

Xác định các tần số riêng của hệ thống bằng kiểm tra va đập

Identification of natural frequencies of system by means of impact test

Đặng Phước Vinh

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

Email: dpvinh@dut.udn.vn

Tóm tắt

Từ khóa:

Kiểm tra va đập; Biến đổi Fourier nhanh; Cảm biến gia tốc; Tần số riêng; Tính nhất quán.

Quá trình tính toán xác định tần số riêng của máy hay hệ thống là bước cực kỳ quan trọng và phải thực hiện đầu tiên trong quá trình thiết kế và chế tạo của bất kỳ một máy hay hệ thống. Việc xác định không chính xác tần số riêng có thể dẫn đến việc giảm tuổi thọ hay hư hỏng của hệ thống. Bài báo này trình bày phương pháp xác định các tần số riêng của một hệ thống chịu dao động uốn bằng kiểm tra va đập. Bàn thí nghiệm được sử dụng để xác định tần số riêng bao gồm một trục quay và hai đĩa nặng. Tín hiệu thu được bằng các cảm biến gia tốc và cảm biến lực thông qua bộ thu nhận tín hiệu sẽ được phân tích và biến đổi Fourier nhanh để xây dựng hàm truyền H_1 , qua đó có thể xác định được tần số riêng của hệ thống. Để đánh giá độ chính xác của kết quả nhận được, tính nhất quán của hàm truyền cũng được đề xuất. Phương pháp này rất đơn giản, tiết kiệm thời gian và được sử dụng phổ biến khi muốn xác định tần số riêng của hệ thống với độ chính xác cao.

Abstract

Keywords:

Accelerometer; Coherence; Fast Fourier transform; Impact test; Natural frequency.

The calculation of machinery's natural frequency is a very important step and must be carried out at the beginning of the design and fabrication process of any machines or systems. Failing to estimate natural frequency can lead to reducing the longevity or damaging of machinery. This paper presents the methodology for identification of natural frequency of a system under flexural vibrations using the impact test. The test rig used to identify the natural frequencies consisted of one shaft and two disks. Acquired signals from accelerometer and load cell sensors were analyzed and underwent the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm to obtain the transfer function H_1 , thus estimated the natural frequencies of the system. In order to evaluate the accuracy of results, the function's coherence is introduced. This methodology is simple, less time consuming and widely used for the natural frequency calculation with high precision.

Ngày nhận bài: 30/06/2018

Ngày nhận bài sửa: 03/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Khi thiết kế và chế tạo của bất kỳ một máy hay hệ thống nào, việc xác định các thông số động học, động lực học là rất quan trọng và phải được thực hiện trước tiên. Trong đó, việc xác

định chính xác tần số riêng của hệ thống để tránh hiện tượng cộng hưởng là một bước không thể bỏ qua trước, trong và sau khi chế tạo, lắp đặt máy. Hiện tượng cộng hưởng làm cho biên độ dao động của hệ thống bị khuếch đại lên nhiều lần và có thể gây ra hư hỏng một phần hoặc toàn bộ hệ thống. Cây cầu Tacoma Narrows [1] là một ví dụ điển hình cho sự phá hoại hệ thống của hiện tượng cộng hưởng. Vào năm 1940, một cơn gió đặc biệt xuất hiện với tốc độ 68 km/h có tần số đúng bằng tần số riêng của cây cầu này. Lúc đầu cây cầu dao động với biên độ khoảng 0.9 m, sau đó lớn dần và khi đạt đến 8m thì bị phá hủy hoàn toàn. Một ví dụ phổ biến khác là nghệ sĩ nổi tiếng Jaime Vendera đã chứng minh rằng bằng giọng nói của mình có thể làm vỡ chiếc ly thủy tinh. Điểm cốt lõi ở đây là âm thanh phát ra phải có cường độ lớn và tần số bằng với tần số riêng của chiếc ly thủy tinh đó.

Việc xác định tần số riêng có thể thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau. Sau khi thiết kế trên phần mềm chuyên dụng như SolidWorks hay Inventor, tần số riêng có thể được xác định một cách nhanh chóng. Tuy nhiên để xác định tần số riêng của một máy hay một hệ thống bất kỳ ở một địa điểm bất kỳ thì phương pháp sử dụng các phần mềm chuyên dụng trên là không khả thi. Do đó, phương pháp kiểm tra và đập được giới thiệu và được sử dụng rất rộng rãi khi muốn xác định tần số riêng của hệ thống không những cho máy móc [2]-[3] mà còn ở những công trình xây dựng [4]. Ngoài ra, việc xác định tần số riêng của góp phần trong việc tính toán các thông số động lực học của hệ thống như hệ số độ cứng, độ giảm chấn... [5].

Bài báo này trình bày phương pháp xác định tần số riêng của hệ thống bằng phương pháp thực nghiệm. Đối tượng để xác định tần số riêng là một bàn thí nghiệm đơn giản gồm một trục quay gắn hai đĩa nặng. Ba cảm biến gia tốc và một chiếc búa có gắn cảm biến lực là những thiết bị cần thiết để tiến hành thí nghiệm. Tín hiệu sau khi được thu nhận từ hệ thống thu nhận tín hiệu thì được phân tích và xử lý bằng Matlab. Sau đó các tần số riêng sẽ được xác định một cách nhanh chóng và chính xác. Độ tin cậy của các kết quả thu được sẽ được đánh giá thông qua thông số tính nhất quán của hàm truyền.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT/PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

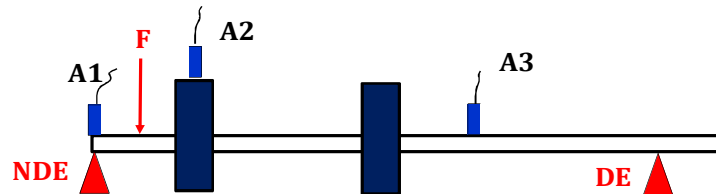
2.1. Thiết lập thí nghiệm

Bàn thí nghiệm được sử dụng để kiểm tra và đập được thể hiện ở Hình 1. Ba cảm biến được gắn tại ba vị trí bất kỳ trên hệ thống. Trong bài báo này tác giả chỉ trình bày trường hợp với một cảm biến gia tốc được gắn trên một đĩa nặng, một cảm biến gắn trên gối đỡ và cảm biến gia tốc còn lại được gắn trên trục quay.

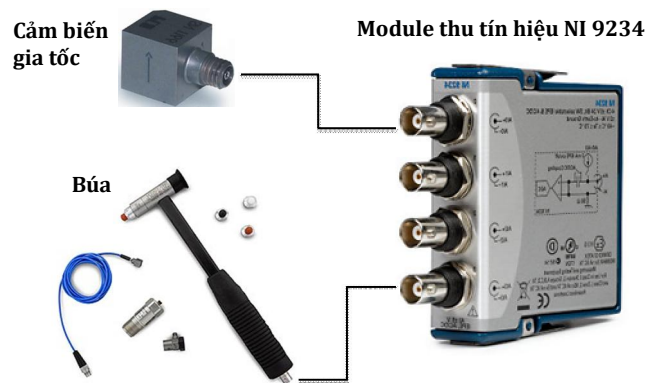


Hình 1. Bàn thí nghiệm được sử dụng để xác định tần số riêng bằng kiểm tra và đập

Vị trí lắp đặt các cảm biến gia tốc được thể hiện ở Hình 2. Để tiện phân tích và đánh giá, tác giả đặt tên ba cảm biến này lần lượt là A1, A2 và A3. Gối đỡ cho trục tại vị trí gần với động cơ được đặt tên là DE (Driven-End) và gối đỡ phía đối diện có tên là NDE (Non Driven-End). Người làm thí nghiệm sẽ dùng chiếc búa với cảm biến lực gắn ở phía đuôi gõ vào trục tại vị trí giữa A1 và A2. Mô đun NI 9234 của hãng National Instrument được sử dụng để thu nhận tín hiệu từ các cảm biến (Hình 3). Các thông số kỹ thuật của cảm biến gia tốc, búa và bộ thu nhận tín hiệu NI 9234 được liệt kê chi tiết ở Bảng 1.



Hình 2. Vị trí lắp đặt các cảm biến và tác dụng lực



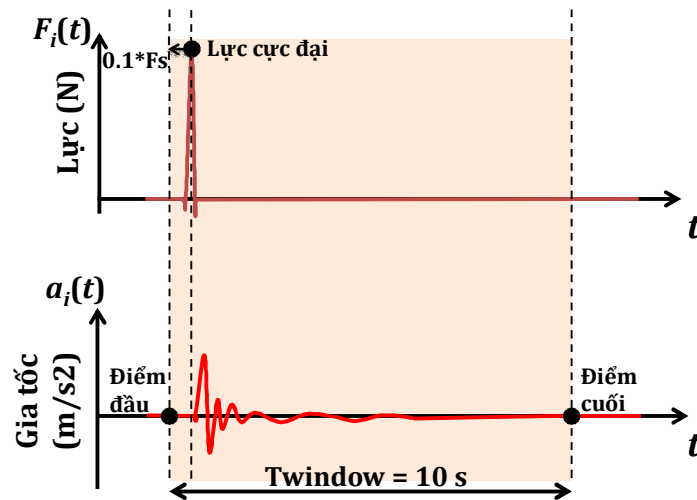
Hình 3. Thiết bị dùng để thực hiện kiểm tra và đập (cảm biến gia tốc, búa, bộ thu nhận tín hiệu)

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của cảm biến gia tốc và búa

Cảm biến gia tốc	Mã số	PCB Model 333B30
	Tần số làm việc (Hz)	0,5 – 3000
	Độ phân giải ($mV/(m/s^2)$)	10,2
	Đầu ra	Tương tự (chuẩn IEPE)
	Tần số cộng hưởng (kHz)	$\geq 40kHz$
	Khối lượng (g)	4,8
Búa	Mã số	086D05
	Độ phân giải (mV/N)	0,23
	Dãi đo (N pk)	± 22240
	Khối lượng (kg)	0,32
Bộ thu nhận tín hiệu	Mã số	NI 9234
	Hãng sản xuất	NI (National Instrument)
	Số lượng kênh đầu vào	4
	Độ phân giải	24
	Tốc độ lấy mẫu (kS/s)	51.2
	Dãi tần số (KHz)	23,04

Tín hiệu sau khi thu về sẽ qua bước tiền xử lý trước khi được phân tích. Bởi vì việc tiến hành thí nghiệm phải được lặp lại nhiều lần (trong bài báo này tác giả lặp lại thí nghiệm 10 lần) để giảm nhiễu, từ đó giảm sai số cho kết quả. Ở mỗi thí nghiệm, khoảng thời gian tác dụng lực (bằng cách gõ búa) sẽ không giống nhau dẫn đến việc lấy giá trị trung bình sẽ không thực hiện được. Do đó cần phải cắt tín hiệu thu được để đảm bảo rằng 10 tín hiệu ở 10 thí nghiệm sẽ trùng thời điểm với nhau. Quy trình cắt tín hiệu như sau:

1. Tiến hành thí nghiệm với tần số lấy mẫu F_s (10 kHz) và thời gian lấy mẫu t (15 giây). Tín hiệu thu được (rời rạc) sẽ có độ dài là $t \times F_s = 150000$ điểm.
2. Xác định thời điểm tác dụng lực lên hệ thống. Đó là thời điểm mà giá trị của lực sẽ đạt cực đại (xem Hình 4). Do vậy tín hiệu từ cảm biến lực sẽ được lấy làm chuẩn.
3. Từ vị trí cực đại này, ta lấy một lượng tín hiệu trước đó với độ dài cỡ khoảng $0,1 \times F_s$ (điểm đầu). Từ vị trí này, ta xác định điểm cuối của tín hiệu với khoảng thời gian là 10 giây.
4. Cắt tín hiệu thu được từ cảm biến lực và ba cảm biến gia tốc với khung thời gian này, ta sẽ được các tín hiệu với các điểm rời rạc trùng nhau từng điểm một.



Hình 4. Cắt tín hiệu trước khi thực hiện phân tích và xử lý

2.2. Phân tích và xử lý tín hiệu

Tất cả các tín hiệu sau khi cắt sẽ được biến đổi từ miền thời gian sang miền tần số trước khi thực hiện các bước cần thiết tiếp theo. Ta quy định như sau:

- Tín hiệu đầu vào và đầu ra trong miền thời gian là tín hiệu từ cảm biến lực và gia tốc, gọi là $x^p(t)$ và $y^p(t)$, với p là số thứ tự của các lần thí nghiệm ($p = 10$)
- Sau khi biến đổi sang miền tần số, $x^p(t)$ và $y^p(t)$ sẽ trở thành $X^p(f)$ và $Y^p(f)$

Để tính hàm truyền giữa đầu vào và đầu ra, ta cần xác định quang phổ tự động G_{xx} và quang phổ bất chéo G_{yx} của các tín hiệu này. Công thức để xác định các quang phổ này như sau:

$$G_{xx}(f) = X^p(f)^* \cdot X^p(f) \quad (1)$$

$$G_{yx}(f) = Y^p(f)^* \cdot X^p(f)$$

Trong đó $Y^p(f)$ và $Y^p(f)^*$ là vecto phức hợp (complex vector) và vecto liên hợp (complex conjugate vector) của tín hiệu đầu ra và có dạng như sau:

$$\begin{aligned} Y^p(f) &= a + ib \\ Y^p(f)^* &= a - ib \end{aligned} \quad (2)$$

Do ta tiến hành lặp lại thí nghiệm nhiều lần, nên giá trị trung bình của quang phổ tự động và bất chéo được tính theo công thức:

$$\begin{aligned} \overline{G}_{yx} &= \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P Y^p(f)^* X^p(f) \\ \overline{G}_{xx} &= \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P X^p(f)^* X^p(f) \end{aligned} \quad (3)$$

Hàm truyền giữa đầu vào và đầu ra H_1 được tính theo công thức:

$$H_1(f) = \frac{\overline{G}_{yx}(f)}{\overline{G}_{xx}(f)} \quad (4)$$

Như đã đề cập ở trên, để đánh giá độ tin cậy của kết quả đạt được ta sử dụng tính nhất quán của hàm truyền, được xác định theo công thức:

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad (5)$$

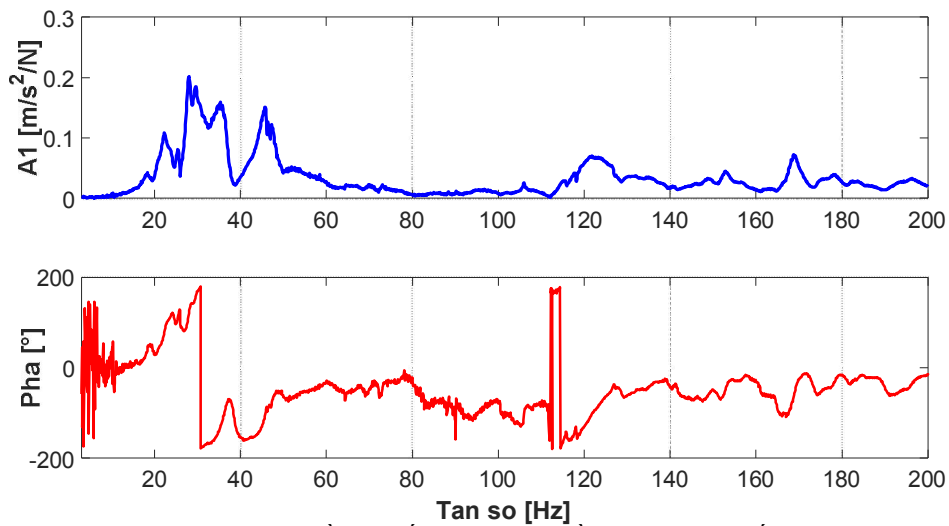
Chú ý là độ lớn của $\gamma_{xy}(f)$ sẽ dao động từ 0 đến 1, với 1 là độ tin cậy tuyệt đối và 0 là kết quả không đáng tin cậy, bị ảnh hưởng bởi nhiễu bên ngoài.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

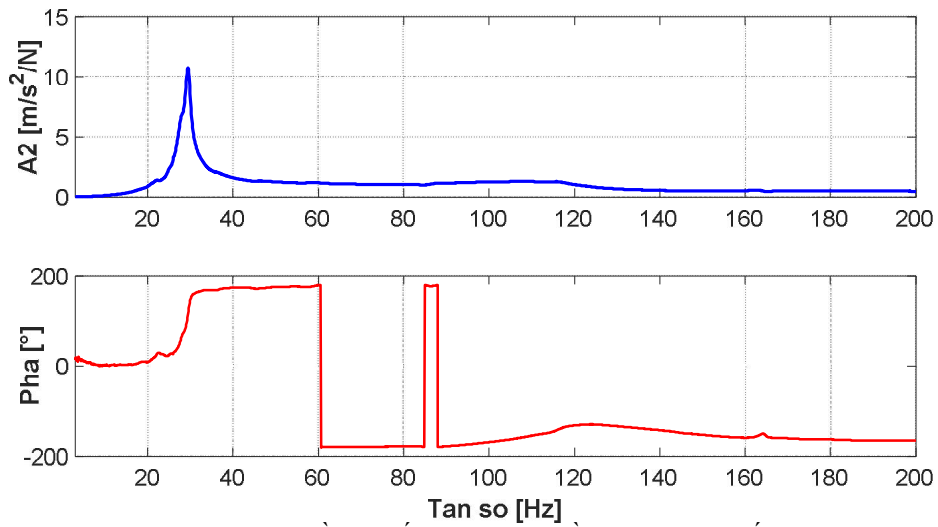
3.1. Hàm truyền

Hàm truyền và pha của tín hiệu ra và tín hiệu vào của cảm biến gia tốc A1, A2, A3 được thể hiện ở Hình 5, Hình 6 và Hình 7 với dải tần số phân tích là từ 0 Hz cho đến 200 Hz. Từ Hình 6 và Hình 7 ta dễ dàng xác định tần số riêng thứ nhất và thứ hai của hệ thống là vào khoảng 28Hz và 118Hz. Tuy nhiên, hàm truyền thu được từ cảm biến A1 lại không rõ ràng như hàm truyền của A2 và A3. Điều này dễ dàng được giải thích là do vị trí lắp đặt cảm biến A1.

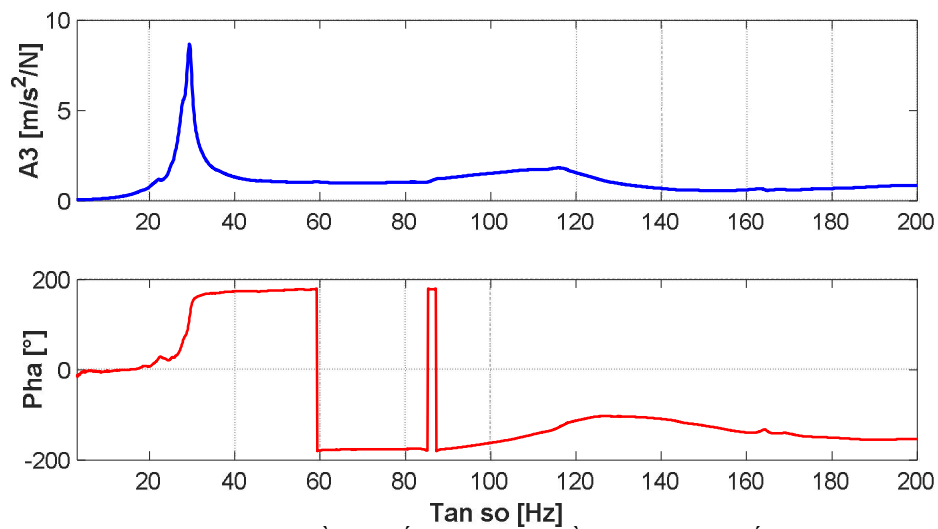
Quay trở lại Hình 2, cảm biến A1 được lắp trên ổ bi, trong khi đó cảm biến A2 và A3 được lắp trên đĩa và trục. Do đó, gia tốc thu được từ cảm biến A1 là cực kỳ nhỏ (dao động tại vị trí này gần như không có). Điều này cũng giải thích cho độ lớn của hàm truyền của cảm biến A1 cực kỳ nhỏ (lớn nhất là 0,2 m/s²/N) và chỉ bằng 1/50 lần so với A2 (lớn nhất là hơn 10 m/s²/N). Bên cạnh đó, do điểm tác dụng lực gần vị trí của A2 hơn A3, nên độ lớn của hàm truyền của A2 lớn hơn so với A3 (lớn nhất là hơn 8,5 m/s²/N).



Hình 5. Hàm truyền gia tốc/lực và giản đồ pha của cảm biến A1



Hình 6. Hàm truyền gia tốc/lực và giản đồ pha của cảm biến A2



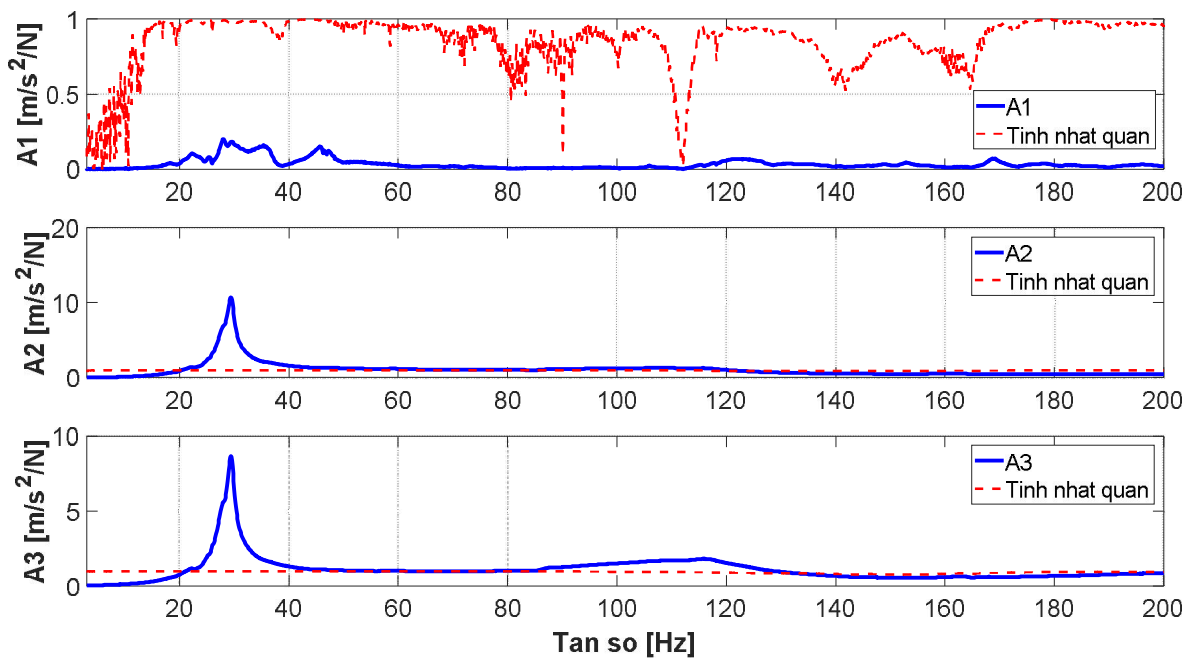
Hình 7. Hàm truyền gia tốc/lực và giản đồ pha của cảm biến A3

3.2. Tính nhất quán hàm truyền

Từ Hình 8, ta có thể đánh giá được độ chính xác của các hàm truyền của cảm biến A1, A2 và A3. Dễ dàng nhận thấy rằng tính nhất quán của hàm truyền A2 và A3 gần như bằng 1, điều này chứng tỏ rằng kết quả thu được từ A2 và A3 là chính xác gần như tuyệt đối. Do đó ta có thể kết luận tần số riêng thứ nhất và thứ hai của hệ thống là vào khoảng 28Hz và 118Hz.

Với cảm biến A1, độ nhất quán là không ổn định trên toàn dải tần số, đặc biệt độ nhất quán này rất thấp ở tần số bé hơn 10Hz và khoảng 115Hz. Do đó, kết quả thu được từ cảm biến A1 là không đáng tin cậy và nên bỏ qua khi xác định tần số riêng của hệ thống.

Từ đó có thể rút ra kết luận là không nên đặt cảm biến gia tốc tại các vị trí mà dao động sẽ bị khống chế như gối đỡ, ngàm...



Hình 8. Tính nhất quán hàm truyền của 3 cảm biến gia tốc

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày phương pháp xác định thực nghiệm tần số riêng của một hệ thống bất kỳ chịu dao động uốn bằng kiểm tra va đập. Đây là phương pháp khá đơn giản, ít tốn thời gian và cho kết quả với độ chính xác khá cao.

Thiết bị được sử dụng bao gồm các cảm biến gia tốc được gắn trên các vị trí của bàn thí nghiệm, búa (có gắn cảm biến lực) và hệ thống thu nhận tín hiệu từ các cảm biến. Các thí nghiệm được lặp lại nhiều lần và cần được thực hiện tiên xử lý (cắt tín hiệu) trước khi tính hàm truyền H_1 ở miền tần số. Tính nhất quán của hàm truyền cũng được đề xuất để đánh giá độ tin cậy của kết quả thu được. Hàm truyền và tính nhất quán của nó được phân tích trên dải tần số từ 0Hz cho đến 200Hz.

Kết quả cho thấy tần số riêng thứ nhất và thứ hai của bàn thí nghiệm là vào khoảng 28Hz và 118Hz. Bên cạnh đó vị trí lắp đặt cảm biến gia tốc cũng cần chú ý là không nên đặt cảm biến gia tốc tại các vị trí mà dao động sẽ bị khống chế như gối đỡ, ngàm

Tác giả cũng đã tiến hành kiểm tra kết quả của phương pháp này bằng cách cho trục quay tăng tốc từ 0 (vòng/phút) đến 8000 (vòng/phút). Kết quả nhận được là hệ thống sẽ xảy ra hiện tượng cộng hưởng tại tốc độ khoảng 1680 (vòng/phút) và khoảng 7000 (vòng/phút), tức là tại tần số khoảng 28Hz và 118Hz.

DANH MỤC DANH PHÁP/KÝ HIỆU

$x^p(t), y^p(t)$: tín hiệu đầu vào, đầu ra của thí nghiệm thứ p ở miền thời gian
$X^p(t), Y^p(t)$: tín hiệu đầu vào, đầu ra của thí nghiệm thứ p ở miền tần số
$G_{xx}(f), G_{yx}(f)$: quang phổ tự động của tín hiệu vào và quang phổ bất chéo của tín hiệu ra/tín hiệu vào
$H_1(f)$: hàm truyền của tín hiệu ra và tín hiệu vào
$\gamma_{xy}(f)$: tính nhất quán của tín hiệu ra và tín hiệu vào

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_\(1940\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))
- [2]. Rocklin, G.T, Crowley, J., and Vold, H. A., 1985. Comparison of H_1 , H_2 , and HV Frequency Response Functions. *3rd International Modal Analysis Conference*, Orlando FL.
- [3]. Formenti, D. and Richardson, M. H., 1985. Global Curve Fitting of Frequency Response Measurements using the Rational Fraction Polynomial Method. *3rd International Modal Analysis Conference*, Orlando, FL.
- [4]. Daniel T., 2011. Modal Analysis of Small & Medium Structures by Fast Impact Hammer Testing Method. *JRC Scientific and Technical Reports*. ISBN 978-92-79-21479-0.
- [5]. Dang, P. V, Chatterton, S., Pennacchi, P., and Vania, A., 2016. Effect of the load direction on non-nominal five-pad tilting-pad journal bearings. *Tribology International*, Vol. 98, pp. 197-211.