

## ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ АКТИВНОЇ ТА ПАСИВНОЇ ВІБРОДІАГНОСТИКИ МОСТІВ

**Редченко В.П.**

*Дніпропетровський комплексний відділ ДерждорНДІ*

---

### Вступ

Визначення та моніторинг технічного стану будівельних конструкцій і мостів зокрема за інтегральними структурними параметрами, які визначаються динамічними випробуваннями, посідає важливе місце серед інших методів діагностики та отримує все більше розповсюдження як у світовій, так і у вітчизняній практиці [1,2,3,4,5]. Знання динамічних параметрів конструкцій та споруд є необхідною умовою при визначенні їх сейсмостійкості. Вимоги до натурного визначення цих параметрів для споруд, які знаходяться в сейсмічних зонах, закладено в недавно прийнятих державних нормах України ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України» [6].

### Проблема

На відміну від значного розвитку, якого набули в останній час практичні методи розрахунку конструкцій, методи натурного визначення динамічних характеристик конструкцій мають в цьому плані значне відставання при дуже слабкому їх освітленні та викладенні в науковій і технічній літературі [7]. В експериментальній практиці методи динамічних випробувань розділяють на активні, коли застосовується певне динамічне навантаження, та пасивні, коли використовується випадкове збудження коливальних систем. Найбільш відпрацьованими з методологічної точки зору є методи активної вібродіагностики (особливо методи з використанням вібраційної машини) [8]. Існує усталена думка, що методи пасивної вібродіагностики не можуть дати тих результатів, які дають методи активної вібродіагностики [9, 10]. В той же час методи активної вібродіагностики не розповсюджені в практиці дослідження мостів в Україні (на даний час немає жодної робочої вібромашини).

**Практичне порівняння** різних методів вібродіагностики можна виконати співставленням певних оцінок, які можна дати тому чи іншому методу при його застосуванні для досягнення цілей випробувань. Таке співставлення дано в [9] і без змін мовою оригіналу наводиться в табл.1. Порівняння виконано за 15 факторами, які можна об'єднати в такі групи:

- вартість робіт за даним методом (п. 1-3);
- інформативність методу (п. 4-8);
- точність результатів (п. 9);
- можливості для подальшого аналізу та використання (п. 10-15).

В цілому наведені оцінки збігаються з даними інших джерел [10,11], отже вони відображають сучасний погляд на методи вібродіагностики.

З першого погляду можна помітити, що оцінка пасивної вібродіагностики повністю збігається з оцінкою методу, який реалізує імпульсне навантаження. Це цілком логічно, адже в останньому випадку аналізуються вільні коливання як і при пасивній діагностиці. Надалі будемо порівнювати методи, в яких аналізуються вільні (або випадкові коливання), з методами, в яких аналізу підлягають стаціонарні коливання, вимушені гармонічною силою.

За першою групою оцінок (вартість робіт) методи пасивної вібродіагностики значно кращі, ніж методи активної вібродіагностики. За другою групою оцінок (інформативність) пасивні методи поступаються активним – можливості пасивної вібродіагностики для визначення форм коливань та АФХЧ (амплітудо-фазо-частотних характеристик) ставиться під сумнів. Також негативно оцінено можливості перших двох методів за фактором повторюваності, але ця оцінка не збігається з оцінками інших авторів. Так, в [11] випробування мостів імпульсним навантаженням оцінюється як таке, що має добру повторюваність. Відповідно до негативних оцінок за інформативністю та повторюваністю ставиться під сумнів використання методів пасивної діагностики для їх подальшого широкого використання.

**Таблиця 1** – Сопоставление методов вибродиагностики

№ п.	Факторы «+» – положительная оценка «-» – отрицательная оценка «?» – сомнительная оценка «?-» – проблематично	Пассивная	Активная		
			Импульс	Вибро-машина	Сейсмо-вибратор
1	Время подготовки	+	+	-	+
2	Стоимость работ	+	+	-	-
3	Оперативность	-	+	-	+
4	Определение частот резонансов	+	+	+	+
5	Определение спектров	+	+	+	+
6	Добавка дин. коэффициента	+	+	+	+
7	Определения форм колебаний	?-	?-	+	+
8	Определение АФЧХ	-	-	+	+
9	Повторяемость характеристик	-	-	+	+
10	Совместимость с аналитическими методами расчета	+	+	+	+
11	Совместимость с современным КЭ расчетом	-	-	+	+
12	Возможность использования данных для оценки остаточной грузоподъемности	?-	?-	+	+
13	Возможность использования данных для при повторной диагностике	?-	?-	+	+
14	Возможность использования данных в динамическом паспорте сооружения и его ООБД	?-	?-	+	+
15	Возможность создания на базе экспериментальных данных технологичной вибродиагностики автодорожных мостов	?-	?-	+	+

Якщо підсумувати та дещо спростити, то можна говорити, що маємо таку сучасну оцінку методів пасивної діагностики (як і діагностики за імпульсом): методами пасивної діагностики

є проблемним визначення форм власних коливань та АФЧХ конструкції, інші недоліки вказаних методів є наслідком цих проблем.

**Теоретичне порівняння** методів активної та пасивної діагностики в літературних джерелах в прямому вигляді не знайдено, тому були виконані дослідження та порівняння моделей, які є основою для вказаних методів. Для спрощення розглядаємо лінійну стаціонарну систему, якою можна змоделювати переважно більшість мостових конструкцій нехай і з певними обмеженнями.

Реєстрацію реакції будь-якої конструкції в певній її точці на збудження в іншій її точці можна представити моделлю, яку подано рис. 1. При цьому зв'язок між збудженням  $x(t)$  та реакцією  $y(t)$  можна встановити, вводючи поняття функції перетворення  $F(x)$ , яка є розв'язком диференціального рівняння, що описує дану систему.

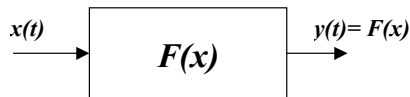


Рис. 1. Модель лінійної системи з вхідним та вихідним (перетвореним) сигналом

В загальному випадку функції перетворення є досить громіздкими. Так, у найпростішому випадку лінійного осцилятора, який вільно коливається, маємо такий вираз [12]

$$y(t) = e^{-\alpha t} \left[ \frac{y'(0) + y(0)\alpha}{\omega_D} \sin(\omega_D t) + y(0) \cos(\omega_D t) \right], \quad (1)$$

де  $y(0)$  та  $y'(0)$  – початкові умови (зміщення та швидкість відповідно),

$\alpha$  – коефіцієнт демпфірування,

$\omega_D$  – циклічна частота коливань системи з врахуванням демпфірування.

Якщо прийняти, що початкове зміщення  $y(0)=0$  і система збуджується імпульсом  $p$ , а отже  $y'(0)=p/m$  ( $m$  – маса системи), тоді

$$y(t) = e^{-\alpha t} \left[ \frac{p}{m\omega_D} \sin(\omega_D t) \right] = h(t). \quad (2)$$

Остання функція, яку позначено  $h(t)$ , описує реакцію системи на імпульсне навантаження, і при одиничному імпульсі  $p=1=\delta(t)$  має назву *імпульсна перехідна функція* або ж *імпульсна характеристика* ( $\delta(t)$  – дельта-функція або функція Дірка).

Будь-яке навантаження, що описується функцією  $P(t)$ , можна представити як суму ряду імпульсів  $P(t)\delta(\tau)dt$ , де  $t$  – загальний час,  $\tau$  – момент часу для даного імпульсу (*дельта-функція* в цьому виразі виконує вибірку на час  $\tau$ ). Точність такого представлення буде тим більшою, чим менша тривалість кожного імпульсу  $dt$ , і в граничному переході реакцію системи на будь-яке навантаження  $P(t)$  можна описати виразом, який широко відомий під назвою *інтеграл Дюамеля*

$$y(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t P(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)} \sin(\omega_D(t-\tau)) d\tau = \int_0^t P(\tau) h(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

Отже, реакція системи в часі є інтегралом згортки функції навантаження та імпульсної перехідної функції системи. Перетворення Фур'є від згортки функцій дає добуток спектрів цих функцій, тому в частотній області реакція лінійної системи описується дуже просто

$$S_{вих}(\omega) = S_{вх}(\omega)K(\omega), \quad (4)$$

де  $S_{вх}(\omega)$  та  $S_{вих}(\omega)$  – відповідно спектральні функції навантаження на вході та реакції на виході системи;

$K(\omega)$  – спектральна функція імпульсної характеристики системи, яку ще називають *комплексним коефіцієнтом передачі* системи, або ж *передаточною функцією*, а її модуль та фазу – відповідно амплітудно-частотною (АЧХ) та фазо-частотною (ФЧХ) характеристиками системи.

АЧХ системи показує, у скільки разів амплітуда реакції на виході системи відрізняється від амплітуди синусоїдального навантаження в залежності від частоти  $\omega$ . Значення АЧХ при  $\omega=0$ , тобто при статичному навантаженні є коефіцієнтом впливу, який широко застосовується при розрахунках конструкцій. Не слід забувати про дуже важливий момент, а саме що перетворення Фур'є знаходимо інтегруванням на нескінченному інтервалі часу, тому вираз (4) слід використовувати уважно, аналізуючи властивості конкретних функцій на предмет точності знаходження перетворення Фур'є.

На практиці АЧХ визначають, проводячи випробування з використанням вібраційної машини та аналізуючи входні та вихідні сигнали в стабільних режимах коливань на різних частотах збудження [8]. В цьому випадку спектральні функції можуть не знаходитись, а для обчислень використовуються лише значення амплітуд коливань, тим самим обходять певні труднощі, пов'язані із знаходженням перетворення Фур'є для функцій, які не збігаються до певної границі (саме такою є гармонічна функція).

Аналізуючи наведені вище теоретичні викладки, бачимо, що АЧХ лінійної системи можна отримати прямим визначенням спектральної функції реакції системи на ідеальний одиничний імпульс – в цьому випадку для реальної системи функція реакції збігається до нуля (згасальні коливання) і її перетворення Фур'є може бути досить точно обчислене. Іншими словами, реакції при вільних коливаннях та при вимушених коливаннях несуть однакову інформацію про динамічні характеристики системи.

Реальну конструкцію можна представити як систему з нескінченим числом ступенів свободи та з нескінченим числом входів та виходів, які на практиці моделюються системами з певним числом входів та виходів (рис. 2) і для яких експериментально (з використанням вібростанини) знаходять набір передаткових функцій  $K(\omega)_{11} \dots K(\omega)_{ik} \dots K(\omega)_{nn}$  (матрицю передаткових функцій) [8].

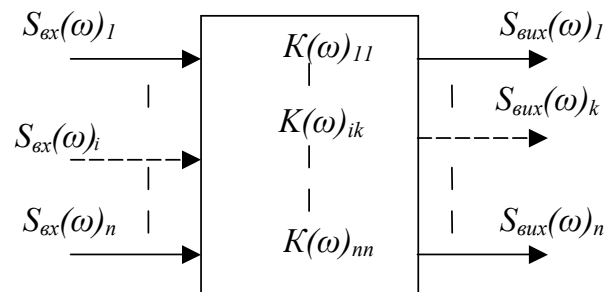


Рис. 2. Модель конструкції з  $N$  точками реєстрації реакції

Теоретично і в цьому випадку набір передаткових функцій можна отримати шляхом визначення ряду спектральних функцій від реакцій системи на імпульси, що прикладаються в різних її точках.

На практиці, відмінність реального імпульсу від ідеального одиничного та неточності, пов'язані з отриманням спектральних функцій реакції на обмеженому в часі інтервалі, викликають певні труднощі та вносять розбіжності у результати (у порівнянні з використанням вібраційної машини цей момент в табл.1 охарактеризовано як погана повторюваність).

Нерозвинутість загальних методів пасивної вібродіагностики мабуть можна пояснити тим, що в машинобудуванні, а саме ця галузь є найбільшим законодавцем “моди” у вібраційних дослідженнях, найважливішу роль відіграють вимушені коливання, особливо їх резонансні режими. Вільні коливання машин та їх деталей відбуваються з більшими частотами та мають менші амплітуди у порівнянні з будівельними конструкціями і особливо мостами. Мости в цьому плані є особливими, оскільки їх експлуатаційне навантаження (проїзд транспорту) має ознаки імпульсного характеру, і реакції конструкцій завжди завершуються періодом вільних коливань, амплітуди яких становлять 10 ... 50 % від максимальних, що виникають при дії даного навантаження. Відношення амплітуд реакцій до “шумів” в сигналі, що досліджується при вільних коливаннях прогонових будов мостів, є значно більшим, ніж аналогічне відношення при вільних коливаннях машин або будинків. Саме тому розробка методів пасивної вібродіагностики для мостів є завданням, яке має реальне підґрунтя для успішного вирішення.

## **Висновок**

Реакції будівельних конструкцій як при вільних коливаннях, так і при вимушених коливаннях, несуть однакову інформацію про динамічні характеристики системи, отже, переваги активних методів вібродіагностики полягають лише у відсутності дієвих методик пасивної вібродіагностики та недосконалості методів аналізу вільних коливань.

Створення нових моделей та методик визначення динамічних характеристик конструкцій мостів за результатами пасивної вібродіагностики як і розвиток методів аналізу їх вільних коливань є актуальною проблемою, яка має реальне підґрунтя для успішного вирішення

## **Література**

1. Редченко В.П. Оцінка просторової роботи прогонової будови моста за результатами її випробувань рухомим навантаженням. // Сб. “Автомобільні дороги і дорожнє будівництво”. Вип. 69. – К.: НТУ, 2004. – С. 210...214.
2. Немчинов Ю.И., Кендзера А.В., Бугаевский Г.Н. Динамическая паспортизация сооружений как составная часть СНИПа. // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2004. – Вип.60. – С.193-198.
3. Коваль П.М, Филоненко С.Ф., Сташук П.М., Корниенко И.К. Анализ динамических характеристик моста. // Сб. «Дороги и мосты». Вып.9. – К.: 2008. – С.119...128.
4. Masato Abe, Makoto Shimamura, Masaaki Matsunuma. Bridge Substructure Monitoring Using Live Load Induced Vibration. TRB 2007 Annual Meeting – 11p.
5. Carmelo Gentile, Alberto Gennari-Santori. Dynamic Testing and Modeling of a 30-years' old Cable-Stayed Bridge. / Structural Engineering International. 1/2006. p. 39-43.

6. Хавкін О.К., Калюх Ю.І., Мар'єнков М.Г., Глуховський В.П., Приємський В.Д. Моніторинг будівельних конструкцій і застосування нових державних норм ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України». // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2008. – Вип.69. – С. 26-44.
7. Кулябко В.В. Динамика конструкций, зданий и сооружений. Уч. для вузов. – Запорожье, 2005. – 232с.
8. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. – М.: Машиностроение, 1978-1981.
9. Методические рекомендации по вибродиагностике автодорожных мостов. – М.: Росавтодор, 2001 – 24с.
10. РВ.2.3-218-00018112-521:2006. Рекомендації з динамічних випробувань мостів та шляхопроводів. К.: Укравтодор, 2006. – 34с.
11. Коваль П.М. Науковий супровід ДерждорНДІ системи експлуатації мостів України. // Зб. н. ст. “Дороги і мости” випуск 7, том 1. – К.: ДерждорНДІ, 2007 – С. 237...252.
12. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1979 – 320 с.