28	2,32	0,92

Додатково було виконано дослідження зміни напружень (до та після нанесення пропилю на балку), що виникали в балці від навантаження 10 кГ, яке прикладалося в точці 5. Результати зведено до табл. 2. Як видно з таблиці, зміна напружень навіть в зоні дефекту виявилася незначною. Отже, зроблений пропилю можна вважати дефектом на початковій стадії розвитку.

Таблиця 2

Зміна напружень в балці

	ГД №1, кГ/см ²	ГД №2, кГ/см ²	ГД №3, кГ/см ²
Без пропилю	73,1	142,8	73,7
Пропил 1 мм	73,1	142,4	73,7
Зміна, %	0	-0,3	0
Пропил 2 мм	73,1	141,1	85,7
Зміна, %	0	-1,2	16,3

Після проведення серії випробувань на балці з пропилюм 2 мм, аналогічно до першої частини експерименту, отримано лінії впливу додаткової маси на відносну зміну власних частот балки для перших трьох форм коливань, які представлені на рис. 4.

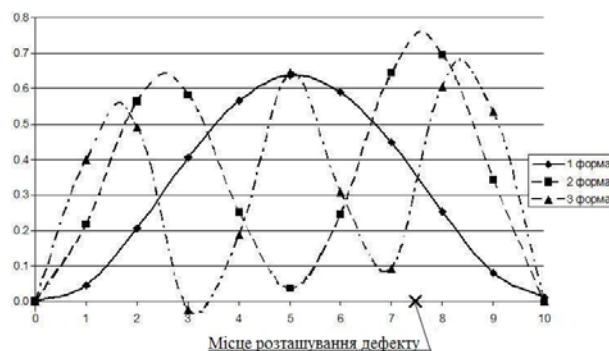


Рис. 4. Лінії впливу додаткової маси на зміну власних частот балки з дефектом

Як бачимо, дефект призвів до помітної зміни форм ліній впливу, і найбільші зміни відбулися саме в місці його розташування. Таким чином, вимірюючи лише власні частоти та їх

зміни при наявності на конструкції додаткової маси, можна визначати та відстежувати зміни власних форм коливань при появі дефектів. При цьому для визначення форми коливань відпадає необхідність у вимірюванні з високою точністю прогинів цілого ряду точок балки, тобто проблема, яка була означена на початку дослідження, вирішена.

Висновки

Проведеним дослідженням встановлено, що за аналізом змін ліній впливу додаткової маси на власні частоти конструкції можна робити висновки про місцезнаходження дефекту. Рекомендований порядок дій при таких роботах:

1. Експериментальне визначення ліній впливу додаткової маси на власні частоти прогонової будови при введенні мосту в експлуатацію.

2. Визначення ліній впливу додаткової маси на власні частоти прогонової будови при проведенні чергового визначення її технічного стану.

3. Порівняння та аналіз змін у власних частотах прогонової будови та змін у формі ліній впливу додаткової маси. При наявності змін виконується детальне обстеження у відповідній зоні конструкції.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ерёмин, К. И. Особенности экспертизы и неразрушающего контроля строительных металлических конструкций [Электрон. ресурс] / К. И. Ерёмин, С. А. Матвейошкин // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. научных трудов – Вып. 8. – М.: 2009. – Режим доступа: <http://www.pamag.ru/prensa/expert-metall>.
2. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и со-

- ружений [Текст] / О. В. Шимановский и др. – К.: Сталь, 2008. – 463 с.
3. Еманов, А. Ф. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний [Текст] / А. Ф. Еманов, Л. А. Скляр // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. научных трудов – Вып. 8. – М.: 2009. – С. 63-72.
4. Редченко, В. П. Идентификация дефектов споруд методами динамической диагностики [Текст] / В. П. Редченко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. / ПГАСА. – Вып. 52. – Д.: ПГАСА, 2010. – Ч.2 С.100-104.
5. Wrana, B. Identyfikacja uszkodzenia mostu przy pomocy analizy wzalozliwosci [Текст] / B. Wrana // Materiały konferencyjne «Zespolone konstrukcje mostowe». – Krakow, Poland, 2009. – P. 544-554.
6. Experimental vibration analysis for civil engineering structures [Текст] // Proc. of the unt'l conf. on experimental vibration analysis for civil engineering structures. – Wroclaw, Poland, 2009. – 208 p.
7. Завалишин, С. И. Динамический мониторинг зданий и сооружений для контроля их сейсмостойкости [Текст] / С. И. Завалишин, Г. Э. Шаблонский, Д. А. Зубков, А. А. Румянцев // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. научных трудов – Вып. 8. – М.: 2009. – С. 42-53.
8. Редченко, В. П. Особливості застосування спектрального аналізу при дослідженні коливань будівельних конструкцій [Текст]: монографія / В. П. Редченко. – Д.: Пороги, 2010. – 98 с.
9. Бондарь, Н. Г. Динамика железнодорожных мостов [Текст] / под ред. Н. Г. Бондаря. – М.: Транспорт, 1965. – 412 с.
10. Редченко, В. П. Визначення власних частот коливань прогонових будов мостів методом складання спектрів [Текст] / В. П. Редченко // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: зб. наук. пр. – Вип. 11. – Львів: Каменяр, 2009. – С. 199-203.

Надійшла до редколегії 31.03.2011.

Прийнята до друку 11.04.2011.