

ĐIỀU KHIỂN BÁN CHỦ ĐỘNG CHO HỆ GIẢM CHẤN MỘT BẬC TỰ DO BẰNG VẬT LIỆU LƯU BIẾN TỪ ĐÀN HỒI

SEMI-ACTIVE CONTROL FOR 1-DOF SYSTEM USING MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMER

Nguyễn Xuân Bảo, Nguyễn Văn Chương, Trương Thị Hoa

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng;
 nxbao@ute.udn.vn, nvchuong@ute.udn.vn, tthoa@ute.udn.vn

Tóm tắt - Vật liệu lưu biến từ đàn hồi (MRE) là một trong những vật liệu thông minh được nhiều nhà khoa học quan tâm trong những năm gần đây. Độ cứng của vật liệu có thể thay đổi được dưới ảnh hưởng của một từ trường. Trong nghiên cứu này, vật liệu lưu biến từ đàn hồi được sử dụng trong hệ giảm chấn thông minh. Trong hệ giảm chấn này, độ cứng của hệ có thể điều khiển được do đó tần số riêng của hệ có thể được điều chỉnh để tránh hiện tượng cộng hưởng. Đầu tiên sự thay đổi độ cứng của vật liệu được khảo sát dưới ảnh hưởng của các giá trị từ trường khác nhau. Thứ hai, điều khiển bán chủ động với chiến lược dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov để giảm rung động của hệ. Hiệu quả của bộ điều khiển đã được đánh giá bằng mô phỏng MATLAB và bằng thực nghiệm so với của hệ thống bị động. Kết quả cho thấy, bộ điều khiển đề xuất đã thành công trong việc giảm chấn cho hệ rung động một bậc tự do.

Từ khóa - Lưu biến từ đàn hồi; điều khiển bán chủ động; giảm chấn

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, nghiên cứu và ứng dụng hệ thống giảm chấn bán chủ động là nội dung được nhiều nhà nghiên cứu, và được ứng dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp ô tô, công trình xây dựng, và các hệ thống cơ khí.

Hệ thống giảm chấn bán chủ động bằng việc sử dụng dầu từ trường (magnetorheological fluid, MRF) đã trở nên nổi tiếng và đang được sử dụng rộng rãi [1, 2]. Tuy nhiên, MRF thể hiện những nhược điểm, ví dụ, các vấn đề lắng đọng và chi thay đổi độ giảm xóc dưới tác động của vận tốc. Ngược lại, vật liệu lưu biến từ đàn hồi (magnetorheological elastomer MRE) được sử dụng trong điều khiển bán chủ động, gần đây đã nổi lên như một vật liệu thông minh có khả năng cải thiện các hệ thống truyền thống trong việc kiểm soát các rung động [3-7]. Mô đun đàn hồi của vật liệu này có thể điều khiển được, do đó các thiết bị sử dụng vật liệu này có thể thay đổi được tần số riêng của hệ.

Thiết bị sử dụng vật liệu lưu biến từ MRE là một thiết bị bán chủ động và cần một bộ điều khiển bán chủ động để khai thác các tính năng tốt nhất của hệ thống giảm chấn. Hệ thống giảm chấn sử dụng MRE hiệu quả như một hệ thống giảm chấn chủ động mà không cần năng lượng lớn. Gần đây, các hệ thống điều khiển bán chủ động đã xuất hiện như một thiết bị thông minh và được áp dụng rộng rãi trong kiểm soát rung động (đặc biệt là hệ thống treo, hệ thống chống động đất). Một thuật toán điều khiển để xác định độ cứng MRE bằng cách thay đổi cường độ từ trường. Nhiều thuật toán như điều khiển Skyhook [8], điều khiển cắt tối ưu [9], điều khiển tuyến tính bậc hai (LQG) [10], điều khiển logic mờ [11, 12] đã được giới thiệu để kiểm soát hệ thống giảm chấn sử dụng MRF. Các thuật toán này đơn giản và áp dụng vào thực tế dễ dàng. Tuy nhiên, hiệu quả của các thuật toán

Abstract - Magnetorheological elastomer (MRE) is one of the smart materials that have interested many scientists in recent years. The stiffness of a material can be changed under the difference levels of magnetic field. In this study, MREs are used in intelligent suspension systems. In this system, the stiffness of the system is controllable so that its natural frequency can be adjusted to avoid resonance. First, the material stiffness is investigated under the different levels of magnetic field. Second, semi-active control with a strategy is based on Lyapunov stability theory to reduce system vibration. The effectiveness of the controller has been evaluated by MATLAB simulation and by experiment. The results show that the proposed controller has reduced vibration in the 1-DOF system.

Key words - Magnetorheological elastomer; Semi-active control; Variable stiffness

này chưa cao. Gần đây, các thuật toán điều khiển thích nghi, bền vững đã được đề xuất cho bộ điều khiển bán chủ động [13-16]. Tuy nhiên, các thuật toán điều khiển này khó áp dụng vào thực tiễn vì tính chất phi tuyến của vật liệu MRE. Bên cạnh đó, các bộ điều khiển này cần các thiết bị (nguồn, cảm biến, bộ vi xử lý) có độ phân giải cao và đáp ứng nhanh, cán bộ kỹ thuật phải có trình độ chuyên môn cao. Nghiên cứu này nhóm tác giả đề xuất thuật toán điều khiển Lyapunov cho bộ điều khiển bán chủ động sử dụng vật liệu MRE. Thuật toán đề xuất dựa trên nguyên lý hấp thụ năng lượng dao động tối ưu. Thuật toán điều khiển đề xuất là đơn giản, áp dụng vào điều khiển thời gian thực một cách dễ dàng và đạt hiệu quả cao. Hơn nữa, thuật toán bỏ qua tính chất phi tuyến của vật liệu MRE.

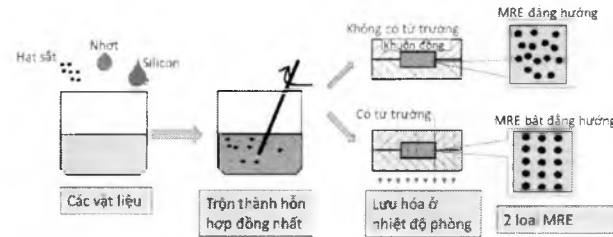
Xuất phát từ ưu điểm đáng kể của vật liệu lưu biến từ đàn hồi trên, nhóm tác giả đề xuất nghiên cứu “Điều khiển bán chủ động cho hệ thống giảm chấn bán chủ động bằng việc sử dụng vật liệu lưu biến từ đàn hồi” nhằm nâng cao hiệu quả giảm chấn cho các hệ thống cơ khí. Đầu tiên, quá trình chế tạo vật liệu MRE và tính chất cơ học của MRE dưới ảnh hưởng của từ trường đã được trình bày. Sau đó, một bộ điều khiển được đề xuất nhằm tăng hiệu quả của hệ thống giảm chấn sử dụng MRE, thuật toán điều khiển dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov.

2. Vật liệu lưu biến từ đàn hồi

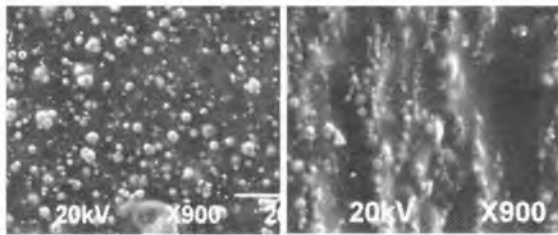
2.1. Chế tạo vật liệu

Một quy trình chế tạo cơ bản được mô tả trong Hình 1. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả sử dụng hỗn hợp vật liệu với tỉ lệ khối lượng là: Silicon RTV (68%) nhãn hiệu Shin-etsu KE1416, nhớt silicon (2%), hạt sắt có đường kính trung bình 20 μ m (30%) nhãn hiệu BASF SG-BH. Các

thành phần này được cho vào trong một máy trộn li tâm để tạo thành một hỗn hợp đồng nhất. Hỗn hợp này được rót vào trong khuôn đồng và được nén để loại bỏ bọt khí bên trong vật liệu. Cuối cùng, hỗn hợp được lưu hóa (đúc) trong khuôn đồng dưới một từ trường hoặc không có từ trường ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ. Các mẫu MRE bất đẳng hướng được đúc trong từ trường, trong khi đó các mẫu MRE đẳng hướng được đúc mà không có sự hiện diện của từ trường. Sau khi đúc trong 24 giờ, nhóm tác giả có được mẫu MRE có kích thước 20x20x10 mm như biểu diễn Hình 3(b). Hình 2 cho thấy cấu trúc vi mô của các MRE đẳng hướng và bất đẳng hướng dưới kính hiển vi.



Hình 1. Quá trình chế tạo vật liệu MRE



(a) (b)

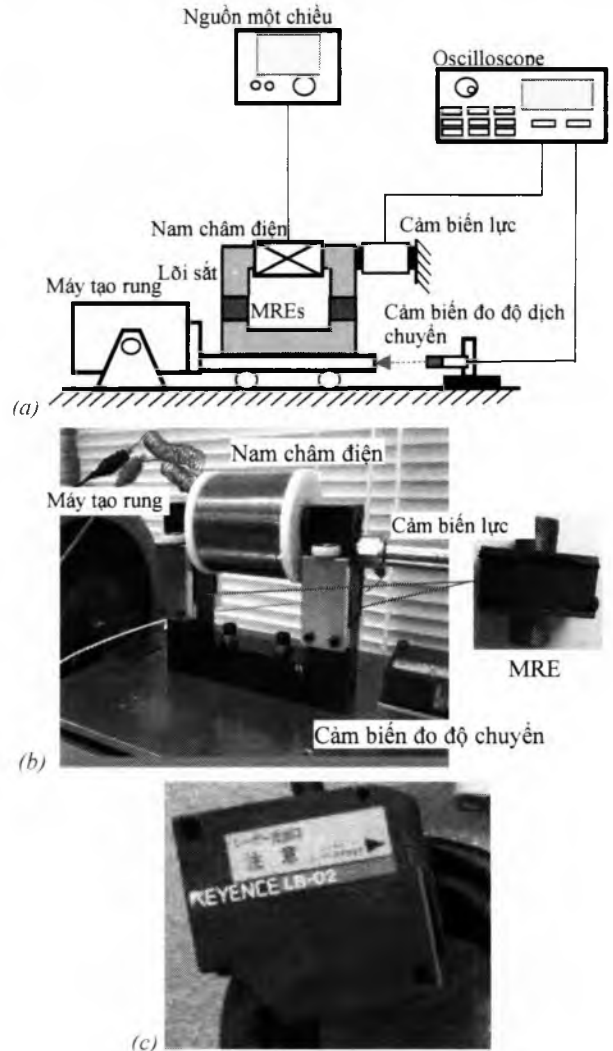
Hình 2. Cấu trúc của MRE dưới kính hiển vi (a) đẳng hướng; (b) bất đẳng hướng

2.2. Đặc tính độ cứng của vật liệu lưu biến từ đàn hồi

Thiết lập hệ thống đo lường được hiển thị trong Hình 3. Một nam châm điện bao gồm lõi sắt và một cuộn dây từ tính. Một dây có đường kính 1 mm được sử dụng để quấn một cuộn dây 800 vòng. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng hai mẫu MRE đẳng hướng có kích thước 20x20x10mm, các mẫu này được đặt trong các khoảng trống giữa lõi trên và dưới của nam châm điện. Trong các khoảng trống này, mật độ từ thông được thay đổi từ 0 mT đến 326 mT tương ứng với sự thay đổi dòng điện từ 0A đến 6A. Trong khi lõi dưới được lắp đặt trên bàn di chuyển. Bàn được di chuyển bởi một máy rung với tín hiệu kích thích được cung cấp bởi một bộ tạo tín hiệu. Lực đo được ở lõi trên và độ dịch chuyển của lõi dưới chính là lực biến dạng đàn hồi và lượng biến dạng đàn hồi của vật liệu MRE. Lực được đo bằng cảm biến lực (PCB PIEZOTRONICS 208C02). Độ dịch chuyển được đo bằng cảm biến dịch chuyển với nhãn hiệu (KEYENCE LB-02). Thông số kỹ thuật của cảm biến được trình bày ở Bảng 1, hình ảnh cảm biến được trình bày ở Hình 3(c). Đáp ứng lực đàn hồi và lượng biến dạng được xử lý bởi máy phân tích Oscilloscope (ONOSOKI CF-6400). Một nguồn cung cấp dòng điện một chiều (MATSUSADA PRECISION Inc., Series POP 65-5) cung cấp dòng điện trực tiếp có thể điều chỉnh từ trường của cuộn dây. Dòng điện áp dụng được điều khiển từ 0A đến 6A (tương ứng mật độ từ thông được điều chỉnh từ 0 mT đến 326 mT).

Bảng 1. Các thông kỹ thuật của cảm biến dịch chuyển nhãn hiệu KEYENCE LB-02

Loại cảm biến	Cảm biến độ phân giải cao
Khoản cách tham chiếu	40 mm
Giới hạn đo	±10 mm
Nguồn sáng	Laser bán dẫn hồng ngoại
Công suất	1.0 mW maximum
Điểm sáng	1 mm
Độ phân giải	2 μm (60 ms), 15 μm (2 ms), 50 μm (0.15 ms)



Hình 3. Hệ thống đo lường đặc tính độ cứng của MRE (a) sơ đồ thí nghiệm, (b) hình ảnh thí nghiệm, và (c) hình ảnh cảm biến KEYENCE LB-02

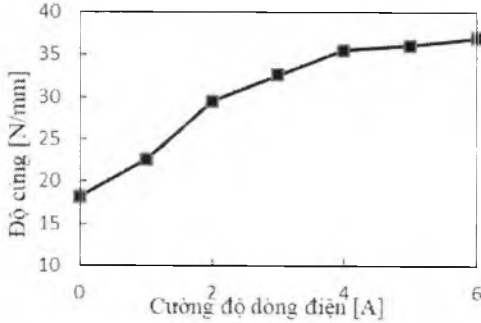
Để xác định độ cứng của vật liệu, máy rung thực hiện dao động điều hòa với tần số thấp $x = x_0 \sin(\omega t)$. Khi đó đáp ứng lực cũng là hàm điều hòa $F = F_0 \sin(\omega t)$. Độ cứng của vật liệu được xác định,

$$k = \frac{F}{x} = \frac{F_0}{x_0} \tag{1}$$

Trong đó, x_0 là biên độ của rung động hàm điều hòa được đo từ cảm biến dịch chuyển, F_0 là biên độ của lực được đo từ cảm biến lực. Giá trị của biên độ được xác định bằng giá trị lớn nhất được đo từ các cảm biến.

Độ cứng phụ thuộc vào từ trường được thể hiện trong Hình 4. Độ cứng tương đương tăng mạnh đối với từ trường

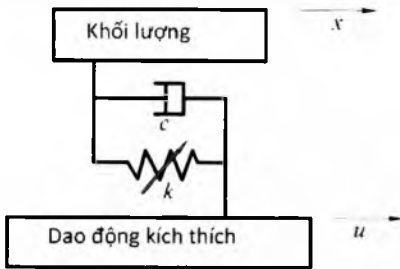
dao động từ 0 mT (0A) đến 173 mT (4A) và giá trị tăng chậm cho đến khi đạt đến trạng thái bão hòa khi cường độ từ trường là 365mT (6A). Vì độ cứng tăng không đáng kể trong khoản từ 4A đến 6A. Nên trong nghiên cứu này, nhóm tác giả khai thác sự thay đổi độ cứng của MRE từ 0A đến 4A để dòng điện một chiều đáp ứng nhanh hơn khi chuyển trạng thái đóng - mở. Thí nghiệm Hình 4 được thực hiện nhiều lần, tuy nhiên giá trị thay đổi không đáng kể.



Hình 4. Tính chất độ cứng ảnh hưởng bởi dòng điện

3. Điều khiển giảm chấn hệ một bậc tự do

3.1. Mô hình hệ giảm chấn một bậc tự do (1-DOF)



Hình 5. Hệ thống kích thích 1-DOF

Mô hình toán học của hệ thống giảm chấn 1-DOF được thể hiện trong mục này. Phương trình chuyển động cho hệ thống 1-DOF (Hình 5) được mô tả trong miền thời gian là

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k^*x = c\dot{u} + ku \quad (2)$$

Trong phương trình (2), x đại diện cho sự dịch chuyển của khối lượng m , u là độ dịch chuyển của dao động kích thích, c hệ số giảm chấn của MRE, $k^* = k_0 + \Delta k$ là độ cứng MRE có thể điều chỉnh, k_0 là độ cứng của MRE có được mà không có dòng điện, và Δk là lượng tăng độ cứng khi dòng điện được cấp.

Độ truyền động của hệ (transmissibility) được định nghĩa bằng tỉ lệ giữa lượng dịch chuyển đáp ứng $x(t)$ và dao động kích thích $u(t)$, trong miền thời gian độ truyền động được xác định là $T(t) = x(t)/u(t)$. Tuy nhiên, độ truyền động của hệ thống trong miền thời gian không phản ánh hết tính chất của hệ thống, độ truyền động phụ thuộc lớn vào tần số kích thích và tần số riêng của hệ. Do đó, độ truyền động trong miền tần số cần được phân tích.

Từ phương trình (2), hàm truyền $G(s)$ của hệ thống trong miền Laplace được định nghĩa là.

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{c}{k^*}s + 1}{\frac{m}{k^*}s^2 + \frac{c}{k^*}s + 1} \quad (3)$$

Trong phương trình (3), $X(s)$ là hàm biến đổi Laplace của $x(t)$ và $U(s)$ là hàm biến đổi Laplace của $u(t)$.

Độ truyền động của hệ thống trong miền tần số $T(\omega)$ được xác định bằng cách thay s bằng $j\omega$ trong miền Laplace $G(s)$, được viết là:

$$T(\omega) = G(j\omega) = \frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2} \quad (4)$$

Trong đó, $\lambda = \omega_0/\omega$, $\omega = \sqrt{k^*/m}$, $\zeta = c/(2\sqrt{k^*m})$, ω_0 là tần số kích thích. ω là tần số riêng của hệ, ζ là tỉ lệ giảm chấn. Khi tần số kích thích bằng tần số riêng của hệ $\lambda = 1$, độ truyền động của hệ đạt giá trị lớn nhất và xảy ra hiện tượng cộng hưởng.

3.2. Điều khiển bán chủ động cho hệ giảm chấn 1-DOF

Một thuật toán điều khiển dựa trên lý thuyết điều khiển đáng tin cậy, cụ thể là lý thuyết ổn định Lyapunov đã được áp dụng. Phương trình động học cho hệ thống 1-DOF (phương trình 2) có thể được viết lại thành:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{u}) + k_0(x - u) = -\Delta k(x - u), \quad (5)$$

Thuật toán điều khiển dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Giả sử hàm Lyapunov được chọn bất kì $V(x, \dot{x}) > 0 \forall x, \dot{x}$, nếu đạo hàm $\dot{V}(x, \dot{x}) < 0 \forall x, \dot{x}$ thì các biến x, \dot{x} tiệm cận về giá trị không. Tuy nhiên, trong hệ thống này bộ điều khiển không đảm bảo được $\dot{V}(x, \dot{x}) < 0 \forall x, \dot{x}$. Thuật toán điều khiển đề xuất nhằm làm giá trị của hàm $V(x, \dot{x})$ đạt giá trị nhỏ nhất. Từ đó, giá trị các biến x, \dot{x} được giảm về lân cận giá trị không. Lượng dịch chuyển và vận tốc dịch chuyển của khối lượng sẽ giảm như là mục tiêu của nghiên cứu.

Hàm Lyapunov được chọn là.

$$V(x, \dot{x}) = \frac{1}{2} \left(\frac{k_0}{m} (x - u)^2 + \dot{x}^2 \right) \quad (6)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov kết hợp phương trình (2) được diễn giải là:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, \dot{x}) &= \frac{k_0}{m} (x - u)\dot{x} + \dot{x}\dot{x} \\ &= \frac{c}{m} (\dot{u} - \dot{x})\dot{x} - \frac{\Delta k}{m} (x - u)\dot{x} \\ &= -\frac{c}{m} \dot{x}^2 - \frac{\Delta k}{m} (x - u)\dot{x} + \frac{c}{m} \dot{u}\dot{x}. \end{aligned} \quad (7)$$

Thuật toán điều khiển bán chủ động dưới đây được đề xuất để hàm $V(x, \dot{x})$ đạt giá trị nhỏ nhất

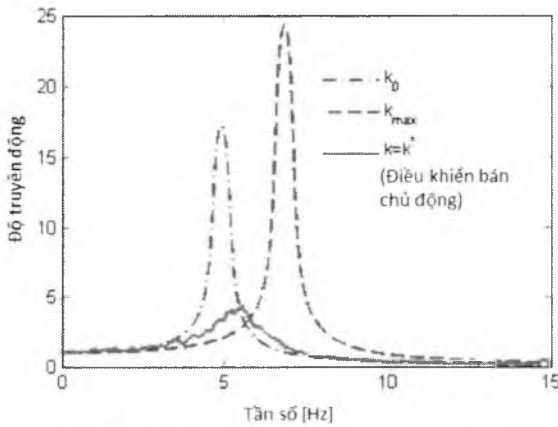
$$\Delta k = \begin{cases} 0 & (k^* = k_0, I = 0A) \text{ if } x_r \dot{x} < 0 \\ \Delta k_{max} & (k^* = k_{max}, I = I_{max}) \text{ if } x_r \dot{x} \geq 0, \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó, $x_r = x - u$ là lượng dịch chuyển tương đối giữa khối lượng và dao động kích thích.

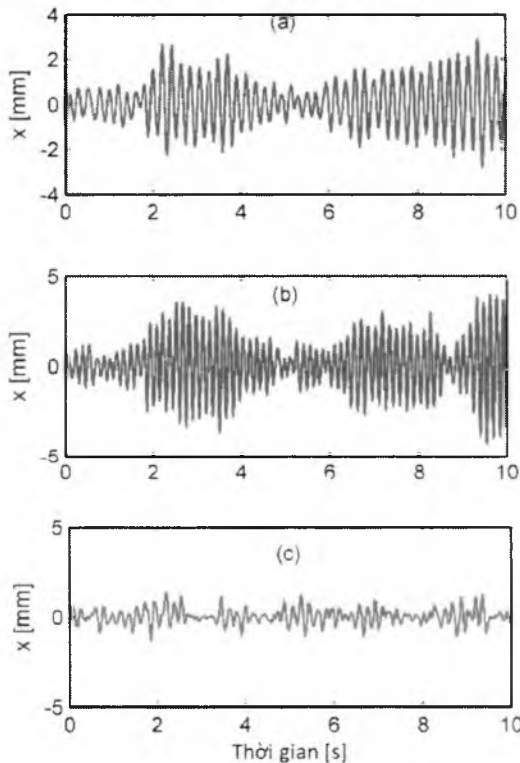
3.3. Kết quả mô phỏng

Nhóm tác giả dùng phần mềm Matlab để mô phỏng đáp ứng của hệ thống. Các thông số được sử dụng cho mô phỏng được trình bày trong Bảng 2. Các thông số sử dụng cho mô phỏng dựa trên thông số thực của mô hình và kết quả thực nghiệm ở Mục 2.2. Độ cứng nhỏ nhất k_0 là độ cứng của vật liệu đạt được khi không có dòng điện áp dụng (0A), độ cứng lớn nhất k_{max} đạt được khi áp dụng một cường độ dòng điện 4A. Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 6 và 7. Hình 6 biểu diễn đáp ứng trong miền tần số của khối lượng m . Trong trường hợp này, tần

số kích thích được quét trong khoảng 1 Hz đến 15 Hz. Biểu đồ cho thấy, khả năng đáp ứng của chuyển vị đã giảm đáng kể trong điều khiển bán chủ động. Hình 7 mô tả đáp ứng chuyển vị của khối lượng dưới sự kích thích ngẫu nhiên trong miền thời gian. Rung động đã bị triệt tiêu đáng kể khi sử dụng điều khiển bán chủ động.



Hình 6. Độ truyền động (transmissibility) của hệ thống 1-DOF trong miền tần số



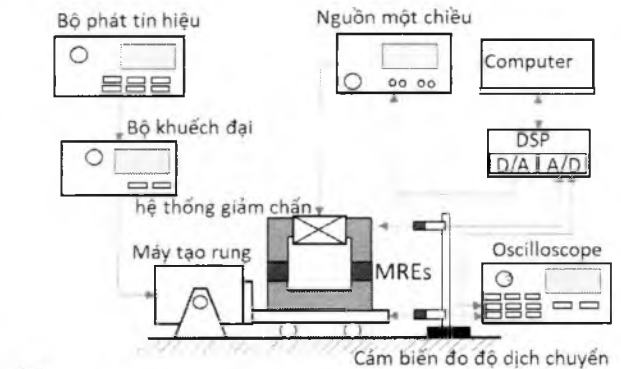
Hình 7. Đáp ứng chuyển vị của khối lượng
 (a) độ cứng MRE có giá trị nhỏ nhất ($I = 0 \text{ A}, k^* = k_0$);
 (b) độ cứng MRE có giá trị lớn nhất ($I = 4 \text{ A}, k^* = k_{max}$);
 (c) độ cứng của MRE được điều chỉnh bởi bộ điều khiển bán chủ động ở phương trình 8

Bảng 2. Các thông số được sử dụng cho mô phỏng

Hệ số giảm chấn (c)	1 Nsm ⁻¹
Khối lượng (m)	1.138 kg
Độ cứng nhỏ nhất (k_0)	974,5 Nm ⁻¹
Độ cứng lớn nhất (k_{max})	1948,9 Nm ⁻¹
Biên độ kích thích	2 mm

3.4. Kết quả thực nghiệm

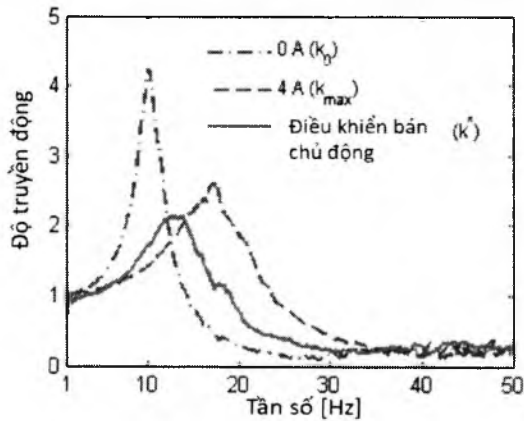
Sơ đồ thí nghiệm đã được lắp đặt để đánh giá hiệu quả của hệ thống MRE được hiển thị trong Hình 8(a). Hình ảnh của bộ máy thí nghiệm cũng được hiển thị trong Hình 8(b). Một cặp mẫu MRE đã được đặt cố định giữa các lõi sắt của nam châm điện được xem như lò xo có độ cứng thay đổi. Lõi dưới được cố định trên đế, và phần trên được phép di chuyển theo hướng ngang. Lõi trên và cuộn cảm hoạt động cùng nhau như một khối và là khối lượng của dịch chuyển. Hai cảm biến dịch chuyển laser đã được sử dụng để đo chuyển vị của dao động kích thích và dao động của khối lượng. Các tín hiệu dịch chuyển tương tự được gửi đến bộ điều khiển tín hiệu số (TMS320C6713 DSK Board) làm tín hiệu đầu vào.



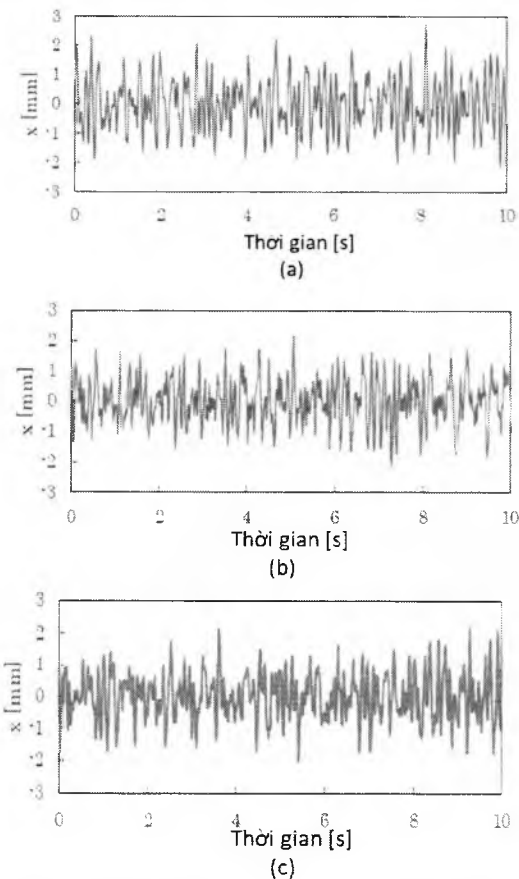
Hình 8. Hệ thống thí nghiệm
 (a) sơ đồ thí nghiệm; (b) hình ảnh

Các kết quả thử nghiệm được thể hiện trong Hình 9 và 10. Các kết quả được so sánh giữa hai hệ thống bị động (các giá trị dòng điện được áp dụng không đổi lần lượt là 0A, 4A) và hệ thống được điều khiển bằng bộ điều khiển bán chủ động. Khả năng đáp ứng nhỏ và gần như giống nhau khi các hệ thống hoạt động ở vùng tần số cao (trên 30 Hz). Hệ thống bị động với dòng điện áp dụng bằng 0 có tần số riêng nhỏ nhất và độ đáp ứng cao nhất. Hệ thống bị động với dòng điện áp dụng 4A có tần số riêng lớn nhất và độ đáp ứng nhỏ. Những kết quả này phù hợp với các đặc tính vật liệu MRE được đề cập trong Mục 2. Đáng chú ý, độ truyền động cũng như đáp ứng chuyển vị đã giảm đáng kể khi sử dụng bộ điều khiển bán chủ động. Trong thực nghiệm, dao động kích thích là ngẫu nhiên với cường độ và dải tần số hoạt động là giống nhau cho cả ba trường hợp. Nhóm tác giả thực hiện mỗi trường hợp trong thời gian dài và tính giá trị trung bình bình phương (root mean square RMS) để so sánh. Đó đó, kết quả là đáng tin cậy. Cụ thể, giá trị trung bình bình phương cho các trường hợp là: Trường hợp giá trị độ cứng nhỏ nhất (0A) RMS=1.08; Trường hợp giá trị độ

cứng lớn nhất (4A) RMS=0.96: Trường hợp điều khiển bán chủ động RMS=0.85. Vậy, hệ thống sử dụng vật liệu MRE với bộ điều khiển bán chủ động hoạt động hiệu quả hơn.



Hình 9. Độ truyền động (transmissibility) theo tần số (thực nghiệm)



Hình 10. Đáp ứng miền thời gian (thực nghiệm)
(a) đáp ứng khi MRE không có dòng điện; (b) đáp ứng khi MRE được cấp dòng điện $I = 4 \text{ A}$; (c) đáp ứng khi MRE được điều chỉnh bởi bộ điều khiển bán chủ động ở phương trình 5

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển bán chủ động được đề xuất cho hệ giảm chấn sử dụng vật liệu MRE. Đặc tính độ cứng của vật liệu MRE đã được khảo sát dưới ảnh hưởng của các giá trị từ trường. Độ cứng được điều chỉnh bằng cách điều khiển dòng điện áp dụng cho nam châm điện. Hệ thống

giảm chấn MRE là một hệ thống thông minh có thể thay đổi được tần số tự nhiên của hệ do vậy hệ thống tránh được hiện tượng cộng hưởng. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, hệ thống giảm chấn MRE kết hợp với điều khiển bán chủ động đạt kết quả tốt hơn so với các bộ điều khiển bị động. Khi được điều chỉnh phù hợp, bộ điều khiển bán tích cực mờ có khả năng cải thiện các đặc tính đáp ứng và hiệu quả của các hệ thống loại bán hoạt động.

Lời ghi nhận: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2019-DN06-16.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. El Majdoub, D. Ghani, F. Giri, and F. Z. Chaoui, "Adaptive semi-active suspension of quarter-vehicle with magnetorheological damper", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 137, no. 2, 2015.
- [2] S. Nie, Y. Zhuang, W. Liu, F. Chen, A semi-active suspension control algorithm for vehicle comprehensive vertical dynamics performance, *Veh. Syst. Dyn.*, 55 (2017), pp. 1099-1122.
- [3] X.B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma, Robust adaptive controller for semi-active control of uncertain structures using a magnetorheological elastomer-based isolator, *Journal of Sound and Vibration*, No: 343, Science Direct, 2018, Pages: 192-212.
- [4] X.B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma, Fuzzy Semi-active Control of Multi-degree-of-freedom Structure using Magnetorheological Elastomers, *ASME Proceedings*, No: ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference Volume 8: Seismic Engineering, 2017, Pages: 1-10.
- [5] S. Opie, W. Yim, Design and control of a real-time variable modulus vibration isolator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 22(2) (2011) 113-125.
- [6] G.J. Liao, X.L. Gong, S.H. Xuan, C. J. Kang, L.H. Zong, Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 23(1) (2011) 25-33.
- [7] X.B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma, Fuzzy Semiactive Vibration Control of Structures Using Magnetorheological Elastomer, *Shock and Vibration, Hindawi*, Volume 2017, Pages: 15p.
- [8] L.M. Jansen, S.J. Dyke, Semi-active control strategies for MR dampers: A comparative study, *J. of Eng. Mech. ASCE* 2000; 126(8):795-803.
- [9] F. Yi, S. Dyke, J. Caicedo, J. Carlson, Experimental verification of multi input seismic control strategies for smart dampers, *Journal of Engineering Mechanics* 127 (2001) 1152-1164.
- [10] Y. Wang, S. Dyke, Modal-based LQG for smart base isolation system design in seismic response control, *Structural Control and Health Monitoring* 20 (2013) 753-768.
- [11] M.D. Symans, S. W. Kelly, Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems, *Earth Engineering and Structural Dynamics* 28 (1999) 37-60.
- [12] X.B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma, Modeling and semi-active fuzzy control of magnetorheological elastomer-based isolator for seismic response reduction, *Mech. Syst. Signal Process.* 101 (2018) 449-466.
- [13] J. Fei, M. Xin, "Robust adaptive sliding mode controller for semi-active vehicle suspension system", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8 (1B) (2012) pp. 691-700.
- [14] A.Y. Fallah, T. Taghikhany, "Sliding mode fault detection and fault tolerant control of smart dampers in semi-active control of building structures", *Smart Materials and Structures*, 24 (2015): 125030.
- [15] S.D. Nguyen, W. Kim, J. Park, S.B. Choi, "A new fuzzy sliding mode controller for vibration control systems using integrated structure smart dampers", *Smart Materials and Structures*, 26 (2017): 045038.
- [16] D.X. Phu, K. Shah, S.B. Choi, "Design of a new adaptive fuzzy controller and its implementation for the damping force control of a magnetorheological damper", *Smart Materials and Structures*, 23 (2014): 065012.