

УДК 519.24

СТАРОСИЛА М.І., старший науковий співробітник

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВИМУШЕНИХ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Розглядається оцінка технічного стану механічної конструкції з використанням кореляційного та спектрального аналізу вимушених коливань

Вступ. В різних галузях техніки існує нагальна потреба визначення технічного стану конструкції, яка, в свою чергу, викликана необхідністю своєчасного проведення робіт з технічного обслуговування для безпечної експлуатації. Одним із актуальних завдань в області створення нових методів неруйнівного контролю технічного стану конструкцій є розроблення методики ідентифікації стану конструкцій за її динамічними характеристиками.

В результаті експлуатації конструкції в ній можуть відбуватися втомні деформації, тріщини, які не приводять до змін геометричних розмірів, але приводять до зміни динамічних характеристик конструкції. Очевидно, що значення певного набору динамічних характеристик конструкції, темпи їх зміни характеризують, відповідним чином, технічний стан, а отже, аналіз цих змін дозволить визначити технічний стан конструкції.

Одним із ефективних експериментальних методів визначення динамічних характеристик конструкцій є аналіз нормальних мод (резонансних коливань), отриманих в результаті вимірювань вимушених механічних коливань.

Постановка задачі.

Необхідно визначити динамічні характеристики конструкції та ідентифікувати в подальшому її технічний стан.

Основна частина. Існує два методи модального аналізу динамічних характеристик конструкцій – традиційний і операційний. У традиційному модальному аналізі створюється контрольоване вхідне збудження конструкції і проводиться аналіз між вихідним відгуком і вхідним збудженням. У реальних умовах експлуатації для складних конструкцій з багатомодовими коливаннями часто немає можливості провести традиційний модальний аналіз.

Операційний модальний аналіз ґрунтується на використанні тільки вимушених коливань конструкції. Достатньо визначити коливання конструкції при нормальних експлуатаційних режимах, при цьому модальні параметри в робочому режимі показують залежність поведінки конструкції від фактичних навантажень, а також зміни динамічних характеристики від її технічного стану.

В результаті удосконалень алгоритму обчислення і використання сучасної обчислювальної техніки, операційний модальний аналіз може бути ефективним інструментом для визначення динамічних характеристик конструкції при збудженні

конструкції внутрішніми і зовнішніми силами [1].

Для оцінки динамічних характеристик механічних систем (конструкцій) пропонується застосовувати кореляційні та спектральні функції. В практичних випадках лінійність системи відноситься до числа найбільш рідко виконуваних властивостей. Але, якщо досліджувана система не є сильно нелінійною, то кореляційний та спектральний аналіз приведуть в більшості випадків до осмислених результатів, які описують найкращі (в середньоквадратичному сенсі) лінійні наближення для досліджуваних систем. Основні теоретичні положення кореляційного та спектрального аналізу, які використовуються в інженерних задачах, викладені в роботі [2].

Нехай випадкові процеси (механічні коливання) $\{x(t)\}$ та $\{y(t)\}$, які припускаються стаціонарними і ергодичними, такі, що їх можливо описати індивідуальними реалізаціями $x(t)$ і $y(t)$. Визначимо кореляційну функцію $x(t)$ і $y(t)$ для довільного τ як

$$C_{xy}(\tau) = E\{[x(t) - \mu_x][y(t + \tau) - \mu_y]\} = R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y, \quad (1)$$

де $R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt$ - взаємно коваріаційна функція; μ_x, μ_y - середні значення $x(t)$ і $y(t)$.

Спектральна щільність двох реалізацій $x(t)$ і $y(t)$ (взаємний спектр) визначається як перетворення Фур'є їх коваріаційної функції

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (2)$$

Якщо $\{x(t)\} = \{y(t)\}$ то $R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt$ називається коваріаційною функцією $x(t)$.

У випадку одностороннього спектру співвідношення (2) прийме вигляд

$$G_{xy}(f) = 2S_{xy}(f) = C_{xy}(f) - jQ_{xy}(f) = |G_{xy}(f)| e^{-j\theta_{xy}(f)}, \quad (3)$$

де $|G_{xy}(f)| = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)}$ - модуль спектра, $\theta_{xy}(f) = \arctg \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right]$ - фазовий кут.

Функція когерентності

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) G_{yy}(f)}, \quad 0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1. \quad (4)$$

Таким чином, певні оцінки основних динамічних властивостей можна отримати шляхом відповідного аналізу вихідних процесів, що є реакцією конструкції на певні збудження. Якщо на слабодемпфіровану конструкцію подіяло випадкове збудження, то спектр реакції, визначений в будь-якій точці конструкції, досягає максимуму на тих же частотах, на які доводиться максимум або спектру дії, або частотної характеристики конструкції. При цьому «гострі» максимуми частотної характеристики слабодемпфірованої механічної системи розташовуються на частотах, відповідних нормальним модам системи (резонансних частотах). Отже,

можна вважати, що максимуми спектру реакції свідчать, як правило, або про максимуми спектру дії, або про нормальні моди конструкції.

Для того, щоб відрізнити максимуми вихідного спектру, обумовлені вібраційними модами конструкції, від максимумів, викликаних максимумами вхідного спектру, можна скористатися тим фактом, що в першому випадку всі точки конструкція будуть або у фазі, або в протифазі в залежності виключно від форми нормальної моди. Дві поздовжньо розташовані точки переміщуються при поперечній вібрації у фазі у разі першої і третьої мод згину і в протифазі при другій і четвертій модах згину. Моди згину від мод кручення можна відрізнити за допомогою додаткових вимірювань фазового кута між двома датчиками, розташованими на протилежних сторонах конструкції на перпендикулярі до її поздовжньої осі. Вихідні сигнали від будь-яких двох таких датчиків, розташованих в поперечній площині, повинні бути у фазі у разі мод згину і в протифазі для мод кручення за умови, що моди повністю незв'язані. На тих частотах, на яких максимум вихідного спектру викликаний максимумом спектру дії, а не реакцією конструкції на резонансній частоті, фазовий кут між двома вихідними вимірюваннями прийме значення між нулем і 180° .

Для ілюстрації цих висновків в роботі [2] розглянуто експеримент, проведений на великій конструкції у відкритому морі. На морській платформі, яка міцно закріплена на його дні, встановлено три акселерометри, за допомогою яких проводяться вимірювання переміщень платформи як цілого, при цьому один із датчиків $y_1(t)$ знаходиться на правій найближчій до берега опорі недалеко від вершини конструкції, інші - $y_2(t)$ на правій найближчій до берега опорі трохи вище за рівень моря і $y_3(t)$ - на лівій дальній від берега опорі теж трохи вище за рівень моря.

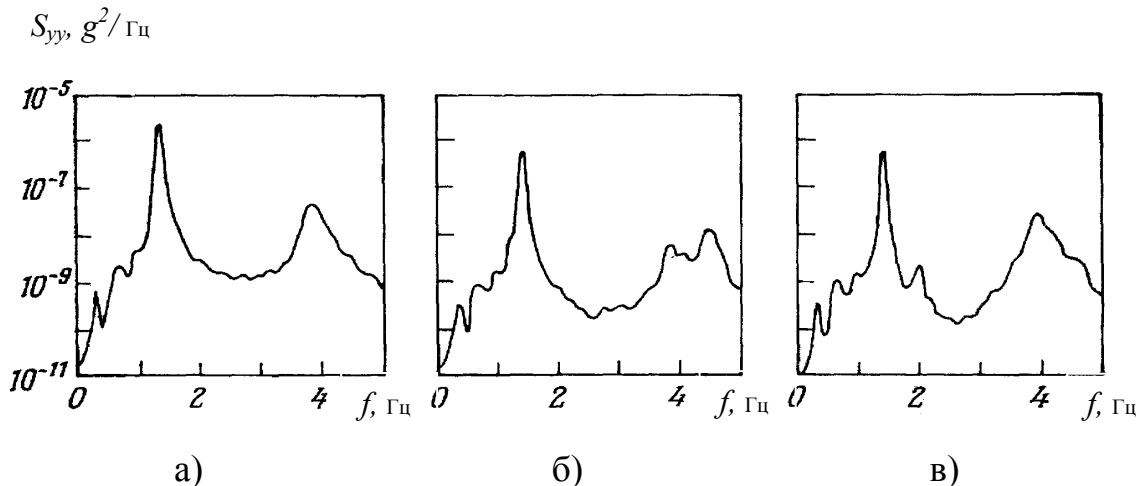


Рис. 1. Спектри реакції конструкції: а) $y_1(t)$; б) $y_2(t)$; в) $y_3(t)$

Спектри сигналів, що знімаються з акселерометрів, реєструючих хвилеву дію, приведені на рис. 1. На всіх трьох графіках, відповідних трьом акселерометрам, видно спектральні максимуми, але ці графіки не дозволяють ідентифікувати шукані нормальні моди конструкції. На рис. 2 показані модулі взаємних спектрів, фазові характеристики і функції когерентності. Ці результати більш показові. Зокрема, модулі

взаємних спектрів між $y_1(t)$ і $y_2(t)$, а також між $y_2(t)$ і $y_3(t)$ виявляють три максимуми, що виділяються, на частотах приблизно 1,4; 3,9 і 4,5 Гц. Крім того, є декілька менш значних максимумів на частотах нижче 1 Гц, але вони, ймовірно, свідчать про спектральні максимуми хвилевої дії. Фаза взаємного спектру, відповідна цим трьом головним максимумам, рівна або нулю, або 180° , що говорить про резонансну реакцію конструкції. Дані про фазу зведені в табл. 1. Результати при 1,4 Гц вказують на моду згину (коливання) конструкції, оскільки всі вимірювання знаходяться у фазі. При 3,9 Гц вимірювання знаходяться у фазі при поздовжньому розташуванні датчиків і в протифазі при їх поперечному розташуванні; отже, має місце мода кручення. При 4,5 Гц, навпаки, вимірювання знаходяться в протифазі при поздовжньому розташуванні датчиків і у фазі при їх поперечному розташуванні, що указує на наявність моди згину вищого порядку на цій частоті.

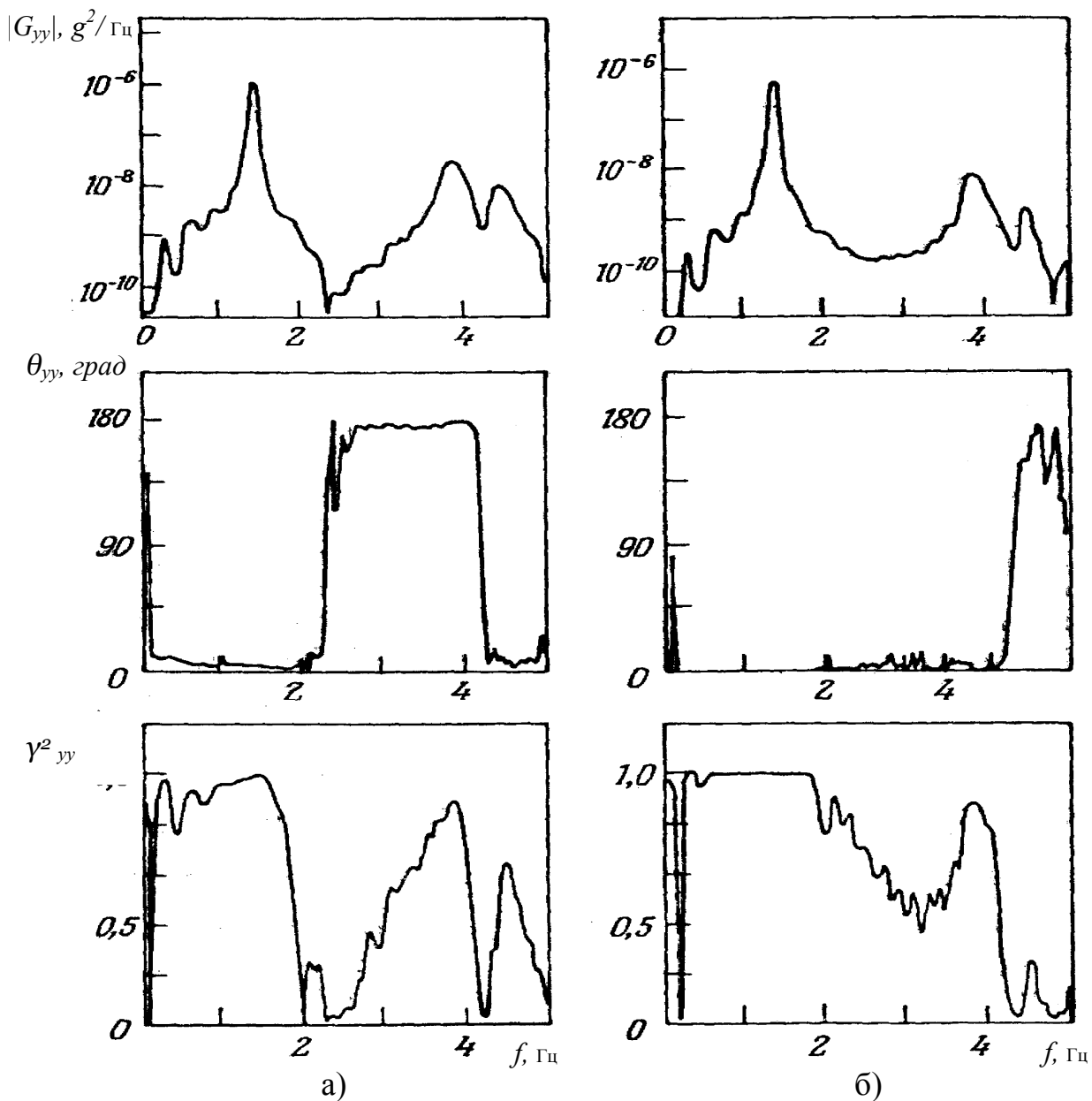


Рис. 2. Взаємні спектри і функції когерентності між вихідними сигналами датчиків: а) між $y_1(t)$ і $y_2(t)$; б) між $y_2(t)$ і $y_3(t)$

Функції когерентності, між $y_1(t)$ і $y_2(t)$, та між $y_2(t)$ і $y_3(t)$ зображені на рис. 2. Ці функції когерентності потрібні для визначення випадкових помилок оцінювання фаз, що, у свою чергу, дозволяє встановити статистичну значущість розбіжностей між очікуваними значеннями фази і її оцінками. Проте функції когерентності можуть виявитися корисними і при визначенні форм нормальних мод. Відмітимо, що функції когерентності на рис. 2 мають максимуми на частотах ідентифікованих нормальних мод. Це є слідством того, що нормальні моди з'являються як максимуми вихідного спектру, і тому відношення сигналу до шуму максимально на цих частотах.

Таблиця 1.

Результати вимірювань фази коливань конструкції

Пара вимірювань	Розташування датчиків	Відносна фаза на головних частотах, град		
		1,4 Гц	3,9 Гц	4,5 Гц
$y_1(t)$ і $y_2(t)$	Поздовжнє	0	0	180
$y_2(t)$ і $y_3(t)$	Поперечне	0	180	0

В силу відсутності аналітичних залежностей оцінки технічного стану конструкції від певних наборів динамічних характеристик, для визначення оцінки технічного стану заданої конструкції можливо скористатися методами теорії розпізнавання образів. Попередньо вводиться шкала оцінок технічного стану конструкції (тобто проводиться класифікація) і експертним шляхом та на основі апостеріорних даних формується навчальна таблиця. В навчальній таблиці зв'язується весь набір оцінок технічного стану заданої конструкції і значення відповідних динамічних характеристик.

В подальшому за набором значень динамічних характеристик, отриманих шляхом спектрального аналізу вимушених коливань певної механічної конструкції, на основі теорії розпізнавання образів і, зокрема, алгоритмів Ю.І. Журавльова [3], які базуються на обчисленні оцінок, виконується ідентифікація технічного стану цієї конструкції.

Висновок. Запропонований підхід до оцінки технічного стану механічних конструкцій на основі спектрального аналізу вимушених механічних коливань може бути ефективним в різних областях техніки і використовуватися при дослідженні технічного стану різного роду конструкцій від лопаток турбін до транспортних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Програмное обеспечение Zetlab // www.zetms.ru
2. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.-312 с.
3. Журавлев Ю.И., Никифоров В.В. Алгоритмы распознавания, основанные на вычислении оценок //Кибернетика. - 1971. - №3. - С. 1-11.