

УДК 624.21

Вібраційна діагностика просторових конструкцій великого розміру, проблеми та перспективи

Редченко В.П., к.т.н.

Дніпропетровський відділ ДерждорНДІ, Україна

Анотація. В статті подано огляд сучасних методів вібраційної діагностики. Відмічені їх переваги та недоліки.

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов вибродиагностики. Отмечены их достоинства и недостатки.

Abstract. In the article the review of modern methods vibrational diagnostics is represented. Their dignities and defects are marked.

Ключові слова: конструкції, вібраційні діагностики, динамічні характеристики.

Вступ. В усьому світі спостерігається тенденція до збільшення розмірів будівельних споруд та широкого застосування гнучких конструкцій, що робить їх більш чутливими до динамічних навантажень. При проектуванні таких споруд доводиться вирішувати цілий ряд складних проблем, пов'язаних із забезпеченням їх динамічної стійкості при дії експлуатаційного, вітрового, сейсмічного та ін. динамічних навантажень. Перевірка правильності прийнятих рішень виконується шляхом проведення натурних динамічних випробувань [4, 9, 10]. Окрім цього, методи динамічних випробувань все більше застосовують при визначенні та моніторингу технічного стану споруд і, в першу чергу, просторових конструкцій великого розміру, для яких проведення статичних випробувань є дуже проблематичним завданням. Знання динамічних характеристик будівель та споруд також є необхідною умовою при визначенні їх сейсмостійкості [3,6], вимоги щодо натурального визначення цих параметрів для споруд, які знаходяться в сейсмічних зонах, закладені в ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України».

Проблема. На відміну від значного розвитку, якого набули останнім часом практичні методи розрахунку конструкцій, методи натурального визначення їх динамічних характеристик мають в цьому плані значне відставання при недостатньому їх освітленні у науковій і технічній літературі. Аналіз вітчизняної технічної літератури та публікацій на цю тему свідчить про те, що практика натурних динамічних випробувань будівельних конструкцій в Україні завмерла на межі 80-х років минулого століття і в кращому випадку реалізує методики, напрацьовані та освітлені в літературі до вказаного періоду [5]. Щодо світової практики динамічних випробувань,

то в останні 20 років спостерігається справжній бум розвитку їх методів, що пов'язано з розробленням як систем реєстрації динамічних реакцій, так і методів їх опрацювання та аналізу [11, 12]. Методи вібраційної діагностики особливо актуальні для просторових споруд великого розміру, для яких проведення статичних випробувань є проблематичним. Широке впровадження у вітчизняну практику технічної діагностики методик вібраційної діагностики світового рівня та їх розвиток є актуальним завданням.

Огляд публікацій. У цілому на сучасному етапі динамічні випробування використовуються для [12]:

- дослідження резонансних явищ;
- визначення структурних параметрів;
- дослідження роботи на експлуатаційне навантаження;
- коригування розрахункової схеми;
- пошуку та ідентифікації дефектів;
- моніторингу технічного стану;
- визначення динамічних характеристик. Динамічні випробування часто називають вібраційними випробуваннями або вібраційною діагностикою. За визначенням [1]: «Вібраційні випробування – це випробування об'єкта при заданій вібрації», а «Вібраційна діагностика – це технічна діагностика, яка базується на аналізі вібрацій об'єкта діагностування», тобто вібраційні випробування – це завжди активні випробування, оскільки рівень вібрації певним чином завжди задається. При вібраційних випробуваннях визначають характеристики чи поведінку об'єкта при дії на нього вібрації, яка моделює певні навантаження (максимальні експлуатаційні, сейсмічні тощо).

Вібраційна діагностика може бути як активною, так і пасивною, якщо вібраційне (динамічне) навантаження відповідно задається або ні (при цьому пасивна вібраційна діагностика не виключає також і процедури реєстрації випадкового навантаження). Проведення активної вібраційної діагностики, методи якої добре відпрацьовані ще в минулому столітті, потребує потужних та масивних вібраційних машин (рис. 1) чи інших контрольованих навантажень. У випадку масивних просторових конструкцій великого розміру застосування активної вібродіагностики буде потребувати вже не однієї вібромашини, а декількох з відповідним їх закріпленням та синхронізацією, пропорційно зростають і затрати на такі роботи.

У світовій практиці за останні 20 років застосування методів динамічних випробувань будівельних конструкцій переживає черговий бум, що пов'язано з розповсюдженням випробування, яке англійською має назву Ambient Vibration Test (дослівно «вібраційні випробування в оточуючому середовищі») [14]. Спеціальне навантаження не застосовується, а викорис-

товуються випадкові збудження (вітер, мікросейсміка, проїзд транспорту і т.п.). Реєстрація реакцій конструкції виконується досить тривалий час. Ці випробування є певним аналогом пасивних динамічних випробувань, які в СРСР були визнані неперспективними, що знайшло відображення навіть в деяких нормативних документах Росії та України.

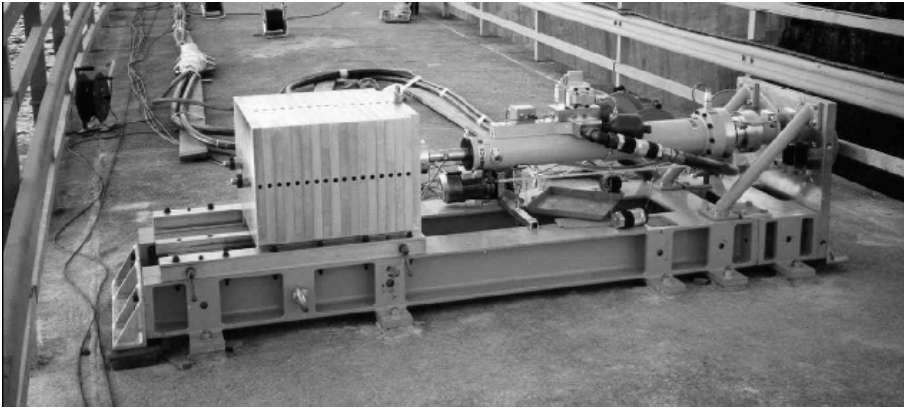


Рис. 1. Вібраційна машина для створення горизонтальних навантажень

Теоретичною основою Ambient Vibration Test – Фонові Вібраційної Діагностики (одне із значень терміна «фон» – це тло, оточення, середовище) є метод аналізу коливань конструкцій, який отримав назву «Out only» – «лише вихід» на відміну від методу аналізу при активній вібраційній діагностиці, коли застосовують аналіз типу «In and Out» – «вхід і вихід». У багатьох країнах світу методам аналізу сигналів «Out only» було присвячено ряд дисертацій, за якими створено та впроваджено запатентовані програмні комплекси, які формують модель споруди та в автоматичному режимі, аналізуючи зареєстровані коливання, визначають її динамічні параметри. Перевагами даного методу є те, що при випробуваннях не припиняється експлуатація споруди, затрати на проведення випробувань мінімальні, випробування є простими організаційно та можуть проводитися з мінімальною кількістю обладнання. При фонових випробуваннях нормалізована передаточна функція H_{Rk} між точками конструкції R та k визначається за відношенням взаємної спектральної функції S_{Rk} та автоспектра S_{kk} синхронно зареєстрованих коливань $y_R(t)$ та $y_k(t)$ у вказаних точках (рис. 2). При цьому точка R приймається за реперну і є незмінною для цілого ряду реєстрацій коливань у різних точках k , що дозволяє обходитися мінімальною кількістю обладнання.

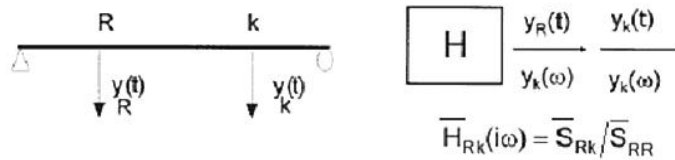


Рис. 2. Схема випробувань та визначення динамічних параметрів лише за вихідними реакціями

Загальноприйнятою є думка, 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) [13].

Результати досліджень. 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, іноді високої роздільної здатності за частотою. Отримання спектра відбувається за наступним алгоритмом:

1. Попереднє опрацювання віброграми, видалення неінформативних та бракованих ділянок, підбір загальної довжини віброграми в залежності від бажаної точності та дисперсії результатів аналізу.
2. Розбивання віброграми на певну кількість ділянок для осереднення спектральної оцінки (метод періодограми), кількість точок на кожній ділянці кратна двійці у цілочисловому степені.
3. Вибір вагової функції («вікна») для згладжування.
4. Знаходження швидкого перетворення Фур'є для кожної ділянки.
5. Нормалізація спектральних оцінок по кожній ділянці.
6. Сума нормалізованих амплітудних спектрів усіх ділянок та їх осереднення.
7. Коригування осередненого спектра (дія обернена накладанню вагової функції).

Використання даного алгоритму дозволяє виділяти власні частоти в коливаннях, які збуджені випадковими імпульсами та відбуваються на фоні сторонніх шумів. При цьому п. 1 та п. 2 з точки зору роздільної здатності виконують протилежні функції – збільшення загальної довжини віброграми веде до збільшення роздільної здатності, а поділ на ділянки – до

її зменшення, в результаті чого роздільна здатність розглянутого методу часто є недостатньою. Необхідність ділення на ділянки та знаходження осередненого спектра викликана особливістю дії випадкового імпульсного навантаження, при якому навіть спектр реакції осцилятора (одна власна частота) матиме дуже «порізаний» амплітудний спектр, хибні піки якого можна сприйняти за прояв власних частот (рис. 3). Певною мірою збільшити роздільну здатність спектрального аналізу можна, якщо застосувати параметричні методи аналізу та додатково аналізувати сам комплексний спектр – його зміни в залежності від фазових положень гармонік та ін. [8].

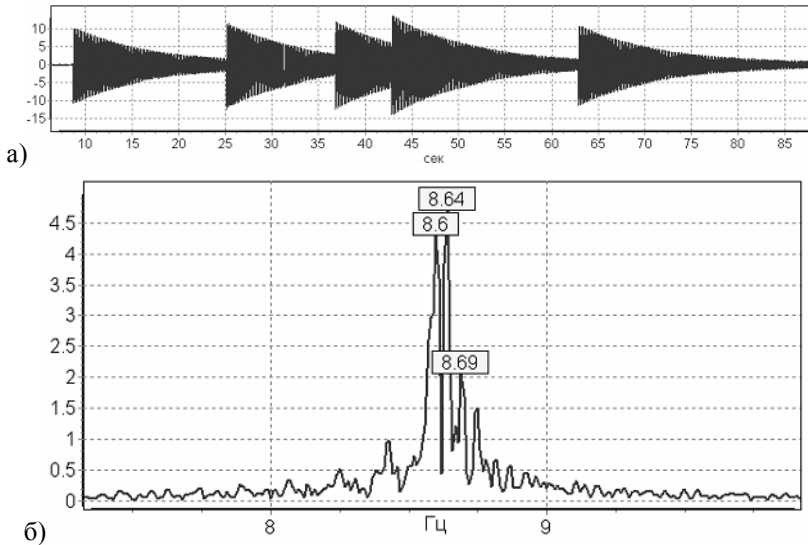


Рис. 3. Віброграма коливань лінійного осцилятора при дії випадкових імпульсів (а) та її амплітудний спектр (б)

Сучасне обладнання та технології вібраційної діагностики дозволяють навіть для масивних споруд з високою точністю визначити декілька перших форм власних коливань, що стало основою розвитку практичних методик ідентифікації дефектів на основі аналізу зміни динамічних характеристик конструкції [13]. Разом з тим, практичне застосування розроблених методик ще не набуло широкого розповсюдження, а ті окремі дослідження, які були виконані на натурних об'єктах після землетрусу [12], вказують, що при досить хорошому визначенні наявності самого факту пошкодження існує проблема з визначенням місця розташування пошкодження – жодна з методик у загальному випадку не дає чіткого визначення місця розташування дефекту.

Динамічні характеристики будівельних конструкцій є інтегральними і залежать від функцій розподілу жорсткості та маси по всій споруді. Якщо розглядати передаточну функцію між точкою фундаменту та точкою на даху будинку, то вона є залежною від жорсткості та маси будь-якого конструктивного елементу будинку. Аналіз такої передаточної функції лише вкаже на те, що в конструкціях сталися певні зміни і що це може бути якимось пошкодженням, але місце розташування його залишиться невизначеним. Для того, щоб визначити зону пошуку дефекту треба збільшити кількість точок, між якими визначаються передаточні функції, і на основі аналізу відносних їх змін шукати зону розташування пошкодження. Чим меншу за розміром зону ми хочемо окреслити для локалізації дефекту, тим більшим повинно бути число точок, в яких виконується вимірювання.

Якщо динамічну систему описати матрицею передаточних функцій, то функцію пошкоджень системи можна представити системою матриць, які визначають зміни передаточних функцій при наявності пошкодження в певній зоні конструкції. Кількість матриць у такій системі буде дорівнювати кількості зон, на які розбивається споруда 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 (у 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. Проведені теоретичні та експериментальні роботи [7] дозволили на даному етапі розвитку вібродіагностики запропонувати таку схему робіт для ідентифікації дефектів:

1. Експериментальне визначення частот та форм власних коливань споруди. Порівняння цих параметрів із початковими (динамічний паспорт).
2. При наявності змін динамічних параметрів виконання аналізу цих змін та попереднє складання варіантів функції пошкоджень і визначення можливих ділянок із дефектами.
3. Проведення часткового обстеження в зонах можливих дефектів.
4. Коригування розрахункової схеми та функції пошкоджень за результатами обстежень, аналіз достатності таких коригувань у порівнянні з фактичними змінами динамічних параметрів.

5. При недостатності внесених коригувань розрахункової схеми повторення пунктів 2 – 4, до повного виявлення всіх дефектів.

Висновки

Використання методик вібраційної діагностики для визначення технічного стану просторових конструкцій великого розміру має великі перспективи, оскільки дозволяє обходитися меншими затратами у порівнянні з іншими методами. Сучасне ресстраційне обладнання дає можливість отримувати та аналізувати відгук конструкції на фоніві збудження (вітер, мікросейсміка, проїзд транспорту тощо), що дозволяє проводити постійний моніторинг технічного стану споруди через зміни її динамічних характеристик. Можна стверджувати, що розвиток методик вібраційної діагностики і, особливо, методів аналізу отриманих результатів знаходиться на початку свого чергового етапу розвитку та потребує уваги широкого кола науковців для вирішення існуючих проблем.

Література

- [1] ГОСТ 24346-80 Вибрация. Термины и определения.
- [2] Еманов А.Ф. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний / А.Ф. Еманов, Л.А. Складов // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. научных трудов, выпуск 8. – М.: 2009. – С. 63 – 72.
- [3] Завалишин С.И. Динамический мониторинг зданий и сооружений для контроля их сейсмостойкости. / С.И. Завалишин, Г.Э. Шаблонский, Д.А. Зубков, А.А. Румянцев // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. Науч. тр., вып. 8. – М.: 2009. – С. 42 – 53.
- [4] Кулябко В.В. Динамика конструкций, зданий и сооружений. Уч. для вузов. – Запорожье, 2005. – 232 с.
- [5] Кулябко В.В. Проблемы моделирования динамических нагрузок и расчетных схем сооружений, проведение динамических испытаний и анализа их результатов. / В.В. Кулябко, В.А. Банах, В.П. Редченко // Зб. н. пр. Вісник ДонНАБА – 2009. – Вип. 4(78) – С. 104 – 110.
- [6] 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.
- [7] Редченко В.П. Идентификация дефектов споруд методами динамичної діагностики. // Сб. научн. тр. Строительство, материаловедение, машиностроение. Вып. 52. в 2-х частях – Дн-ск, ГВУЗ ПГАСА, 2010. – ч. 2 С. 100 – 104.
- [8] Редченко В.П. Особенности использования спектрального анализа при исследовании колебаний строительных конструкций. // У зб.н.пр. Вісник ДонНАБА – 2009. – Вип. 4(78) – С.44 – 48.
- [9] Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений. / Шимановський О.В., Гордеев В.М., Коро-

- льов В.П., Оглобля О.І., Рухович І.Р., Філатов Ю.В. – К.: «Сталь», 2008. – 463 с.
- [10] 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.
- [11] Challenges in experimental vibration analysis for structural identification and corresponding engineering strategies / Zhang J., Prader J., Moon K. A. F., Aktan A.E., Grimmelsman K.A., Shama A. // Proceedings of the international conference on experimental vibration analysis for civil engineering structures, Wroclav, Poland, 2009. – p. 13 – 34.
- [12] EVACES'09. Experimental vibration analysis for civil engineering structures / Proceedings of the international conference, Wroclav, Poland, 2009 – 208 p.
- [13] Ramos L. Vibration signatures to identify damage in historical constructions. / L. Ramos, P. Lourenco, G. De Roeck, A. Campos-Costa // EVACES'07. Proceedings of the international conference. – Porto, 2007. – p. 1251 – 1260.
- [14] Wenzel H. Ambient Vibration Monitoring / Wenzel H., Pichler D. – John Wiley & Sons, Ltd, 2005 – 291 p.

Надійшла до редколегії 15.06.2010 р.