

В. П. РЕДЧЕНКО (Дніпропетровський відділ ДерждорНДІ ім. М. П. Шульгіна)

МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ МЕТОДАМИ ПАСИВНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ

У статті представлено результати досліджень методів пасивної вібраційної діагностики та можливостей їх застосування для визначення та моніторингу технічного стану мостів.

В статье представлены результаты исследований методов пассивной вибродиагностики и возможностей их использования для определения и мониторинга технического состояния мостов.

In the article the results of studies of the passive vibration test methods and the possibilities of using them for determining and monitoring of technical condition of bridges are presented.

Визначення та моніторинг технічного стану мостів за їх інтегральними характеристиками, які встановлюють за результатами динамічних випробувань, займає чинне місце серед інших методів діагностики та отримує все більше розповсюдження як у світовій так і у вітчизняній практиці [1, 2]. Знання динамічних параметрів конструкцій та споруд є необхідною умовою при визначенні їх сейсмостійкості [3]. В наш час спостерігається тенденція до збільшення довжини прогонових будов мостів та широкого застосування гнучких конструкцій, що робить їх ще більш чутливими до динамічних навантажень. При проектуванні таких споруд доводиться вирішувати цілий ряд складних задач пов'язаних із забезпеченням їх динамічної стійкості при дії експлуатаційного, вітрового, сейсмічного та ін. динамічних навантажень. Перевірка правильності прийнятих рішень також виконується шляхом проведення натурних динамічних випробувань. Окрім цього, методи динамічних випробувань все більше застосовують для визначення та моніторингу технічного стану мостів і, в першу чергу, мостів великих, для яких проведення статичних випробувань є проблематичним завданням.

Динамічні випробування часто називають вібраційними випробуваннями або ж вібраційною діагностикою. За визначенням [4]: «*Вібраційні випробування* – це випробування об'єкту при заданій вібрації», а «*Вібраційна діагностика* – це технічна діагностика, яка базується на аналізі вібрацій об'єкту діагностування». За цими визначеннями вібраційні випробування – це завжди активні випробування, оскільки рівень вібрації задається. Вібраційна діагностика, може бути як активною, так і пасивною, якщо вібраційне (динамічне) навантаження відповідно задається або ж ні (при цьому пасивна вібраційна діагностика не виключає також і процедури реєстрації випадкового навантаження). Найбільш відпрацьованими з методологічної

точки зору є методи активної вібродіагностики (особливо методи з використанням вібраційної машини) [5]. Недоліком методів активної вібродіагностики є їх значна вартість та необхідність спеціального обладнання (вібраційних машин), яке для великих споруд повинно мати значні потужності. Саме тому методи активної вібродіагностики не розповсюджені в практиці дослідження мостів в Україні (на даний час у мостовиків немає жодної робочої вібраційної машини).

Ще за часів СРСР склалася усталена думка, що методи пасивної вібродіагностики не можуть дати тих результатів, які дають методи активної вібродіагностики, згодом ця теза навіть увійшла в деякі нормативні документи Росії та України [6, 7]. Мабуть саме тому увага спеціалістів до цього виду випробувань в Україні є на дуже низькому рівні. Якщо ж взяти світову практику, то в останні 20 років тут спостерігається справжній бум розвитку методів пасивних динамічних випробувань, що пов'язано, як з розвитком систем реєстрації динамічних реакцій, так і з розвитком методів їх опрацювання та аналізу, а також їх головними перевагами – це набагато менша вартість, простота практичних методик та можливість виконувати натурні роботи без закриття руху по мосту.

Найбільшого розповсюдження набули динамічні випробування споруд та їх конструкцій, які англійською мають назву Ambient Vibration Test [8] (дослівно «вібраційні випробування в оточуючому середовищі»). При цих випробуваннях спеціальне навантаження не застосовується, а використовуються випадкові збудження (вітер, мікросейсміка, проїзд транспорту і т.п.). Теоретичною основою Ambient Vibration Test – Фонової Вібраційної Діагностики (одне із значень терміну «фон» – це тіло, оточення, середовище) є метод аналізу динамічних систем, який отримав назву «Out only» – «лише вихід» на відміну від методу аналізу при актив-

ній вібраційній діагностиці, коли застосовують аналіз типу «In and Out» – «вхід і вихід». В останні десятиліття в багатьох країнах світу методам аналізу сигналів «Out only» було присвячено ряд дисертацій, створено та впроваджено запатентовані програмні комплекси, які формують модель споруди та в автоматичному режимі, аналізуючи зареєстровані коливання, визначають її динамічні параметри [9]. Загальноприйнятим став висновок про те, що моніторинг технічного стану будівельних конструкцій значних розмірів найкраще виконувати саме шляхом їх ідентифікації через натурні динамічні характеристики, наприклад нормалізовані форми власних коливань (Modal Identification). Швидкими темпами розвиваються та впроваджуються в практику методики визначення пошкоджень будівельних конструкцій методами динамічних випробувань (Damage Identification).

При фонових випробуваннях реакції конструкції аналізуються як в часовій, так і частотній областях методами, які є розвитком класичних непараметричних методів аналізу випадкових сигналів. При цьому спільним їх недоліком є взаємне протиріччя між намаганням максимально позбутися шумів та забезпеченням необхідної, часом високої роздільної здатності по частоті.

З точки зору вказаної проблеми мости серед інших споруд займають вигідне положення, оскільки, при пасивній вібродіагностиці завжди є можливість аналізувати вільні коливання їх конструкцій, які регулярно виникають після проїзду експлуатаційного навантаження (рухомого транспорту). При цьому амплітуди вільних коливань значно перевищують амплітуди шумів, а характер коливань для лінійних систем має відому функціональну залежність. Це дозволяє виконувати аналіз зареєстрованих сигналів методами, які є розвитком параметричних методів спектрального аналізу, і які дають можливість на порядок збільшити їх роздільну здатність [10]. Саме для мостових конструкцій розрізнення форм власних коливань, які мають близькі частоти, є важливою проблемою. Так завдяки особливостям своєї конструкції переважна більшість прогонових будов автодорожніх мостів мають зони згущення частот, які утворюються близько частот власних коливань двомірної балкової моделі за рахунок формування різних форм викривлення поперечного перерізу. Подібні згущення частот наявні і для нерозрізних балкових систем з однаковими чи близькими довжинами прогонів. Частоти різних форм в зонах вказаних згущень іноді відрізняються одна від одної лише на долі проценту.

Для теоретичних досліджень та відпрацювання практичних методик запропоновано модель, яку можна описати наступним виразом

$$K_{ik}(\omega) = \sum_{n=1}^N K_{ikn}(\omega), \quad (1)$$

де $K(\omega)_{ik}$ – передаточна функція між точками i та k ; $K(\omega)_{ikn}$ – передаточна функція між точками i та k за n -ю власною формою (модальна передаточна функція).

Вільні коливання лінійної стаціонарної системи розглядаються як сума ортогональних реакцій за власними формами, ваговий вплив яких визначається модальними імпульсними функціями (функціями Гріна) або ж модальними передаточними функціями та початковими умовами, які передували вільним коливанням: швидкість (*імпульсна складова*) та зміщення (*кінематична складова*). Враховуючи ортогональність модальних функцій Гріна, кожна модальна передаточна функція (перетворення Фур'є від модальної функції Гріна) може бути визначена як для лінійного осцилятора, а комплексну передаточну функцію можна отримати склавши модальні передаточні функції (для практичного використання достатньо декількох перших форм). Для лінійних систем вираз (1), визначений через власні кутові частоти W , декременти коливань δ та амплітуди власних форм A (вагові коефіцієнти), в комплексній формі записується, як:

$$K_{ik}(\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{W_n A_{ikn}}{2} (S_n + S_n^*), \quad (2)$$

де

$$S_n = \frac{e^{-j\pi/2}}{\delta_n W_n / 2\pi + j(\omega - W_n)};$$

$$S_n^* = \frac{e^{j\pi/2}}{\delta_n W_n / 2\pi + j(\omega + W_n)}.$$

Як бачимо, для визначення передаточної функції необхідно мати наступні параметри:

- кутову частоту коливань за власною формою (W_n);
- декремент коливань даної форми (δ_n);
- ваговий коефіцієнт впливу (A_{ikn}).

Саме визначення цих параметрів і має бути метою динамічних випробувань за даною моделлю. Для практичних завдань, як правило, достатньо мати їх значення для декількох перших форм. Достатню кількість форм визначають шляхом аналізу розрахункової моделі конструкції.

Теоретично визначення частот та декрементів власних форм коливань конструкції можна виконати шляхом опрацювання віброграми вільних коливань зареєстрованої лише для однієї точки (звісно якщо вона не є вузловою для котроїсь з форм). На практиці це не завжди вдається оскільки форми з більшими амплітудами «затіняють» форми з меншими амплітудами і тому визначення останніх є ускладненим. На практиці рекомендується визначати параметри власних форм коливань за реакціями в точках, де ці форми мають максимальні амплітуди. Хороші результати дає попереднє планування експерименту з врахуванням аналізу розрахункової моделі та властивостей спектральних функцій її реакцій [11].

Нормалізовані ординати власних форм коливань визначаються за наступним алгоритмом:

- намічаються точки на конструкції, в яких визначатимуться ординати форми коливань;
- синхронно реєструються вільні коливання у вибраних точках;
- вибирається реперна точка (як правило з максимальними амплітудами коливань) та за відношенням спектральних функцій реакції в певній точці та в реперній точці визначаються відносні ординати форми коливань.

Не обов'язково одночасно реєструвати коливання у всіх точках, особливо для великих мостів, це потребує значної кількості обладнання. Абсолютно рівнозначним буде варіант почергової реєстрації коливань для певної групи точок окремо при спільній для всіх груп реперній точці (для кожної площини коливань

повинна бути як мінімум одна реперна точка).

Важкі коефіцієнти впливу для кожної з форм рекомендується визначати в наступному порядку:

- визначаються форми власних коливань в нормалізованому виді;
- для однієї чи декількох точок визначаються масштабні коефіцієнти, за якими відносні ординати форм коливань переводяться в абсолютні значення.

Визначення масштабних коефіцієнтів можна також виконувати використовуючи моделі створені методом скінченних елементів (МСЕ) та скориговані за натурними частотами та нормалізованими формами власних коливань – такий підхід дає достатню для інженерної практики точність. Взагалі слід відмітити, що у світі склалася практика ідентифікації будівельних споруд як динамічних систем саме через їх моделювання в програмних середовищах, які реалізують МСЕ.

Як один із варіантів практичного застосування передаточної функції покажемо на наступному прикладі. Для балкової прогонової будови за типовим проектом вип. 122-63 повною довжиною 22,16 м випробуванням визначені частоти двох перших форм коливань 5,0 Гц (без викривлення поперечника) та 5,2 Гц (крутильні коливання), декременти коливань мають значення 0,15 та 0,18 відповідно. Для крайньої балки при навантаженні протилежної смуги руху в середині прольоту силою 10 т вагові коефіцієнти становлять 2,15 мм та -1,8 мм. Амплітудний спектр передаточної функції за виразом (2) та знайденими параметрами представлено на рис. 1.

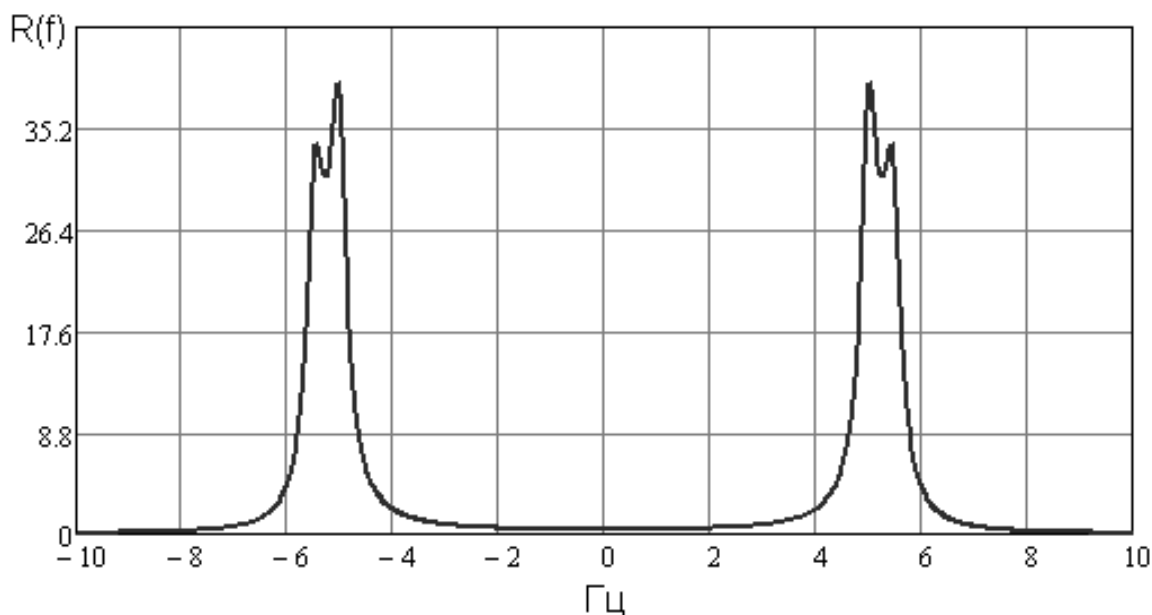


Рис.1. Графік амплітудного спектру комплексної передаточної функції

Добуток передаточної функції та спектральної функції навантаження дає спектральну функцію реакції, за якою, виконавши зворотне

перетворення Фур'є, отримуємо реакцію конструкції в часовій області (рис. 2).

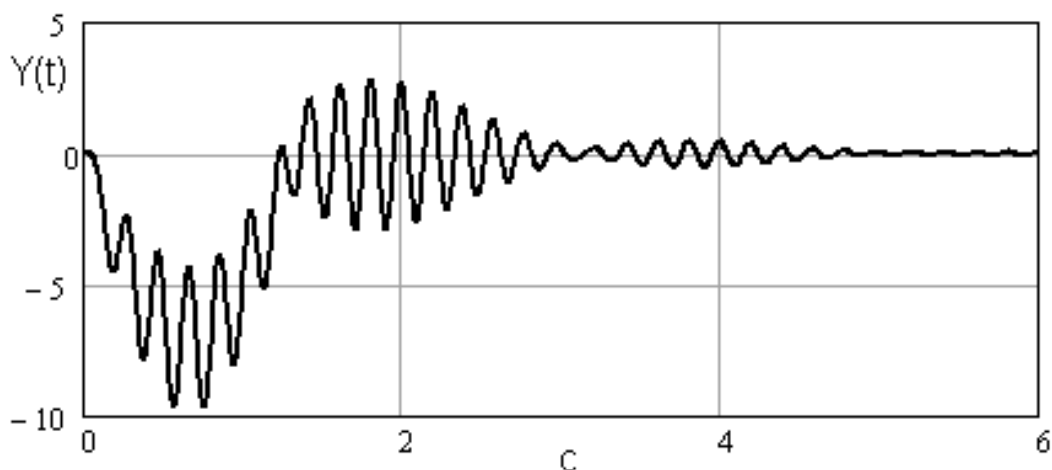


Рис.2. Графік реакції балки на дію рухомої сили

Для визначення технічного стану споруди необхідно визначити всі відхилення (пошкодження), які мають місце у порівнянні з нормальним її станом. Якщо динамічну систему описуємо матрицею передаточних функцій [5], то функцію пошкоджень системи можна представити системою матриць, які визначають зміни передаточних функцій при наявності пошкодження в певній зоні конструкції. Кількість матриць в такій системі буде дорівнювати кількості зон, на які ми розбиваємо споруду для локалізації дефекту.

Можна запропонувати іншу модель, в якій динамічна система описується власними формами коливань та їх параметрами. В цьому випадку функцію пошкоджень 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, що повністю може бути зроблено методами пасивної вібродіагностики.

Слід відмітити, що динамічні методи дозволяють виявляти зміни в інтегральних параметрах конструкції, що не дозволяє використовувати їх для контролю за локальними дефектами, як, наприклад, розрив однієї з сотні заклепок і т.п. Натомість вказані методи добре проявляють себе при виявленні: загального ко-

розійного зношення, перевантаження постійним навантаженням, текучості матеріалу, зміні розрахункової схеми і т.п.

Враховуючи рівень досягнень натурної динамічної діагностики пропонується така схема робіт для моніторингу технічного стану мостів:

1. Експериментальне визначення частот та форм власних коливань споруди. Порівняння цих параметрів з початковими (динамічний паспорт).
2. При наявності змін динамічних параметрів виконання аналізу цих змін та попереднє складання варіантів функції пошкоджень і визначення можливих ділянок з дефектами.
3. Проведення часткового обстеження в зонах можливих дефектів.
4. Коригування розрахункової схеми та функції пошкоджень за результатами обстежень, аналіз достатності таких коригувань при порівнянні з фактичними змінами динамічних параметрів. Визначення технічного стану мосту з врахуванням виявлених дефектів.
5. При недостатності внесених змін виконується повторення пунктів 2 – 4, до повного виявлення всіх дефектів.

Зрозуміло, що найкращою є ситуація, коли проведені випробування не фіксують змін в частотах та формах коливань у порівнянні з паспортними даними, на основі чого, можна зробити попередній висновок про незмінність технічного стану споруди. Хоча відмітити, що висновок буде саме попереднім, і його треба ще підкріпити обстеженнями споруди, хоча б за неповною програмою. Разом з тим висловлюю впевненість, що широке впровадження в практику методів вібраційної діагностики дозволить

напрацювати достатню експериментальну базу та збільшити довіру до можливостей цих методів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Коваль, П. М. Науковий супровід ДерждорНДІ системи експлуатації мостів України [Текст] / П. М. Коваль // Дороги і мости: зб. наук. статей / ДерждорНДІ. – Вип. 7, т. 1. – К.: ДерждорНДІ, 2007 – С. 237-252.
2. Challenges in experimental vibration analysis for structural identification and corresponding engineering strategies [Текст] / J. Zhang *et al.* // Proc. of the int'l conf. on experimental vibration analysis for civil engineering structures. – Wroclav, Poland, 2009. – P. 13-34.
3. Моніторинг будівельних конструкцій і застосування нових державних норм ДБН В.1.1-12:2006 Будівництво в сейсмічних районах України [Текст] / О. К. Хавкін та ін. // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – Вип. 69. – К.: НДІБК, 2008. – С. 26-44.
4. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения [Текст].
5. Вибрации в технике [Текст]: справочник в 6 т. – М.: Машиностроение, 1978-1981.
6. Методические рекомендации по вибродиагностике автодорожных мостов [Текст]. – М.: Росавтодор, 2001. – 24 с.
7. РВ.2.3-218-00018112-521:2006. Рекомендації з динамічних випробувань мостів та шляхопроводів [Текст]. – К.: Укравтодор, 2006. – 34 с.
8. Wenzel, H. Ambient Vibration Monitoring [Текст] / H. Wenzel, D. Pichler. – John Wiley & Sons, Ltd, 2005. – P. 291.
9. Andersen, P. Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models [Текст] / P. Andersen. – Aalborg University, 1997. – P. 244.
10. Редченко, В. П. Особливості застосування спектрального аналізу при дослідженні коливань будівельних конструкцій [Текст] : монографія / В. П. Редченко. – Д.: Пороги, 2010. – 98 с.
11. 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.

Надійшла до редколегії 05.03.2010.

Прийнята до друку 12.03.2010.