



XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ TỐI ƯU CỦA THIẾT BỊ CHẾ NGỰ DAO ĐỘNG NỐI HAI KẾT CẤU LIỀN KỀ

Phạm Hoàng Anh¹

Tóm tắt: Biểu thức giải tích cho các thông số tối ưu của một thiết bị chế ngự dao động dạng đàn nhớt nối hai kết cấu liền kề có hạn chế trong một số trường hợp. Bài báo đề xuất các điều kiện ràng buộc bổ sung trong bài toán tối giảm tổng năng lượng dao động trung bình của hệ kết cấu chịu động đất dạng ồn trắng, đó là điều kiện đảm bảo năng lượng dao động trung bình của mỗi kết cấu luôn giảm. Sử dụng thuật toán tối ưu để xác định các thông số tối ưu của thiết bị. So với các thông số đã cho dưới dạng giải tích, phương pháp đề xuất đảm bảo hiệu quả chế ngự của thiết bị đối với cả hệ kết cấu cũng như từng kết cấu.

Từ khóa: Chế ngự dao động; thiết bị cản; kết cấu liền kề.

Summary: The analytical formulas for determining optimum parameters of a viscoelastic damper connecting two adjacent structures have been shown to have limitation in certain cases. This paper introduces additional constraints for minimizing the averaged vibration energy of the system under a white-noise ground excitation, ensuring that the averaged vibration energy of each structure is reduced. The optimal parameters of the coupling device are obtained via numerical optimization. Comparing with the analytical parameters, the proposed approach guarantees the control effectiveness of the device for the whole system as well as for each structure.

Keywords: Vibration control; viscoelastic damper; adjacent structure.

Nhận ngày 04/09/2015, chỉnh sửa ngày 21/9/2015, chấp nhận đăng 07/01/2016



1. Giới thiệu

Phương pháp chế ngự dao động tương tác (interaction control) sử dụng các thiết bị (thụ động hoặc chủ động) nối các kết cấu liền kề đã được nghiên cứu trong những thập kỷ gần đây. Phương pháp này lợi dụng sự tương tác giữa kết cấu liền kề thông qua thiết bị chế ngự để làm giảm dao động của hệ kết cấu dưới tác động của tải trọng như gió và động đất. Để đạt được hiệu quả chế ngự tối ưu, các thông số của thiết bị cần được thiết kế hợp lý.

Iwanami và cộng sự [1] đề xuất phương pháp sử dụng một thiết bị cản nhớt nối các kết cấu được mô hình là các hệ một bậc tự do để chế ngự dao động của hệ khi chịu động đất. Thông số cản tối ưu của thiết bị được đưa ra cho trường hợp $m_1 k_1 = m_2 k_2$. Kageyama và cộng sự [2] thiết kế thiết bị cản tối ưu nối hai kết cấu nhà cao tầng tại mái để giảm dao động động đất của hệ. Gurley và cộng sự [3] sử dụng một thiết bị đàn nhớt kiểu Voigt nối hai kết cấu nhà cao tầng được mô hình dạng dầm chịu cắt chịu tải trọng gió. Các thông số độ cứng và thông số cản tối ưu của thiết bị được thiết lập thông qua tối ưu giá trị đỉnh của hàm truyền dưới tác dụng của tải trọng điều hòa. Luco và De Barros [4] sử dụng cùng mô hình kết cấu và nguyên lý tối ưu như của [3] để thiết lập thông số tối ưu cho hệ thiết bị cản bố trí phân bố nối hai kết cấu chịu tải trọng động đất. Thông qua tính toán số, tỷ số cản tối ưu của thiết bị cũng như chiều cao tối ưu của kết cấu thấp hơn được xác định cho các hệ kết cấu với các chiều cao và khối lượng khác nhau. Đối với kết cấu khung nhiều tầng chịu động đất, Zhang và Xu [5] sử dụng các thiết bị đàn nhớt nối tại các tầng của hai kết cấu liền kề và thực hiện khảo sát số để đưa ra các thông số tối ưu của thiết bị thông qua cực đại hóa tỷ số cản của các dạng riêng. Với cùng mô hình, Zhang và Xu [6] tính toán thông số tối ưu cho thiết bị cản chất lỏng.

¹TS, Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng. Email: anhpham.nuce@gmail.com.

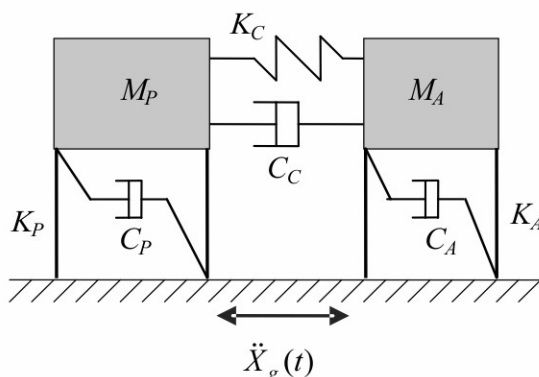
Khác với những nghiên cứu trên, trong đó thông số tối ưu của các thiết bị được xác định chủ yếu thông qua tính toán số cho những trường hợp xác định, Zhu và Iemura [7] đã thiết lập biểu thức giải tích để xác định thông số tối ưu cho phần tử tương tác nối hai kết cấu liền kề. Phần tử tương tác là một thiết bị cản đàn nhớt, hai kết cấu (kết cấu chính P và kết cấu phụ A) được mô hình là hai hệ một bậc tự do. Các thông số tối ưu, bao gồm thông số đàn hồi và thông số cản của thiết bị được thiết lập với mục tiêu là tối giảm năng lượng dao động trung bình của hệ dưới tác dụng của gia tốc nền được giả thiết là quá trình nhiễu ồn trắng dừng (stationary-white-noise - SWN). Kết quả [7] đưa ra là biểu thức giải tích cho tỉ số độ cứng và tỉ số cản của phần tử tương tác giữa hai hệ. Với cùng mô hình và tiêu chí tối ưu như trong [7], Phạm [8] đã thiết lập lại các biểu thức này. Với trường hợp tối ưu tổng năng lượng dao động trung bình của cả hệ, kết quả biểu thức của tỉ số độ cứng trong [8] là giống với kết quả của Zhu và Iemura [7], trong khi biểu thức tỉ số cản thì có khác biệt. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu này các tác giả đã giả thiết độ cản của các kết cấu là nhỏ và không kể đến khi thiết lập các biểu thức trên. Ngoài ra, như đã chỉ ra trong [8], khi tần số dao động tự do của hai kết cấu gần bằng nhau và khối lượng của kết cấu phụ tương đối nhỏ so với kết cấu chính, dao động của kết cấu phụ có thể bị tăng so với trường hợp không có phần tử tương tác.

Bài báo này trình bày về hạn chế của biểu thức giải tích xác định thông số tối ưu của phần tử tương tác theo mô hình của Zhu và Iemura [7] và thiết lập thêm các điều kiện ràng buộc trong bài toán tối ưu xác định các đặc trưng của thiết bị cản đàn nhớt nối hai kết cấu. Đó là điều kiện năng lượng dao động trung bình của từng kết cấu chính và phụ phải luôn giảm. Ngoài ra, độ cản của các kết cấu cũng được xét đến. Kết quả tính toán các thông số tối ưu theo điều kiện mới được so sánh với kết quả theo biểu thức giải tích thông qua ví dụ số. Việc tính toán tối ưu được thực hiện bằng thuật toán tiến hóa vi phân (DE) [9].



2. Mô hình chế ngự và biểu thức giải tích của phần tử tương tác

Hệ kết cấu bao gồm hai hệ một bậc tự do được nối với nhau bởi một phần tử tương tác chịu tác động của gia tốc nền $\ddot{X}_g(t)$ được giả thiết là quá trình nhiễu ồn trắng (Hình 1). Kết cấu chính (P) có khối lượng M_P , độ cứng K_P và độ cản C_P . Các thông số tương ứng của kết cấu phụ (A) là M_A , K_A và C_A . Phần tử tương tác có độ cứng K_C và hệ số cản C_C .



Hình 1. Sơ đồ hệ kết cấu với phần tử tương tác

Phương trình dao động của hệ được cho như sau:

$$\begin{aligned} M_P \ddot{X}_P(t) + (C_P + C_C) \dot{X}_P(t) + (K_P + K_C) X_P(t) - K_C X_A(t) - C_C \dot{X}_A(t) &= -M_P \ddot{X}_g(t) \\ M_A \ddot{X}_A(t) + (C_A + C_C) \dot{X}_A(t) + (K_A + K_C) X_A(t) - K_C X_P(t) - C_C \dot{X}_P(t) &= -M_A \ddot{X}_g(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Theo Zhu và Iemura [7] với mật độ phổ gia tốc của nền S_{gg} , năng lượng dao động trung bình của kết cấu P và A lần lượt xác định như sau:

$$\bar{E}_P = \frac{M_P S_{gg}}{2} \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3 + a_3 a_4 (\omega_A^2 + \omega_C^2)^2 - a_1 a_4 [2(\omega_A^2 + \omega_C^2) - (\Delta_A + \Delta_C)^2]}{a_4 (a_1 a_2 a_3 - a_4 a_1^2 - a_0 a_3^2)} \quad (2)$$

$$\bar{E}_A = \frac{M_A S_{gg}}{2} \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3 + a_3 a_4 (\omega_P^2 + \omega_C^2)^2 - a_1 a_4 [2(\omega_P^2 + \omega_C^2) - (\Delta_P + \Delta_C)^2]}{a_4 (a_1 a_2 a_3 - a_4 a_1^2 - a_0 a_3^2)} \quad (3)$$

trong đó

$$\begin{aligned} a_0 &= (\omega_P^2 \omega_A^2 + \omega_P^2 \omega_{CA}^2 + \omega_A^2 \omega_{CP}^2), \quad a_1 = [\Delta_P(\omega_A^2 + \omega_{CA}^2) + \Delta_A(\omega_P^2 + \omega_{CP}^2) + \Delta_{CP}\omega_A^2 + \Delta_{CA}\omega_P^2] \\ a_2 &= (\omega_P^2 + \omega_A^2 + \omega_C^2 + \Delta_P\Delta_A + \Delta_P\Delta_{CA} + \Delta_A\Delta_{CP}), \quad a_3 = (\Delta_P + \Delta_A + \Delta_C), \quad a_4 = 1; \\ \Delta_P &= \frac{C_P}{M_P}, \Delta_A = \frac{C_A}{M_A}, \Delta_{CP} = \frac{C_C}{M_P}, \Delta_{CA} = \frac{C_C}{M_A}, \Delta_C = \Delta_{CP} + \Delta_{CA} \\ \omega_P &= \sqrt{\frac{K_P}{M_P}}, \quad \omega_A = \sqrt{\frac{K_A}{M_A}}, \quad \omega_{CP} = \sqrt{\frac{K_C}{M_P}}, \quad \omega_{CA} = \sqrt{\frac{K_C}{M_A}}, \quad \omega_C = \sqrt{\omega_{CP}^2 + \omega_{CA}^2} \end{aligned}$$

Các đặc trưng tối ưu của phần tử tương tác được xác định theo (4)

$$K_{C-opt} = K_P \cdot \beta_{C-opt}, \quad C_{C-opt} = \frac{M_P}{(1+\mu)} \cdot \Delta_{C-opt} \quad (4)$$

với các thông số tối ưu β_{C-opt} và Δ_{C-opt} được xác định theo [8] như sau:

$$\beta_{C-opt} = \frac{(\mu-1)(1-\beta^2)}{(1+\mu)^2}, \quad \Delta_{C-opt} = \omega_P \sqrt{\frac{2(\beta^2-1)^2\mu}{(1+\mu)(\beta^2+\mu)}} \quad (5)$$

trong đó $\mu = M_P / M_A$ là tỉ số khối lượng giữa hai kết cấu và $\beta = \omega_A / \omega_P$ là tỉ số tần số dao động riêng giữa kết cấu phụ và kết cấu chính. Các biểu thức của β_{C-opt} và Δ_{C-opt} được thiết lập trong [8] thông qua cực tiểu tổng năng lượng dao động tương đối trung bình của hệ và bỏ qua độ cản của kết cấu P và A, nghĩa là:

$$\min[\bar{E} = \bar{E}_P + \bar{E}_A], \quad C_P = C_A = 0 \quad (6)$$

Biểu thức (5) xác định cho trường hợp $\mu \geq 1$ và $\beta < 1$. Khi $\beta \geq 1$ các thông số tối ưu được xác định theo biểu thức (7), nghĩa là thiết bị tương tác chỉ có thông số cản [8]. Trường hợp $\mu < 1$ có thể xem như kết cấu chính và phụ chuyển đổi vai trò.

$$\beta_{C-opt} = 0, \quad \Delta_{C-opt} = \omega_P \sqrt{\frac{(1+\mu^2)(\beta^2-1)^2}{(1+\mu)(\beta^2+\mu)}} \quad (7)$$



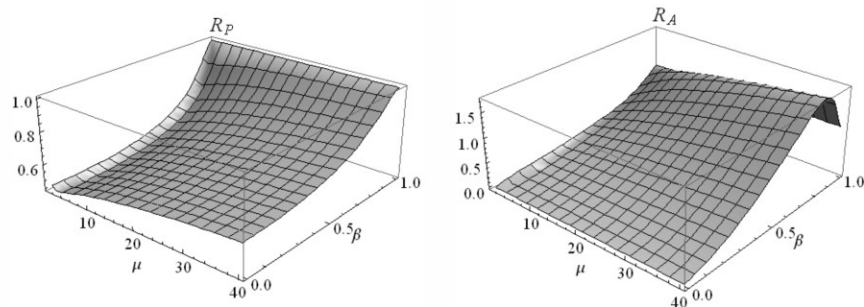
3. Khảo sát hiệu quả chế ngự dao động bởi phần tử tương tác

Có thể nhận thấy rằng giá trị của các thông số tối ưu xác định theo (5) và (7) phụ thuộc vào hai tham số là tỉ số khối lượng μ và tỉ số tần số dao động β . Do vậy, hiệu quả chế ngự dao động cũng sẽ phụ thuộc vào các tham số này. Để đánh giá ảnh hưởng của các tham số đối với hiệu quả chế ngự, hai chỉ số chế ngự được định nghĩa theo [7], bao gồm:

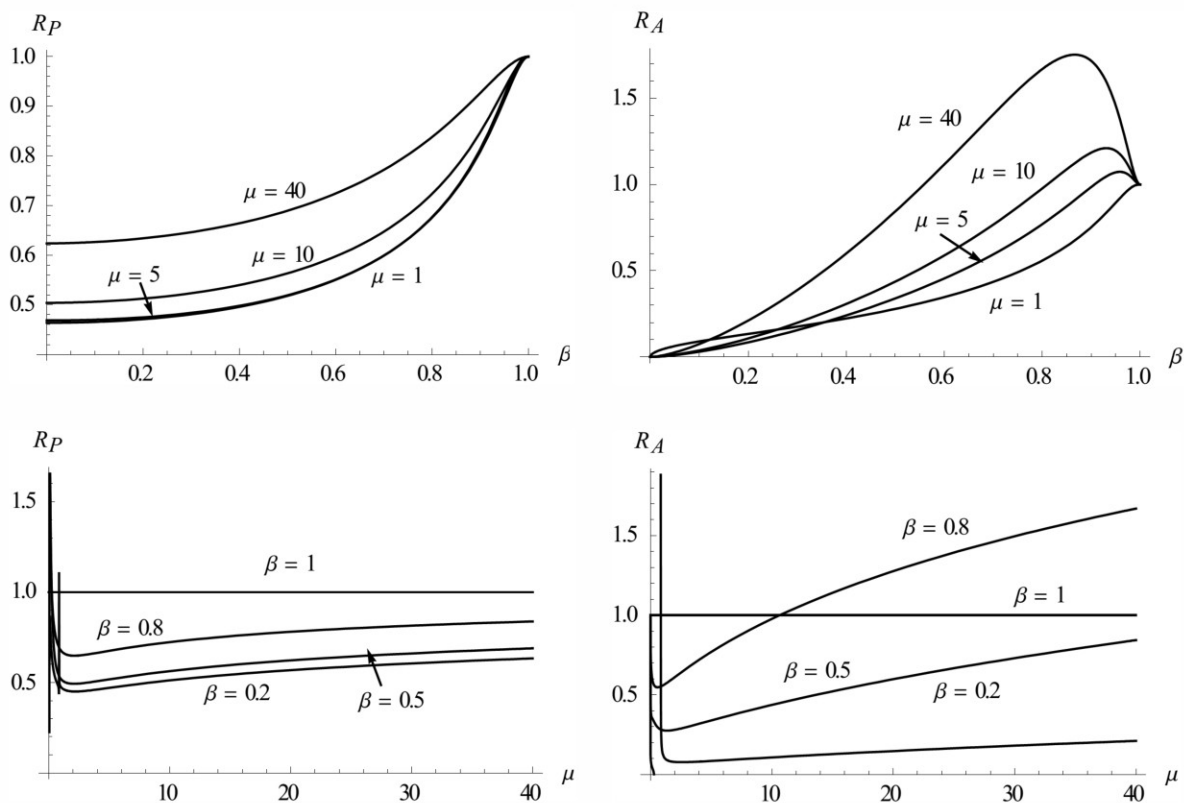
$$R_P = \frac{\langle X_P \rangle_C}{\langle X_P \rangle_U}, \quad R_A = \frac{\langle X_A \rangle_C}{\langle X_A \rangle_U} \quad (8)$$

trong đó $\langle X_P \rangle_C$ và $\langle X_A \rangle_C$ lần lượt là giá trị trung phương chuyển vị tương đối của kết cấu chính và kết cấu phụ có phần tử tương tác dưới tác dụng của gia tốc SWN; $\langle X_P \rangle_U$ và $\langle X_A \rangle_U$ lần lượt là giá trị trung phương chuyển vị tương đối của kết cấu chính và kết cấu phụ khi không có phần tử tương tác. Các giá trị này được xác định theo biểu thức trong [7].

Với hệ kết cấu chính có $M_P = 1.5 \times 10^5$ kg, $\omega_P = 10.55$ rad/s, $\Delta_P = 0.422$ 1/s, Hình 2 biểu diễn các chỉ số R_P và R_A theo sự biến thiên của tỉ số khối lượng và tỉ số tần số dao động. Có thể thấy, kết cấu chính luôn có phản ứng giảm khi được chế ngự. Tuy nhiên đối với kết cấu phụ có tần số riêng gần với kết cấu chính và khối lượng kết cấu phụ nhỏ hơn nhiều so với kết cấu chính, phần tử tương tác có thể làm tăng dao động của kết cấu phụ. Cụ thể trong trường hợp này đối với $\beta = 0.8$, sẽ lớn hơn 1 khi $\mu > 10$ (Hình 3).



Hình 2. Biến thiên chỉ số chế ngự R_p và R_A theo tỉ số khối lượng và tỉ số tần số dao động



Hình 3. Ảnh hưởng của tỉ số khối lượng và tỉ số tần số riêng đến hiệu quả chế ngự



4. Xác định thông số theo tối ưu có ràng buộc

Nhằm đảm bảo hiệu quả chế ngự của phần tử tương tác đối với cả hệ kết cấu cứng như tầng kết cấu, cần đưa thêm các điều kiện ràng buộc trong bài toán tối ưu. Khi xét hệ chịu tác dụng của một gia tốc nền dạng SWN, cần đảm bảo không chỉ tổng năng lượng dao động trung bình của cả hệ là nhỏ nhất mà còn cần đảm bảo năng lượng dao động trung bình của mỗi kết cấu luôn giảm. Như vậy bài toán tối ưu được thiết lập lại như sau:

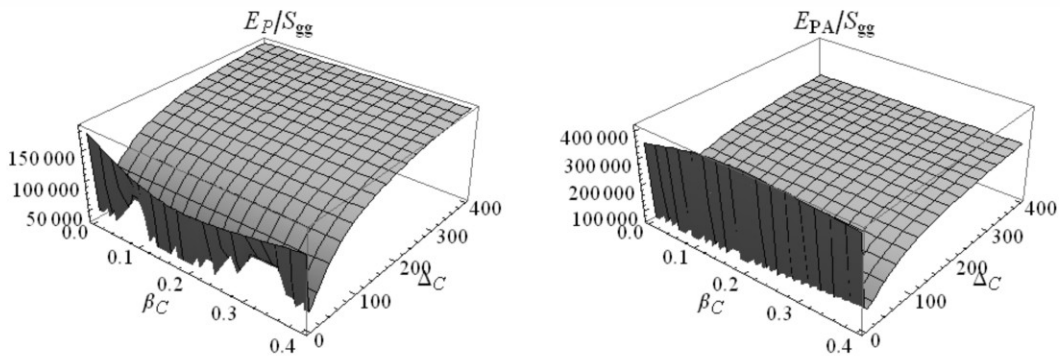
$$\min[\bar{E} = \bar{E}_p + \bar{E}_A], \quad J_p = \frac{\bar{E}_p}{\bar{E}_{p-u}} \leq 1, \quad J_A = \frac{\bar{E}_A}{\bar{E}_{A-u}} \leq 1 \quad (9)$$

trong đó $\bar{E}_{p-u}$ và $\bar{E}_{A-u}$ lần lượt là dao động tương đối trung bình của kết cấu chính và kết cấu phụ khi không có phần tử tương tác, được xác định bởi

$$\bar{E}_{p-u} = M_p S_{gg} / 2\Delta_p, \quad \bar{E}_{A-u} = M_A S_{gg} / 2\Delta_A \quad (10)$$

Việc giải bài toán tối ưu (9) theo giải tích là khó có thể thực hiện được. Tuy nhiên, trong thực tế thiết kế, khi các thông số của kết cấu được xác định, có thể giải bài toán bằng các thuật toán tối ưu số. Ngoài ra, khi giải theo tối ưu số, các giả thiết bỏ qua độ cản của kết cấu là không cần thiết. Thông số tối ưu của phần tử tương tác có thể xác định trực tiếp kể đến cả độ cản của hệ kết cấu.

Hình 4 minh họa hàm năng lượng của kết cấu chính và hàm năng lượng của cả hệ cho hệ kết cấu có kết cấu chính với các đặc trưng giống ở mục 2, tỉ số khối lượng giữa kết cấu chính và kết cấu phụ là $\mu=2$, tỉ số tần số riêng giữa kết cấu phụ và kết cấu chính là $\beta=0.5$. Có thể nhận thấy các hàm năng lượng có nhiều cực tiểu địa phương tại lân cận của giá trị tối ưu. Với các hàm số như thế này, các thuật toán tối ưu tìm kiếm trực tiếp là phù hợp hơn cả (thuật toán di chuyển, thuật toán tiến hóa...).



Hình 4. Năng lượng dao động trung bình theo các thông số của phần tử tương tác

5. Ví dụ

Xét một hệ kết cấu với các thông số như sau:

- Kết cấu chính: $M_p = 2.58 \times 10^7 \text{ kg}$, $\omega_p = 4.27 \text{ rad/s}$, $\xi_p = 0.01$

- Kết cấu phụ: $M_A = M_p / \mu$, $\omega_A = 3.02 \text{ rad/s}$, $\xi_A = 0.01$

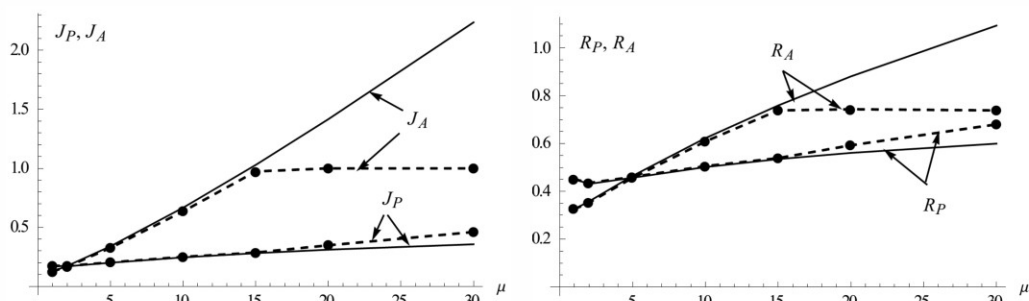
Để minh họa và so sánh giữa kết quả chế ngự sử dụng biểu thức giải tích (5) và kết quả chế ngự theo tối ưu có điều kiện ràng buộc (9), tỉ số μ sẽ được cho các giá trị khác nhau. Kết quả tính toán các thông số tối ưu của thiết bị tương tác được cho trong Bảng 1, trong đó “Giải tích” là kết quả tính theo biểu thức giải tích (5), “Tối ưu số” là kết quả tính trực tiếp tối ưu có điều kiện ràng buộc bằng thuật toán tiến hóa vi phân (DE). Đồng thời, tỉ số năng lượng J giữa tổng năng lượng dao động trung bình của hệ có phần tử tương tác và năng lượng dao động trung bình của hệ không có phần tử tương tác (biểu thức (11)) cũng được thể hiện trong Bảng 1.

$$J = \frac{\bar{E}_P + \bar{E}_A}{\bar{E}_{P-u} + \bar{E}_{A-u}} \quad (11)$$

Có thể thấy khi tỉ số khối lượng $\mu \leq 15$, cả hai phương pháp đều cho hiệu quả giảm năng lượng dao động trung bình của hệ tương đương nhau, mặc dù các thông số tối ưu là có chút khác biệt (khác biệt nhiều hơn khi μ tăng). Hiệu quả chế ngự của phần tử tương tác xác định theo tối ưu trực tiếp có chút tốt hơn so với sử dụng công thức giải tích, được thể hiện bằng các giá trị J nhỏ hơn (in đậm). Khi $\mu > 15$, công thức giải tích (5) cho tỉ số J nhỏ hơn so với tính toán tối ưu số, tuy nhiên năng lượng dao động của kết cấu phụ lại tăng so với trường hợp không có thiết bị tương tác, thể hiện ở giá trị $J_A > 1$ trên Hình 5a (Đường nét liền). Trái lại J_A luôn được đảm bảo không lớn hơn 1 khi sử dụng thông số tối ưu theo (9) (Đường nét đứt). Chỉ số chế ngự của kết cấu phụ R_A cũng luôn được đảm bảo nhỏ hơn 0.8 (Đường nét đứt trên Hình 5b). Hình 5 cũng cho thấy phương pháp tối ưu trực tiếp có ràng buộc luôn cho kết quả chế ngự kết cấu phụ tốt hơn so với sử dụng công thức giải tích. Còn đối với kết cấu chính, hai phương pháp cho kết quả tương đương khi $\mu \leq 15$.

Bảng 1. So sánh kết quả chế ngự theo giải tích và theo tối ưu có ràng buộc

μ	Giải tích			Tối ưu số		
	Δ_{C-opt}	β_{C-opt}	J	Δ_{C-opt}	β_{C-opt}	J
1	1.742	0	0.146517	1.745	0	0.146517
2	1.558	0.0555	0.170725	1.570	0.0512	0.170626
5	1.174	0.0555	0.230596	1.196	0.0537	0.23043
10	0.888	0.0371	0.297783	0.916	0.0363	0.297531
15	0.742	0.0273	0.345739	0.773	0.0268	0.345391
20	0.650	0.0215	0.383415	0.849	0.0196	0.391035
30	0.537	0.0150	0.441131	0.951	0.0123	0.484707


Hình 5. Tỷ số năng lượng (a) và chỉ số chế ngự (b) đối với kết cấu chính và kết cấu phụ

6. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã nghiên cứu xác định thông số tối ưu của thiết bị chế ngự dao động nổi hai kết cấu liên kết được mô hình hóa là các hệ một bậc tự do. Trong trường hợp tối ưu không có điều kiện ràng buộc, dao động của một kết cấu có thể tăng so với khi không có thiết bị tương tác mặc dù tổng năng lượng dao động của hệ vẫn giảm. Hạn chế này được khắc phục khi bổ sung điều kiện đảm bảo năng lượng dao động trung bình của mỗi kết cấu luôn giảm. Từ đó, tác giả đã sử dụng thuật toán tối ưu số để xác định các thông số tối ưu của thiết bị. So với các thông số đã cho dưới dạng giải tích, phương pháp đề xuất đảm bảo hiệu quả chế ngự của thiết bị đối với cả hệ kết cấu cũng như từng kết cấu.

Tài liệu tham khảo

1. Iwanami, K., Suzuki, K., and Seto, K. (1986), "Studies of the Vibration Control Method of Parallel Structures", *Trans. JSME*, No. 86-0247A, 3063-3072.
2. Kageyama, M., Yoshida, O., and Yasui, Y. (1994), "A Study on Optimal Damping Systems for Connected Double Frame Structures", *Proceeding of First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, U.S.A., Vol. 1, WP4-32/WP4-39.
3. Gurley, K., Kareem, A., Bergman, L.A., Johnson, E.A., and Klein, R.E. (1994), "Coupling Tall Buildings for Control of Response to Wind", *Proceeding of Sixth International Conference on Structural Safety and Reliability*, '93 (ICOSSAR), A.A. Balkema Publishers, Rotherdam, 1553-1560.
4. Luco, J.E. and De Barros, F.C.P. (1998), "Control of the Seismic Response of a Composite Tall Building Modelled by Two Interconnected Shear Beams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (27), 205-223.
5. Zang, W.S. and Xu, Y.L. (1999), "Dynamic Characteristics and Seismic response of Adjacent Buildings Linked by Discrete Dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (28), 1163-1185.
6. Zhang, W.S. and Xu, Y.K. (2000), "Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell model-defined fluid dampers", *Journal of Sound and Vibration* 233, (5), 775-796.
7. Zhu, H. and Iemura, H. (2000), "A Study of Response Control on the Passive Coupling Element between Two Parallel Structures", *Structural Engineering and Mechanics*, 9(4), 383-396.
8. Pham, H. A. (2002), "Một phương pháp điều khiển tương tác phản ứng của hai kết cấu song song chịu tải trọng động đất", *Tuyển tập các công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VII*, Hà Nội, 12/2002, 30-36.
9. Storn, R. and Price, K. (1997), "Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359.