



LOẠI BỎ ẢNH HƯỞNG NGẪU NHIÊN TRONG DỮ LIỆU ĐO ĐẠC NHẪM XÁC ĐỊNH HIỆU QUẢ HƠN CÁC THAM SỐ ĐỘNG HỌC CHO CÔNG TRÌNH CẦU

Nguyễn Đức Phúc^{1*}, Khúc Đăng Tùng², Nguyễn Hương Dương³

Tóm tắt: Tần số giao động và tỉ số giảm chấn là các tham số động học của kết cấu đóng một vai trò quan trọng trong lĩnh vực đánh giá sức khỏe công trình. Mặc dù đây là các tham số cơ bản của kết cấu, việc xác định các tham số này của công trình cầu gặp một số khó khăn. Hiện nay tại Việt Nam, phương pháp xác định chủ yếu dựa trên việc phân tích dữ liệu đo đạc khi cầu bị đóng và dùng các xe thử tải để làm lực kích thích. Điều này thường gây ảnh hưởng đến giao thông qua lại trên cầu. Ngoài ra dữ liệu đo đạc cũng hay bị tác động bởi nhiều loại tác động ngẫu nhiên khác nhau gây ảnh hưởng đến kết quả tính toán các tham số. Bài báo này giới thiệu phương pháp giảm lượng ngẫu nhiên, một phương pháp đơn giản và hiệu quả nhằm loại bỏ các tác động này trong dữ liệu đo đạc cho việc xác định hiệu quả hơn các tham số động học của cầu sử dụng phương tiện giao thông làm lực kích thích. Phương pháp cũng được ứng dụng để phân tích một công trình cầu thực tế và so sánh với số liệu phân tích từ phương pháp phần tử hữu hạn.

Từ khóa: Loại bỏ nhiễu; kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên; đặc trưng động học; quan trắc sức khỏe công trình.

Random decrement technique for effectively determining dynamic parameters of bridges

Abstract: Natural frequencies and damping ratios are parameters that play a crucial role in the field of Structure Health Monitoring - SHM. Despite they are fundamental parameters of structures, the determination of these modal characteristics of a bridge faces difficulties. Currently in Viet Nam, the primary methods for determination of modal parameters of bridges are based on analysis of data acquired in its inoperative conditions. Those methods also require testing vehicles as input exciters that commonly stop traffic on the bridges. This paper presents Random Decrement Technique - RDT, a simple and efficient technique diminish these effects in data calculating to determine modal parameters of bridges, which only uses ambient excitation. The required dynamic characteristics are compared to results from FEM analysis that confirm the method reliability.

Keywords: Data noise discarding; random decrement technique; modal characteristics; structural health monitoring.

Nhận ngày 25/6/2017; sửa xong 24/8/2017; chấp nhận đăng 28/02/2018

Received: June 25th, 2017; revised: August 24th, 2017; accepted: February 28th, 2018



1. Giới thiệu chung

Các công trình cầu luôn được xem là thành phần quan trọng bậc nhất của hệ thống giao thông quốc gia. Với sự tăng trưởng rất nhanh của khối lượng vận chuyển nhằm đáp ứng cho nhu cầu phát triển kinh tế, hệ thống giao thông nói chung và hệ thống công trình cầu nói riêng đang phải chịu một áp lực rất lớn cả về lưu lượng cũng như cường độ tải trọng của các phương tiện qua lại. Điều này dẫn tới một nhu cầu cấp thiết về công tác đánh giá kiểm định công trình cầu nhằm mục đích ngăn ngừa sự cố, đảm bảo sự thông suốt của hệ thống giao thông.

Ở Việt Nam hiện nay, việc đánh giá kiểm định công trình cầu thường dùng các phương pháp thử tải tĩnh kết hợp với công tác đo động để xác định tần số dao động của các kết cấu chính, ví dụ như dầm chủ và trụ cầu [1]. Công tác kiểm định này phải dùng các xe thử tải đóng vai trò như tải trọng kích thích lên kết cấu kết hợp với yêu cầu đóng cầu gây nhiều ảnh hưởng tới giao thông. Hơn nữa, việc dùng xe thử tải chạy

¹ KS, Khoa Xây dựng Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng.

² TS, Khoa Xây dựng Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng.

³ ThS, Khoa Xây dựng Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng.

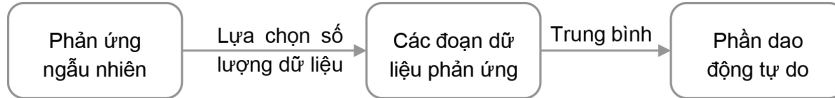
* Tác giả chính. E-mail: ndphuc@nuce.edu.vn.

qua cầu với thời gian rất ngắn (thường chỉ vài giây) sẽ dẫn đến kết quả phân tích tần số thường không chính xác. Hầu như kết quả đo đạc chỉ có thể xác định được tần số dao động cơ bản. Trong vài trường hợp, phân tích dữ liệu đo đạc thậm chí còn không thể xác định được tần số dao động nào, hoặc tần số dao động xác định được là tần số nhiễu gây ra bởi chính xe thử tải.

Trong công trình cầu, phương tiện di chuyển trên cầu có thể xem như là tải trọng kích thích lên kết cấu thay vì sử dụng xe thử tải. Tuy nhiên, loại tải trọng này là tải trọng ngẫu nhiên do tốc độ, vị trí và trọng lượng của phương tiện không thể xác định. Để sử dụng loại tải trọng ngẫu nhiên cho việc xác định các tham số động học của công trình cầu, các phương pháp phân tích mô hình hiện trường có thể được sử dụng, chẳng hạn như nhóm các tác giả thuộc Trường Đại học Giao thông vận tải đã sử dụng phương pháp SSI (Stochastic Subspace Identification [2,3]) để nhận dạng dao động của cầu dây văng Mỹ Thuận [4]. Gần đây, các tác giả của Trường Đại học Xây dựng đã dùng phân tích EFDD (Enhanced Frequency Decomposition Domain [5]) để xác định được các tham số động học của một mô hình cầu trong phòng thí nghiệm [6]. Mặc dù các nghiên cứu trên có thể xác định được khá đầy đủ các tham số động học của công trình cầu, các phương pháp này thường đòi hỏi sử dụng nhiều đầu đo gia tốc cũng như các thuật toán phân tích phức tạp, đòi hỏi kiến thức chuyên gia. Với mục đích nghiên cứu và thử nghiệm một phương pháp cho người ít có kinh nghiệm về phân tích mô hình và đặc biệt có thể áp dụng được với dữ liệu từ một đầu đo đặc (số lượng đầu đo đặc thường khá giới hạn ở Việt Nam), phương pháp giảm lượng ngẫu nhiên (Random Decrement Technique [7]) được các tác giả chọn để ứng dụng cho công trình cầu. Mục tiêu đưa ra của nghiên cứu là có thể ứng dụng được phương pháp ra ngoài thực tế với năng lực máy móc hạn chế, dễ dàng hỗ trợ cho công tác kiểm định cầu nhằm xác định tần số cũng như tỉ số cản của kết cấu sử dụng tải trọng kích thích là phương tiện giao thông.

2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp giảm lượng ngẫu nhiên

Kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên (Random Decrement Technique- RDT) (Hình 1) là một phương pháp đơn giản và đặc biệt hiệu quả trong việc tách phần dao động tự do của kết cấu từ phản ứng động của chúng dưới tác dụng của các tải trọng ngẫu nhiên được giới thiệu bởi H. Cole [8]. Ý tưởng của phương pháp xuất phát từ thực tế rằng: Nếu ta cộng dồn vô số các ứng xử động X của kết cấu gây ra chỉ bởi các tải trọng ngẫu nhiên thì sẽ được giá trị trung bình bằng không (0).



Hình 1. Sơ đồ xử lý dữ liệu trong kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên

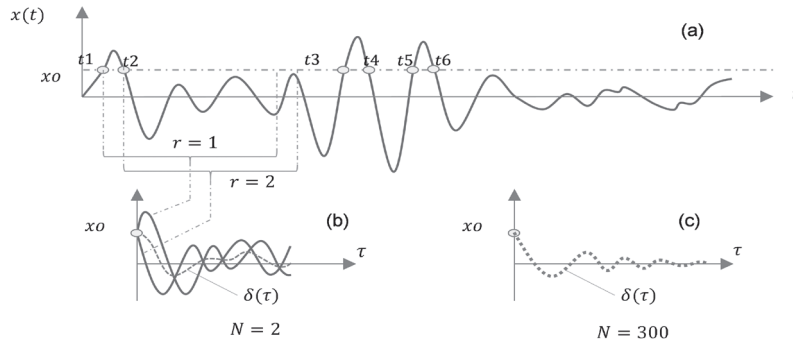
Trong thực tế, ứng xử động của một kết cấu X (ví dụ như chuyển vị động, gia tốc) dưới kích thích của tải trọng ngẫu nhiên ở thời điểm $t + t_0$ bao gồm 3 thành phần: (1) phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của chuyển vị ban đầu a ở thời điểm t_0 ; (2) thành phần do tác dụng của vận tốc ban đầu a' lên kết cấu ở thời điểm t_0 ; (3) phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên F trong khoảng thời gian t_0 đến $t + t_0$. Ba thành phần này có thể được ký hiệu như trong công thức (1).

$$X(t + t_0) = X(t + t_0)|_{a(t_0)} + X(t + t_0)|_{a'(t_0)} + R(t + t_0)|_{F(t)} \quad (1)$$

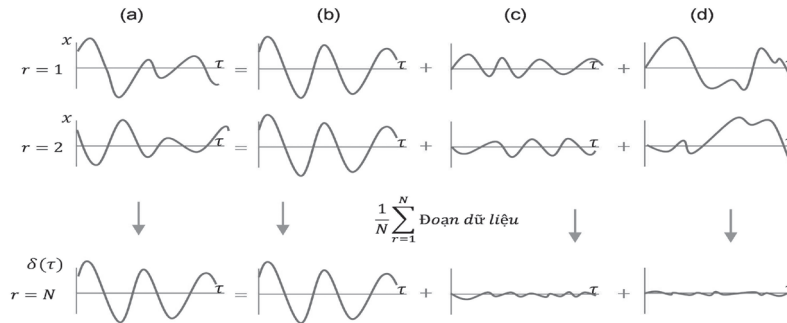
Kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên được thực hiện đơn giản bằng cách lấy các đoạn phản ứng của kết cấu với số lượng điểm dữ liệu bằng nhau và có tương tự giá trị ban đầu x_0 . Hình 2b thể hiện hai đoạn dữ liệu được lấy ra từ dữ liệu phản ứng của kết cấu. Đoạn đầu tiên bắt đầu ở thời điểm t_1 và kết thúc ở thời điểm $(t_1 + \tau)$, ký hiệu $X_0(t_1 + \tau)$ trong đó τ là chiều dài của đoạn dữ liệu. Các đoạn dữ liệu sẽ được cộng và lấy trung bình như công thức 2 và khi các đoạn dữ liệu đủ lớn kết quả thu được là phản ứng tự do của kết cấu như Hình 2c.

$$\delta_N(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N X_0(t_r + \tau) \quad (2)$$

Phần trên chính là trình tự thực hiện của kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên. Tuy nhiên, cơ sở lý thuyết để giải thích cho kỹ thuật này như sau: dưới sự kích thích của tải trọng ngẫu nhiên, tải trọng này có thể được giả thiết như nhiễu lý tưởng (white noise), dẫn đến các phản ứng của kết cấu dưới tác dụng của vận tốc ban đầu và lực kích thích đều là ngẫu nhiên. Kết quả là khi cộng trung bình đủ lớn các đoạn dữ liệu phản ứng của kết cấu gây ra bởi hai thành phần này sẽ bằng 0 theo như mô tả tại công thức (3) và (4). Như vậy, thành phần còn lại của công thức 1 sau khi đã cộng trung bình sẽ chỉ còn là phản ứng tự do của kết cấu dưới tác dụng của chuyển vị ban đầu.



Hình 2. Các đoạn dữ liệu lấy từ phản ứng của kết cấu



Hình 3. Lấy trung bình của các đoạn dữ liệu; (a) Các đoạn dữ liệu và kết quả cộng trung bình; (b) Thành phần do chuyển vị ban đầu; (c) Thành phần do vận tốc ban đầu; (d) thành phần do lực ngẫu nhiên.

$$\delta_N(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N X_0(t_r + \tau) \Big|_{a(t_0)} \rightarrow 0 \quad (3)$$

$$\delta_N(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N X_0(t_r + \tau) \Big|_{F(t)} \rightarrow 0 \quad (4)$$

Cơ sở lý thuyết của kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên cũng được thể hiện rõ dưới dạng đồ thị như trong Hình 3.

3. Áp dụng phân tích dữ liệu cầu Tân An

Cầu Tân An có kết cấu dạng dầm chính dạng hộp bê tông cốt thép dự ứng lực nhịp liên tục với sơ đồ (70.05m+110m+70.05m) và cầu dẫn dạng Super-T nhịp 38m nằm trên quốc lộ 1A thuộc tỉnh Long An. Với mật độ giao thông qua lại dày đặc, việc cấm lưu thông trên cầu để đo đạc là không khả thi và do đó đây là công trình phù hợp để sử dụng phương pháp được giới thiệu trong nghiên cứu này nhằm mục đích tách dao động tự do của cầu. Số liệu sử dụng trong bài báo này được đo đạc từ phần cầu dẫn Super-T của cầu Tân An (Hình 4).

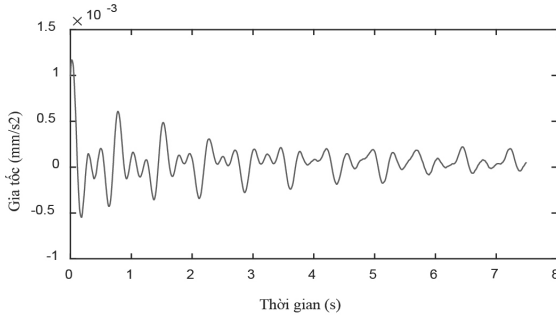


Hình 4. Cầu Tân An, nhịp liên tục (trái), và nhịp dầm Super - T (phải)

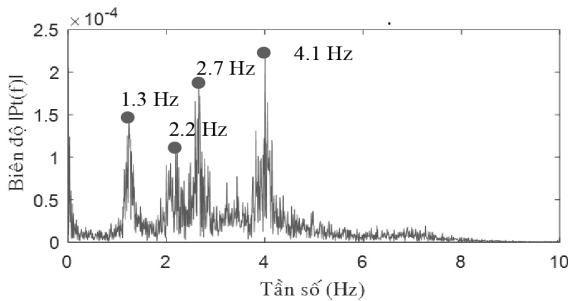
Trong quá trình đo đạc dữ liệu tải trọng qua cầu là xe cộ chạy ngẫu nhiên trên cầu. Thiết bị sử dụng để đo đạc là đầu đo gia tốc ba phương được gắn ở trên mặt cầu gần lề lan can để đảm bảo không cản trở sự lưu thông qua lại của phương tiện giao thông (Hình 5). Phản ứng gia tốc của cầu dưới kích thích của xe cộ được thu lại thông qua thiết bị SDA-830C, số liệu thu thập trong khoảng thời gian 140 giây và tốc độ ghi dữ liệu là 200 Hz. Kết quả đo được thể hiện trong Hình 6.

Áp dụng kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên cho dữ liệu gia tốc (Hình 6) với chiều dài của các đoạn dữ liệu (Response Segments) được lựa chọn là 7.5 giây tương đương 1500 giá trị dữ liệu và giá trị ban đầu (triggering level) x_0 lấy bằng 0.5 lần độ lệch chuẩn. Kết quả thu được được gọi là hàm giảm lượng ngẫu nhiên (Randomdec Signature), đây là phản ứng tự do của cầu được tổ hợp từ nhiều dạng dao động (Hình 7).

Chuyển dữ liệu của hàm giảm lượng ngẫu nhiên từ miền thời gian sang miền tần số bằng thuật toán FFT (Fast Fourier Transform) kết quả các tần số dao động đầu tiên của cầu được thể hiện rõ là các đỉnh của đồ thị Hình 8. Kết quả này cũng được so sánh với kết quả biến đổi FFT trực tiếp từ dữ liệu đo gia tốc được thể hiện trong Hình 9. Mặc dù cả 2 phương pháp vẫn cho ra kết quả tương đối giống nhau; tuy nhiên, việc biến đổi FFT trực tiếp dữ liệu đo cho ra đồ thị tương đối nhiễu với rất nhiều đỉnh tần số. Hơn nữa, kết quả này sẽ làm cho việc xác định các tham số động học khác như tỉ số cản trở nên khó khăn và có thể cho ra kết quả kém chính xác.



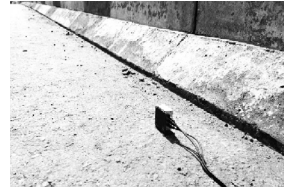
Hình 7. Hàm giảm lượng ngẫu nhiên (Randomdec Signature)



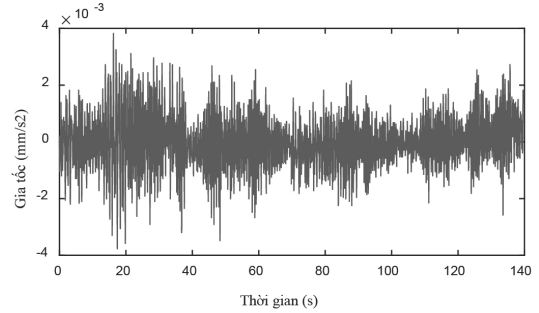
Hình 9. Biến đổi FFT trực tiếp từ dữ liệu đo đạc

Bảng 1. Kết quả xác định đặc trưng động học của cầu Tân An

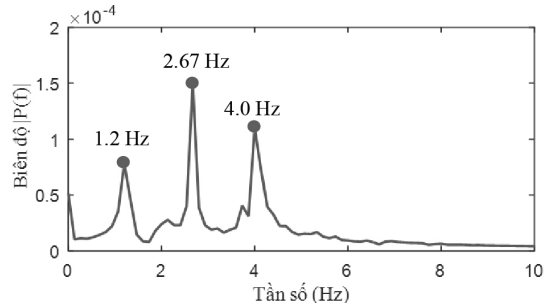
Dạng dao động	Tần số dao động sử dụng kỹ thuật RD (Hz)	Tần số dao động phân tích theo FEM (Hz)	Tỉ số giảm chấn ζ (%)
1	1.2	(*)	2.12
2	2.67	2.603	2.13
3	4.0	4.053	4.24



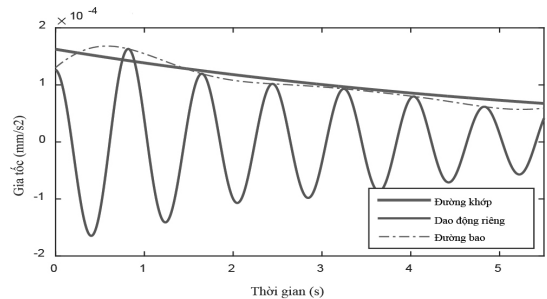
Hình 5. Bố trí đầu đo gia tốc và thiết bị SDA-830C



Hình 6. Phản ứng gia tốc của cầu dưới kích thích của phương tiện giao thông



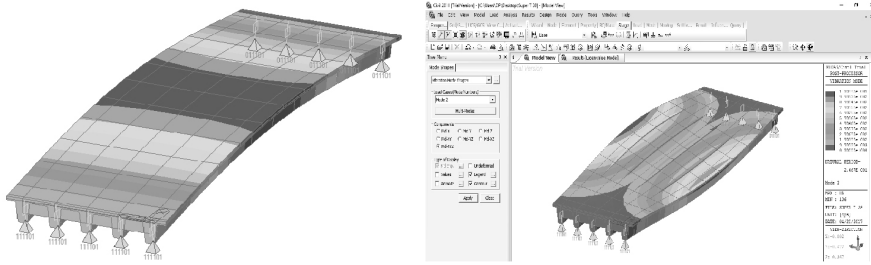
Hình 8. Hàm giảm lượng ngẫu nhiên trên miền tần số



Hình 10. Xác định tỉ số giảm chấn của kết cấu

Từ hàm giảm lượng ngẫu nhiên, việc xác định tỉ số cản của kết cấu có thể được thực hiện bằng nhiều cách. Tuy nhiên, một trong các cách đơn giản nhất là tách các dao động trong Hình 8 thành các thành phần dao động riêng theo từng tần số, tiếp theo đó sử dụng khai triển Hilbert để tìm đường bao của hàm thành phần này. Từ đó chúng ta có thể tìm một đường bao logarit - $e^{-\omega_n \zeta t}$ với ζ là tỉ số cản và ω_n là tần số dao động riêng của kết cấu để thể hiện gần đúng phương trình của đường bao, chi tiết được mô tả trong Hình 10.

Kết quả tỉ số giảm chấn tương ứng với các tần số dao động khác được thực hiện tương tự. Để kiểm chứng độ tin cậy của kết quả phân tích, một mô hình phần tử hữu hạn (FEM) của cầu Tân An sử dụng phần mềm Midas/Civil 2011 đã được sử dụng để phân tích động. Kết quả dạng dao động và giá trị tần số dao động riêng của kết cấu thể hiện trong Hình 11 và Bảng 1.



Hình 11. Dạng dao động thứ nhất và thứ hai khi phân tích trong Midas/Civil

Kết quả phân tích dạng dao động thứ hai và thứ ba sử dụng kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên được so sánh với hai dạng dao động đầu tiên phân tích bằng Midas/Civil cho thấy phương pháp giảm lượng ngẫu nhiên cho kết quả khá tin cậy. Tuy nhiên, một điểm đáng chú ý ở đây là khi phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) không cho ra được tần số dao động nào trùng khớp với tần số dao động đầu tiên xác định được từ phương pháp giảm lượng ngẫu nhiên. Tần số này có thể là một kết quả nhiễu hoặc là tần số dao động của một xe tải nặng ngẫu nhiên nào đó chạy qua cầu khi đo đạc số liệu. Nhìn vào Hình 8 cũng cho thấy đây cũng là đỉnh tần số thấp nhất để một lần nữa bổ sung thông tin rằng đây có lẽ không phải là tần số dao động của kết cấu. Kết quả này cũng chỉ ra rằng khi phân tích dao động của kết cấu sử dụng phương pháp RDT những đỉnh tần số có biên độ thấp cần được xem xét cẩn thận trước khi được đưa vào các phân tích khác như một tần số dao động riêng của kết cấu.

4. Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã giới thiệu cơ sở lý thuyết của kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên cùng với đó là một ví dụ áp dụng kỹ thuật này vào trong phân tích dữ liệu đo đạc của một cầu thực tế. Kết quả phân tích sử dụng kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên được so sánh và kiểm chứng với kết quả mô hình phần tử hữu hạn cho thấy kết quả cho ra từ việc sử dụng kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên là đáng tin cậy. Nhược điểm của phương pháp này yêu cầu phải có lượng dữ liệu đủ lớn để có thể loại bỏ được những ảnh hưởng ngẫu nhiên trong dữ liệu đo. Tuy nhiên, với việc không cản trở giao thông qua lại trên cầu và không cần dừng xe thử tải trong khi đo đạc dữ liệu, phương pháp này hứa hẹn sẽ là một trong những phương pháp có hiệu quả trong tương lai gần trong lĩnh vực đánh giá sức khỏe công trình.

Mặc dù đây là một phương pháp đơn giản, việc lựa chọn các thông số trong kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên như chọn chiều dài của các đoạn dữ liệu dùng để lấy trung bình, lựa chọn biên độ ban đầu cũng là một vấn đề cần được nghiên cứu. Đây cũng là hướng đi tiếp theo của nghiên cứu trong việc phân tích tối ưu hóa các tham số của kỹ thuật giảm lượng ngẫu nhiên.

Tài liệu tham khảo

1. Bộ Giao thông Vận Tải (1998), *Quy trình kiểm định cầu trên đường ô tô - 22TCN 243-98*.
2. Van O.P., Moor B.D. (1993), "Subspace algorithms for the stochastic identification problem", *Automatica*, 29(3): 649-660.
3. Van O.P., Moor B.D. (2012), *Subspace identification for linear systems: Theory - Implementation - Applications*, Springer Science & Business Media.
4. Nguyễn Hữu Thuận, Bùi Tiến Thành, Ngô Văn Minh (2016), "Đo đạc thực nghiệm và mô phỏng số nhận dạng dao động kết cấu nhịp cầu dây văng Mỹ Thuận", *Tạp chí Giao thông Vận tải*.
5. Brincker R., Ventura C., Andersen P. (2001), "Damping estimation by frequency domain decomposition", *19th International Modal Analysis Conference*, 698-703.
6. Nguyễn Đức Phúc, Khúc Đăng Tùng (2016), "Tính toán tần số dao động, dạng dao động, và tỷ số giảm chấn kết cấu cầu sử dụng dữ liệu đo gia tốc", *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, Trường Đại học Giao thông vận tải.
7. Cole Jr., H.A. (1973), *On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement signatures*, Nasa Report.
8. Cole H., J.R. (1968), "On-the-line analysis of random vibrations", *9th Structural Dynamics and Materials Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics*.