

УДК 539.3:534.1

В. Г. Дубенець, докт. техн. наук, професор
 О. В. Савченко, канд. техн. наук, доцент
 О. Л. Деркач, аспірант

Чернігівський національний технологічний університет, derkach.oleh@gmail.com

АКТИВНЕ ДЕМПФІРУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ КОЛИВАНЬ БАЛКИ З ЕЛЕКТРОВ'ЯЗКОПРУЖНИМИ НАКЛАДКАМИ

В останні роки для демпфірування коливань тонкостінних елементів конструкцій інтенсивно застосовуються активні методи, які реалізують за допомогою п'єзоелектричних елементів у якості сенсорів (sen) та актуаторів (act) [1]. Для компенсації коливань на певній частоті до актуатора за допомогою керуючого пристрою прикладається розрахована заздалегідь різниця потенціалів

$$\tilde{\varphi}_{act} = -i\omega p \tilde{\varphi}_{sen}, \quad (1)$$

де $i\omega p$ – пропорційний швидкості параметр керування сигналом актуатора, який визначається за відомим сигналом сенсора.

Для ефективної реалізації активного демпфірування коливань особливо важливим є врахування розсіяння енергії в матеріалі за допомогою методів, які базуються на реальних фізичних залежностях. У [2, 3] показано, що для аналізу нестационарних коливань неідеально-пружних елементів конструкцій можна ефективно використати частотний метод скінченних елементів ЧМСЕ (FFEM), при якому синтез конструкції і аналіз коливань проводиться безпосередньо у просторі інтегральних перетворень Фур'є, що дозволяє коректно ввести частотно-залежні комплексні модулі та аналізувати нестационарні коливання із заданими початковими умовами.

Скінченно-елементний варіант диференціальних рівнянь рівноваги відносно частотних зображень векторів переміщень \tilde{u} і електричних потенціалів $\tilde{\varphi}$ для конструкції з елекров'язкопружними [4] накладками має вигляд:

$$\begin{aligned} -\omega^2 M\tilde{u} + \tilde{K}_{uu}^E \tilde{u} - \left(\tilde{K}_{u\varphi}^{(sen)} \tilde{\varphi}_{sen} + \tilde{K}_{u\varphi}^{(act)} \tilde{\varphi}_{act} \right) &= F(i\omega), \\ \tilde{K}_{\varphi u}^{(sen)} \tilde{u} + \tilde{K}_{\varphi\varphi}^{(sen)} \tilde{\varphi}_{sen} &= 0, \quad \tilde{K}_{\varphi u}^{(act)} \tilde{u} + \tilde{K}_{\varphi\varphi}^{(act)} \tilde{\varphi}_{act} = Q(i\omega), \end{aligned} \quad (2)$$

де M – матриця мас;

\tilde{K}_{uu}^E , $\tilde{K}_{\varphi\varphi}^e$ – комплексні матриці механічної і електричної жорсткості при сталій напруженості електричного поля і сталих деформаціях;

$\tilde{K}_{u\varphi}^{(sen,act)}$, $\tilde{K}_{\varphi u}^{(sen,act)}$ – комплексні матриці електромеханічної жорсткості;

$F(i\omega)$, $Q(i\omega)$ – частотні зображення векторів вузлових сил і зарядів відповідно.

Вектор потенціалів сенсора $\tilde{\varphi}_{sen}$ визначається із системи рівнянь (2) і залежить від вектора переміщень \tilde{u} , тому рівняння (1) перепишемо наступним чином:

$$\tilde{\varphi}_{act} = -i\omega p \left[\tilde{K}_{\varphi\varphi}^{(sen)} \right]^{-1} \tilde{K}_{\varphi u}^{(sen)} \tilde{u}.$$

Виключивши електричні змінні з системи рівнянь (2), за алгоритмом оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT) отримаємо розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно зображень вектора переміщень u у часовому просторі

$$u(t) = IFFT \left[Z(i\omega)^{-1} F(i\omega) \right],$$

де $Z(i\omega) = \tilde{K}_{uu}^D - i\omega p \tilde{K}_{\phi u}^{(act)} \left[\tilde{K}_{\phi\phi}^{\varepsilon(sen)} \right]^{-1} \tilde{K}_{\phi u}^{(sen)} - \omega^2 M$ – так звана матриця динамічної жорсткості; $\tilde{K}_{uu}^D = \tilde{K}_{uu}^E + \tilde{K}_{\phi u}^{(sen)} \left[Q(i\omega) - \tilde{K}_{\phi\phi}^{\varepsilon(sen)} \right]^{-1} \tilde{K}_{\phi u}^{(sen)}$ – комплексна матриця жорсткості при ненульовій напруженості електричного поля.

Слід зазначити, що підбором оптимальних значень елементів зовнішнього електричного кола (шунта) $Q(i\omega)$ можна досягти збільшення рівня розсіяння енергії коливань за рахунок розсіяння електричної енергії в шунтах [1, с. 103–115].

Розглянемо задачу оптимізації для випадку активного демпфірування нестационарних коливань, яка полягає у визначенні параметра проекту p_{opt} за критерієм максимального демпфірування (максимального декременту Δ) з урахуванням обмежень $p_{min} \leq p \leq p_{max}$, обумовлених характеристиками пристроїв керування. Дану задачу оптимізації сформулюємо у вигляді узагальненої задачі нелінійного програмування:

$$\max \Delta(p, u). \quad (3)$$

Оптимальне значення цільової функції (3) було знайдено за 14 ітерацій за допомогою програми *fmincon* в системі MatLab. Результати розрахунків реакції стрижня при дії ударного навантаження для оптимального значення коефіцієнта $p_{opt} = 10^{-4}$ показано на рис. 1.

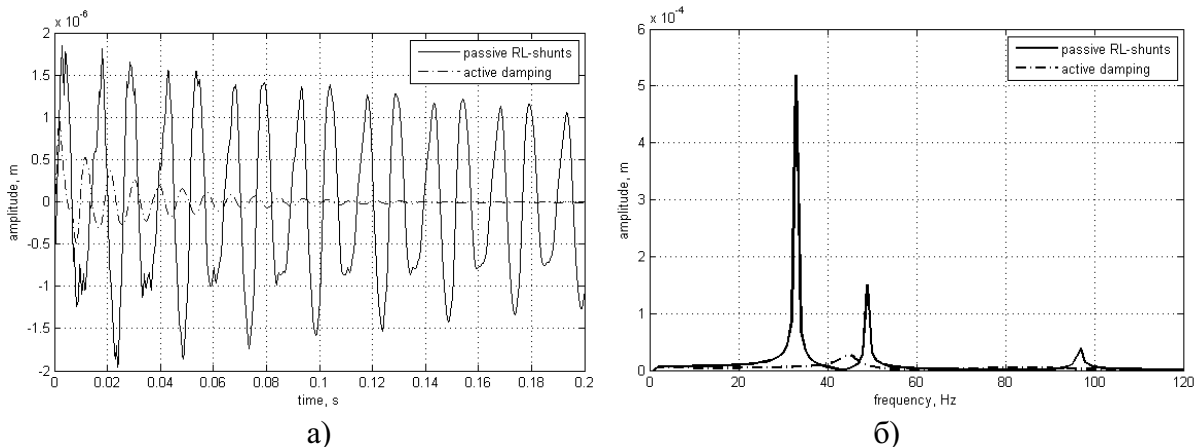


Рис. 1 – Реакція стрижня з п’єзоелектричними пасивними і активними накладками при дії ударного навантаження а); амплітудно-частотна характеристика б)

Таким чином, введення в конструкцію системи активного демпфірування з сталим керуючим параметром p_{opt} збільшує декремент коливань ($\Delta_{opt} = 0,4808$).

Розглянута методика скінченно-елементного моделювання у просторі інтегральних перетворень Фур’є дозволяє урахувати реальні фізичні залежності дисипативних властивостей матеріалів, що є важливим фактором на етапі проектування системи активного демпфірування коливань композиційних елементів конструкцій.

Список посилань

1. Preumont A. Vibration control of active structures: an introduction / A. Preumont. – Springer, 2011. – 453 p.
2. Дубенец В. Г. Колебания демпфированных композитных конструкций / В. Г. Дубенец, В.В. Хильчевский. – К.: Вища школа, 1995. – Т. 1. – 226 с.

3. Савченко Е. В. Пассивное демпфирование колебаний композитных конструкций: монография / Е. В. Савченко. – Нежин: Аспект-Поліграф, 2006. – 232 с.

4. Шульга Н. А. Колебания пьезоэлектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев; Отв. ред. Б. П. Маслов; АН УССР. Ин-т механики. – К.: Наукова думка, 1990. – 228 с.

УДК 621.7.044

Р. Г. Пузырь, канд. техн. наук, доцент

Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского, puzyruslan@gmail.com

Л. Э. Дикая, ассистент

Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского, lu.di@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

Технологический процесс изготовления стальных ободьев колес методом радиально – ротационного профилирования не имеет аналогов в обработке металлов давлением. Этот метод изучен недостаточно полно не только в экспериментальном плане, но и теоретически, что не позволяет создать надежную базу для расчетов переходов профилирования, энергосиловых параметров процесса и не позволяет в полной мере использовать все преимущества процесса, разработать научно обоснованные ресурсосберегающие технологические процессы и устройства [1, 2, 3].

Целью экспериментальных исследований по определению напряженно-деформированного состояния при профилировании ободьев колес было установление интегральных логарифмических деформаций по трем взаимно перпендикулярным направлениям обода колеса, интенсивности деформаций и напряжений, ресурса пластичности.

Деформированное состояние определялось методом координатных сеток на моделях ободьев колес с масштабным коэффициентом 1:4. Исследовались типовые представители узкопрофильных и широкопрофильных ободьев колес: 4,5Ex16; W8x16; 5,5Fx20; DW14Lx38; DW20Ax26; 9,00x22,5. Семейство координатных линий образовывало на поверхности заготовки координатную сетку с квадратными ячейками. Размеры квадратных ячеек составили 3×3 мм.

Так как до деформации неискаженная сетка имела форму квадратной ячейки, в которую можно вписать окружность, то для расчета главных логарифмических деформаций по переходам можно воспользоваться зависимостями [4]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_m &= \ln \frac{r_1}{r_0}, \\ \varepsilon_\theta &= \ln \frac{r_2}{r_0}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где r_0 , r_1 и r_2 – радиус круга и главные оси эллипса соответственно.

Третью составляющую истинных деформаций находили из условия постоянства объема без учета знаков деформаций [5]:

$$\varepsilon_m + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0, \quad (2)$$

где ε_r – логарифмическая деформация по толщине полуфабриката.

Деформированное состояние исследуемых участков по переходам оценивали интенсивностью логарифмических деформаций [6]: