

NGHIÊN CỨU KIỂM SOÁT DAO ĐỘNG CỦA HỆ ĐƯỜNG ỐNG VÀ KẾT CẤU BẰNG THIẾT BỊ TẮT CHẤN ĐỘNG LỰC ĐIỀU CHỈNH KHỐI LƯỢNG

STUDY ON VIBRATION CONTROL OF PIPING SYSTEMS AND STRUCTURES USING TUNED MASS DAMPERS

TS. Nguyễn Anh Ngọc^{1,*}, ThS. Tống Đức Năng²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: nguyenanhnngocmxd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Dao động của hệ đường ống và kết cấu cơ khí công nghiệp thường xuất hiện dưới tác động của các nguồn kích động tuần hoàn như rối dòng chảy, dao động áp suất và thiết bị quay. Do độ cản cơ học nhỏ, hệ dễ xảy ra cộng hưởng, làm tăng biên độ rung và ảnh hưởng đến độ bền, an toàn và độ tin cậy vận hành. Bài báo trình bày khả năng ứng dụng của thiết bị tắt chấn động lực điều chỉnh khối lượng (Tuned Mass Damper - TMD) như một giải pháp thụ động để kiểm soát dao động cộng hưởng của hệ đường ống. Nội dung tập trung vào cơ sở lý thuyết, quy trình thiết kế và khảo sát các tham số tối ưu của TMD. Kết quả cho thấy TMD có tiềm năng ứng dụng tốt trong thiết kế mới và cải tạo hệ cơ khí công nghiệp, đặc biệt trong những trường hợp cần hạn chế can thiệp vào kết cấu chính.

Từ khóa: Dao động; Cộng hưởng; Hệ đường ống; Kết cấu; TMD; Giảm rung.

ABSTRACT

Vibration in piping systems and mechanical structures is common in industrial applications, especially under periodic excitations such as flow turbulence, pressure pulsation, and rotating machinery. Due to low inherent damping, these systems are prone to resonance, which increases vibration amplitude and reduces fatigue strength, safety, and operational reliability. This paper presents the application of Tuned Mass Dampers (TMDs) as a passive solution for controlling resonant vibration in piping systems. The study focuses on the theoretical basis, design procedure, and parametric investigation of optimal TMD characteristics. The results show that TMDs have strong potential for both new design and retrofit of industrial mechanical systems, particularly when intervention in the primary structure should be minimized.

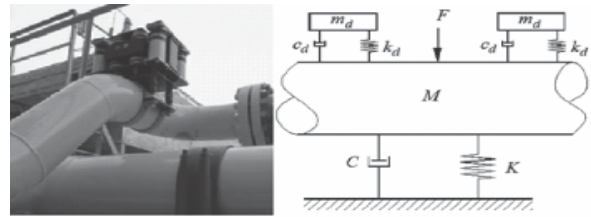
Keywords: Vibration; Resonance; Piping systems; Structures; TMD; Vibration reduction.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các hệ đường ống công nghệ và kết cấu cơ khí công nghiệp, dao động là hiện tượng thường gặp do hệ luôn tồn tại các tần số dao động riêng và thường làm việc dưới tác động của các nguồn kích động tuần hoàn như rối dòng chảy, xung động áp suất và các thiết bị quay [1], [2]. Khi tần số kích động trùng hoặc gần trùng với tần số cộng hưởng, biên độ rung có thể tăng mạnh, gây ứng suất động lớn, hư hỏng môi và làm giảm độ tin cậy vận hành của hệ thống [1], [2], [6].

Trong thực tiễn, giải pháp thường dùng là gia tăng độ cứng của hệ để dịch chuyển tần số cộng hưởng ra khỏi vùng kích động. Tuy nhiên, giải pháp này thường làm tăng chi phí, gây khó khăn thi công và chưa luôn bảo đảm hiệu quả ổn định khi phổ kích động chưa được nhận diện đầy đủ [1], [2], [6]. Trong bối cảnh đó, thiết bị tắt chấn động lực điều chỉnh khối lượng (Tuned Mass Damper - TMD) là một giải pháp thụ động có khả năng giảm dao động cộng hưởng bằng cách bổ sung một hệ dao động phụ gồm khối lượng, phần tử đàn hồi và phần tử cản vào hệ chính [1], [3], [7].

Các nghiên cứu trước đây cho thấy hiệu quả của TMD phụ thuộc chủ yếu vào tỷ số khối lượng, tỷ số tần số điều chỉnh và tỷ số cản [3], [7]. Đồng thời, các phương pháp mô hình hóa tương đương cũng cho phép đơn giản hóa quá trình phân tích và hỗ trợ lựa chọn tham số thiết kế [1], [4], [5]. Trên cơ sở đó, bài báo tập trung trình bày cơ sở lý thuyết, quy trình thiết kế và khảo sát các tham số tối ưu của TMD nhằm đánh giá khả năng ứng dụng thiết bị này trong kiểm soát dao động của hệ đường ống và kết cấu cơ khí công nghiệp [1], [6], [7].



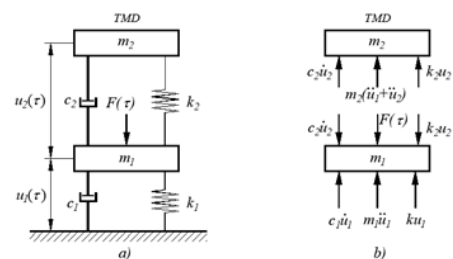
Hình 1. Bộ giảm chấn khối lượng điều chỉnh lắp trên hệ thống đường ống

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết của thiết bị TMD

TMD là thiết bị kỹ thuật được sử dụng để giảm rung động trong các hệ cơ học. Về cấu tạo, TMD gồm ba thành phần chính: khối lượng phụ m_2 được gắn với kết cấu chính thông qua một phần tử đàn hồi k_2 và một phần tử cản nhớt c_2 , kết cấu chính có khối lượng m_1 được liên kết với nền thông qua lò xo k_1 và phần tử cản nhớt c_1 . Trong một số trường hợp, do cản của kết cấu chính có giá trị nhỏ nên người ta thường cho $c_1 \approx 0$ để tính toán tối ưu (Hình 2).

Nguyên lý hoạt động của TMD dựa trên việc điều chỉnh tần số riêng của khối lượng phụ sao cho gần bằng với tần số dao động của hệ chính. Khi hệ chính bị rung do tác động như gió hoặc động đất, khối lượng phụ sẽ dao động ngược pha, tạo ra lực đối kháng giúp giảm biên độ dao động. Cơ chế này liên quan trực tiếp đến hiện tượng cộng hưởng cơ học, nhưng được khai thác theo hướng có lợi để tiêu tán năng lượng dao động.



Hình 2. a) Mô hình TMD; b) Mô hình cân bằng lực

Phương trình mô tả hệ kết cấu đường ống có gắn TMD tương đương với mô hình cơ học hai bậc tự do:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 - c_2 \dot{u}_2 - k_2 u_2 &= F(\tau) \\ m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 &= -m_2 \ddot{u}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: u_1, u_2 là tọa độ tương đối của khối lượng m_1, m_2 so với nền, $F(\tau)$ là lực kích động điều hòa được biểu diễn theo:

$$F(\tau) = F_0 \cos \Omega \tau \quad (2)$$

Với Ω là tần số của lực kích động lên kết cấu chính m_1 , τ là thời gian.

Đặt các biến sau:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \mu = \frac{m_2}{m_1}, \xi_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}, \beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \lambda = \frac{\Omega}{\omega_1} \quad (3)$$

và thực hiện phép đổi biến:

$$t = \omega_1 \tau, u_1 = x_1, \dot{u}_1 = \omega_1 \dot{x}_1, \ddot{u}_1 = \omega_1^2 \ddot{x}_1, u_2 = x_2, \dot{u}_2 = \omega_1 \dot{x}_2, \ddot{u}_2 = \omega_1^2 \ddot{x}_2 \quad (4)$$

Khi đó, hệ phương trình (1) sẽ chuyển thành hệ phương trình không thứ nguyên sau:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\beta\xi_1\dot{x}_1 + x_1 - 2\mu\beta\xi_2\dot{x}_2 - \mu\beta^2x_2 &= X_{st} \cos \lambda t \\ \ddot{x}_2 + 2\beta\xi_2\dot{x}_2 + \beta^2x_2 &= -\ddot{x}_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó, phương trình (5) biểu thị đạo hàm theo thời gian không thứ nguyên t , và độ võng tĩnh của kết cấu chính được xác định:

$$X_{st} = F_0 / k_1 \quad (6)$$

Với: ω_1 và ω_2 lần lượt là tần số tự nhiên của cấu trúc chính; $\mu, \xi_2, \beta, \lambda$ là tỷ số khối lượng, tỷ số cản, tỷ số tần số điều chỉnh và tỷ số tần số kích động tương ứng. Có thể thấy rằng, hệ phương trình (5) là hệ phương trình vi phân tuyến tính với hai ẩn số là chuyển vị cơ học của kết cấu chính $x_1(t)$ và của TMD $x_2(t)$. Để giải

hệ phương trình trên, chúng ta áp dụng phương pháp biên độ phức.

Xét phương trình của lực kích động là một hàm điều hòa được biểu diễn dưới dạng biên độ phức:

$$F = F_0 e^{i\lambda t} \quad (7)$$

Các nghiệm của hệ phương trình (5) cũng được biểu diễn dưới dạng như sau:

$$x_1(t) = X_1 e^{i\lambda t}, x_2(t) = X_2 e^{i\lambda t} \quad (8)$$

Trong đó: X_1, X_2 là biên độ phức.

Thay (7) và (8) vào hệ phương trình (5), ta thu được hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} (1 - \lambda^2 + i2\xi_1\lambda)X_1 - (\mu\beta^2 + i2\mu\beta\xi_2\lambda)X_2 &= X_{st} \\ -\lambda^2 X_1 + (\beta^2 - \lambda^2 + i2\beta\xi_2\lambda)X_2 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Giải hệ phương trình (9), ta thu được các nghiệm X_1, X_2 được biểu diễn dưới dạng sau:

$$\frac{X_1}{X_{st}} = \frac{B_1 + B_2 i}{E_1 + E_2 i}, \quad \frac{X_2}{X_{st}} = \frac{C_1 + C_2 i}{E_1 + E_2 i} \quad (10)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} B_1 &= \beta^2 - \lambda^2; B_2 = 2\beta\lambda\xi_2; C_1 = 0; C_2 = \lambda^2; \\ E_1 &= 2\lambda\xi_1(\beta^2 - \lambda^2) + 2\beta\xi_2\lambda(1 - \lambda^2 - \lambda^2\mu); \\ E_2 &= (1 - \lambda^2)(\beta^2 - \lambda^2) - \lambda^2\beta(\mu\beta + 4\xi_1\xi_2); \end{aligned} \quad (11)$$

Do đó, các đáp ứng biên độ thực có dạng:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_1 \cos(\lambda t + \varphi_1) \\ x_2(t) &= a_2 \cos(\lambda t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (12)$$

Với:

$$\begin{aligned} a_1 = |X_1| &= X_{st} \sqrt{\frac{B_1^2 + B_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}, \quad \varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_2 E_1 - B_1 E_2}{B_1 E_1 + B_2 E_2} \right) \\ a_2 = |X_2| &= X_{st} \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2}{E_1^2 + E_2^2}}, \quad \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{C_2 E_1 - C_1 E_2}{C_1 E_1 + C_2 E_2} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Một cách tổng quát, biên độ dao động của kết cấu chính và TMD được xác định như sau:

$$K_1 = \frac{a_1}{X_{st}}; K_2 = \frac{a_2}{X_{st}} \quad (14)$$

Hiệu quả của TMD phụ thuộc chủ yếu vào ba thông số thiết kế cơ bản, gồm tỷ số khối lượng μ , tần số điều chỉnh β và tỷ số cản ξ_2 . Việc tăng khối lượng TMD thường làm tăng mức giảm rung và mở rộng dải tần có hiệu quả. Tăng tỷ số cản ξ_2 cũng giúp mở rộng dải làm việc của thiết bị, nhưng đồng thời có thể làm giảm mức suy giảm cực đại tại đỉnh cộng hưởng. Ngược lại, nếu tỷ số cản quá thấp, hệ có thể xuất hiện cộng hưởng phụ ở vùng thấp hơn tỷ số tần số điều chỉnh β , từ đó làm giảm tính ổn định của phương án thiết kế. Vì vậy, thiết kế TMD trong thực tế không chỉ dừng ở việc “đúng tần số” mà cần xem xét đồng thời cả tỷ số khối lượng μ và tỷ số cản ξ_2 để đạt hiệu quả bền vững trong toàn bộ dải tần vận hành.

2.2. Quy trình thiết kế TMD cho hệ đường ống

Quy trình thiết kế TMD cho hệ thống đường ống trước hết phải bắt đầu bằng việc nhận diện bài toán dao động thông qua đo phổ rung trong điều kiện vận hành thực tế. Trên cơ sở số liệu đo, cần xác định các tần số nguy hiểm, biên độ rung cần khống chế và các vị trí có đáp ứng lớn nhất để xem xét bố trí TMD.

Sau bước nhận diện phổ rung, cần kiểm tra xem các tần số nguy hiểm có thực sự gần với cộng hưởng cơ học của hệ hay không, bởi TMD chỉ phát huy hiệu quả rõ rệt đối với dao

động cộng hưởng. Việc này có thể được thực hiện thông qua đo đáp ứng động hoặc kết hợp phân tích thực nghiệm với mô hình tính toán để xác định tần số cộng hưởng, tỷ số cản và khối lượng tham gia của hệ.

Khi các cộng hưởng đã được nhận diện, bước tiếp theo là xây dựng mô hình xấp xỉ nhiều bậc tự do và khảo sát các phương án TMD khác nhau (Hình 2). Mục tiêu của bước này là lựa chọn tổ hợp hợp lý giữa tỷ số khối lượng μ , tỷ số tần số điều chỉnh β và tỷ số cản ξ_2 để vừa đạt mức giảm rung mong muốn, vừa bảo đảm tính ổn định trong dải tần làm việc.

Với các hệ đường ống chịu dao động, phần tử cản nhớt thường có giá trị bé $\xi_1 \approx 0$. Do đó, áp dụng các kết quả nghiên cứu trước đây của Den Hartog, kết quả tối ưu các tham số với hệ cơ học hai bậc tự do trong đó có kể đến kết cấu chính không cản. Tỷ số tần số điều chỉnh tối ưu được xác định qua biểu thức:

$$\beta_{op} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (15)$$

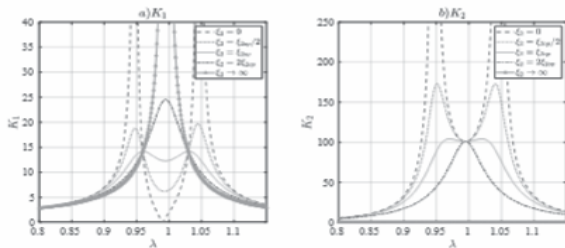
Và tỷ số cản tối ưu được xác định thông qua biểu thức:

$$\xi_{2op} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (16)$$

3. KHẢO SÁT SỐ

Căn cứ vào các tham số tối ưu được xác định, tiến hành khảo sát với bộ thông số cơ bản: $\mu = 0,01$ và các tham số như tỷ số tần số tối ưu β_{op} và tỷ số cản tối ưu ξ_{2op} được xác định thông qua tỷ số khối lượng.





Hình 3. Biên độ dao động của kết cấu ống và TMD với $\mu = 0,01$

Như trên Hình 3 ta thấy, khi $\xi_2 = \xi_{2op}$, đường cong biên độ kết cấu chính K_1 (kết cấu chính) có hai đỉnh thấp hơn và cao độ hai đỉnh tương đối bằng nhau trong miền tần số. Tương tự, đối với biên độ của TMD là K_2 cũng có hai đỉnh và đạt giá trị thấp nhất trong miền tần số.

Điều đó cho thấy với tỷ số khối lượng $\mu = 0,01$ tương ứng (khối lượng TMD $\approx 1\%$ khối lượng kết cấu chính là đường ống) thì đạt hiệu quả giảm dao động đáng kể cho kết cấu đường ống.

Qua nghiên cứu tính toán các tham số tối ưu cho TMD tích hợp vào kết cấu đường ống chịu dao động, ta có thể thấy:

- TMD là giải pháp thụ động có hiệu quả tốt đối với các bài toán dao động cộng hưởng của hệ đường ống.

- So với giải pháp gia cường độ cứng truyền thống, TMD có ưu điểm là ít can thiệp vào hệ chính hơn, giảm yêu cầu hàn nóng và thuận lợi hơn trong các bài toán cải tạo hiện trường.

- Hiệu quả của TMD phụ thuộc đáng kể vào việc nhận diện đúng cộng hưởng cơ học của hệ cũng như lựa chọn hợp lý các thông số tỷ số khối lượng μ , tỷ số tần số điều chỉnh β và tỷ số cản ξ_2 .

- Đối với các hệ có nhiều cộng hưởng gần nhau hoặc có yêu cầu phân bố tải hợp lý,

phương án sử dụng nhiều TMD phân tán có thể phù hợp hơn một TMD tập trung.

4. KẾT LUẬN

Dao động cộng hưởng là nguyên nhân quan trọng làm gia tăng rung động và ảnh hưởng bất lợi đến độ bền, an toàn và độ tin cậy vận hành của hệ đường ống và kết cấu cơ khí công nghiệp. TMD là giải pháp thụ động có khả năng giảm rung hiệu quả mà không cần thay đổi đáng kể kết cấu chính của hệ. Hiệu quả của TMD phụ thuộc chủ yếu vào việc xác định đúng cộng hưởng của hệ và lựa chọn hợp lý các tham số thiết kế như tỷ số khối lượng, tỷ số tần số điều chỉnh và tỷ số cản. Kết quả khảo sát cho thấy với bộ tham số tối ưu thích hợp, TMD có thể làm giảm đáng kể biên độ dao động của hệ đường ống. Để nâng cao khả năng áp dụng trong thực tế, cần tiếp tục nghiên cứu thực nghiệm và hoàn thiện quy trình lựa chọn thông số TMD phù hợp với điều kiện chế tạo, lắp đặt và vận hành tại Việt Nam. ♦

Ngày nhận bài: 06/4/2026

Ngày phản biện: 18/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Rechenberger, S., Mair, D. (2017), "Vibration Control of Piping Systems and Structures Using Tuned Mass Dampers". Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2017-65448.
- [2]. Harris, C.M., Piersol, A.G. (2002), "Harris' Shock and Vibration Handbook". 5th edition, McGraw-Hill, New York.
- [3]. Harris, A.F. (2003), "Multi-Degree of Freedom Passive and Active Vibration Absorbers for the Control of Structural Vibration". Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [4]. Olson, H.F. (1943), "Dynamical Analogies". D. Van Nostrand Company Inc., New York.
- [5]. Beranek, L.L. (1954), "Acoustics". McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- [6]. Hatch, M.R. (2001), "Vibration Simulation using Matlab and ANSYS". Chapman & Hall/CRC.
- [7]. J.P. Den Hartog, "Mechanical Vibrations". McGraw-Hill, New York, 1956.