

KHAI THÁC NĂNG LƯỢNG ÁP ĐIỆN TỪ RUNG ĐỘNG CỦA DẦM CẦU
CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG
EXPLOITING PIEZOELECTRIC ENERGY FROM VIBRATION OF BRIDGE BEAM
SUBJECTED TO MOVING LOAD

Phí Thị Hằng

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 29/07/2022, Ngày chấp nhận đăng: 29/08/2022, Phản biện: TS. Bùi Văn Bình

Tóm tắt:

Trong thực tế, năng lượng mà các phương tiện giao thông truyền xuống mặt đường là rất đáng kể mà vẫn là một dạng năng lượng dư thừa chưa tận dụng được. Bài báo này đặt vấn đề xây dựng cơ sở khoa học cho việc tính toán điện năng thu lại được từ rung động của dầm cầu nhờ một lớp áp điện dán vào mặt dưới của dầm chịu tải trọng di động. Sử dụng mô hình cổ điển của kết cấu dầm với giả thiết liên kết giữa dầm và lớp áp điện là lý tưởng (không bong tách và không trượt) đã thiết lập được phương trình dao động của dầm có lớp áp điện chịu tải trọng điều hòa di động với vận tốc không đổi. Từ đó, dựa trên hiệu ứng áp điện đã đưa ra công thức tính điện năng được tạo ra trong lớp áp điện khi dầm rung động do tải trọng di động. Để minh họa cho các công thức nhận được, đã tiến hành tính toán số trong một ví dụ cụ thể để nghiên cứu ảnh hưởng của vận tốc của tải trọng di động và chiều dày lớp áp điện đến điện áp ra của lớp áp điện.

Từ khóa:

Vật liệu áp điện, dầm đàn hồi, tải trọng di động.

Abstract:

In the practice, the kinetic energy of moving transport vehicles transferred to the road surface is a significant amount that has not been recovered for energy needs. This paper is devoted to develop theoretical fundamentals for exploiting energy from the ambient traffic vehicles moving on a bridge beam by using piezoelectric material. Using the classical theory of beam and assumption that connection between beam and piezoelectric layer is ideal (not delaminated and no shear), governing equations for vibration of beam bonded with piezoelectric layer under harmonic load moving on the beam with constant speed are established in the frequency domain. Therefore, the formulas for calculating the voltage produced in the piezoelectric layer due to the beam vibration have been derived and used for numerically investigating the effect of load velocity and piezoelectric layer thickness on the output voltage of the piezoelectric layer.

Keywords:

Piezoelectric material, elastic beams, moving load.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vật liệu áp điện là loại vật liệu thông

minh có khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học thành năng lượng điện và ngược

lại. Cụ thể hơn, nếu vật liệu áp điện chịu tác dụng của một áp lực thì bản thân nó bị phân cực, từ đó sinh ra một điện áp giữa hai cực. Ngược lại, nếu cấp cho vật liệu áp điện một nguồn điện thì nó sẽ bị biến dạng, tức tạo ra một năng lượng cơ học. Để khai thác lợi ích từ tính chất thuận nghịch này, người ta chế tạo ra vật liệu áp điện ở dạng gốm (ceramics) hay polyme có tính áp điện cao hơn nhiều vật liệu áp điện tự nhiên.

Lúc đầu, vật liệu áp điện chỉ được sử dụng để chế tạo các đầu đo (sensors) cho các thiết bị đo (rung động, âm...) và các bộ kích thích (actuator) trong điều khiển. Gần đây khi xu thế hướng tới năng lượng tái tạo, bảo vệ môi trường thì người ta bắt đầu nghĩ đến khả năng sử dụng vật liệu áp điện để phát điện [1-4]. Đáng chú ý là các nghiên cứu tái tạo năng lượng từ các phương tiện giao thông [5], cụ thể là hệ thống đường sắt [6-7]. Bài báo này đã thiết lập được các phương trình, công thức tính toán năng lượng thu thập được do các tấm áp điện được đặt dưới các thanh tà vẹt đường sắt. Các tác giả của công trình [8] đã nghiên cứu các bộ thu thập năng lượng trên các cầu cao tốc và bài toán thu thập năng lượng từ chuỗi phương tiện di động trên cầu đã được giải quyết trong [9].

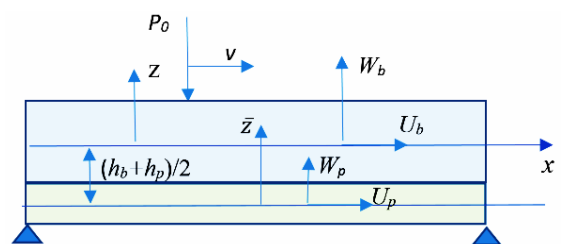
Bài báo này sử dụng mô hình tổng quát đã thiết lập trong [8] để nghiên cứu khả năng tái tạo năng lượng từ các phương tiện giao thông chạy trên dầm cầu bằng vật liệu áp điện. Phương pháp nghiên cứu là phương pháp hiện đại được áp dụng trong luận án

tiên sỹ của tác giả [10] và các công bố sau đó của tác giả với thầy hướng dẫn [11-12], gọi là phương pháp phổ đã được GS. Nguyễn Tiến Khiêm đề xuất và phát triển để giải quyết bài toán dao động của dầm chịu tải trọng di động.

Điểm khác biệt của nghiên cứu này so với các công bố trước, ở đó người ta xét bài toán trong miền thời gian, còn ở đây xét bài toán trong miền tần số. Mục tiêu của bài báo: xây dựng mô hình dầm đàn hồi có lớp áp điện chịu tải trọng di động; tính toán đáp ứng cơ học của dầm có lớp áp điện và từ đó tính toán hiệu điện thế sinh ra giữa hai điện cực của lớp áp điện. Cả đáp ứng cơ cũng như điện được nghiên cứu phụ thuộc vào vận tốc di chuyển của tải trọng hằng số và chiều dày lớp áp điện. Trường hợp tải trọng điều hòa di động đã mở rộng khả năng điều tiết năng lượng có thể thu thập được bằng cách chọn tần số tải trọng phù hợp.

2. BÀI TOÁN DAO ĐỘNG CƯỜNG BỨC CỦA DẦM CÓ LỚP ÁP ĐIỆN

Xét một dầm đàn hồi phẳng có chiều dài L , diện tích tiết diện ngang $A_b = b \times h_b$, mô đun đàn hồi và khối lượng riêng E, ρ có một lớp vật liệu áp điện phía dưới có chiều dày h_p và có cùng chiều rộng và chiều dài như của dầm (hình 1).



Hình 1. Mô hình dầm đàn hồi có lớp áp điện

Dầm chịu một tải trọng $P(t)$ di động trên dầm với vận tốc không đổi v . Xét hệ tọa độ cho dầm có gắn lớp áp điện nêu trên và dựa trên lý thuyết dầm cổ điển, chúng ta có các mối liên hệ giữa trường chuyển vị, biến dạng và ứng suất của dầm chủ như sau:

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0(x, t) - zw'_0(x, t); \\ w(x, z, t) &= w_0(x, t); \\ \sigma_x &= E\varepsilon_x; \varepsilon_x = u'_0 - zw''_0 \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó $u(x, z, t), w(x, z, t)$ là chuyển vị dọc trục và chuyển vị ngang (độ võng) của dầm tại điểm bất kỳ trong dầm, $u_0(x, t), w_0(x, t)$ là chuyển vị của dầm trên trục giữa, θ là góc xoay của mặt cắt ngang; ε_x, σ_x là biến dạng và ứng suất.

Xét lớp áp điện như một kết cấu dầm thỏa mãn điều kiện của lý thuyết dầm cổ điển, khi đó ta có

$$\begin{aligned} u_p(x, \bar{z}, t) &= u_{p0}(x, t) - \bar{z}w'_{p0}(x, t), \\ w_p(x, \bar{z}, t) &= w_{p0}(x, t); \\ \varepsilon_{px} &= u'_{p0} - \bar{z}w''_{p0}(x, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Mối quan hệ giữa ứng suất biến dạng của

$$\begin{aligned} \Pi &= \Pi_b + \Pi_p = (1/ \\ 2) \int_0^L &\left\{ EA_b u_0'^2 + EI_b w_0''^2 + C_{11}^p A_p u_0'^2 + 2C_{11}^p A_p h u_0' w_0'' + C_{11}^p [I_p + A_p h^2/4] w_0''^2 \right\} dx \\ &- 2h_{13} A_p D u_0' - h_{13} A_p D h w_0'' + \beta_{33}^p A_p D^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$T = T_p + T_p = (1/2) \int_0^L \{ I_{11} \dot{u}_0^2 + 2I_{12} \dot{u}_0 \dot{w}'_0 + I_{22} \dot{w}'_0^2 + I_{11} \dot{w}_0^2 \} dx,$$

trong đó đưa vào các ký hiệu

$$A_{11} = EA_b + C_{11}^p A_p; A_{12} = C_{11}^p A_p h; A_{22} = EI_b + C_{11}^p (I_p + A_p h^2); \quad (8)$$

dầm áp điện có dạng:

$$\begin{aligned} \sigma_{px} &= C_{11}^p \varepsilon_{px} - h_{13} D; \\ \varepsilon &= -h_{13} \varepsilon_{px} + \beta_{33}^p D \end{aligned} \quad (3)$$

trong đó $C_{11}^p, h_{13}, \beta_{33}^p$ lần lượt là môđun đàn hồi, hằng số áp điện và điện môi; ε và D lần lượt là điện trường và mật độ thông lượng của lớp áp điện.

Giả thiết lớp áp điện được gắn chặt (không bị trượt) so với dầm chủ, khi đó điều kiện liên tục của chuyển vị có dạng:

$$\begin{aligned} u\left(x, -\frac{h_b}{2}, t\right) &= u_p\left(x, \frac{h_p}{2}, t\right), \\ w(x, -h_b/2, t) &= w_p(x, h_p/2, t) \end{aligned} \quad (4)$$

từ đó ta có:

$$\begin{aligned} u_{p0} &= u_0 + w'_0 h, \\ h &= (h_b + h_p)/2, w_{p0} = w_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Do đó ta nhận được:

$$\begin{aligned} u_p(x, \bar{z}, t) &= u_0(x, t) - (\bar{z} - h)w'_0(x, t), \\ \varepsilon_{px} &= u'_0 - (\bar{z} - h)w''_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Sử dụng các mối liên hệ (2), (5) và (6) ta tính được thế năng và động năng của dầm áp điện bằng:

$$I_{11} = \rho A_b + \rho_p A_p; I_{12} = \rho_p A_p h; I_{22} = \rho I_b + \rho_p I_p + \rho_p A_p h^2$$

Công của lực ngoài, tức tải trọng di động, bằng

$$W = \int_0^L P(t)\delta(x - vt)w_0(x, t)dx, \quad (9)$$

trong đó $\delta(x)$ là hàm Dirac có các tính chất:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty: x = 0 \\ 0: x \neq 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\delta(x - x_0)dx = f(x_0) \quad (10)$$

Thay các biểu thức (7) và (9) vào nguyên lý Hamilton:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - \Pi + W)dt = 0,$$

sau đó sử dụng quy tắc biến phân và tích phân từng phần ta nhận được phương trình chuyển động của hệ dầm kép nêu trên ở dạng

$$(I_{11}\ddot{u}_0 - A_{11}u_0'') + (I_{12}\ddot{w}_0' - A_{12}w_0''') + h_{13}A_p D' = 0;$$

$$\begin{aligned} I_{11}\ddot{w}_0 + A_{22}w_0'''' + A_{12}u_0''' - I_{12}\ddot{u}_0' - \\ I_{22}\ddot{w}_0'' - h_{13}A_p h D''/2 = P(t)\delta(x - vt); \end{aligned} \quad (11)$$

$$h_{13}A_p(u_0' + hw_0''/2) - \beta_{33}^p A_p D = 0.$$

Từ phương trình cuối trong (11) ta tìm được $D = h_{13}(u_0' + hw_0'')/\beta_{33}^p$, do đó thế biểu thức cuối vào các phương trình còn lại trong (11) ta được

$$\begin{aligned} (I_{11}\ddot{u}_0 - B_{11}u_0'') + (I_{12}\ddot{w}_0' - B_{12}w_0''') = 0; \\ I_{11}\ddot{w}_0 + B_{22}w_0'''' + B_{12}u_0''' - I_{12}\ddot{u}_0' - \\ I_{22}\ddot{w}_0'' = P(t)\delta(x - vt), \end{aligned} \quad (12)$$

trong đó đã sử dụng các ký hiệu:

$$\begin{aligned} B_{11} &= A_{11} - A_p h_{13}^2/\beta_{33}^p = EA_b + E_p A_p, B_{12} \\ &= A_{12} - A_p h h_{13}^2/\beta_{33}^p \\ &= E_p A_p h, \end{aligned}$$

$$B_{22} = A_{22} - A_p h^2 h_{13}^2/\beta_{33}^p = EI_b + C_{11}^p I_p + E_p A_p h^2; \quad E_p = C_{11}^p - h_{13}^2/\beta_{33}^p$$

Thực hiện phép biến đổi Fourier phương trình (12) trở thành:

$$(\omega^2 I_{11}U + B_{11}U'') + \begin{pmatrix} \omega^2 I_{12}W' \\ + B_{12}W'''' \end{pmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} B_{22}W'''' + B_{12}U'''' + \omega^2 I_{12}U' \\ + \omega^2 I_{22}W'' - \omega^2 I_{11}W \\ = P(x/v)e^{-i\omega x/v} \end{aligned}$$

hay:

$$\begin{aligned} [A_0] \left\{ \frac{d^4 z}{dx^4} \right\} + [A_1] \left\{ \frac{d^3 z}{dx^3} \right\} + [A_2] \left\{ \frac{d^2 z}{dx^2} \right\} + \\ [A_3] \left\{ \frac{dz}{dx} \right\} + [A_4] \{z\} = \{q\}, \end{aligned} \quad (13)$$

trong đó $\{z\} = \{U(x, \omega), W(x, \omega)\}^T$, $\{q\} = \{q_0\}e^{-i\omega x/v}$; $\{q_0\} = \{0, P_0\}^T$ và

$$[A_0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{22} \end{bmatrix}; [A_1] = \begin{bmatrix} 0 & B_{12} \\ B_{12} & 0 \end{bmatrix};$$

$$[A_2] = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & \omega^2 I_{22} \end{bmatrix};$$

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 0 & \omega^2 I_{12} \\ \omega^2 I_{12} & 0 \end{bmatrix};$$

$$[A_4] = \begin{bmatrix} \omega^2 I_{11} & 0 \\ 0 & -\omega^2 I_{11} \end{bmatrix}.$$

Sau khi giải phương trình (12) ta có thể tính được điện tích đầu ra của lớp áp điện bằng công thức:

$$Q = b \int_0^L D dx = (bh_{13}/\beta_{33}^p)(u_0 + hw_0')L$$

Từ đó ta có thể tính được điện áp ra bằng

$$V = i\omega Q / (i\omega C_p + 1/R), \quad (14)$$

trong đó $C_p = bL/h_p\beta_{33}^p$ và R là điện trở của mạch đóng giữa hai cực áp điện.

3. ĐÁP ỨNG PHỔ CỦA DẦM CÓ LỚP ÁP ĐIỆN CHỊU TẢI TRỌNG DI ĐỘNG

Bây giờ ta xét trường hợp dao động cưỡng bức với tải trọng:

$$P(t) = P_0 e^{i\Omega t}, \quad (15)$$

Tức xét phương trình (13) với vế phải bằng:

$$\begin{aligned} [A_q] &= [(\tilde{\omega}/v)^4 A_0 - i(\tilde{\omega}/v)^3 A_1 - (\tilde{\omega}/v)^2 A_2 - (i\tilde{\omega}/v) A_3 + A_4] = \\ &= \begin{bmatrix} -(\tilde{\omega}/v)^2 B_{11} + \omega^2 I_{11} & -i(\tilde{\omega}/v)^3 B_{12} - \omega^2 (i\tilde{\omega}/v) I_{12} \\ -i(\tilde{\omega}/v)^3 B_{12} - \omega^2 (i\tilde{\omega}/v) I_{12} & (\tilde{\omega}/v)^4 B_{22} - \omega^2 (\tilde{\omega}/v)^2 I_{22} - \omega^2 I_{11} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Để dàng tìm được nghiệm của phương trình cuối ở dạng:

$$\{z_1^0\} = \begin{Bmatrix} z_{11}^0 \\ z_{12}^0 \end{Bmatrix} = \frac{P_0}{v\Delta} \begin{Bmatrix} \omega^2 I_{11} - (\tilde{\omega}/v)^2 B_{11} \\ i(\tilde{\omega}/v)^3 B_{12} + \omega^2 (i\tilde{\omega}/v) I_{12} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} \Delta &= (\omega^2 I_{11} - (\tilde{\omega}/v)^2 B_{11})[(\tilde{\omega}/v)^4 B_{22} \\ &\quad - \omega^2 (\tilde{\omega}/v)^2 I_{22} - \omega^2 I_{11}] - [(\tilde{\omega}/v)^3 B_{12} + \omega^2 (\tilde{\omega}/v) I_{12}]^2 \end{aligned}$$

Sau khi có một nghiệm riêng, nghiệm tổng quát của phương trình (18) sẽ là tổng của nghiệm tổng quát phương trình thuần nhất và nghiệm riêng:

$$\begin{aligned} \{z_q(x, \omega)\} &= \{U_q(x, \omega), W_q(x, \omega)\}^T = \\ \{z_0(x, \omega)\} &+ \{z_1(x, \omega)\}, \quad (18) \end{aligned}$$

$$[G(x, \omega)] = \begin{bmatrix} \alpha_1 e^{\lambda_1 x} & \alpha_2 e^{\lambda_2 x} & \alpha_3 e^{\lambda_3 x} & -\alpha_1 e^{-\lambda_1 x} & -\alpha_2 e^{-\lambda_2 x} & -\alpha_3 e^{-\lambda_3 x} \\ e^{\lambda_1 x} & e^{\lambda_2 x} & e^{\lambda_3 x} & e^{-\lambda_1 x} & e^{-\lambda_2 x} & e^{-\lambda_3 x} \end{bmatrix};$$

$$\alpha_j = -\lambda_j (\omega^2 I_{12} + \lambda_j^2 B_{12}) / (\omega^2 I_{11} + \lambda_j^2 B_{11}); \quad j = 1, 2, 3$$

chứa 6 hằng số C_1, \dots, C_6 và $\{z_1(x, \omega)\}$ là nghiệm riêng được tìm thấy ở dạng (16). Thay (18) vào (13) ta được phương trình để xác định các hằng số C_1, \dots, C_6

$$\{q\} = \{q_0\} e^{-\frac{i\tilde{\omega}x}{v}}; \quad \{q_0\} = \left\{0, \frac{P_0}{v}\right\}^T;$$

$$\tilde{\omega} = \omega - \Omega.$$

Trong đó Ω là tần số lực điều hòa, $\Omega = 0$ tương ứng với trường hợp tải trọng hằng số.

Đầu tiên, ta tìm nghiệm riêng của phương trình (13) ở dạng:

$$\{z_1(x, \omega)\} = \{z_1^0\} e^{-i\tilde{\omega}x/v} \quad (16)$$

khi đó phương trình (13) thành:

$$[A_q]\{z_1^0\} = \{q_0\}$$

trong đó $\{z_0(x, \omega)\}$ có dạng:

$$\{z_0(x, \omega)\} = [G(x, \omega)]\{C\},$$

với $\{C\} = \{C_1, \dots, C_6\}^T$ là vector hằng số tùy ý và các tham số:

như sau:

$$[B]\{C\} = -\{q_b(\omega)\} \quad (19)$$

trong đó ma trận [B] có dạng:

$$[\mathbf{B}(\omega)] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \lambda_1^2 & \lambda_2^2 & \lambda_3^2 & \lambda_1^2 & \lambda_2^2 & \lambda_3^2 \\ \lambda_1 \alpha_1 e^{\lambda_1 L} & \lambda_2 \alpha_2 e^{\lambda_2 L} & \lambda_3 \alpha_3 e^{\lambda_3 L} & \lambda_1 \alpha_1 e^{-\lambda_1 L} & \lambda_2 \alpha_2 e^{-\lambda_2 L} & \lambda_3 \alpha_3 e^{-\lambda_3 L} \\ e^{\lambda_1 L} & e^{\lambda_2 L} & e^{\lambda_3 L} & e^{-\lambda_1 L} & e^{-\lambda_2 L} & e^{-\lambda_3 L} \\ \lambda_1^2 e^{\lambda_1 L} & \lambda_2^2 e^{\lambda_2 L} & \lambda_3^2 e^{\lambda_3 L} & \lambda_1^2 e^{-\lambda_1 L} & \lambda_2^2 e^{-\lambda_2 L} & \lambda_3^2 e^{-\lambda_3 L} \end{bmatrix}$$

và vector:

$$\{\mathbf{q}_b(\omega)\} = \{q_{b1}, \dots, q_{b6}\}^T$$

với:

$$q_{b1} = z_{11}^0; q_{b2} = z_{12}^0; q_{b3} = -\left(\frac{\tilde{\omega}}{v}\right)^2 z_{12}^0;$$

$$q_{b4} = -\left(\frac{i\tilde{\omega}}{v}\right) z_{11}^0 e^{-\frac{i\tilde{\omega}L}{v}}; q_{b5} = z_{12}^0 e^{-i\tilde{\omega}L/v};$$

$$q_{b6} = -(\tilde{\omega}/v)^2 z_{12}^0 e^{-i\tilde{\omega}L/v}.$$

Như vậy, có thể tìm được các hằng số C_1, \dots, C_6 bằng:

$$\{\mathbf{C}\} = -[\mathbf{B}]^{-1}\{\mathbf{q}_b(\omega)\} \quad (20)$$

do đó nghiệm (18) sẽ bằng:

$$\{\mathbf{z}_q(x, \omega)\} = \{\mathbf{z}_1(x, \omega)\} - [\mathbf{G}(x, \omega)][\mathbf{B}]^{-1}\{\mathbf{q}_b(\omega)\} \quad (21)$$

Nghiệm (21) được gọi là đáp ứng tần số của dầm có lớp áp điện dưới tác dụng của tải trọng điều hòa di động trên dầm. Hai thành phần của vectơ (21) là , đáp ứng tần số dọc trục $U_q(x, \omega)$ và độ võng $W_q(x, \omega)$ của dầm.

4. VÍ DỤ KHẢO SÁT SỐ

Xét dầm chủ có các tham số hình học và vật liệu sau:

$$L = 1; b = 0.1; h_b = 0.05;$$

$$E_b = 199\text{MPa}, \rho_b = 7827\text{kg/m}^3,$$

$$\mu_b = 0.3.$$

Lớp áp điện gắn chặt vào đáy dầm có

cùng chiều dài và chiều rộng như dầm chủ, chiều dày thay đổi $h_p = 0.001 - 0.01$. Các tham số vật liệu áp điện bằng

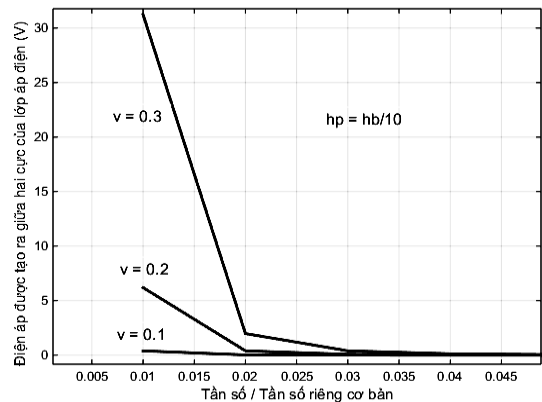
$$C_{11}^p = 69.0084\text{GPa}, \beta_{33}^p = 7.3885 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{F}},$$

$$\rho_p = 7750 \text{kg/m}^3,$$

$$h_{13} = -7.70394 \cdot 10^8 \text{V/m},$$

$$R = 500 \text{k}\Omega.$$

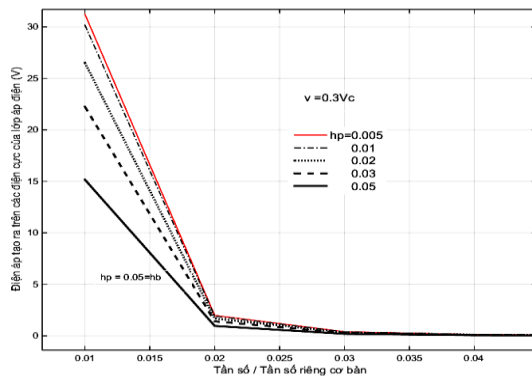
Khảo sát bằng số đáp ứng phổ của dầm phụ thuộc vào vận tốc di chuyển và chiều dày lớp áp điện trong trường hợp tải trọng hằng số di động, kết quả tính được trình bày trong hình 2 và hình 3. Trong trường hợp xét tần số và tốc độ di chuyển của lực điều hòa v, Ω , kết quả tính toán được trình bày trong các hình 4 và hình 5.



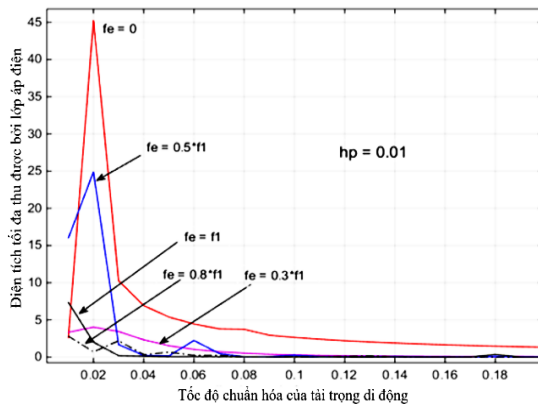
Hình 2. Điện áp tích lũy được trên hai cực của lớp áp điện với vận tốc di chuyển khác nhau của tải trọng, chiều dày lớp áp điện bằng 1/10 chiều dày dầm

Đáp ứng phổ của điện áp tính được trong lớp áp điện phụ thuộc vào vận tốc di

chuyển (hình 2) và độ dày lớp áp điện (hình 3). Tất cả các kết quả tính toán số cho thấy các giá trị cực đại của đáp ứng điện đều cực đại tại tần số bằng 0 (tương đương với tải tĩnh). Dễ thấy đáp ứng điện tăng khi vận tốc di chuyển của tải trọng tăng và chúng giảm khi chiều dày lớp áp điện tăng.



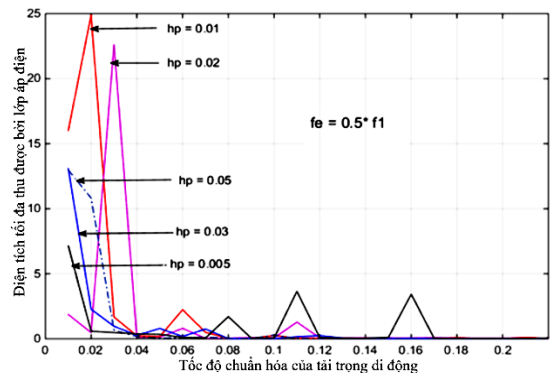
Hình 3. Điện áp tích lũy được trên hai cực của lớp áp điện với chiều dày lớp áp điện khác nhau, vận tốc di chuyển của tải trọng bằng 30% vận tốc tới hạn



Hình 4. Điện tích cực đại tích lũy được trong lớp áp điện phụ thuộc vào tốc độ di chuyển và tần số của tải trọng

Hình 4, hình 5 cho ta thấy sự phụ thuộc của điện tích cực đại tích lũy được trong lớp áp điện vào vận tốc tải trọng tương ứng với các tần số tải trọng và chiều dày lớp áp điện khác nhau. Kết quả cho thấy

điện tích thu hoạch được lớn nhất khi tải trọng là hằng số (tức tần số tải trọng bằng 0) và nó tăng lên khi chiều dày lớp áp điện giảm. Giá trị cực đại của điện tích thu hoạch được đạt được khi tải trọng di chuyển chậm (0.02 - 0.04) vận tốc tới hạn



Hình 5. Điện tích cực đại tích lũy được trong lớp áp điện phụ thuộc vào tốc độ di chuyển của tải trọng và độ dày lớp áp điện

5. KẾT LUẬN

Kết quả chính đã đạt được trong nghiên cứu này là:

1. Dựa trên các đặc tính cơ và điện của dầm đàn hồi và lớp áp điện, bài báo đã xây dựng được mô hình cơ điện của dầm đàn hồi có lớp áp điện tựa đơn hai đầu chịu tải trọng điều hòa di động trên dầm. Mô hình này cho phép xác định được đáp ứng điện (điện áp ra của lớp áp điện) trong miền tần số;
2. Đã tính toán phân tích sự phụ thuộc của điện tích cực đại thu hoạch được trong lớp áp điện phụ thuộc vào vận tốc di chuyển, tần số của tải trọng và chiều dày lớp áp điện;
3. Kết quả số cho thấy điện áp cực đại tăng rất nhanh khi vận tốc di động của tải trọng tăng và giảm khi độ dày của lớp áp điện tăng.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả chân thành cảm ơn Trường Đại học Điện lực đã tạo điều kiện và thầy

Nguyễn Tiến Khiêm - Viện Cơ học, đã hướng dẫn tác giả hoàn thành công trình nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Anton, S.R., Sodano, H.A. (2007) A review of power harvesting using piezoelectric material (2003-2006). *Smart Material and Structures*, 16, R1-21.
- [2] Vatansever, D., Siores, E., Shah, T. (2012) Alternative Resources for Renewable Energy: Piezoelectric and Photovoltaic Smart Structures. *Global Warning Impact and Future Perspective*, Chapter 10. DOI: 10.5772/50570.
- [3] Akkaya OY, S., Özdemir, A.E. (2016) Usage of Piezoelectric Material and Generating Electricity. 5-th International Conference on Renewable Energy Research and Application, 20-23 Nov 2016, Birmingham UK. ICRERA, pp. 63-66. ISBN: 978-1-5090-3388-1/16.
- [4] Ahmed R., Mir, F., Banerjee, S. (2017) A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibration and acoustic waves using piezoelectricity. *Smart Material and Structures* 26, Article 085031, 27 pp.
- [5] Najini, H., Muthukumaraswamy, S.A. (2017) Piezoelectric Energy Generation from Vehicle Traffic with Techno-economic Analysis. *Journal of Renewable Energy*, Volume 2017, Article ID 9643858. DOI: 10.1155/2017/9643858.
- [6] Wang, J., Shi, Z., Xiang, H., Song, G. (2015) Modeling on Energy Harvesting from a Railway System Using Piezoelectric Transducers. *Smart Material and Structures* Vol. 24, Article ID 105017 (13pp.).
- [7] Lee, U., Kim, J. (2000) Dynamics of elastic-piezo-electric two-layer beams using spectral element method. *Intern. J. of Solids and Struct.* Vol. 37: 4403-4417.
- [8] Ali, S.F., Friswell, M.I., Adhikari, S. (2011) Analysis of energy harvesters for highway bridges. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(16) 1929-1938.
- [9] Amini, Y., Heshmati, Fatehi, P., Habibi, S.E. (2017) Piezoelectric energy harvesting from vibration of a beam subjected to multi-moving load. *Applied Mathematical Modelling*, 49, 1-16.
- [10] Phí Thị Hằng. Phương pháp phổ tần số trong nghiên cứu dao động của dầm đàn hồi chịu tải trọng di động. Luận án Tiến sĩ Cơ kỹ thuật. Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Hà Nội, 2015.
- [11] Nguyen Tien Khiem, Phi Thi Hang (2016) Frequency Response of a Beam-like Structure under Harmonic Moving Load. *Vietnam Journal of Mechanics*, V. 38, No 4, pp 223-238.
- [12] Khiem, N.T., Hang, P.T. (2018) Analysis and Identification of Multiple-Cracked Beam subjected to Harmonic Load. *Journal of Vibration and Control*, Vol.24, No 13, pp. 2782-2801.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Phí Thị Hằng tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Thủy lợi Hà Nội vào các năm 2004 và 2010, nhận bằng Tiến sĩ ngành cơ kỹ thuật tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam năm 2016. Hiện nay tác giả công tác tại Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: chẩn đoán hư hỏng của kết cấu, khai thác năng lượng tái tạo.

