

Редченко В.П.

**ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ
ДОСЛІДЖЕННІ ДИНАМІЧНИХ РЕАКЦІЙ БУДІВЕЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЙ.**

Анотація. Стаття присвячена застосуванню спектрального аналізу для визначення натурних динамічних характеристик будівельних конструкцій. Означені проблеми та шляхи їх розв'язання.

Ключові слова: діагностика, спектральний аналіз, будівельні конструкції.

Аннотация. Статья посвящена использованию спектрального анализа при определении натурных динамических характеристик строительных конструкций. Определены проблемы и пути их решения.

Ключевые слова: диагностика, спектральный анализ, строительные конструкции.

Abstract. Clause is devoted to use of the spectral analysis at definition натурних of dynamic characteristics of building designs. Are determined the problems and ways of their decision are planned.

Key words: diagnostics, spectral analysis, building construction.

Вступ

Визначення та моніторинг технічного стану будівельних конструкцій, і мостів зокрема, за інтегральними структурними параметрами, які визначаються динамічними випробуваннями, займає чинне місце серед інших методів діагностики та отримує все більше розповсюдження як у світовій так і у вітчизняній практиці [1,2,3,4]. Знання динамічних параметрів конструкцій та споруд є необхідною умовою при визначенні їх сейсмостійкості, вимоги щодо натурального визначення цих параметрів для споруд, які знаходяться в сейсмічних

зонах, закладені в недавно прийнятих державних нормах України ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України» [6]. У переважній більшості випадків визначенню підлягають частоти та форми власних коливань та декременти коливань. Отримані натурні дані дозволяють перевірити та скоригувати розрахункові моделі споруд, що забезпечує достовірність проведених розрахунків.

Проблема

З розвитком цифрових технологій реєстрація динамічних реакцій будівельних конструкцій перестала бути проблемою – реєстраційні цифрові комплекси, що налаштовані на проблеми діагностики будівельних конструкцій, на даний час має переважна більшість організацій, які займаються випробуванням споруд. Реакція конструкції на певне збудження перетворюється давачем в певний сигнал, який в тому чи іншому цифровому форматі зберігається в тривалій пам'яті реєстраційного комплексу. Зареєстровану реакцію можна переглянути у вигляді графіка в координатах одиниці реакції – час, який найчастіше називають віброграмою і опрацювання якої можна виконати методами, що були розроблені майже 100 років тому. Ці методи базуються на вимірюванні амплітуд і часу для характерних точок графіку та візуальному аналізу характеру віброграми (чи декількох синхронних віброграм). При складних коливаннях, які є результатом складання декількох форм коливань з різними частотами та амплітудами, що спостерігаємо в переважній більшості випадків при коливаннях будівельних конструкцій, ці методи не дають можливості з потрібною для інженерних розрахунків точністю визначати власні частоти та декременти коливань.

Починаючи приблизно з 50-х років минулого століття в таких для аналізу складних віброграм рекомендується застосовувати спектральний аналіз - метод, який базується на знаходженні перетворення Фур'є для даної віброграми. Ці ж рекомендації в незмінному вигляді наявні і на даний час, але, як і раніше, на фразі "...необхідно виконати спектральний аналіз..." всі пояснення закінчуються або ж йде посилання на літературу з галузі зв'язку та теорії сигналів. Розібратися у величезному масиві вказаної літератури інженеру будівельнику дуже важко, тим більше, що переважна більшість досліджень, які там представлені, стосуються проблеми якнайточнішого представлення вхідного сигналу, який пройшов через певну систему, за наявним вихідним

сигналом [7,8,9,10,11]. У випадку дослідження будівельних конструкцій нас цікавлять параметри системи (конструкції), через яку проходить вхідний сигнал (діюче на конструкцію збудження), і ці параметри ми намагаємося встановити за вихідним сигналом (реакція конструкції). Звичайно, наведене пояснення відмінностей є дещо спрощеним, але слід зауважити, що в самій теорії зв'язку застосування спектрального аналізу пройшло досить складний шлях розвитку, помилок та дискусій і лише в останні десятиліття набуло загальноприйнятих підходів [12,13], тому не дивно, що в при дослідженні будівельних конструкцій застосування спектрального аналізу знаходиться на самому початковому рівні.

На даний час застосування спектрального аналізу при дослідженні динамічних реакцій будівельних конструкцій, як правило, полягає в знаходженні перетворення Фур'є для даної віброграми (ця функція закладена в більшість сучасних реєстраційних комплексів) та візуального знаходження екстремумів на графіку амплітудного спектру, що інтерпретується із знаходженням складових гармонік. Така ситуація наявна і в зарубіжній практиці [4,5]. При цьому забуваємо, що перетворення Фур'є для обмеженої в часі віброграми не є строго ідентичним ряду Фур'є для цієї ж віброграми. Слід розуміти, що отриманий в результаті спектр по суті є "миттєвим спектром" лише даної реалізації динамічної реакції і може мати дуже суттєві відмінності від спектрального представлення цієї ж реакції, як ряду гармонік, які ми маємо на меті визначити експериментально. Власне за наявним реальним сигналом ми можемо отримати лише певну оцінку його спектру тому практика спектрального аналізу є "...ремесло досить суб'єктивного характеру, яке поруч з використанням наукового підходу вимагає певного рівня емпіричного мистецтва..."[13]. Останній висновок ще донедавна був предметом спору багатьох вчених зі світовими іменами, а його ігнорування призводило до серйозних помилок [12].

Іншим обмеженням спектрального аналізу є його гранична роздільна здатність – тобто можливість прояву двох гармонік з близькими частотами двома піковими положеннями на графіку амплітудного спектру сигналу. Це обмеження знову ж таки пов'язане з обмеженою тривалістю віброграми в часі. Роздільну здатність класичного методу спектрального аналізу наближено оцінюють як величину обернену тривалості сигналу – якщо є сигнал тривалістю 5,0 сек., то ми можемо надіятися на прояв частот, які відрізняються більш ніж на 0,2 Гц, частоти з ж меншою різницею не проявляться на графіку спектру

окремими піками (рис. 1). На практиці часто доводиться зустрічатися з випадками, коли конструкція має дві та більше форм коливань з близькими частотами. Так, наприклад, для прогонових будов мостів це: крутильна та балкова форми коливань; цілий ряд перших форм коливань для нерозрізної балки з рівними або ж близькими довжинами прогонів і т.п. Не маючи змоги розділити ці частоти, на практиці просто вказують інтервал частот для даних форм, існує навіть термін “пучність частот” для таких випадків. Про розділення частот за формами чи про точне визначення декременту коливань для окремих форм в таких випадках навіть не йде мова. Звичайно такий підхід в умовах зростаючої точності розрахунків є значним обмеженням при їх експериментальній перевірці, а отже є проблемою, яку необхідно вирішити.

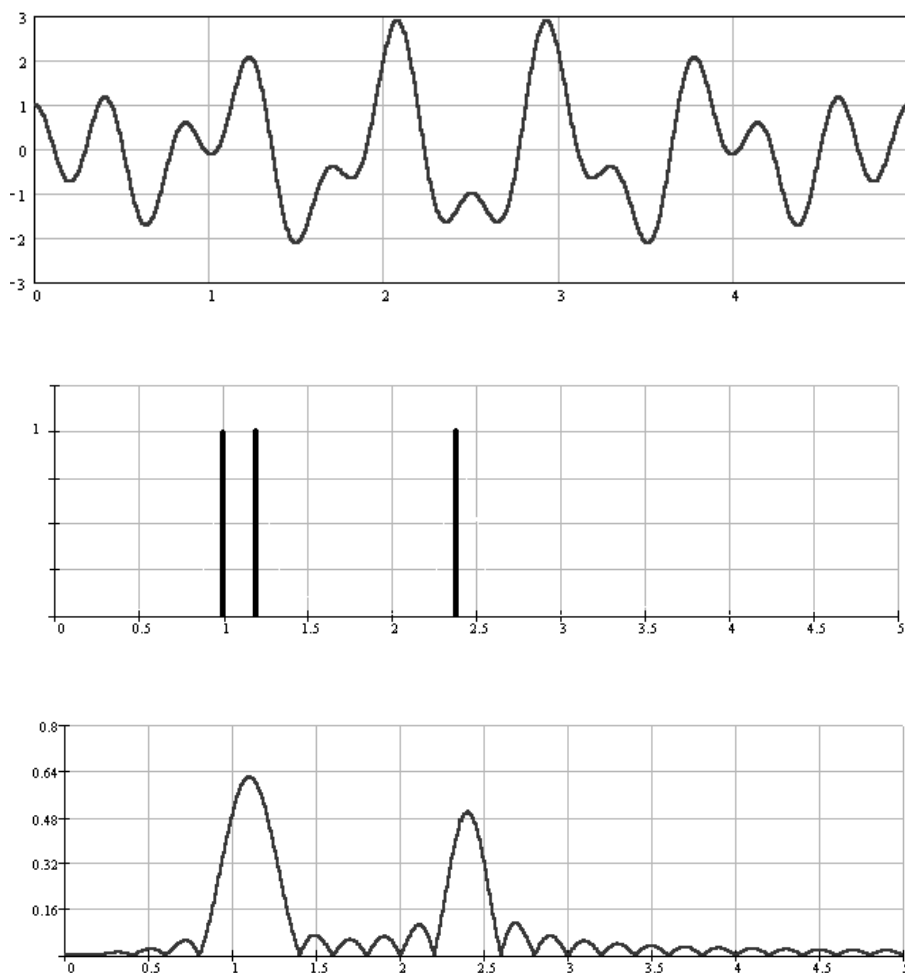


Рис. 1. Графік коливань, що утворені сумою трьох гармонік (а), їх частотне представлення як ряду Фур'є (б) та амплітудного спектру перетворення Фур'є (в). Дві перші гармоніки, які близькі за своїми частотами, не проявилися відповідно двома екстремумами на графіку амплітудного спектру

Шляхи розв'язання проблеми

Враховуючи певну додаткову інформацію про статистичні особливості сигналів, можна, виконавши певні дії вже над самим перетворенням Фур'є, умовно збільшити роздільну здатність спектрального аналізу. При цьому спектральне представлення сигналу буде спотворене (аж до появи хибних частот) тому такий підхід можна застосовувати лише для сигналів з конкретними особливостями та для вирішення конкретних задач, які були поставлені [13,14]. Застосувавши вказаний підхід, автор виконав ряд досліджень, які направлені на збільшення можливостей спектрального аналізу при розгляді саме динамічних реакцій будівельних конструкцій. Дослідження виконувалися шляхом встановлення зв'язку між змінами у початковій функції та змінами в її миттєвому спектрі. Після окреслення певного ряду властивостей спектру функцій – аналогів реакцій будівельних конструкцій були розроблені алгоритми для знаходження власних частот, декрементів коливань та розділення їх за формами. Значна частина результатів виконаних досліджень викладена в авторській монографії “Особливості застосування спектрального аналізу при дослідженні коливань будівельних конструкцій”, яка схвалена науково-технічною радою ДерждорНДІ та повинна вийти з друку в 2009 році. Деякі результати досліджень наведені нижче.

Інформацію про частоти, форми та декременти коливань власних форм коливань конструкції можна отримати аналізуючи її вільні коливання. Значна частина будівельних конструкцій з достатньою точністю моделюється у вигляді лінійних систем з в'язким тертям, отже функціями – аналогами реакцій при вільних коливаннях цих конструкцій будуть гармонічні функції, амплітуди яких зменшуються за експоненціальним законом, або ж сума таких функцій. Найважливіші властивості спектру вільних коливань лінійної системи з в'язким тертям, які були встановлені:

- збільшення довжини віброграми збільшує роздільну здатність спектру лише до певної межі – після збільшення тривалості віброграми T понад $4/F\delta$, де F – середня частота інтервалу пучності, δ - декремент коливань – вид спектру, а отже і його роздільна здатність, практично вже не змінюються;
- при наявності віброграми тривалістю $T \geq 4/F\delta$ роздільна здатність методу залежить лише від співвідношення початкових фаз та амплітуд

всіх складових гармонік (маються на увазі гармоніки, які утворюють пучність частот), а також від декременту коливань;

- при рівних амплітудах двох гармонік їх розділення у спектрі на два піки матиме місце при будь-якій різниці їх початкових фаз лише тоді, коли різниця частот між ними Δf буде більшою за $0,43F\delta$, (керуючись вказівками щодо роздільної здатності класичного спектрального аналізу, в даному випадку слід було б очікувати розділення частот з $\Delta f \geq 1/T \approx 0,25F\delta$);
- гармоніки з меншими амплітудами можуть проявлятися на графіку амплітудного спектру віброграми не лише піками а й впадинами на фоні загального екстремуму в зоні пучності частот.
- З врахуванням визначених властивостей спектру суми гармонічних згасаючих функцій були розроблені алгоритми визначення частот, які утворюють пучність, їх амплітуд та декременту коливань з розділенням їх за формами власних коливань.

Загальний підхід при опрацюванні віброграм вільних коливань повинен бути таким:

- знаходження перетворення Фур'є для даної віброграми;
- оцінка довжини віброграми порівнянням її з критерієм $4/F\delta$;
- визначення ділянок з екстремумами та перевірка кожного екстремуму для вирішення питання, що він представляє: пучність частот чи одну гармоніку;
- застосування відповідних алгоритмів для визначення частот гармонік, які утворюють пучності.

Висновок

При застосуванні спектрального аналізу для дослідження динамічних реакцій будівельних конструкцій не слід задовольнятися лише визначенням його екстремумів, а необхідно проводити аналіз самого перетворення Фур'є з врахуванням особливостей функції – аналога даної реакції. Проведення такого аналізу дозволяє значно збільшити інформативність класичного спектрального аналізу.

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 – 11 p.
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. *Гоноровский И.С., Демин М.П.* Радиотехнические цепи и сигналы.: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1994.
8. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы.: Учебник для вузов по спец. “Радиотехника”. – М.: Высш. шк., 2000.
9. *Дж. Бендат, А. Пирсол.* Применение корреляционного и спектрального анализа. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
10. *Г.Дженкинс, Д. Ваттс.* Спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – Том 1 - 316 с., том 2 – 287 с.
11. *Случайные колебания.* /Под ред. С. Кренделла // Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 356 с.
12. *Финк Л.М.* Сигналы, помехи, ошибки... Заметки о некоторых неожиданных, парадоксах и заблуждениях в теории связи. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
13. *Марпл-мл. С.Л.* “Цифровой спектральный анализ и его приложения” / Пер. с англ. – М.: Мир, 1990 .– 548 с.
14. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.