

Дубенець В. Г.

Савченко О. В.

Деркач О. Л.

*Чернігівський
національний
технологічний
університет*

Dubenets V. G.

Savchenko O. V.

Derkach O. L.

*Chernigiv National
Technological University*

УДК 534.1: 539.3

НЕСТАЦІОНАРНІ КОЛИВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ З ЕЛЕКТРОВ'ЯЗКОПРУЖНИМИ ДИСИПАТИВНИМИ НАКЛАДКАМИ

Досліджено пасивне і активне демпфірування нестационарних коливань конструкцій з п'єзоелектричними накладками та підключеними RL-шунтами. Запропоновано методику скінченно-елементного моделювання smart-конструкцій у частотному просторі інтегральних перетворень Фур'є.

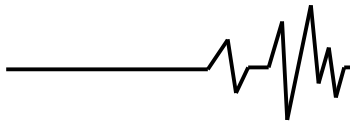
Ключові слова: нестационарні коливання, пасивне демпфірування, активне демпфірування, smart-конструкція, перетворення Фур'є, частотний метод скінченних елементів.

Вступ. Останнім часом, як свідчать публікації у провідних виданнях [1, 2], дедалі більшого розповсюдження у різних галузях, зокрема в авіабудуванні і космічній техніці, набувають так звані smart-матеріали та виготовлені на їх основі конструкції. До найбільш ефективних smart-матеріалів відносять п'єзоелектричні та електров'язкопружні матеріали. Електрична напруга, яка з'являється після попередньої поляризації п'єзоелектричного елемента при деформації, використовується у сенсорних пристроях або перетворюється у теплову енергію в матеріалі, а також в приєднаних електричних контурах (шунтах). В конструкціях накладки і прошарки з електров'язкопружних композиційних матеріалів можна використовувати як активні елементи, функціонування яких ґрунтується на явищі зворотного п'єзоелектричного ефекту. Активні і пасивні способи зменшення механічної енергії деформацій, зокрема при динамічних навантаженнях приводить до зменшення амплітуд коливань (демпфірування).

Метод досліджень. При малих динамічних деформаціях фізичні залежності для п'єзоелектричних матеріалів можна записати за допомогою інтегральних операторів лінійної теорії спадкового середовища – як для лінійного в'язкопружного тіла [3]. Однак безпосереднє використання інтегральних залежностей у задачах динаміки викликає значні труднощі, пов'язані з експериментальним визначенням фізичних

параметрів [4] і розв'язком систем інтегродиференціальних рівнянь. Складність задач обумовлює використання наближених методів. Найбільш поширеним методом синтезу складних композитних конструкцій є метод скінченних елементів, однак застосування методу для розв'язання задач динаміки неідеально-пружних конструкцій потребує вибору відповідних фізичних залежностей. У роботах [5, 6] показано, що для аналізу нестационарних коливань неідеально-пружних конструкцій можна ефективно використати частотний метод скінченних елементів ЧМСЕ (FFEM) [7], при якому синтез конструкції і аналіз коливань проводиться у просторі інтегральних перетворень Фур'є. Перевагами використання цього методу є можливість врахування залежностей лінійної теорії спадкових середовищ, зокрема коректного введення частотно-залежних комплексних модулів, а також можливість аналізу нестационарних коливань із заданими початковими умовами. При переході до частотного простору також суттєво полегшується синтез конструкцій з п'єзоматеріалів.

Розглянемо плоску задачу в координатах (x, y) . Рівняння коливань довільної електров'язкопружної конструкції об'ємом V та площею S , можна одержати, використавши варіаційний принцип Гамільтона-Остроградського [8].



$$\int_0^t \left(-\int_V \delta \mathbf{e}^T \mathbf{y} dV + \int_V \delta \dot{\mathbf{u}}^T \rho \dot{\mathbf{u}} dV - \int_{S_1} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{p}_S dS - \int_V \delta \mathbf{E}^T \mathbf{D} dV + \int_{S_2} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_S dS \right) dV = 0, \quad (1)$$

де $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{e} - \mathbf{e}^T \mathbf{E}$, $\mathbf{D} = \mathbf{e}\mathbf{e} + \mathbf{k}\mathbf{E}$ – лінійні фізичні залежності для плоского напруженого стану п'єзоелектричного тіла при сталому електричному полі; \mathbf{y} , \mathbf{D} , \mathbf{u} , \mathbf{u} – відповідно вектори механічних напружень електричної індукції механічних переміщень та електричного потенціалу; \mathbf{C} , \mathbf{e} , \mathbf{k} – тензори пружних п'єзо-

та діелектричних модулів відповідною; вектор зовнішнього навантаження \mathbf{p}_S на площі S_1 і електричний заряд \mathbf{q}_S на площі S_2 ; ρ – густина матеріалу; t – час; матричний та векторний диференціальні оператори у даному випадку матимуть вигляд:

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}, \quad \nabla^T = [\partial/\partial x \quad \partial/\partial y]. \quad (2)$$

Введемо матриці функцій, апроксимуючих переміщення $(u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{12})$ і потенціали $(\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_6)$ по товщині плоского шестивузлового скінченного елемента (рис. 1):

$$\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{N}_u \mathbf{u}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \mathbf{N}_\varphi \boldsymbol{\varphi}, \quad (3)$$

де \mathbf{N}_u , \mathbf{N}_φ матриці функцій апроксимації [6]:

$$\mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_6 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots & 0 & N_6 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{N}_\varphi = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_6],$$

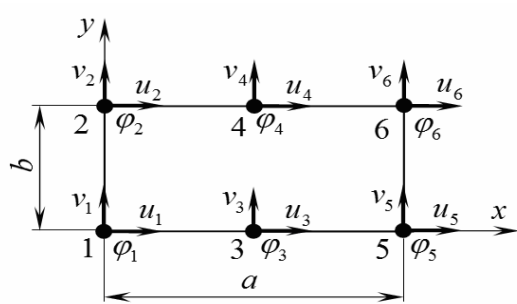


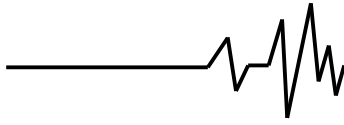
Рис. 1. Шестивузловий електропружний скінченний елемент

Після підстановки (3) в (1) і виконавши перетворення [7], отримаємо скінченно-елементний варіант диференціальних рівнянь руху. У відповідності з методикою розрахунку в'язкопружних систем, запропонованою у [5, 6] ці рівняння необхідно записати у просторі перетворень Фур'є. Дана методика дозволяє коректно ввести комплексні пружні п'єзо-

діелектричні модулі без додаткових перетворень експериментальних даних [8]. Рівняння динаміки електров'язкопружної дисипативної конструкції у частотному просторі матимуть вигляд рівнянь лінійної теорії пружності з комплексними модулями відносно зображень переміщень \mathbf{u}_ω і потенціалу $\boldsymbol{\varphi}_\omega$:

$$\lambda^2 \mathbf{M} \mathbf{u}_\omega + \tilde{\mathbf{K}}_u \mathbf{u}_\omega + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi} \boldsymbol{\varphi}_\omega = \tilde{\mathbf{F}}(i\omega) + \lambda \mathbf{M} \dot{\mathbf{u}}_t(0) + \mathbf{M} \mathbf{u}_t(0), \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi u} \mathbf{u}_\omega + \tilde{\mathbf{K}}_\varphi \boldsymbol{\varphi}_\omega = \tilde{\mathbf{Q}}(i\omega), \quad \lambda = i\omega,$$



де $\lambda = i\omega$, $i = \sqrt{-1}$; $\dot{\mathbf{u}}_t$, \mathbf{u}_t – швидкості та переміщення у початковий момент часу; \mathbf{M} – матриця мас, $\tilde{\mathbf{K}}_u$ – матриця жорсткості, $\tilde{\mathbf{K}}_\varphi$ – матриця електричної «жорсткості», $\tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}$, $\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi u}$ – матриці, які відповідають прямому та зворотному п'єзоелектричному ефекту відповідно:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \int_V \mathbf{N}_u^T \rho \mathbf{N}_u dV, \quad \tilde{\mathbf{K}}_u(i\omega) = \int_V (\mathbf{A}\mathbf{N}_u)^T \tilde{\mathbf{C}}(i\omega) \mathbf{A}\mathbf{N}_u dV, \\ \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}(i\omega) &= \int_V (\mathbf{A}\mathbf{N}_u)^T \tilde{\mathbf{e}}(i\omega) \nabla \mathbf{N}_\varphi dV, \quad \tilde{\mathbf{K}}_\varphi(i\omega) = \int_V (\nabla \mathbf{N}_\varphi)^T \tilde{\mathbf{k}}(i\omega) \nabla \mathbf{N}_\varphi dV, \\ \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi u}(i\omega) &= \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^T(i\omega), \quad \tilde{\mathbf{F}}(i\omega) = \int_0^t \int_S \mathbf{N}_u^T \mathbf{p}_S e^{-\lambda t} dS dt, \quad \tilde{\mathbf{Q}}(i\omega) = \int_0^t \int_S \mathbf{N}_\varphi^T \mathbf{q}_S e^{-\lambda t} dS dt, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\tilde{\mathbf{C}}(i\omega) = \mathbf{C}'(\omega) + i\mathbf{C}''(\omega)$ – матриця частотно-залежних комплексних пружних модулів;
 $\tilde{\mathbf{e}}(i\omega) = \mathbf{e}'(\omega) + i\mathbf{e}''(\omega)$,
 $\tilde{\mathbf{k}}(i\omega) = \mathbf{k}'(\omega) + i\mathbf{k}''(\omega)$ – відповідно матриці комплексних п'єзоелектричних та діелектричних модулів;
 $\tilde{\mathbf{F}}(i\omega)$, $\tilde{\mathbf{Q}}(i\omega)$ – зображення Фур'є зовнішнього механічного навантаження та вузлових зарядів.

Для того, щоб знайти розв'язок системи лінійних рівнянь (5) відносно зображень переміщень, виключимо змінну \mathbf{u}_ω . Зображення Фур'є вузлових значень потенціалу має вигляд:

$$\mathbf{u}_\omega = (\tilde{\mathbf{Q}}(i\omega) - \tilde{\mathbf{K}}_\varphi)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^T \mathbf{u}_\omega. \quad (7)$$

Значення зображення потенціалу (7) підставимо у перше рівняння системи (5), враховуючи при цьому комплексні складові матеріальних тензорів. Отримаємо розв'язок рівнянь відносно зображень механічних переміщень:

$$\mathbf{u}_\omega = \mathbf{Z}(i\omega)^{-1} (\tilde{\mathbf{F}}(i\omega) + \lambda \mathbf{M} \dot{\mathbf{u}}_t(0) + \mathbf{M} \mathbf{u}_t(0)), \quad (8)$$

де $\mathbf{Z}(i\omega)$ – матриця динамічної жорсткості:

$$\mathbf{Z}(i\omega) = \tilde{\mathbf{K}}_u + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi} (\tilde{\mathbf{Q}}(i\omega) - \tilde{\mathbf{K}}_\varphi)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^T + \lambda^2 \mathbf{M}, \quad (9)$$

Повернення в часовий простір відбувається за допомогою чисельного (дискретного) оберненого перетворення Фур'є, а саме за алгоритмом оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT):

$$\mathbf{u}_t = \text{IFFT}(\mathbf{u}_\omega), \quad (10)$$

Пасивне демпфірування. Розглянемо випадок, коли розсіяння електричної енергії, в основному, відбувається в приєднаних до п'єзоелементів електричних контурах з опорів R та котушок L, які утворюють RL-шунт. Диференціальне рівняння електричного RL-шунта з паралельним з'єднанням елементів [9] у просторі Фур'є записуємо у вигляді:

$$\tilde{\mathbf{Q}}(i\omega) = \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi R} + \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi L}, \quad (11)$$

де $\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi R}$, $\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi L}$ – відповідно матриці електричної «жорсткості» скінченного елемента (рис. 2, а).

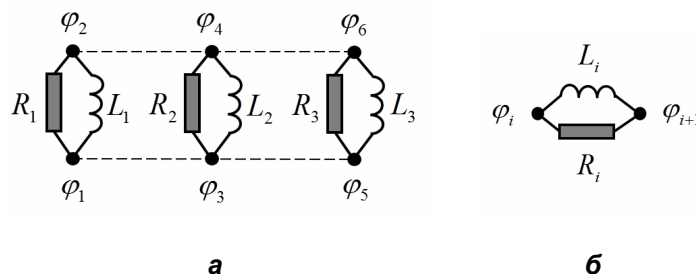
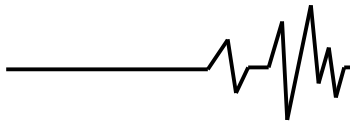


Рис. 2. Скінченні елементи шунта



Кожен шунт (рис. 2, б) має такі матриці електричної «жорсткості»:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi R} = \left(\frac{1}{\lambda R} \right) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi L} = \left(\frac{1}{\lambda^2 L} \right) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Синтез скінченного елемента з RL-шунтами (рис. 2) виконується згідно зі стандартною процедурою методу скінченних елементів [10]. Граничні умови в контакт "металева основа/п'єзоелемент" (метал/

діелектрик) забезпечуються використанням функцій апроксимації (4). Умова заземлення одного з виводів шунта враховується шляхом присвоєння нульових рядків і стовпчиків відповідним "заземленим" вузлам шунта.

Розглянемо приклад розрахунку коливань конструкції з електров'язкопружними дисипативними накладками, скінченно-елементну модель якої зображено на рис. 3.

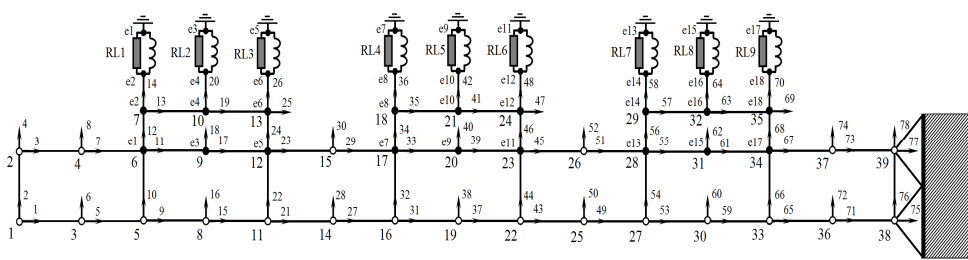


Рис. 3. Скінченно-елемента модель конструкції з RL-шунтами

Враховуючи рівняння (11) матриця динамічної жорсткості для конструкції з RL-шунтами матиме вигляд:

$$\mathbf{Z}_{Shunt}(i\omega) = \tilde{\mathbf{K}}_u + \tilde{\mathbf{K}}_{uf} \left(\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi R} + \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi L} - \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi} \right)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{uf}^T + \lambda^2 \mathbf{M} \quad (13)$$

У випадку, коли шунт відключено ($\tilde{\mathbf{Q}} = 0$):

$$\mathbf{Z}_{Open}(i\omega) = \tilde{\mathbf{K}}_u - \tilde{\mathbf{K}}_{uf} \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{uf}^T + \lambda^2 \mathbf{M}, \quad (14)$$

а також при відсутності п'єзоелектричного ефекту:

$$\mathbf{Z}_{Mech}(i\omega) = \tilde{\mathbf{K}}_u + \lambda^2 \mathbf{M}. \quad (15)$$

Результати визначення реакції стержня на імпульсне навантаження, яке прикладається до узагальненої координати 4 (рис. 3) та амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) для першої форми показано на рис. 4, 5.

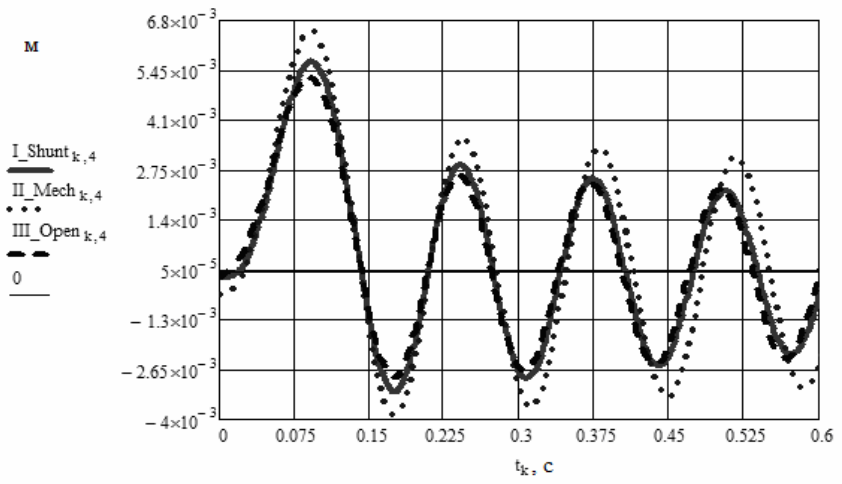


Рис. 4. Осцилограми вільних коливань стержня (— з шунтом (13), •••• без шунта (15), - - з відкритими електродами (14))

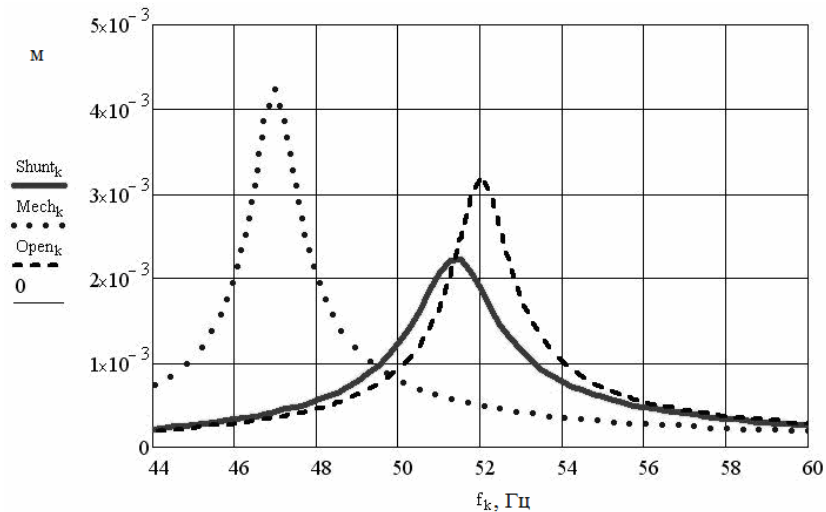
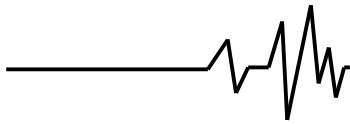


Рис. 5. Реакція та АЧХ першої форми коливань (— з шунтом (13), •••• без шунта (15), -- з відкритими електродами (14))

Активне демпфірування. Регулювання різниці потенціалів на електродах актуатора φ_a може бути здійснено із врахуванням показників сенсора φ_s . На рис. 5 показано принципову

схему підключення сенсора і актуатора, які мають протилежні напрямки поляризації і з'єднані у контур від'ємного зворотного зв'язку.

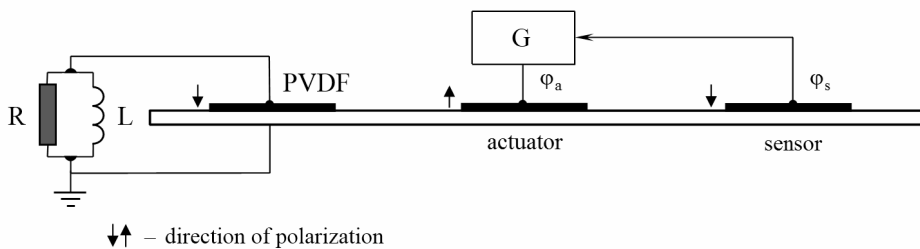


Рис. 5. Принципова схема активного демпфірування фрагмента конструкції

Керування потенціалом актуатора будемо здійснювати за таким алгоритмом:

$$\varphi_a = -G\dot{\varphi}_s \quad (16)$$

де G – коефіцієнт підсилення похідної за часом потенціалу сенсора (параметр керування).

Для випадку активного контролю коливань, скінченно-елементний варіант диференціальних рівнянь лінійної електропружності (5), доповнюємо рівняннями для сенсора (s) і актуатора (a).

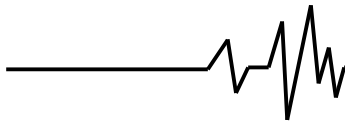
$$\begin{aligned} \lambda^2 \mathbf{M} \mathbf{u}_\omega + \tilde{\mathbf{K}}_u \mathbf{u}_\omega + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^s \varphi_s^s + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^a \varphi_a^a &= \tilde{\mathbf{F}}(i\omega) + \lambda \mathbf{M} \dot{\mathbf{u}}_t(0) + \mathbf{M} \mathbf{u}_t(0), \\ \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi u}^s \mathbf{u}_\omega - \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^s \varphi_s^s &= \tilde{\mathbf{Q}}_s(i\omega), \quad \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi u}^a \mathbf{u}_\omega + \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^a \varphi_a^a &= \tilde{\mathbf{Q}}_a(i\omega) \end{aligned} \quad (17)$$

Із даної системи рівнянь визначаємо різницю потенціалів, яку необхідно надати на електроди актуатора:

$$\mathbf{u}_\omega^a = -\lambda G \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{s-1} \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s T} \mathbf{u}_\omega \quad (18)$$

Матриця динамічної жорсткості системи для активного керування:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(i\omega) &= \tilde{\mathbf{K}}_u + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^s \left(\tilde{\mathbf{Q}}_s(i\omega) + \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^s \right)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s T} - \\ &- \lambda \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^a G \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{s-1} \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s T} + \lambda^2 \mathbf{M} \end{aligned} \quad (19)$$



Для аналізу розсіяння енергії коливань в конструкції потрібно визначити власні вектори і числа матриці динамічної жорсткості з умови

$$|Z(i\omega)| = 0. \quad (20)$$

Результати розрахунку коливань конструкції при оптимальному значенні

керуючого параметра G за критерієм максимального демпфірування з урахуванням обмежень на характеристики пристроїв керування і підсилення сигналів показано на рис. 6.

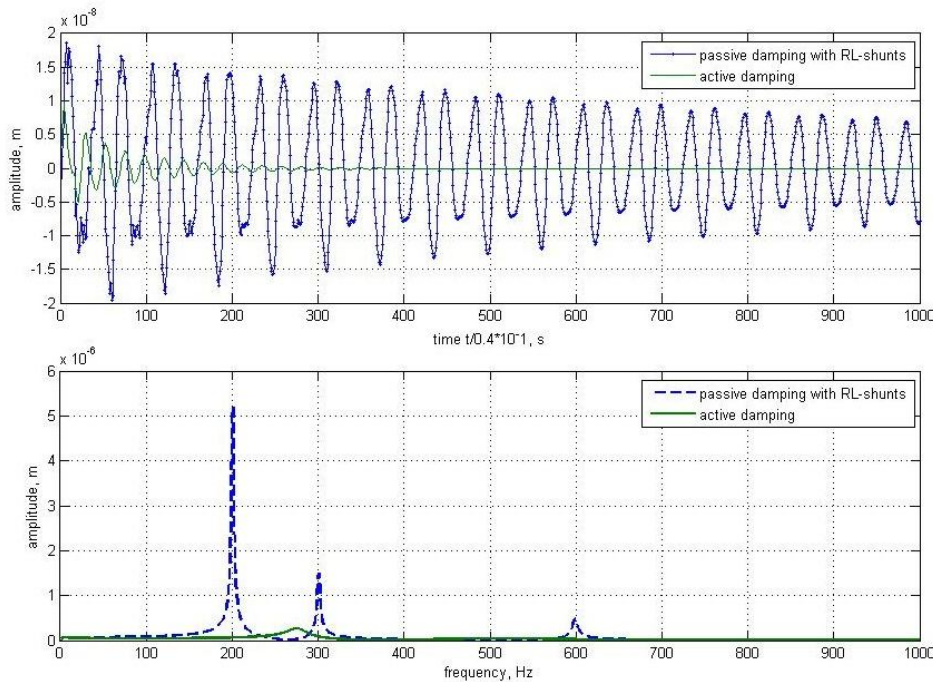


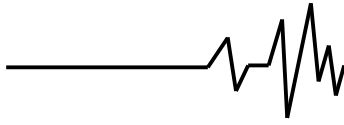
Рис. 6. Реакція стержня на ударне навантаження і АЧХ другої форми

Висновок. Скінченно-елементний аналіз у просторі перетворень Фур'є може використовуватись для розрахунків пасивних і активних п'єзоелектричних конструкцій і композитів на їх основі при нестационарному навантаженні. Перевагами використання методики є можливість визначення реакцій від дії зовнішнього навантаження довільного спектрального складу й врахування залежності фізичних характеристик матеріалу від частоти. Повернення до часового простору проводиться тільки на останньому кроці обчислень.

Згідно з результатами розрахунків застосування п'єзоелектричних елементів із приєднаним RL-шунтом, зменшує величину реакції конструкції даного типу при нестационарних навантаженнях. Найбільший декремент і найменша амплітуда переміщення від дії імпульсного та ударного навантаження спостерігаються у конструкції з активним керуванням. Підбором оптимального значення регулюючого параметра можна значно підвищити декремент коливань конструкції.

Список використаних джерел

1. Encyclopedia of smart materials / Mel Schwartz, editor-in-chief. "Wiley-Interscience publication", 2002. – 1190 pp.
2. B. Bandyopadhyay, T.C. Manjunath, M. Umamathy Modeling, Control and Implementation of Smart Structures: A FEM-State Space Approach / Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007. – 282 pp.
3. 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.
4. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин – М.: Госстройиздат, 1960. – 129 с.
5. Дубенец В.Г. Колебания демпфированных композитных конструкций / В.Г. Дубенец, В.В. Хильчевский. – К.: Вища школа, 1995. – Т. 1. – 226 с.
6. Савченко Е.В. Пассивное демпфирование колебаний композитных



конструкцій: монографія / Е.В. Савченко. – Нежин: Аспект-Поліграф, 2006. – 232 с.

7. Дубенець В.Г. Основи методу скінченних елементів: Навчальний посібник / В.Г. Дубенець, В.В. Хільчевський, О.В. Савченко. – Чернігів: ЧДТУ, 2007. – 348 с.

8. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен [Пер. с англ. М.И. Рейтмана] – М.: Мир, 1974. – 338 с.

9. Павловський М.А. Теоретична механіка / М.А. Павловський. – К.: Техніка, 2002. – 510 с.

10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Список джерел в транслітерації

1. Encyclopedia of smart materials / Mel Schwartz, editor-in-chief. "Wiley-Interscience publication", 2002. – 1190 pp.

2. B. Bandyopadhyay, T.C. Manjunath, M. Umamathy Modeling, Control and Implementation of Smart Structures: A FEM-State Space Approach / Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007. – 282 pp.

3. Shulga N.A. Kolebaniya piezoelektricheskikh tel / N.A. Shulga, A.M. Bolkisev; Otv. red. B.P. Maslov; AN USSR. In-t mekhaniki. – К.: Naukova dumka, 1990. – 228 с.

4. Sorokin E.S. K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem / E.S. Sorokin – М.: Gosstroyizdat, 1960. – 129 с.

5. Dubenets V.G. Kolebaniya dempfirovannykh kompozitnykh konstruktsiy / V.G. Dubenets, V.V. Khilchevskiy. – К.: Vyscha shkola, 1995. – Т. 1. – 226 с.

6. Savchenko E.V. Passivnoe dempfirovanie kolebaniy kompozitnykh konstruktsiy: monografiya / E.V. Savchenko. – Nezhin: Aspekt-Poligraf, 2006. – 232 с.

7. Dubenets V.G. Osnovy metodu skinchennykh elementiv. Navchalnyy posibnyk / V.G. Dubenets, V.V. Khilchevskiy, O.V. Savchenko. – Chernihiv: CDTU, 2007. – 348 с.

8. Kristensen R. Vvedenie v teoriyu vyzkouprugosti / R. Kristensen [Per. s angl. M.I. Reytmanna] – М.: Mir, 1974. – 338 с.

9. Pavlovskiy M.A. Teoretichna mekhanika / M. A. Pavlovskiy. – К.: Tekhnika, 2002. – 510 с.

10. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike / O. Zenkevich. – М.: Mir, 1975. – 541 с.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИМИ ДИССИПАТИВНЫМИ НАКЛАДКАМИ

Аннотация. Исследовано пассивное демпфирование нестационарных колебаний конструкций с пьезоэлектрическими накладками и подключенными RL-шунтами. Предложена методика конечно-элементного моделирования smart-конструкций в частотном пространстве интегральных преобразований Фурье. Показано, что конечно-элементный анализ в пространстве преобразований Фурье может использоваться для расчетов пассивных и активных пьезоэлектрических конструкций и композитов на их основе при действии нестационарных нагрузок.

Ключевые слова: нестационарные колебания, пассивное демпфирование, активное демпфирование, smart-конструкция, преобразование Фурье, частотный метод конечных элементов.

NON-STATIONARY VIBRATIONS OF STRUCTURES WITH ELECTRO-VISCOELASTIC DISSIPATIVE PATCHES

Annotation. The non-stationary vibration passive and active damping of structures with piezoelectric patches and RL-shunts was investigated. The finite-element modeling technique of smart structures in Fourier transform frequency space is proposed.

Key words: non-stationary vibrations, passive damping, active damping, smart-constructions, Fourier transformation, frequency finite element method.