

Vị trí tối ưu của các bộ giảm chấn động lực trong điều khiển dao động uốn của dầm

Nguyễn Văn Khang¹, Nguyễn Phong Điền¹, Vũ Đức Phúc², Đỗ Thế Dương¹, Nguyễn Thị Vân Hương¹

¹ Bộ môn Cơ học ứng dụng, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

² Bộ môn Kỹ thuật cơ sở, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

E-Mail: khang.nguyenvan2@hust.edu.vn

Tóm tắt

Các bộ giảm chấn động lực thường được sử dụng nhằm giảm dao động không mong muốn trong các công trình. Trong bài báo này, kỹ thuật dạng riêng được sử dụng để giảm dao động của dầm Euler-Bernoulli chịu kích động điều hòa bằng nhiều bộ giảm chấn động lực. Mục đích của nghiên cứu này là nghiên cứu ảnh hưởng của các vị trí của các bộ giảm chấn động lực đến sự giảm rung động trong bài toán điều khiển toàn cục dao động của dầm. Các thí dụ mô phỏng số được thực hiện để cho thấy hiệu quả của các vị trí tối ưu.

Từ khóa: Bộ giảm chấn động lực, phương pháp Taguchi, kích động điều hòa, vị trí tối ưu, điều khiển dao động.

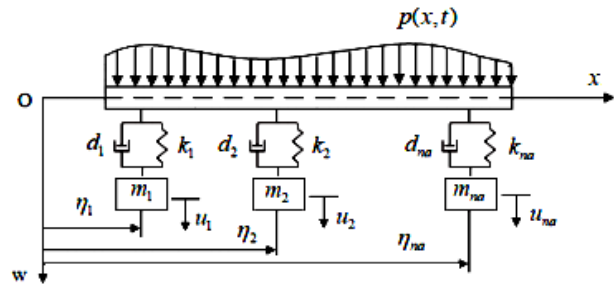
1. Mở đầu

Dao động là một hiện tượng phổ biến trong tự nhiên và trong kỹ thuật. Bài toán điều khiển các hệ dao động được quan tâm nghiên cứu trong thời gian vài chục năm gần đây [1-3]. Trong thực tế, điều khiển các hệ dao động liên quan đến động lực học giải tích để thiết lập phương trình vi phân dao động, động lực học cấu trúc để mô hình hóa và phân tích mô hình và lý thuyết điều khiển để thiết kế hệ thống điều khiển. Các bài toán về điều khiển dao động được phân chia thành ba nhóm: Điều khiển chủ động, điều khiển bị động và điều khiển bán chủ động.

Một trong các bài toán điều khiển bị động các hệ dao động là bài toán tính toán và thiết kế các bộ giảm chấn động lực (vibration absorber) để điều khiển dao động của các cơ hệ kỹ thuật. Đối với mô hình dao động uốn của dầm, vị trí lắp đặt bộ giảm chấn (Tuned Mass Damper - TMD) lên cơ hệ có một vai trò rất quan trọng. Bài toán này còn được nghiên cứu chưa đầy đủ với một số ít công trình đã công bố [4, 5]. Bài báo này trình bày việc thiết lập các phương trình dao động uốn của dầm có gắn nhiều bộ giảm chấn động lực (tên tiếng Anh viết tắt - MTMD). Trong đó, các dạng dao động riêng của dầm được áp dụng để đưa ra thuật toán xác định khối lượng các bộ giảm chấn động lực và vị trí lắp đặt các bộ giảm chấn trên dầm sao cho hiệu ứng giảm chấn đạt kết quả tối đa.

2. Phương trình dao động uốn của dầm Euler-Bernoulli có gắn nhiều bộ giảm chấn

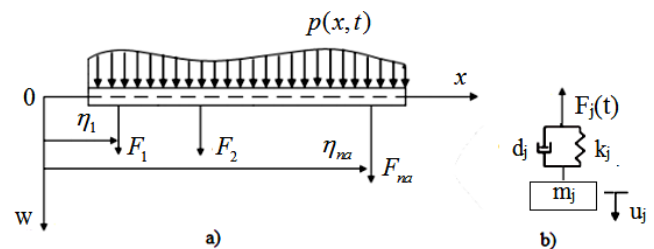
Xét mô hình dao động uốn của dầm Euler-Bernoulli gắn nhiều bộ giảm chấn động lực TMD như hình 1.



Hình 1. Dầm có gắn nhiều bộ giảm chấn động lực TMD

Cho biết dầm có chiều dài L , độ cứng chống uốn EI gắn các bộ giảm chấn động lực tại các vị trí $x = \eta_j$ ($j = 1, 2, \dots, n_a$). Để đơn giản, dầm được giả định là đồng chất có mặt cắt ngang không đổi trên toàn chiều dài và chịu lực kích động phân bố điều hòa $p(x, t) = p_0(x) \sin(\Omega t)$. Các bộ giảm chấn động lực có khối lượng m_j kết nối với dầm nhờ phần tử đàn hồi có độ cứng k_j và phần tử cản có hệ số cản d_j ($j = 1, 2, \dots, n_a$).

Phương pháp tách cấu trúc được áp dụng để thiết lập các phương trình vi phân mô tả dao động của hệ, khi đó hệ được phân thành $n_a + 1$ cấu trúc con, dầm chủ và n_a bộ giảm chấn (hình 2).



Hình 2. Các cấu trúc con gồm dầm chủ và TMD thứ j

Ký hiệu độ võng động của dầm là w và dịch chuyển thẳng của TMD thứ j là u_j ($j = 1, 2, \dots, n_a$), khi đó phản lực liên kết do dầm tác dụng lên TMD thứ j là:

$$F_j(t) = k_j(u_j - w_{\eta_j}) + d_j(\dot{u}_j - \dot{w}_{\eta_j}), \quad (1)$$

for $j = (1, 2, \dots, n_a)$

Ở đây: $w_{\eta_j} = w(\eta_j, t)$, $\dot{w}_{\eta_j} = \frac{\partial w(\eta_j, t)}{\partial t}$.

Trước hết, ta thiết lập phương trình vi phân dao động của bộ giảm chấn (hình 2b). Xét bộ giảm chấn thứ j , chọn gốc tọa độ u_j ở vị trí cân bằng tĩnh, áp dụng Định luật II Newton, phương trình vi phân dao động của vật thể m_j có dạng

$$m_j \ddot{u}_j = -F_j(t) \quad (2)$$

Thế (2) vào (1) ta được

$$m_j \ddot{u}_j + d_j \dot{u}_j + k_j u_j = k_j w_{\eta_j} + d_j \dot{w}_{\eta_j} \quad (3)$$

($j = 1, 2, \dots, n_a$)

Phương trình (3) là phương trình mô tả dao động của bộ giảm chấn thứ j . Áp dụng nguyên lý cơ bản của động lực học, phương trình vi phân mô tả dao động uốn của dầm chủ có kể đến yếu tố cản (hình 2) là [6, 7]

$$\mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c^{(e)} \frac{\partial w}{\partial t} \right) + EI \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + c^{(i)} \frac{\partial^5 w}{\partial x^4 \partial t} \right] = p(x, t) + \sum_{j=1}^{n_a} F_j \delta(x - \eta_j) \quad (4)$$

Trong đó μ là khối lượng trên một đơn vị chiều dài của dầm, $c^{(e)}$, $c^{(i)}$ là hệ số cản nhớt ngoài và hệ số nội cản nhớt trên một đơn vị chiều dài dầm. Hàm Delta-dirac có dạng:

$$\delta(x - \eta_j) = \begin{cases} 1 & \text{khi } x = \eta_j \\ 0 & \text{khi } x \neq \eta_j \end{cases} \quad (5)$$

Các phương trình (3) và (4) là hệ phương trình vi thường và phương trình đạo hàm riêng mô tả dao động uốn của dầm gắn nhiều bộ giảm chấn động lực TMD và dao động của các bộ giảm chấn động lực. Ngoài ra với mỗi dầm ta có bốn điều kiện biên, hai điều kiện biên tại $x = 0$, hai điều kiện biên tại $x = L$ và các điều kiện đầu để giải hệ phương trình trên.

Sử dụng phương pháp Ritz-Galerkin biểu diễn nghiệm của phương trình đạo hàm riêng (4), ta có thể biến đổi hệ phương trình (3) và (4) về dạng [8, 9]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{h}(t) \quad (6)$$

Trong đó $\mathbf{M}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{K}$ là các ma trận hằng số cỡ $(n_a + n_b) \times (n_a + n_b)$, các vectơ $\mathbf{z}$, $\mathbf{h}$ là các vectơ cỡ $(n_a + n_b)$, vectơ $\mathbf{h}(t)$ là hàm tuần hoàn chu kỳ $T = 2\pi / \Omega$.

Giả sử hàm $\mathbf{h}(t)$ tuần hoàn theo thời gian và có thể khai triển thành chuỗi Fourier gần đúng như sau:

$$\mathbf{h}(t) = \mathbf{b}_0 + \sum_{k=1}^m (\mathbf{a}_k \sin k\Omega t + \mathbf{b}_k \cos k\Omega t) \quad (7)$$

Sử dụng nguyên lý cộng tác dụng trong lý thuyết phương trình vi phân tuyến tính, ta dễ dàng tìm được nghiệm của hệ phương trình vi phân (6). Từ đó dao động của dầm được xác định bởi công thức

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^K X_k(x) q_k(t) \quad (8)$$

Ta xét trường hợp hay gặp trong thực tế, khi tần số kích động Ω xấp xỉ bằng tần số riêng thứ nhất của dầm ($\Omega = \omega_1$), nghĩa là dầm dao động ở mode 1. Khi đó bằng phương pháp biên độ phức, ta tìm được hàm đáp ứng tần số của dầm lắp các bộ giảm chấn động lực [8, 9]

$$H_s(\Omega) = \frac{\hat{h}_s}{[\omega_s^2 - \Omega^2 + i2\delta_s\Omega] - \frac{\Omega^2}{D_1} a_{11}} \quad (9)$$

Môđun của hàm đáp ứng tần số $|H_s|$ được xác định bởi công thức sau

$$|H_s| = \frac{|\hat{h}_s|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (10)$$

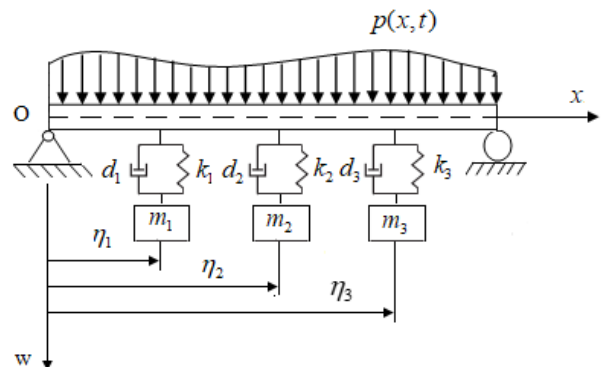
Trong đó, theo các tài liệu [7, 8]:

$$a = [\omega_s^2 - \Omega^2] - \frac{\Omega^2}{D_1} \sum_{j=1}^{n_a} m_j X_1^2(\eta_j) \frac{[\omega_{jc}^2 (\omega_{jc}^2 - \Omega^2) + 4\delta_{jc}^2 \Omega^2]}{[(\omega_{jc}^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta_{jc}^2 \Omega^2]} \quad (11)$$

$$b = 2\delta_s\Omega + \frac{\Omega^2}{D_1} \sum_{j=1}^{n_a} m_j X_1^2(\eta_j) \frac{2\Omega^3 \delta_{jc}}{[(\omega_{jc}^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta_{jc}^2 \Omega^2]} \quad (12)$$

3. Lựa chọn các tham số khối lượng của các bộ giảm chấn động lực

Ta xét bài toán dao động uốn của mô hình dầm hai đầu bản lề có gắn các bộ giảm chấn động lực tại các vị trí η_1 , η_2 , η_3 như hình 3.



Hình 3. Dầm hai đầu bản lề gắn nhiều TMD

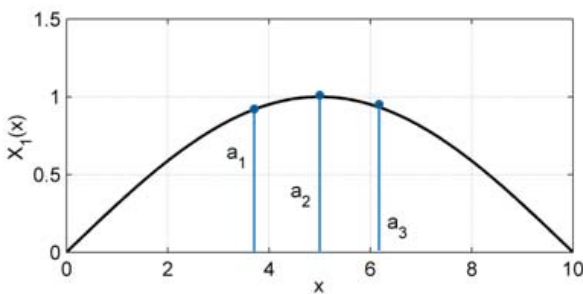
Vị trí tối ưu của các bộ giảm chấn động lực trong điều khiển dao động uốn của dầm

Các tham số của dầm được cho trong bảng 1. Từ các bộ tham số dầm trong bảng 1 ta tính toán được tần số riêng thứ nhất của dầm: $\omega_1 = 110.3005(s^{-1})$. Ta xét trường hợp tần số lực kích động xấp xỉ bằng tần số riêng thứ nhất của dầm.

Bảng 1. Tham số của hệ

Tham số	Giá trị	Đơn vị
EI	3.06×10^7	Nm ²
L	10	m
μ	24.5	kg/m
m_b	245	kg
$c^{(e)}$	0.4	1/s
$c^{(i)}$	0.0001	s/m
η_1, η_2, η_3	$3L/8, 4L/8, 5L/8$	m
$p = p_0 \sin \Omega t$	$p_0 = 100$	N/m
Ω	$\Omega = \omega_1$	rad/s

Với các kết cấu dầm khối lượng lớn, theo kinh nghiệm, người ta thường lựa chọn tổng khối lượng các bộ giảm chấn xấp xỉ cỡ 0.5% đến 1% khối lượng của dầm. Để thiết kế tối ưu các tham số của các bộ giảm chấn TMD, nghiên cứu này đề xuất một cách xác định khối lượng các bộ giảm chấn lắp trên dầm dựa vào dạng dao động riêng của dầm. Dạng dao động riêng của dầm và giá trị hàm riêng thứ nhất ở các vị trí lắp đặt được cho trong hình 4 dưới đây [6, 7].



Hình 4. Dạng riêng thứ nhất của dầm và giá trị hàm riêng tại vị trí lắp đặt giảm chấn TMD

Các khối lượng của các bộ giảm chấn TMD được tính toán như sau:

$$m_1 = \alpha a_1, \quad m_2 = \alpha a_2, \quad m_3 = \alpha a_3$$

Trong đó α là giá trị tỉ lệ. a_1, a_2, a_3 là giá trị hàm riêng thứ nhất tại các vị trí lắp đặt các bộ giảm chấn, được xác định bởi:

$$a_1 = X_1(x_1) = X_1\left(\frac{3L}{8}\right) = 0.9239$$

$$a_2 = X_1(x_2) = X_1\left(\frac{4L}{8}\right) = 1.0$$

$$a_3 = X_1(x_3) = X_1\left(\frac{5L}{8}\right) = 0.9239$$

Nếu tổng khối lượng các bộ giảm chấn được lựa chọn bằng 1% khối lượng của dầm thì ta có:

$$m_1 + m_2 + m_3 = \alpha(a_1 + a_2 + a_3) = \frac{m_b}{100}$$

Ta suy ra

$$\alpha = \frac{m_b}{100(a_1 + a_2 + a_3)} = 0.8603$$

Từ đó ta tính được khối lượng các bộ giảm chấn:

$$m_1 = \alpha a_1 = 0.8603 \times 0.9239 = 0.7948(kg),$$

$$m_2 = \alpha a_2 = 0.8603 \times 1 = 0.8603(kg),$$

$$m_3 = \alpha a_3 = 0.8603 \times 0.9239 = 0.7948(kg).$$

4. Thuật toán xác định các tham số tối ưu của các bộ giảm chấn

Nguyễn Văn Khang và đồng nghiệp đã đề xuất một thuật toán khá thuận tiện xác định các tham số tối ưu của các bộ giảm chấn động lực lắp trên hệ chính có căn dựa trên phương pháp thực nghiệm Taguchi [8-11]. Sử dụng thuật toán đề xuất nêu trên, trong mục này ta tiến hành thiết kế tối ưu các tham số của hệ 3 TMD khác nhau lắp trên dầm khi tần số lực kích động xấp xỉ tần số riêng thứ nhất của dầm. Các tham số tối ưu của các bộ giảm chấn khi tần số kích động Ω bằng tần số dao động riêng bậc nhất của dầm ω_1 được ghi trong bảng 2. Khi tần số kích động Ω thay đổi trong một vùng lân cận tần số dao động riêng bậc nhất của dầm ω_1 các tham số tối ưu của các bộ giảm chấn được cho trong bảng 3.

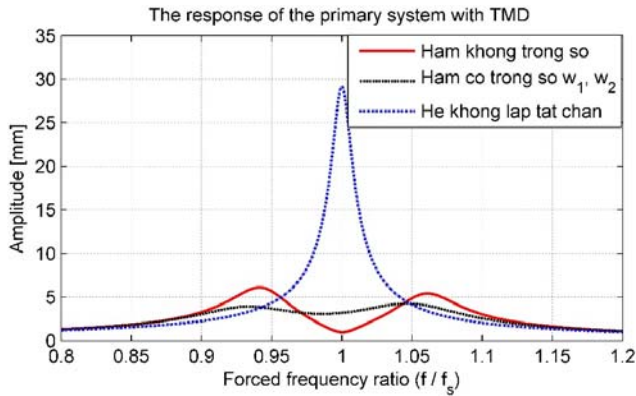
Bảng 2. Tham số tối ưu của các bộ giảm chấn

Giảm chấn	m (kg)	d (Ns/m)	k (N/m)
TMD1	0.7948	1.5	9673
TMD2	0.8603	8.0	10500
TMD3	0.7948	15.625	8875

Bảng 3. Tham số tối ưu của các bộ giảm chấn sử dụng hàm mục tiêu có trọng số

Giảm chấn	m (kg)	d (Ns/m)	k (N/m)
TMD1	0.7948	10.875	9339.3
TMD2	0.8603	16	9750
TMD3	0.7948	11	9328.1

Từ bộ tham số tối ưu của các bộ giảm chấn TMD tìm được khi sử dụng hai hàm mục tiêu khác nhau ta vẽ được đồ thị hàm đáp ứng tần số trong trường hợp dầm có lắp các bộ giảm chấn và không lắp giảm chấn như hình 5.

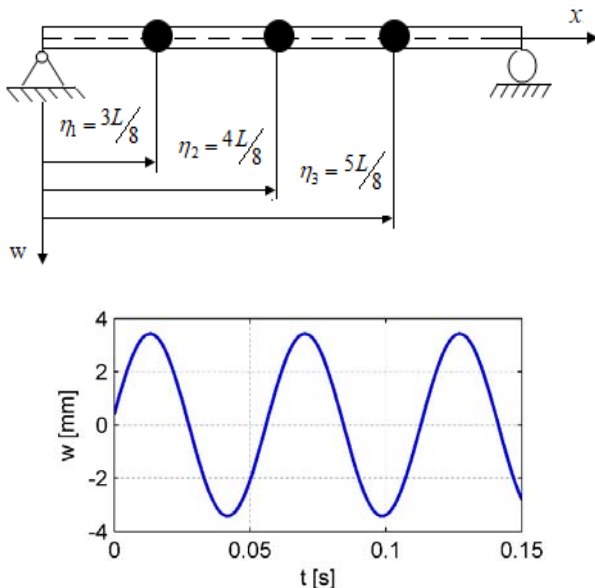


Hình 5. Đáp ứng tần số của dầm hai đầu bản lề khi sử dụng hai hàm mục tiêu khác nhau

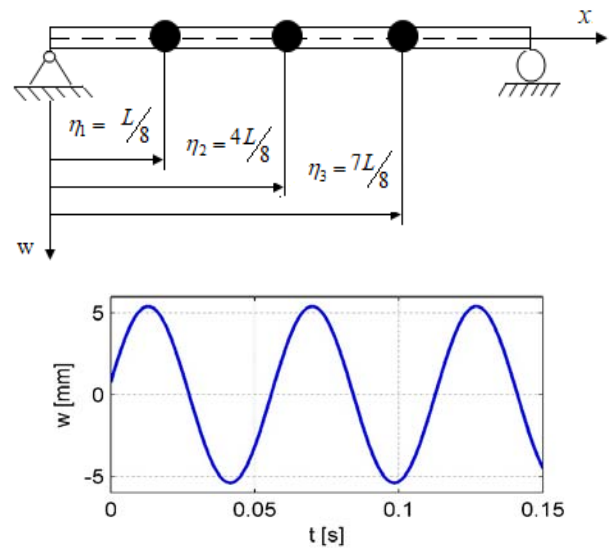
Từ đồ thị trên hình 5 ta thấy khi sử dụng hàm mục tiêu có trọng số hiệu quả giảm dao động của dầm tương đối tốt trên một dải tần số và từ đồ thị trên hình 9 ta thấy dao động của dầm tại vị trí $L/2$ khi lắp các bộ giảm chấn TMD tại các vị trí $3L/8$, $L/2$ và $5L/8$ là 3.428 (mm) so với khi chưa lắp giảm chấn là 29.14 (mm). Như vậy dao động dầm giảm đáng kể khoảng 90%.

5. Xác định vị trí lắp đặt tối ưu của các bộ giảm chấn

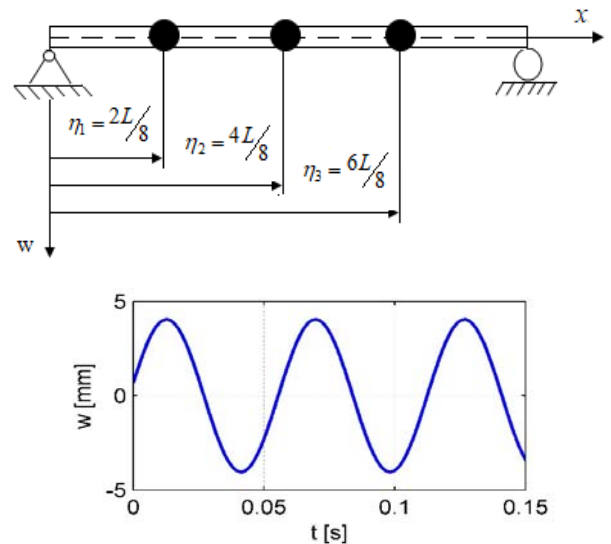
Sử dụng các bộ tham số tối ưu của các bộ giảm chấn TMD trình bày trong mục trước, trong mục này ta khảo sát hiệu quả của vị trí lắp các bộ giảm chấn đến mức dao động của dầm. Ta sẽ khảo sát 9 phương án lắp các bộ giảm chấn lên dầm và tính toán đáp ứng dao động của dầm để thấy hiệu quả tác động do vị trí lắp đặt các bộ giảm chấn động lực.



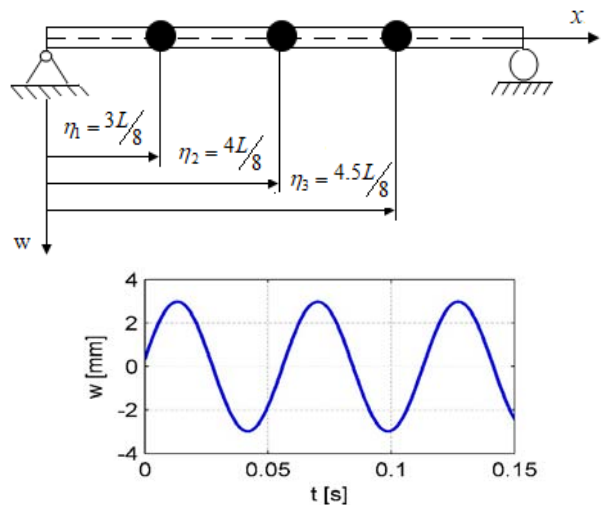
Hình 6. Vị trí lắp đặt các TMD tại $3L/8$, $4L/8$, $5L/8$



Hình 7. Vị trí lắp đặt các TMD tại $L/8$, $4L/8$, $7L/8$

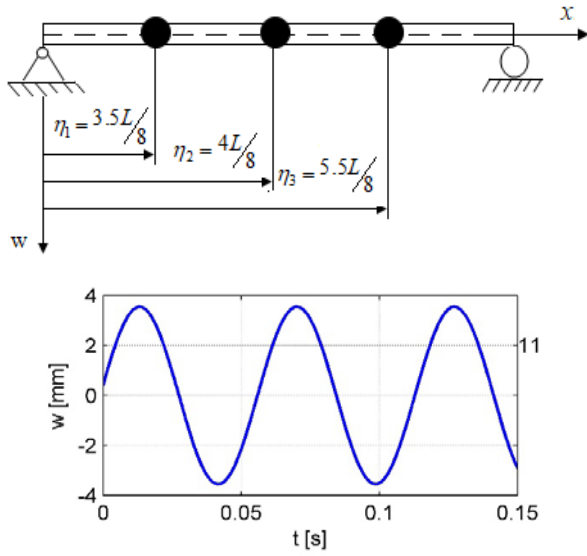


Hình 8. Vị trí lắp đặt các TMD tại $2L/8$, $4L/8$, $6L/8$

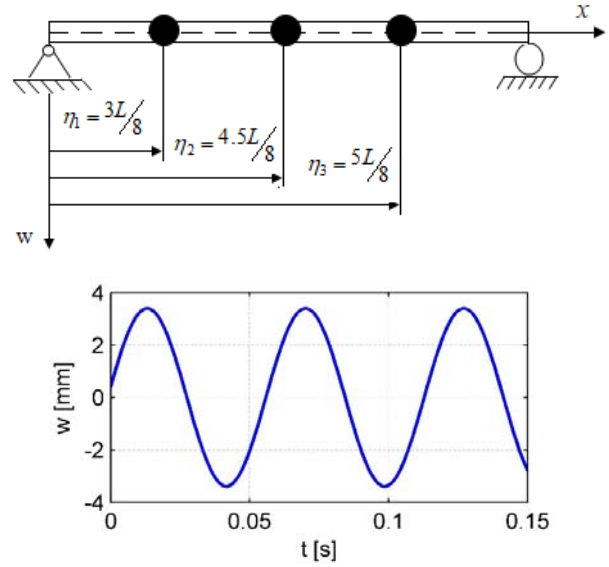


Hình 9. Vị trí lắp đặt các TMD tại $3L/8$, $4L/8$, $4.5L/8$

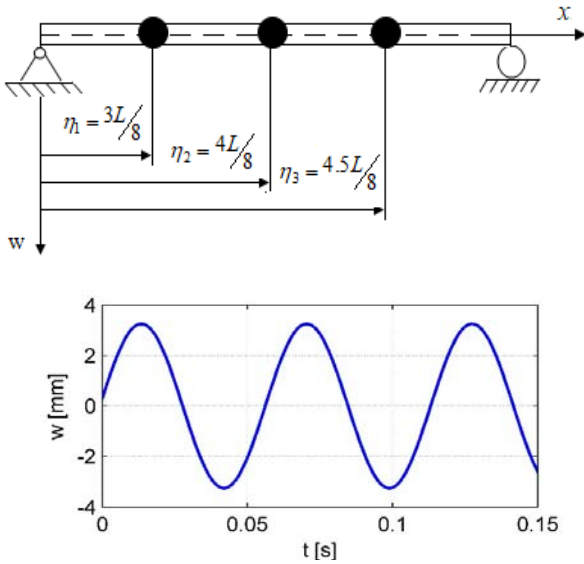
Vị trí tối ưu của các bộ giảm chấn động lực trong điều khiển dao động uốn của dầm



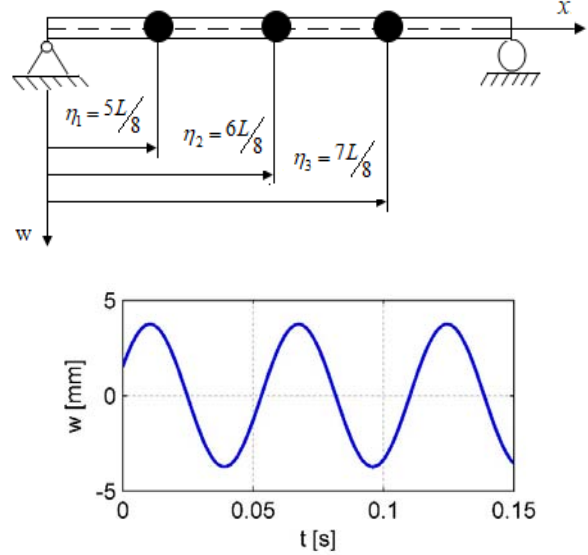
Hình 10. Vị trí lắp đặt tại $3.5L/8$, $4L/8$, $5.5L/8$



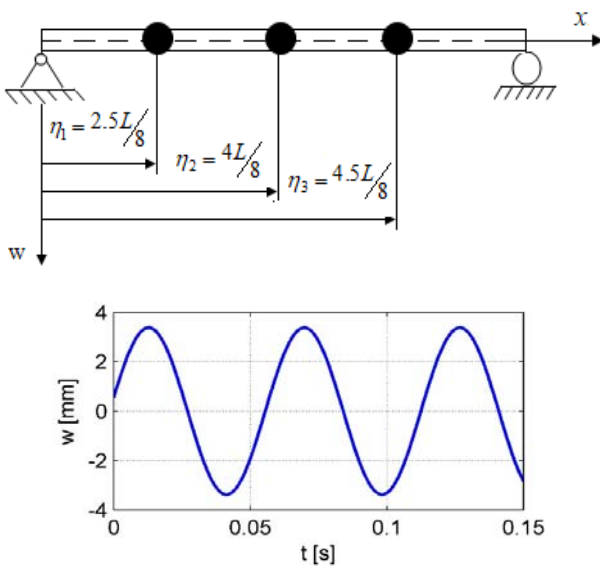
Hình 13. Vị trí lắp đặt các TMD tại $3L/8$, $4.5L/8$, $5L/8$



Hình 11. Vị trí lắp đặt các TMD tại $3L/8$, $4L/8$, $4.5L/8$



Hình 14. Vị trí lắp đặt các TMD tại $5L/8$, $6L/8$, $7L/8$



Hình 12. Vị trí lắp đặt các TMD tại $2.5L/8$, $4L/8$, $4.5L/8$

Từ các kết quả tính toán thể hiện trên các đồ thị tại các hình 6-14, bảng 4 tổng hợp kết quả giảm dao động theo các vị trí các bộ giảm chấn động lực.

Bảng 4. Biên độ và hiệu quả giảm dao động tại vị trí lắp các TMD khác nhau trên dầm

Vị trí của các TMD	Độ võng (mm)	Hiệu quả (%)
$3L/8$, $4L/8$, $5L/8$	3.428	88.24
$L/8$, $4L/8$, $7L/8$	5.415	81.41
$2L/8$, $4L/8$, $6L/8$	4.043	86.13
$3.5L/8$, $4L/8$, $4.5L/8$	2.989	89.77
$3.5L/8$, $4L/8$, $5.5L/8$	3.552	87.81
$3L/8$, $4L/8$, $4.5L/8$	3.255	88.83
$2.5L/8$, $4L/8$, $4.5L/8$	3.375	88.42
$3L/8$, $4.5L/8$, $5L/8$	3.395	88.35
$5L/8$, $6L/8$, $7L/8$	3.743	87.16

Từ các kết quả mô phỏng số trình bày ở trên ta thấy rằng nếu lắp các bộ TMD càng gần vị trí biên độ dạng dao động riêng lớn thì hiệu quả giảm dao động càng lớn, đồng thời biên độ dao động của dầm càng nhỏ. Các khảo sát với các dạng dầm khác ở Bộ môn Cơ học ứng dụng thuộc Trường Đại học Bách khoa Hà Nội cũng cho kết quả tương tự.

6. Kết luận

Việc xác định các vị trí tối ưu của các bộ giảm chấn động lực trong điều khiển dao động của dầm là bài toán có ý nghĩa lực tế và còn ít được nghiên cứu. Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra một cách xác định các tham số khối lượng tối ưu của các bộ giảm chấn động lực dựa trên dạng dao động riêng của dầm. Việc xác định các tham số tối ưu của các phần tử cản nhớt và độ cứng lò xo dựa trên một thuật toán xuất phát từ phương pháp thực nghiệm Taguchi.

Vị trí tối ưu để lắp các bộ giảm chấn động lực lên dầm phụ thuộc vào dạng dao động riêng của dầm. Nếu lắp các bộ giảm chấn động lực càng gần vị trí biên độ dạng dao động riêng lớn thì hiệu quả giảm dao động càng lớn, và biên độ dao động của dầm càng nhỏ. Các kết quả mô phỏng số cho thấy kết quả tối ưu của phương pháp đề xuất trong bài báo này. Hiệu quả giảm chấn đạt được khoảng 90%.

Các nghiên cứu theo thuật toán được đề xuất trong bài báo này đang được tiến hành ở Bộ môn Cơ học ứng dụng, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED).

Tài liệu tham khảo

- [1] Meirovitch L.: *Dynamics and Control of Structures*, John Wiley & Sons, New York 1990.
- [2] Inman D.J.: *Vibration with Control*, John Wiley & Sons, Chichester 2006.
- [3] Kelly S.G.: *Fundamentals of Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, Singapore 1993.
- [4] Latas W., *Optimal positions of tunable translational and rotational dynamic absorbers in global vibration control in beams*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 53, no. 2, pp. 467-476, 2015.
- [5] Patil S.S., Awastare P.J., *Vibration suppression along the segment of beams by imposing nodes using multiple vibrations absorbers*, Journal of Vibration Analysis, Measurement, and Control, vol. 4, no. 1, pp. 29-39, 2016.
- [6] Nguyễn Văn Khang: *Dao động kỹ thuật* (in lần thứ 4), NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội 2005.
- [7] Rao S.S.: *Vibration of Continuous Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey 2007.
- [8] Nguyen Van Khang, Vu Duc Phuc, Nguyen Thi Van Huong, Do The Duong, *Optimal control of transverse vibration of Euler-Bernoulli beam with multiple dynamic vibration absorbers using Taguchi's method*, Vietnam Journal of Mechanics, VAST, vol. 40, no.3, pp. 1-19, 2018.
- [9] Vũ Đức Phúc, *Điều khiển dao động bằng kết hợp nhiều bộ giảm chấn động lực*, Dự thảo Luận án tiến sĩ Cơ học, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2019.
- [10] Nguyen Van Khang, Vu Duc Phuc, Do The Duong, Nguyen Thi Van Huong, *A procedure for optimal design of a dynamic vibration absorber installed in the damped primary system based on Taguchi's method*, Vietnam Journal of Science and Technology, VAST, vol. 55, no. 5, pp. 649-661, 2018.
- [11] Nguyen Van Khang, Do The Duong, Nguyen Thi Van Huong, Nguyen Duc Thi Thu Dinh, Vu Duc Phuc, *Optimal control of vibration by multiple tuned liquid dampers using Taguchi method*, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 33, no. 4, pp. 1563-1572, 2019.