

THIẾT KẾ VÀ TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI CHO GỐI GIẢM DAO ĐỘNG ĐIỆN TỪ TÍCH CỰC

ADAPTIVE BACKSTEPPING CONTROLLER DESIGN OF AN ACTIVE ELECTROMAGNETIC VIBRATION ISOLATOR

TS. Vũ Văn Khoa¹, ThS. Nguyễn Đăng Định¹, TS. Đỗ Văn Điệp²

¹Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương

²Viện Kỹ thuật Cơ giới Quân sự, Tổng cục Kỹ thuật, Bộ Quốc phòng

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày thiết kế bộ điều khiển thích nghi backstepping cho gối giảm dao động điện từ tích cực nhằm nâng cao độ êm dịu và độ ổn định của thiết bị lắp trên phương tiện cơ giới. Trên cơ sở mô hình động lực học thiết bị lắp trên xe cơ giới qua gối giảm dao động điện từ và mô hình động lực học gối điện từ, đã đề xuất và xây dựng luật điều khiển backstepping để điều khiển dòng điện cấp cho gối điện từ, nhằm cực tiểu dịch chuyển của khối lượng thiết bị lắp trên xe. Kết quả mô phỏng đã minh chứng hiệu quả giảm dao động và độ ồn, nâng cao độ êm dịu khi hệ chịu kích động ngẫu nhiên từ mặt đường.

Từ khóa: Gối điện từ tích cực; Gối điện từ thụ động.

ABSTRACT

This paper presents design backstepping adaptive controller for an active electromagnetic vibration isolator to enhance the stability of the equipment mounted on vehicles. Based on dynamics model of the equipment mounted on a vehicle through electromagnetic vibration isolator and dynamic models of electromagnetic isolator, proposed and design backstepping controller to control the current relays for electromagnetic isolator to minimize the movement of equipment mounted on the vehicle. The simulation results have proved effective in reducing oscillation and noise, improve the stability under excitation of random road profile.

Keywords: Electromagnetic; Passive electromagnetic.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gối đỡ giảm dao động [1] cho máy móc, thiết bị trên phương tiện cơ giới có hai chức năng chính. Một là, dùng để đỡ, giữ và giảm dao động cho máy móc, thiết bị lắp trên phương tiện cơ giới do kích động mặt đường

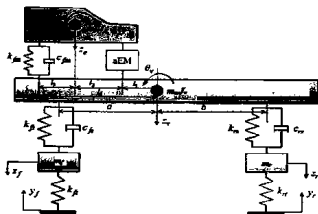
có tần số thấp gây nên. Hai là, cách ly dao động và độ ồn gây ra bởi lực kích động do sự mất cân bằng của nguồn động lực (động cơ-hộp số) có tần số cao. Do vậy, các gối giảm dao động phải có khả năng cách ly hiệu quả trong khoảng tần số rộng. Loại gối đỡ giảm dao động bằng cao su chỉ có độ cứng và độ

cần phù hợp với tần số nhất định, nên chưa đáp ứng được yêu cầu trên. Để đạt được điều này, trong công nghiệp ô tô và cơ khí chính xác đã phát triển các gối đỡ điện từ (EM) loại thụ động (pEM) hoặc loại tích cực (aEM) [2-3]. Trong đó, gối giảm dao động điện từ tích cực ngày càng được ứng dụng nhiều trong các kết cấu đòi hỏi độ ổn định, chính xác cao hoặc thời gian đáp ứng nhanh. Vấn đề cơ bản trong thiết kế và chế tạo aEM là xây dựng và tổng hợp bộ điều khiển cho gối. Bài báo này trình bày các tính toán thiết kế và tổng hợp bộ điều khiển thích nghi theo luật backstepping cho gối điện từ tích cực giảm dao động cho máy móc, thiết bị lắp trên phương tiện cơ giới nhằm giảm tác dụng của mặt đường tới thiết bị, máy móc.

MÔ HÌNH TOÁN

Trong nghiên cứu này, sử dụng mô hình động lực học một nửa xe để dao động của máy móc, thiết bị lắp trên xe cơ giới qua cụm gối đỡ xo-giảm chấn trước và gối sau là gối cEM. Mô hình gồm sáu bậc tự do như hình 1.

Trên mô hình này, máy móc, thiết bị có khối lượng m_p và mô men quán tính J_p liên kết với thân xe (khối lượng được treo) có khối lượng m_v , mô men quán tính J_v qua gối trước bằng cao su có độ cứng, độ cản tương đương là c_{fs}, k_{fs} và gối sau là gối aEM.



Hình 1. Mô hình dao động thiết bị lắp trên phương tiện cơ giới qua aEM.

Thân xe được treo bởi cụm treo trước và treo sau có độ cứng, độ cản lần lượt là c_{fs}, k_{fs} và c_{rs}, k_{rs} . Các khối lượng không được treo trước m_f và sau m_r liên kết với nền qua lớp xe có độ cứng tương đương lần lượt là k_{ff} và k_{rr} . Khi di chuyển, hệ các chịu kích động từ mặt đường đặt tại điểm tiếp xúc giữa lớp trước y_f và lớp sau y_r . Hệ được xác định bởi sáu bậc tự do gồm: z_p, z_v, z_f, z_r lần lượt là dịch chuyển thẳng đứng của thiết bị, thân xe, khối lượng không được treo trước, sau và θ_p, θ_v là góc quay của thiết bị và thân xe quanh khối tâm của chúng.

$$F_{11} = k_{ff}(z_f - y_f), \quad F_{21} = k_{rr}(z_r - y_r) \quad (1)$$

Lực tác dụng của treo trước, treo sau lên thân xe, các khối lượng không được treo và lực tác dụng của gối trước lên thiết bị và thân xe:

$$\begin{aligned} F_{12} &= k_{fs}(z_v - a\theta_v - z_f) + c_{fs}(\dot{z}_v - a\dot{\theta}_v - \dot{z}_f), \\ F_{22} &= k_{rs}(z_v + b\theta_v - z_r) + c_{rs}(\dot{z}_v + b\dot{\theta}_v - \dot{z}_r), \\ F_{13} &= f_{fm}(z_p - l_3\theta_p - z_v + l_4\theta_v) + c_{fm}(\dot{z}_p - l_3\dot{\theta}_p - \dot{z}_v + l_4\dot{\theta}_v) \end{aligned} \quad (2)$$

Từ mô hình động lực trên hình 1 và các phương trình từ (1)-(2), xây dựng được hệ phương trình vi phân chuyển động của cơ hệ dạng:

$$\begin{cases} m_f \ddot{z}_f = F_{12} - F_{11} \\ m_r \ddot{z}_r = F_{22} - F_{21} \\ m_v \ddot{z}_v = F_{12} + F_{22} - F_{13} - F_a \\ J_v \ddot{\theta}_v = aF_{12} - bF_{22} - l_1 F_a - l_4 F_{13} \\ m_p \ddot{z}_p = F_{13} + F_a \\ J_p \ddot{\theta}_p = l_3 F_{13} - l_2 F_a \end{cases} \quad (3)$$

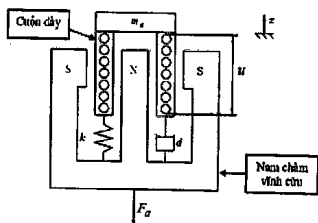
Một cách tổng quát, hệ phương trình vi phân chuyển động (3) của hệ động lực học tổng quát của hệ thiết bị lắp trên phương tiện cơ giới qua gối thụ động và gối đỡ điện từ.

Để xác định lực tác dụng của aEM lên

thiết bị và thân xe, xét mô hình gói điện từ [3], như hình 2. Từ mô hình này, xét dòng điện đi trong cuộn dây được biểu diễn theo phương trình:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = -C_i \dot{x} + u \quad (4)$$

Trong đó: R - Điện trở cuộn dây; L - Điện cảm cuộn dây; $-C_i \dot{x}$ - Thành phần phản sức điện động chống lại sự dịch chuyển của vật theo phương x ; u - điện áp đưa vào cuộn dây.



Hình 2. Mô hình gói đỡ điện từ (aEM)

Phương trình chuyển động của vật có dạng:

$$m_e \ddot{x} + c_e \dot{x} + k_e x = F_a + F_e \quad (5)$$

Trong đó, m_e - Phần khối lượng của thiết bị đặt lên gói đỡ; F_e - Lực kích động ngoài; F_a - Lực điện từ tỷ lệ với dòng điện đi trong cuộn dây có dạng:

$$F_a = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{x + \delta} \right)^2 \quad (6)$$

Trong đó: N - Số vòng dây của cuộn dây; A - Diện tích tiết diện cực từ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (H/m_e)$ là độ từ thẩm của khe hở không khí; δ là khoảng cách khe hở tối thiểu để thành phần $(x + \delta) \neq 0$.

Khi đó, từ (5)-(6), ta có:

$$m_e \ddot{x} + c_e \dot{x} + k_e x = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{x + \delta} \right)^2 + F_e \quad (7)$$

Kết hợp phương trình (4) và (7), viết lại dưới dạng phương trình trạng thái, thu được:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{k}{m_e} x_1 - \frac{d}{m_e} x_2 + \frac{\mu_0 N^2 A}{4m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right)^2 + \frac{F_e}{m_e} \\ \dot{x}_3 = \frac{R}{L} x_3 - \frac{C_3}{L} x_2 + \frac{u}{L} \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó, x_1 - Khe hở không khí dọc theo phương thẳng đứng; x_2 - Tốc độ biến thiên khe hở; x_3 - Dòng điện đưa vào cuộn dây.

Như vậy, ta có thể lựa chọn điện áp đưa vào cuộn dây để sinh ra lực điện từ sao cho dao động của hệ là nhỏ nhất. Khi biết các tham số kết cấu của xe, cụm thiết bị, lớp xe, hệ thống treo và gói đỡ aEM và kích động từ mặt đường, giải hệ phương trình này có thể xác định được các đáp ứng của cơ hệ.

3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING CHO GÓI ĐIỆN TỪ

Bộ điều khiển thích nghi cho gói điện từ tích cực được thiết kế nhằm tính toán và điều khiển điện áp tác động vào cuộn dây sinh ra lực điện từ giúp cân bằng năng lượng dịch chuyển cho khối lượng thiết bị, máy móc. Mục tiêu điều khiển là:

$$e_1 = x_1 - x_{1,ref} \rightarrow 0; \quad \dot{x}_1 \rightarrow 0 \quad (9)$$

Trong đó, $x_{1,ref}$ giá trị tham chiếu vị trí của khối lượng thiết bị.

Từ phương trình động học của gói điện từ (8), với mục tiêu điều khiển (9) và mô hình động lực học hệ thống (3), bài báo thiết kế bộ điều khiển thích nghi dựa trên luật điều khiển backstepping [4-5], kết hợp với bộ quan sát trạng thái để thiết kế hệ thống điều khiển cho gói điện từ.

Xuất phát từ mục tiêu điều khiển (9), biến thiên theo thời gian của sai lệch vị trí khối lượng thiết bị đặt trên cụm gói đỡ điện từ: $e_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}$, thành phần $\dot{x}_{1ref} = 0$, do đó: $\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_2$. Theo phương pháp backstepping, chọn $x_{2ref} = k_1 e_1$, khi đó: $\dot{e}_1 = -k_1 e_1 + e_2$. Trong đó, $e_2 = x_2 - x_{2se}$ với x_{2se} là vị trí được chọn của x_2 . Để thỏa mãn mục tiêu điều khiển $\dot{e}_2 = x_2 - x_{2se} \rightarrow 0$. Khi đó, vi phân theo thời gian sai lệch e_2 là $\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - k_1 \dot{e}_1$.

Thay các đại lượng tương ứng vào phương trình (8), nhận được:

$$\dot{e}_2 = k_1(e_2 - k_1 e_1) - \frac{k}{m_e} x_1 - \frac{d}{m_e} x_2 + \frac{\mu_0 N^2 A}{4m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right)^2 + \frac{F_e}{m_e} \quad (10)$$

Đặt $P = -\frac{k}{m_e} x_1 - \frac{d}{m_e} x_2 + \frac{F_e}{m_e}$, khi đó:

$$\dot{e}_2 = k_1(e_2 - k_1 e_1) + P + \frac{\mu_0 N^2 A}{4m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right)^2 \quad (11)$$

Trong phương trình (11), chọn biến điều khiển x_3 sao cho $e_2 \rightarrow 0$ trong khoảng thời gian hữu hạn. Khi đó:

$$m_v = 1410 \text{ kg}; m_e = 50 \text{ kg}; m_1 = m_2 = 74 \text{ kg}; J_v = 1620 \text{ kgm}^2; J_e = 27 \text{ kgm}^2; a = 1,25 \text{ m};$$

$$b = 1,2 \text{ m}; l_1 = 0,31 \text{ m}; l_2 = 0,833 \text{ m}; l_3 = 0,187 \text{ m}; C_{11} = C_{21} = 250000 \text{ N/m}; C_{12} = 57300 \text{ N/m}; C_{22} = 63600 \text{ N/m}; K_{12} = K_{22} = 4350 \text{ Ns/m}; C_{13} = 650000 \text{ N/m}; K_{23} = 4340 \text{ Ns/m}.$$

$$\frac{\mu_0 N^2 A}{4m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right)^2 = -P - k_2 e_2 + e_3 \quad (12)$$

Trong đó: k_2 là hằng số dương; e_3 là sai khác giữa giá trị thực và giá trị lựa chọn của x_3 .

Thay phương trình (12) vào phương trình (11), nhận được:

$$\dot{e}_2 = k_1(e_2 - k_1 e_1) + P - P - k_2 e_2 + e_3 = -k_1^2 e_1 - (k_2 - k_1) e_2 + e_3 \quad (13)$$

Từ phương trình (13), ta có:

$$e_3 = \frac{\mu_0 N^2 A}{4m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right)^2 + P + k_2 e_2 \quad (14)$$

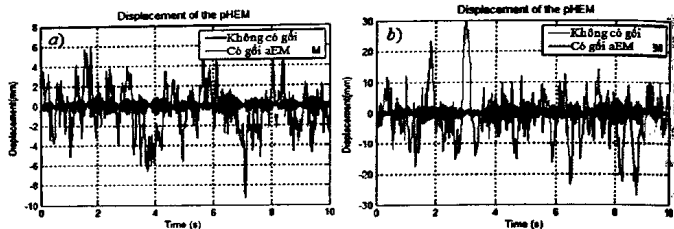
Để $e_3 \rightarrow 0$, xét vi phân theo thời gian của phương trình (14):

$$\dot{e}_3 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right) \frac{\dot{x}_3(x_1 + \delta) - x_3(\dot{x}_1 + \dot{\delta})}{(x_1 + \delta)^2} - \frac{k}{m_e} \dot{x}_1 - \frac{d}{m_e} \dot{x}_2 + k_2 \dot{e}_2 \quad (15)$$

Lựa chọn điều khiển có dạng:

$$\frac{\mu_0 N^2 A}{2m_e} \left(\frac{x_3}{x_1 + \delta} \right) \frac{x_1 + \delta}{L(x_1 + \delta)^2} = -k_3 \text{sign}(e_3) \quad (16)$$

Các phương trình, (9)-(16), tạo thành luật điều khiển backstepping cho gói điện từ. Ứng dụng mô hình và phương pháp tính toán tối ưu các tham số của aEM trình bày ở trên cho xe, khối lượng thiết bị và gói trước có các thông số như sau:



Hình 3. Dịch chuyển tương đối giữa ETU và thân xe khi di chuyển trên đường nhựa (a) và trên đường cát sỏi (b)

Mô hình mô phỏng động lực học một nửa của xe lắp thiết bị qua gói cao su trước và gói aEM sau xây dựng bằng phần mềm Matlab-Simulink. Kết quả mô phỏng với các tham số trên đây được đáp ứng dịch chuyển tương đối giữa khối lượng thiết bị và khung xe khi di chuyển trên đường nhựa và đường cát sỏi ở vận tốc không đổi $v=50\text{km/h}$, trên hình 3.

Kết quả mô phỏng với kích động mặt đường dạng ngẫu nhiên cho thấy khi có gói giảm dao động điện từ được điều khiển bằng bộ điều khiển backstepping thích nghi dao động của thiết bị giảm tới trên 300% biên độ lớn nhất và không có vùng bị kích động cục bộ, nhờ đó nâng cao được độ êm dịu của thiết bị.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo đã trình bày phương pháp nghiên cứu dao động của máy móc, thiết bị lắp trên sàn xe qua các gói cao su phía trước có đặc tính tuyến tính và gói đỡ giảm dao động điện từ phía sau. Dựa vào các quan hệ động lực học trong mô hình một nửa xe và động lực học gói điện từ, đã đề xuất và tổng hợp được luật điều khiển thích nghi backstepping cho gói đỡ điện từ nhằm nâng cao độ êm dịu và ổn định

cho thiết bị khi xe di chuyển trên đường mấp mô. Kết quả mô phỏng đã minh chứng hiệu quả giảm dao động và nâng cao độ êm dịu cho thiết bị khi có gói điện từ tích cực. ❖

Ngày nhận bài: 15/01/2017

Ngày phản biện: 10/02/2017

Tài liệu tham khảo:

- [1]. D. Karnopp, "Active and semi-active vibration isolation", Journal of Mechanical Design, vol. 117, no. B, pp. 177-185 (1995).
- [2]. Nikunj shah, Rob Jamieson (2006), Electromagnetic Linear Actuator. 28.
- [3]. Y.-H. Liu, W.-H. Wu, and C.-L. Chu, "Active vibration isolation by adaptive proportional control", in Proceeding SPIE 8759, China (2013).
- [4]. K. Park, D. Choi, A. Ozer, S. Kim, Y. Lee, and D. Joo, "A voice coil actuator driven active vibration isolation system with the consideration of flexible modes", Review of Scientific Instruments, vol. 79, no. 6, p. 065106, (2008).
- [5]. Ali J. Koshkouei, Alan Zinober, "Adaptive backstepping control of nonlinear systems with unmatched uncertainty", Asian Journal of Control, Vol. 6, No. 4, (December 2004).