

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ДЕФЕКТУ ЗА ЗМІНЮВАННЯМ ВЛАСНИХ ФОРМ КОЛИВАНЬ КОНСТРУКЦІЇ

**Редченко В.П.**

*Дніпропетровський відділ ДП «ДерждорНДІ»*

---

### Вступ

Утримання мостів в працездатному стані є важливим та відповідальним завданням, особливо за умов, коли кількість мостів, що потребують капітального ремонту, в Україні постійно збільшується. Своєчасне виявлення дефектів в конструкціях мосту дає змогу попередити значний розвиток дефекту та виконати ремонтні роботи меншим коштом. Виявлення дефектів вібраційними методами займає чільне місце серед інших методів діагностики та отримує все більше розповсюдження як у світовій, так і у вітчизняній практиці [1,2,3,4].

### Проблема

Для визначення положення дефекту при вібродіагностиці потрібно мати інформацію про форми власних коливань до появи дефекту та їх змінювання, які вказують на появу дефекту [5,6]. При цьому для визначення змінювання форми коливання необхідно виконувати вимірювання прогинів розмірністю 0,001 мм та менше – практично це реалізується дуже складно і при значних похибках. Класичні методи визначення форм власних коливань шляхом вимірювання амплітуд вільних або вимушених коливань [7] не дають результату бажаної точності, особливо при згущенні власних частот.

### Результати досліджень

Для визначення власних форм коливань з високою точністю запропоновано метод додаткової маси [8]. Теоретично показано, що в точці стрижневої конструкції з координатою  $x=a$  квадрат ординати нормалізованої власної форми коливань -  $f_i(a)$ , є пропорційним величині відносної зміни частоти власної форми коливань, яка відбувається при розміщенні в цій точці додаткової маси на порядок меншої від маси конструкції:

$$[f_i(a)]^2 = C \cdot \frac{\Delta\omega_i(a)}{\omega_i} = \frac{M_a [f_i(a)]^2}{2 \int_0^L m(x) [f_i(x)]^2 dx}, \quad (1)$$

- де  $\omega_i$  – кутова частота  $i$ -ї власної форми коливань;  
 $f_i(x)$  – нормалізована функція  $i$ -ї власної форми коливань;  
 $C$  – константа для досліджуваної конструкції;  
 $m(x)$  – функція розподілу маси по конструкції;  
 $M_a$  – додаткова маса в точці з координатою  $x=a$ .

Практична сутність методу полягає у послідовному визначенні змінювань власних частот конструкції при розміщенні на ній в різних точках додаткової маси та відповідного визначення ординат нормалізованої форми власних коливань за формулою (1). Проведені натурні експерименти для однопрогонової балки з розподіленою масою показали хороші результати при визначенні трьох перших власних форм коливань, результати цих експериментів опубліковано у попередньому збірнику [8]. Нижче наведені результати експериментального визначення форм власних коливань для балки з розподіленою масою та зосередженою масою в середині прольоту.

Для натурального експерименту використано сталеву балку коробчатого перерізу 40 x 80 мм з товщиною стінки 2 мм. Довжина балки – 4 м, погонна маса – 3,62 кг/м, розрахунковий проліт становить 3,9 м. Балка умовно поділена на 10 частин (0,39 м кожна), відповідно в прольоті визначилися перерізи 1...9. Зосереджена маса 10,0 кг закріплювалася на балці в середині прольоту (рис. 1). Збуджувальний імпульсний вплив прикладався на відстані 0,49 м від Оп. 2 (1/8 довжини прольоту балки).

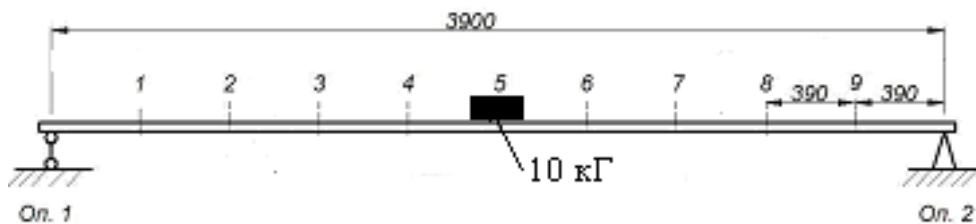


Рис. 1. Розташування умовних перерізів та тензодатчиків на балці

Реєстрація відгуку балки на збудження була реалізована вимірюванням напружень тензодатчиками. Всього використовувалось три тензодатчики у чвертях довжини прольоту балки. Реєстрація напружень проводилась синхронно з усіх трьох датчиків апаратним комплексом “Spider” з частотою дискретизації 200 Гц. Як додаткову масу використовували гирьку вагою 0,1 кг, що становить близько 0,4 % від маси балки.

Для визначення з підвищеною точністю частот трьох перших власних форм вертикальних коливань балки було використано уточнені алгоритми спектрального аналізу [9]. Для зменшення впливу шумів та інших гармонік, також застосовувався метод додавання спектрів [10]. Все це дозволило визначати власні частоти з точністю  $\pm 0,02$  %. Результати визначення власних частот балки за трьома першими формами та їх змінювання при наявності додаткової маси в 9 точках представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати визначення власних частот для ряду точок прикладання додаткової маси

Точка прикладення додаткової маси 0,1 кг	1 форма	Зміна частоти, %	2 форма	Зміна частоти, %	3 форма	Змінювання частоти, %
Вільні коливання	5.613	0.000	34.450	0.000	60.633	0.000
Точка 1	5.6146	0.0293	34.5365	0.25104	60.8551	0.36635
Точка 2	5.6183	0.0937	34.6636	0.62008	61.0015	0.6077
Точка 3	5.6232	0.1815	34.6612	0.61302	60.7978	0.27175
Точка 4	5.6265	0.24	34.5358	0.24916	60.6294	-0.006

Кінець табл. 1

Точка прикладення додаткової маси 0,1 кг	1 форма	Зміна частоти, %	2 форма	Зміна частоти, %	3 форма	Змінювання частоти, %
Точка 5	5.6284	0.2752	34.4568	0.0197	60.6880	0.09075
Точка 6	5.6268	0.2459	34.5410	0.26404	60.6539	0.0345
Точка 7	5.6229	0.1756	34.6674	0.63118	60.8352	0.33355
Точка 8	5.6179	0.0878	34.6667	0.62892	60.9707	0.557
Точка 9	5.6140	0.0176	34.5420	0.26706	60.8377	0.33765

За величиною змінювання частоти власної форми коливань відповідно до виразу (1) визначалися нормалізовані модулі ординат даної форми коливань. З врахуванням фазового положення визначені експериментально та для порівняння розрахункові форми власних коливань у вигляді графіків і представлені на рис. 2. Розрахункові форми отримано з використанням програмного комплексу "Ліра-9".

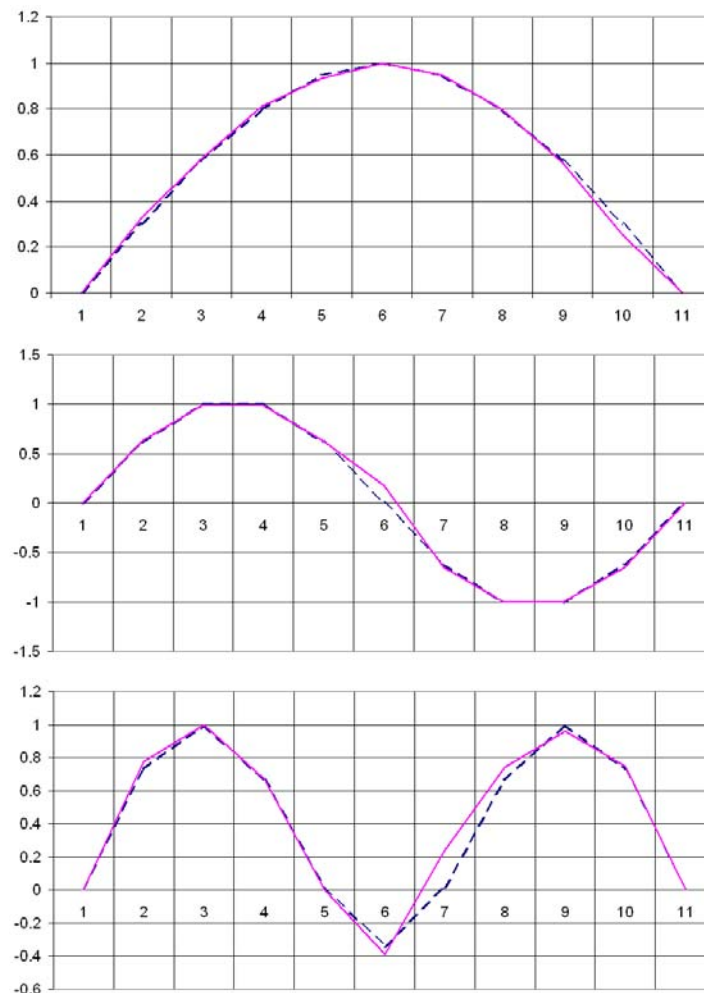


Рис. 2. Перші три форми власних коливань: визначені експериментально (суцільна лінія) та за розрахунками (штрихова лінія)

Як бачимо з графіків, різниця між визначеними експериментально та розрахунковими формами власних коливань є незначною. До того ж слід взяти до уваги, що на практиці фактичні форми власних коливань можуть відрізнятися від форм, розрахованих для математичних моделей – свій вплив вносять: наявність невеликих консолей за опорами; опирання на опорні частини нижньою гранню, а не по осі балки; величина відношення висоти балки до її довжини (відмінність від математичної лінії) і т. п. Саме тому наявні відмінності в лініях вищих форм власних коливань не слід сприймати в повній мірі як неточності методу.

Експеримент з визначення положення дефекту полягав 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 таблиці 2.

**Таблиця 2** – Змінювання частот вільних коливань при появі дефекту

Номер форми коливань	Частота до пропилю, Гц	Пропил 1,0 мм		Пропил 2,0 мм	
		Частота після пропилю, Гц	Змінювання у %	Частота після пропилю, Гц	Змінювання у %
1 форма	8,807	8,806	0,00011	8,694	1,28
2 форма	34,502	34,477	0,00072	33,702	2,32
3 форма	76,358	76,306	0,00068	75,659	0,92

Як бачимо, поява дефекту призвела до зміни власних частот, але для визначення положення дефекту необхідно становити за зміною форм власних коливань. Для спрощення процедури за виразом (1), можна не визначати форму коливань, а використовувати лінії впливу додаткової маси на зміну власних частот. При цьому необхідно мати початкові лінії впливу (як і початкові форми власних коливань) та наступні, які визначаються при черговому моніторингу конструкції.

Початкові лінії впливу додаткової маси на відносне змінювання власних частот балки були отримані до виконання пропилю. Після проведення серії випробувань на балці з пропилом 2 мм отримано лінії впливу для перших трьох форм коливань, які разом з початковими лініями впливу представлено на рис. 3.

Як бачимо, дефект призвів до помітного змінювання форм ліній впливу, і найбільші змінювання відбулися саме в місці його розташування. Таким чином, вимірюючи лише власні частоти та їх змінювання при наявності на конструкції додаткової маси, можна визначати та відстежувати змінювання власних форм коливань при появі дефектів. При цьому для визначення форми коливань відпадає необхідність у вимірюванні з високою точністю прогинів цілого ряду точок балки.

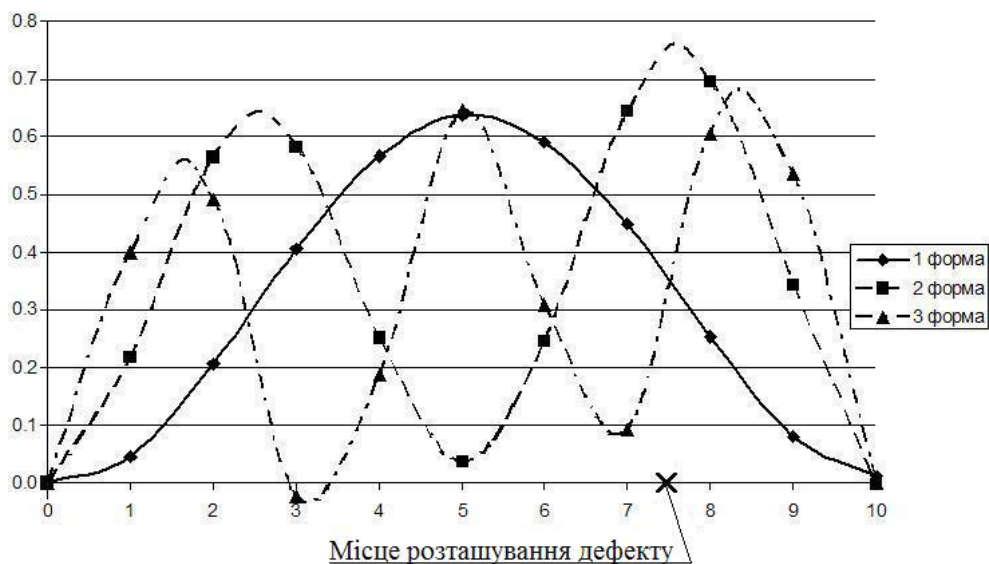
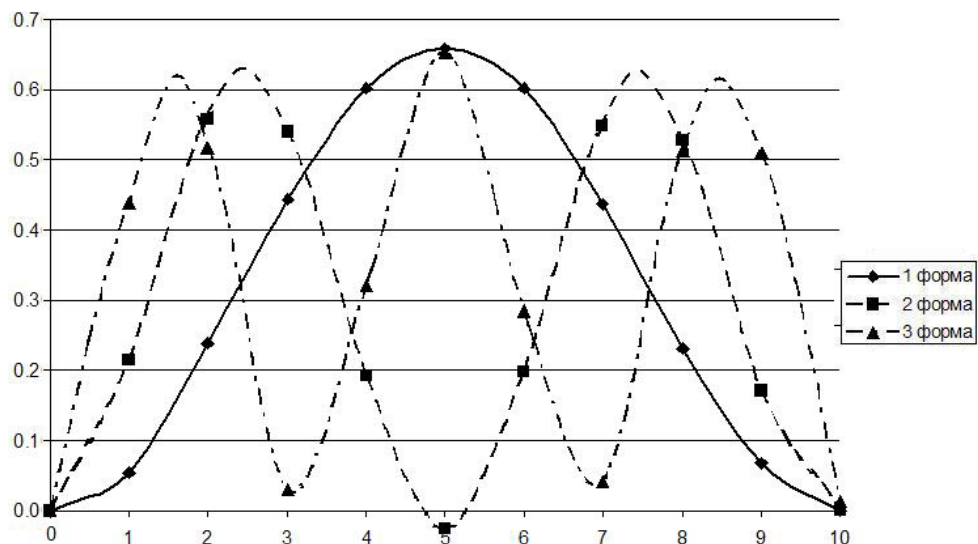


Рис. 3. Лінії впливу додаткової маси на зміну власних частот балки: без дефекту (верхній малюнок) та з дефектом (нижній малюнок)

### Висновок

Як показали виконані дослідження, визначення форми власних коливань методом додаткової маси дає можливість отримувати достовірні результати про фактичні форми власних коливань будівельних конструкцій, які моделюються стержньовими елементами (балка, рама і т.п.). Також встановлено, що за аналізом змінювань ліній впливу додаткової маси на власні частоти конструкції можна робити висновки про місцезнаходження дефекту.

## Література

1. Еманов А.Ф. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний / А.Ф. Еманов, Л.А. Скляр // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. научных трудов, вып. 8. – М.: 2009. – С. 63-72.
2. Анализ динамических характеристик моста / Коваль П.М, Филоненко С.Ф., Сташук П.М., Корниенко И.К. // Сб. «Дороги и мосты». Вып.9. – К.: 2008. – С.119...128.
3. Masato Abe, Makoto Shimamura, Masaaki Matsunuma. Bridge Substructure Monitoring Using Live Load Induced Vibration. TRB 2007 Annual Meeting – 11p.
4. Моніторинг будівельних конструкцій і застосування нових державних норм ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України» / Хавкін О.К., Калюх Ю.І., Мар'єнков М.Г., Глуховський В.П., Приемський В.Д. // Зб. «Будівельні конструкції», вип. 69. – К.: НДІБК, 2008. – С. 26-44.
5. Ідентифікація дефектів споруд методами динамічної діагностики / В.П. Редченко // Сб. науч. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение», вып. 52. – Д.: ПГАСА, 2010. – Ч.2. С. 100-104.
6. Identyfikacja uszkodzenia mostu przy pomocy analizy wrażliwości [Текст] / В. Wrana // Materiały konferencyjne “Zespólone konstrukcje mostowe”. – Krakow, Poland, 2009. – P. 544-554.
7. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. – М.: Машиностроение, 1978-1981.
8. Визначення форм власних коливань методом додаткової маси / В. П. Редченко // Зб. «Дороги та мости», вип. 12. – К.: 2010. С. 159-265.
9. Редченко, В.П. Особливості застосування спектрального аналізу при дослідженні коливань будівельних конструкцій [Текст] : монографія / В. П. Редченко. – Д.: Пороги, 2010. – 98 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: Каменярь, 2009. – С. 199-203.