

STABILITY OF VIBRO-IMPACT DRIVEN LOCOMOTION SYSTEM WITH RANDOM INITIAL CONDITIONS

Nguyen Khac Tuan¹, La Ngoc Tuan², Ho Ky Thanh¹, Nguyen Van Du^{1*}

¹TNU - University of Technology

²Vinh University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 08/6/2021</p> <p>Revised: 21/6/2021</p> <p>Published: 22/6/2021</p>	<p>This paper presents a study to evaluate the stability of the self-moving device under different initial conditions by different analytical techniques. Using the mathematical model describing the motion of masses developed from previous studies, analysis techniques include time history, Poincaré section, Fast Fourier Transform analysis, phase diagram combined with Poincaré map and the basin of attraction technique were applied. The results show that the first four techniques are only suitable to investigate the stability of the mechanical system for each initial value. When the initial state values change randomly in a wide range, the application of the basin of attraction allows a quick and unambiguous assessment of the stability of the system. Two main states of the mechanical system have been formed corresponding to different initial value domains of the initial conditions. The research results can be applied to analyze the dynamic behavior of other mechanical systems when the initial conditions change randomly.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Locomotion</p> <p>Vibro-impact</p> <p>Dynamic response</p> <p>Basin of attraction</p> <p>Poincaré map</p>	

ĐÁNH GIÁ ĐỘ ỔN ĐỊNH CỦA THIẾT BỊ TỰ DI CHUYỂN NHỜ RUNG ĐỘNG - VA ĐẬP TRONG ĐIỀU KIỆN NGẪU NHIÊN TIỀN ĐỊNH

Nguyễn Khắc Tuấn¹, La Ngọc Tuấn², Hồ Kỳ Thanh¹, Nguyễn Văn Dụ^{1*}

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 08/6/2021</p> <p>Ngày hoàn thiện: 21/6/2021</p> <p>Ngày đăng: 22/6/2021</p>	<p>Bài báo này trình bày một số kỹ thuật phân tích nhằm đánh giá độ ổn định của thiết bị tự di chuyển ứng với các điều kiện ban đầu khác nhau. Sử dụng mô hình toán học mô tả chuyển động của các khối lượng đã được phát triển từ các nghiên cứu trước, các kỹ thuật phân tích gồm đồ thị thời gian, lát cắt Poincaré, phân tích nhanh Fourier, đồ thị pha kèm bản đồ Poincaré và kỹ thuật tập hút đã được áp dụng. Kết quả cho thấy bốn kỹ thuật đầu tiên chỉ phù hợp để khảo sát tính ổn định của cơ hệ ứng với từng giá trị ban đầu. Khi các giá trị trạng thái ban đầu thay đổi ngẫu nhiên, việc áp dụng kỹ thuật tập hút cho phép đánh giá nhanh và rõ ràng tính ổn định của cơ hệ. Hai trạng thái chính của cơ hệ đã được hình thành ứng với các miền giá trị ban đầu khác nhau của điều kiện ban đầu. Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng để phân tích ứng xử động lực học của các cơ hệ khác khi điều kiện ban đầu thay đổi ngẫu nhiên.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Tự di chuyển</p> <p>Rung động-va đập</p> <p>Ứng xử động lực học</p> <p>Tập hút</p> <p>Bản đồ Poincaré</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4608>

* Corresponding author. Email: vandu@mut.edu.vn

1. Giới thiệu

Thiết bị tự di chuyển, còn gọi là thiết bị tự hành (autogenous mobile systems hoặc locomotion systems) là loại thiết bị có thể di chuyển chỉ nhờ lực tác động tương tác giữa thân thiết bị với chuyển động tuần hoàn của một khối lượng bên trong hệ thống. Ngày nay, thiết bị tự di chuyển được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp nhằm đáp ứng yêu cầu hoạt động trong môi trường khó khăn cho việc can thiệp trực tiếp của con người, hoặc trong các điều kiện khắc nghiệt, chẳng hạn trong công tác cứu hộ, kiểm tra hầm lò, chẩn đoán các đường ống ngầm... [1], [2]. Trong cơ y sinh (Biomechanics), các hệ thống tự di chuyển hứa hẹn cải thiện khả năng điều khiển viên nang nội soi (capsule endoscopy) đáp ứng yêu cầu di chuyển, tiến/ lui hay tránh kẹt trong mao mạch [3]. Hai nguyên tắc hoạt động chính của thiết bị tự di chuyển đã và đang nhận được nhiều quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học, đó là tự di chuyển nhờ rung động và nhờ rung động - va đập.

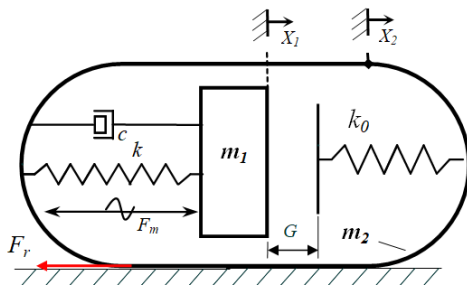
Mô hình thiết bị tự di chuyển dựa trên nguyên tắc rung động kết hợp va đập lần đầu tiên được đề xuất bởi Pavlovskaja và cộng sự [4]. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết đã được triển khai theo hướng này. Chẳng hạn, các nghiên cứu lý thuyết phát triển mô hình thiết bị tự di chuyển nhờ rung động - va đập và phân tích đặc tính động lực học [5], [6]. Các nghiên cứu phát triển mô hình lý thuyết, đồng thời kiểm chứng bằng thực nghiệm, trong đó có phát triển về cơ chế tạo rung động cho khối lượng quán tính như sử dụng mạch cộng hưởng RLC [7],[8], sử dụng động cơ tuyến tính [9], sử dụng bộ tạo rung chuyên dụng điện động lực học [10]... Trong quá trình thiết bị hoạt động, việc đánh giá tính ổn định về động lực học theo thời gian thực đóng vai trò rất quan trọng. Thông thường, tính ổn định động lực học được phân tích dựa trên các kỹ thuật như phân tích Fast Fourier Transform (FFT), đồ thị pha và lát cắt Poincaré, đồ thị rẽ nhánh [11]. Bên cạnh đó, tính ổn định của hệ thống động lực học trong các điều kiện đầu vào khác nhau cũng được đánh giá bằng phương pháp tập hút (basin of attraction) và quỹ đạo hút (attractor) [12]-[14]. Gần đây, tính ổn định của hệ thống tự di chuyển nhờ rung động kết hợp va đập cũng đã được khảo sát dựa trên kỹ thuật phân tích tập hút [15]. Tuy vậy, ưu việt của phương pháp này trong việc đánh giá tính ổn định của hệ tự di chuyển so với các phương pháp khác chưa được phân tích sâu, đặc biệt khi yếu tố đầu vào thay đổi ngẫu nhiên. Do vậy, bài báo này trình bày nguyên tắc thực hiện, kết quả phân tích so sánh kết quả phân tích chi tiết tính ổn định của cơ hệ tự di chuyển nhờ rung động và va đập, qua đó nhấn mạnh các ưu việt của kỹ thuật phân tích tập hút khi các yếu tố đầu vào thay đổi ngẫu nhiên (ngẫu nhiên tiền định).

2. Cơ sở phương pháp nghiên cứu

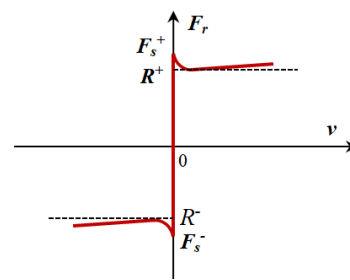
2.1. Mô hình thiết bị tự di chuyển nhờ rung động-va đập

Mô hình vật lý của thiết bị tự di chuyển nhờ rung động - va đập được thể hiện như trên hình 1a [15]. Lò xo được sử dụng để liên kết hai khối lượng m_1 và m_2 có độ cứng k . Hệ số giảm chấn c đặc trưng cho tổn thất năng lượng dao động của hai khối lượng. Khối lượng quán tính m_1 được kích thích tuần hoàn bởi lực kích thích dạng hàm số sin, có biên độ là A và tần số kích thích f_{exc} (trong đó, $f_{exc} = \Omega/2\pi$ với Ω là tần số Ω tính theo rad/s).

(a)



(b)



Hình 1. Mô hình vật lý (a) và mô hình ma sát Coulomb-Stribeck (b)

Lò xo có độ cứng k_0 đặc trưng cho độ cứng va đập giữa hai khối lượng. Lực ma sát cản trở chuyển động, F_r , được giả thiết tuân theo mô hình ma sát Coulomb-Stribeck như trên hình 1b. Lò xo liên kết giữa hai khối lượng được mô hình hóa bởi một hàm bậc ba khuyết, theo dịch chuyển tương đối giữa hai khối lượng, tương tự trong [16], [17], như sau:

$$F_{spr} = k_1(X_1 - X_2) + k_2(X_1 - X_2)^3 \quad (1)$$

Phương trình tổng quát mô tả chuyển động của cơ hệ đã được phát triển dưới dạng [15]:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 X_1}{dt^2} = A \sin(\Omega t) - F_{spr} - c \left(\frac{dX_1}{dt} - \frac{dX_2}{dt} \right) - Hk_0(X_1 - X_2 - G) \\ m_2 \frac{d^2 X_2}{dt^2} = -A \sin(\Omega t) + F_{spr} + c \left(\frac{dX_1}{dt} - \frac{dX_2}{dt} \right) + Hk_0(X_1 - X_2 - G) - F_r \end{cases} \quad (2)$$

trong đó, $H(\cdot)$ là hàm Heaviside, được định nghĩa như sau:

$$\begin{cases} H = 1, & X_1 - X_2 - G > 0 \\ H = 0, & X_1 - X_2 - G \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Mô hình ma sát được sử dụng là mô hình Coulomb-Stribeck [6], [9], có dạng như sau:

$$F_r = \frac{1}{2} F_s \left(1 + e^{-\left| \frac{dX_2}{dt} \right| \frac{1}{V_s}} \right) \operatorname{sgn} \left(\frac{dX_2}{dt} \right) \quad (4)$$

trong đó, F_s là cường độ lực ma sát tĩnh khi cơ cấu bắt đầu chuyển động, nghĩa là khi $dX_2/dt = 0$, và V_s là vận tốc Stribeck.

Nghiên cứu động lực học của cơ hệ được thực hiện dưới dạng không thứ nguyên để có thể áp dụng cho nhiều cỡ kích thước khác nhau. Việc chuyển đổi không thứ nguyên được thực hiện bằng cách đổi biến thông qua việc đặt các đại lượng như sau:

$$\begin{aligned} \tau = \Omega_0 t; x_1 = \frac{k_1}{F_b} X_1; x_2 = \frac{k_1}{F_b} X_2; \Omega_0 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}; \omega = \frac{\Omega}{\Omega_0}; \\ \zeta = \frac{c}{2m_1\Omega_0}; \chi = \frac{A}{F_b}; \sigma = \frac{k_0}{k_1}; \beta = \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{F_b}{k_1} \right)^2; \gamma = \frac{k_1}{F_b} G; \mu = \frac{m_2}{m_1}; f_r = \frac{F_s}{F_b} \end{aligned} \quad (5)$$

trong đó, cường độ lực ma sát tĩnh F_s được xem như là hằng số, F_b là giá trị lực tham chiếu nhằm đánh giá ảnh hưởng của lực ma sát một cách độc lập. Hệ phương trình không thứ nguyên mô tả chuyển động của cơ hệ có dạng như sau:

$$\begin{cases} x_1' = v_1 \\ v_1' = \chi \sin(\omega\tau) - (x_1 - x_2) - \beta(x_1 - x_2)^3 - 2\zeta \left(\frac{dx_1}{d\tau} - \frac{dx_2}{d\tau} \right) - h\sigma(x_1 - x_2 - \gamma) \\ x_2' = v_2 \\ v_2' = \left[-\chi \cos(\omega\tau) + (x_1 - x_2) + \beta(x_1 - x_2)^3 + 2\zeta \left(\frac{dx_1}{d\tau} - \frac{dx_2}{d\tau} \right) + h\sigma(x_1 - x_2 - \gamma) - f_r \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_2}{d\tau} \right) \right] \frac{1}{\mu} \end{cases} \quad (6)$$

Mô hình toán học được mô tả trong phương trình (6) sẽ được sử dụng trong nghiên cứu này.

2.2. Các kỹ thuật cơ bản trong phân tích động lực học

Nói chung, việc phân tích động lực học được thực hiện nhờ sử dụng mô hình toán. Trước hết, mô hình toán đã phát triển cho cơ hệ (2) được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Tiếp đó, các kỹ thuật phân tích động lực học sẽ được áp dụng cho mô hình không thứ nguyên (6) được biến đổi từ mô hình (2). Thông thường, các cơ hệ thường được đánh giá đặc tính thay đổi động lực học thông qua 2 thông số là chuyển vị và vận tốc chuyển động.

2.2.1. Đồ thị thời gian

Có thể đánh giá đặc tính thay đổi chuyển vị và vận tốc theo thời gian (Time history). Tuy nhiên, quan sát đồ thị theo thời gian chỉ có thể cung cấp một phân tích khái lược, phù hợp với các cơ hệ có đặc tính biến đổi lớn, hoặc/ và đơn giản. Phần sau sẽ minh họa nhận định này.

2.2.2. Phân tích Fourier

Theo Fourier, bất kỳ một tín hiệu phức tạp nào cũng có thể phân tích thành tổng các tín hiệu sin, cosin. Phân tích Fourier cung cấp một góc nhìn khác về chuyển động của cơ hệ trong miền tần số. Phép phân tích Fourier là một công cụ hữu ích để xem xét ứng xử của cơ hệ có thể là tổ hợp những dạng dao động nào, có quy luật tuần hoàn (Periodic) hay chuyển động hỗn độn (Chaotic). Hình ảnh quan hệ giữa cường độ tín hiệu ứng với từng giá trị tần số được biểu diễn trong miền tần số thường được gọi là phổ (Spectrum). Một trong những ưu điểm quan trọng của miền tần số là nó cho phép biểu diễn rất rõ ràng các thành phần có tần số khác nhau cùng đồng thời tồn tại trong một dao động gốc.

2.2.3. Đồ thị pha

Trong phân tích động lực học, *mặt phẳng pha* (Phase Plane) chứa tọa độ Đề-các có 2 trục (chuyển vị, vận tốc) thường được gọi là *mặt phẳng trạng thái* (State space). Mỗi điểm của mặt phẳng đặc trưng cho một trạng thái (vị trí và vận tốc) của chuyển động được xét. Tại một thời điểm t bất kỳ, tồn tại một điểm $P(x(t), y(t))$ biểu diễn trạng thái của chuyển động tại thời điểm đó. Khi thời gian t thay đổi, điểm P thay đổi tạo nên một *quỹ đạo pha* (Phase trajectory).

2.2.4. Lát cắt Poincaré

Phương pháp "lát cắt Poincaré" (Poincaré section) mang tên nhà bác học Jules Henri Poincaré, người đã phát minh ra nó. Với các cơ hệ được kích thích bằng một lực biến đổi tuần hoàn với tần số góc ω , tiến hành lấy mẫu các giá trị chuyển vị x và vận tốc v tại các thời điểm cách nhau một khoảng bằng chu kỳ của lực kích thích. Các giá trị này được vẽ chồng lên đồ thị pha, tạo thành bản đồ Poincaré (Poincaré map) để khảo sát tính ổn định của cơ hệ. Kết quả thu được có thể được phân tích dựa trên các nguyên tắc sau [11]:

- Nếu chuyển động đang xét là chuyển động tuần hoàn với thời gian chu kỳ bằng thời gian chu kỳ của lực kích thích, bản đồ Poincaré sẽ chỉ có một điểm chấm duy nhất;
- Theo các tài liệu tiếng Anh, một chuyển động được gọi là "period- n motion" là chuyển động lặp lại chính nó một cách chính xác sau mỗi n chu kỳ của lực kích thích. Bản đồ Poincaré sẽ có n điểm rời nhau. Chuyển động dạng này thường được gọi là thứ điều hòa $1/n$. Một chuyển động thứ điều hòa $1/3$ thì cứ sau ba chu kỳ của lực kích thích, chuyển động mới lại lặp lại chính xác như cũ. Khi này, bản đồ Poincaré có ba điểm rời nhau.
- Nếu chuyển động thuộc dạng chuyển động hỗn độn (chaos) thì bản đồ Poincaré sẽ có dày đặc các điểm, tạo thành một đám mây hỗn độn hoặc xếp chồng lên nhau tạo thành các hình rất đặc biệt, chẳng hạn hình cánh bướm với mô hình Lorentz [18].

2.2.6. Tập hút và quỹ đạo hút

Việc nghiên cứu các cơ hệ phức tạp được thực hiện dựa trên lý thuyết hỗn độn (chaos theory) [19]. Theo đó, đặc tính biến động của ứng xử động lực học thường được phản ánh qua bản đồ Poincaré mô tả trạng thái của hệ. Các điểm của bản đồ Poincaré ứng với một tập điều kiện nhất định của cơ hệ hình thành nên một tập hút (attracting set) gồm điểm hút và quỹ đạo hút (attractor). Một tập hợp các điều kiện ban đầu dẫn đến một tập hút nhất định được gọi là vùng hút, đôi khi gọi là thung lũng hút (basin of attraction). Có thể xếp ứng xử động lực học của các cơ hệ vào 3 loại quỹ đạo hút (attractor): điểm hút (mô tả trạng thái cân bằng-equilibrium), quỹ đạo hút giới hạn (mô tả dao động), và quỹ đạo hút lạ (mô tả hỗn độn). Kỹ thuật phân tích tập hút và

quỹ đạo hút rất phù hợp để đánh giá ứng xử của cơ hệ khi điều kiện đầu (Initial Condition) thay đổi ngẫu nhiên trong một phạm vi cần khảo sát.

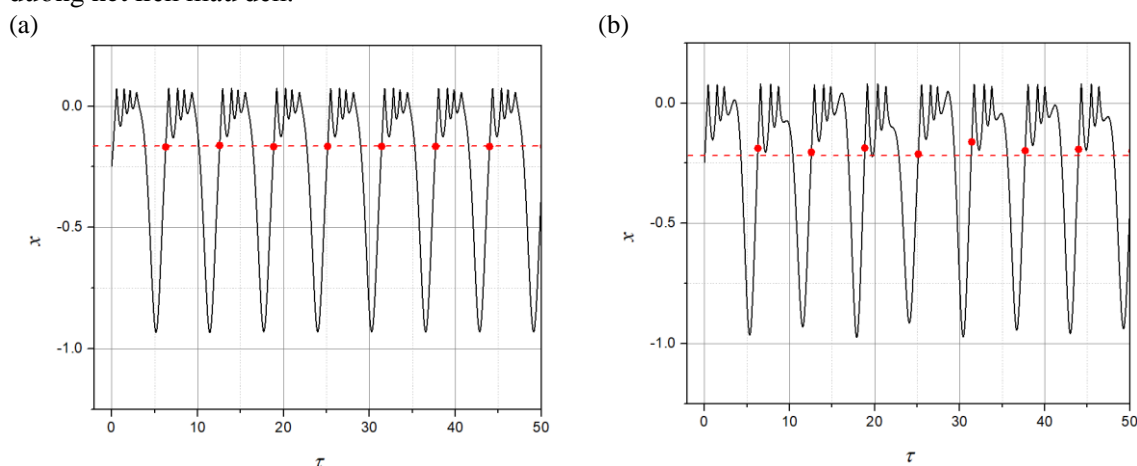
Các kỹ thuật phân tích trên đây sẽ được áp dụng cho cơ hệ tự di chuyển nhờ rung động và va đập, đã được mô tả trong phương trình (6).

3. Tính ổn định động lực học

Hai thông số đặc trưng của cơ hệ, bao gồm đại lượng chuyển vị tương đối không thứ nguyên giữa hai khối lượng, $x = x_1 - x_2$, và vận tốc chuyển động tương đối $v = v_1 - v_2$ được chọn đại diện cho ứng xử động lực học để đánh giá. Lần lượt các kỹ thuật phân tích đồ thị thời gian, FFT, Poincaré section, tập hút và quỹ đạo hút sẽ được áp dụng cho hệ phương trình (6) và so sánh đánh giá chi tiết. Các giá trị $\mu = 3.586$; $\zeta = 0.119$; $\beta = 3.11376816$; $\sigma = 657.74$; $\gamma = 0.95$; $\chi = 1.5$; $\omega = 1$; $f_r = 1.8$ được giữ nguyên trong các phân tích. Phương pháp đồ thị rẽ nhánh đã được phân tích khá kỹ trong nhiều công bố [5], [13], [15], [16] nên không trình bày thêm ở đây. Phần mềm Dynamics [20] được sử dụng để xác định lời giải số và phân tích động lực học cho cơ hệ.

3.1. Phân tích đồ thị thời gian

Hình 2 mô tả sự biến thiên của chuyển vị của cơ hệ theo hệ phương trình (6) với 2 bộ giá trị điều kiện ban đầu (IC = Initial Condition) khác nhau. Các giá trị chuyển vị được biểu diễn bằng đường nét liền màu đen.



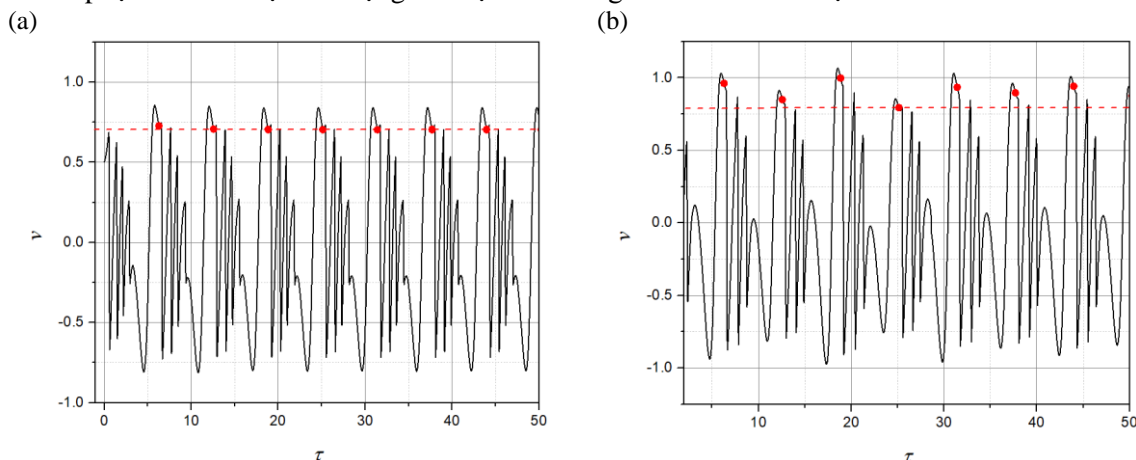
Hình 2. (Xem hình có màu trên phiên bản trực tuyến) Đồ thị chuyển vị theo thời gian (nét liền màu đen) và bản đồ Poincaré (chấm tròn màu đỏ) với điều kiện ban đầu thứ nhất (a) và điều kiện ban đầu thứ hai (b)

Trên hình 2a, điều kiện ban đầu thứ nhất IC1 được xác lập như sau: $x_0 = -0.25$; $v_0 = 0.5$. Đồ thị trên hình 2b có thông số điều kiện ban đầu thứ hai IC2 với $x_0 = 0.25$; $v_0 = 0.75$. Nhận thấy đồ thị trên hình 2a có tính ổn định tốt hơn đồ thị hình 2b. Cụ thể, giá trị cực tiểu của các chu kỳ dao động chính trên hình 2a có giá trị gần như nhau, trong khi các giá trị này thay đổi lên xuống trên hình 2b. Trong mỗi chu kỳ dao động chính ứng với IC1, có 4 chu kỳ va đập (4 đỉnh con trên hình 2a), trong khi giá trị này chỉ là 3 lần va đập (hình 2b). Qua đây có thể thấy, quan sát đồ thị thời gian cũng có thể cho phép nhận định sơ bộ đặc tính động học của cơ hệ. Tuy nhiên, có thể tìm thấy rất ít thông tin khác nhờ kỹ thuật phân tích này.

3.2. Lát cắt Poincaré

Sử dụng các lát cắt cách đều với chu kỳ bằng chu kỳ lực kích thích, các giá trị chuyển vị tương ứng tại các lát cắt này được minh họa bằng các chấm màu đỏ trên hình 2. Có thể thấy với điều kiện ban đầu IC1, các giá trị tung độ của các chấm đỏ là như nhau (hình 2a). Tung độ các điểm này biến động trên hình 2b ứng với điều kiện ban đầu IC2.

Tiếp tục khảo sát sự biến động của vận tốc tương đối v như minh họa trên hình 3.

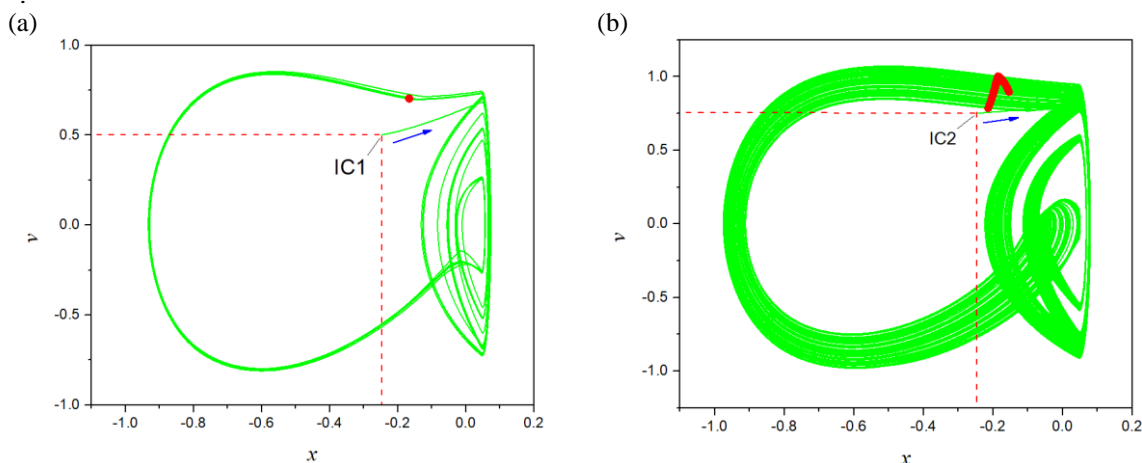


Hình 3. (Xem hình có màu trên phiên bản trực tuyến) Đồ thị vận tốc theo thời gian (nét liền màu đen) và bản đồ Poincaré (chấm tròn màu đỏ) với điều kiện ban đầu thứ nhất (a) và điều kiện ban đầu thứ hai (b)

Sự biến động của vận tốc tương đối v cũng có những đặc điểm tương tự như với chuyển vị. Lát cắt Poincaré của vận tốc với điều kiện IC1 cũng cho ra các giá trị ổn định hơn so với điều kiện IC2. Dễ nhận thấy, sử dụng riêng lát cắt Poincaré cũng chỉ cung cấp lượng thông tin không nhiều về ứng xử động lực học của cơ hệ.

3.3. Đồ thị pha và bản đồ Poincaré

Hình 4 lần lượt trình bày đồ thị pha (nét liền màu xanh) và bản đồ Poincaré (chấm tròn màu đỏ) của không gian trạng thái của cơ hệ ứng với điều kiện ban đầu IC1 (hình 4a) và điều kiện ban đầu IC2 (hình 4b). Trên mỗi đồ thị có 300 điểm lát cắt Poincaré được vẽ, ứng với 300 chu kỳ của lực kích thích.



Hình 4. (Xem hình có màu trên phiên bản trực tuyến) Đồ thị pha (nét liền màu xanh) và bản đồ Poincaré (chấm tròn màu đỏ) với điều kiện ban đầu thứ nhất (a) và điều kiện ban đầu thứ hai (b)

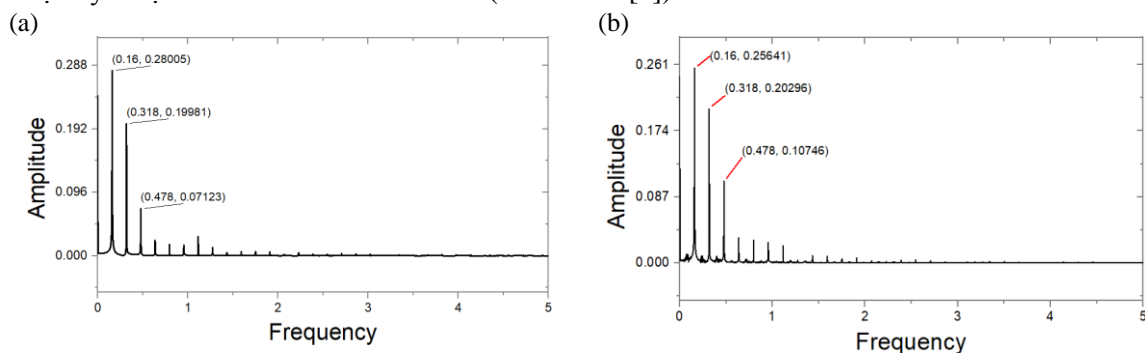
Trên hình 4, các điểm trạng thái $(x - v)$ của điều kiện đầu được ký hiệu IC1 và IC2. Xuất phát từ mỗi điểm khởi đầu này, đồ thị trạng thái của cơ hệ bắt đầu biến thiên theo chiều mũi tên như trên hình vẽ. Dễ thấy với điều kiện ban đầu thứ nhất (hình 4a), trạng thái của cơ hệ nhanh chóng trở nên ổn định, hình thành nên đồ thị pha dưới dạng đường mảnh – tức là các quỹ đạo trạng thái

chồng khít lên nhau. Trái lại, với điều kiện đầu IC2, các quỹ đạo trạng thái không trùng nhau, tạo thành dải màu khá rộng. Dải màu này càng rộng chứng tỏ trạng thái động lực học của cơ hệ càng biến đổi trong phạm vi rộng. Xét bản đồ Poincaré, tất cả các điểm lát cắt Poincaré với điều kiện IC1 đều trùng nhau, tạo thành một chấm tròn duy nhất (hình 4a). Trái lại, với điều kiện đầu IC2, bản đồ Poincaré là một dải dài (hình 4b), chứng tỏ cơ hệ làm việc ở trạng thái hỗn độn.

Nhận thấy, sử dụng đồ thị pha và bản đồ Poincaré cho ta nhiều thông tin rõ ràng hơn so với đồ thị thời gian hay lát cắt Poincaré đơn thuần.

3.4. Phân tích FFT

Đồ thị FFT cho chuyển động của cơ hệ được mô tả trên hình 5. Để thấy ứng với cả hai điều kiện đầu, dao động của cơ hệ đều là chuyển động phức hợp, được tạo thành từ các dao động với tần số khác nhau. Tuy nhiên, không nhận thấy sự sai khác của các tần số thành phần giữa hai điều kiện đầu IC1 (hình 5a) và IC2 (hình 5b). Nói cách khác, phân tích FFT không cung cấp được thông tin giúp phân biệt được ứng xử của cơ hệ với các điều kiện đầu khác nhau. Nói chung, FFT khuyến nghị chỉ dùng khi không biết tần số kích thích của ngoại lực, tức là khi không áp dụng được kỹ thuật lát cắt và bản đồ Poincaré (Xem thêm [8]).

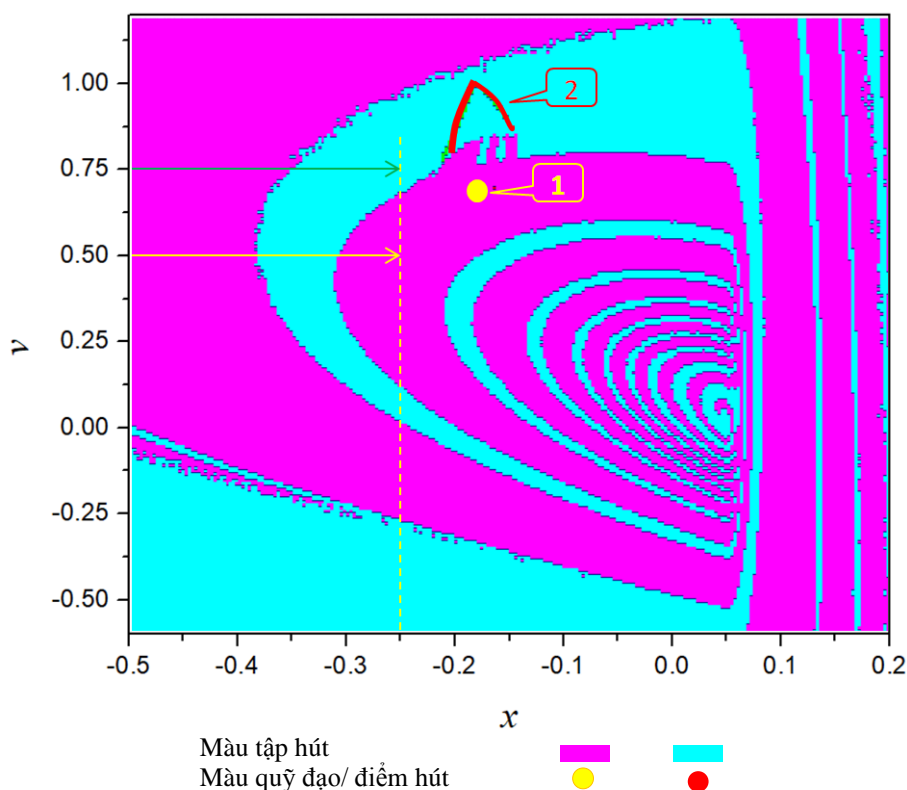


Hình 5. (Xem hình có màu trên phiên bản trực tuyến) Kết quả phân tích FFT chuyển vị x với điều kiện ban đầu thứ nhất (a) và điều kiện ban đầu thứ hai (b)

Để thấy, áp dụng các kỹ thuật phân tích đồ thị thời gian, đồ thị pha, lát cắt Poincaré hay phân tích FFT chỉ cho phép khảo sát trạng thái ứng xử của cơ hệ ứng với từng điều kiện ban đầu được gán trước. Với mỗi giá trị điều kiện đầu, cần giải hệ phương trình (6) và áp dụng một tập các phép phân tích trên đây một lần. Như vậy rất mất thời gian, đồng thời không thể quét hết cho các giá trị điều kiện ban đầu được. Kỹ thuật phân tích tập hút cho phép khắc phục vấn đề này.

3.5. Tập hút và quỹ đạo hút

Như đã trình bày trong phần 2, tập hút (basin of attraction) là tập hợp tất cả các điều kiện ban đầu trong không gian pha mà quỹ đạo của chúng dẫn đến tập hút đó [21]. Như vậy, sử dụng kỹ thuật phân tích tập hút cho phép khảo sát một phạm vi rộng các điều kiện đầu và ứng xử của cơ hệ với các điều kiện ban đầu đó. Trước hết, phạm vi khảo sát các điều kiện đầu x_0, v_0 được ấn định, giả sử nằm trong phạm vi $[x_{0min}, x_{0max}]$ và $[v_{0min}, v_{0max}]$. Tiếp đó, vùng không gian trạng thái (x, v) được giới hạn sẽ được chia thành các ô lưới, bao gồm m ô theo phương x và n ô theo phương v . Các vòng lặp được thực thi liên tục để quét hết các giá trị điều kiện đầu là tâm của mỗi ô lưới được chia. Trong mỗi vòng lặp, với giá trị đầu đã được gán, chương trình sẽ xác định và vẽ các điểm Poincaré với màu xác định. Tập các giá trị đầu cùng dẫn đến cùng một dạng phân bố của bản đồ Poincaré sẽ được gán cùng màu. Kết quả phân tích (bản đồ Poincaré) tương ứng sẽ được gán một màu xác định. Bản đồ màu sắc tập hút (tập hợp các điều kiện ban đầu) và quỹ đạo hút (các điểm Poincaré) được ghi chú cụ thể. Hình 6 mô tả kết quả phân tích tập hút và quỹ đạo hút cho cơ hệ (6).



Hình 6. Tập hút và quỹ đạo hút của cơ hệ

Trên hình 6, phạm vi khảo sát các giá trị điều kiện ban đầu được thiết lập gồm: vị trí $x_0 \in [-0.5; 0.2]$, vận tốc $v_0 \in [-0.6; 1.2]$. Số lượng các ô lưới được chia gồm 240 ô theo chiều trục x và 200 ô theo chiều trục v . Như có thể thấy trên hình 6, tập hợp các giá trị điều kiện đầu x_0, v_0 trong phạm vi khảo sát hình thành hai tập hút, dẫn đến hai tập quỹ đạo hút. Tập hút thứ nhất được mô tả bằng màu tím, quỹ đạo hút tương ứng có màu vàng. Tập hút thứ hai có màu xanh, quỹ đạo hút tương ứng có màu đỏ. Qua hình vẽ, có thể thấy thay đổi giá trị ban đầu sẽ dẫn đến trạng thái ứng xử của cơ hệ khác nhau. Chẳng hạn, điều kiện đầu $x_0 = 0.25$ và $v_0 = 0.5$ sẽ dẫn đến trạng thái ổn định chu kỳ đơn. Lưu ý là tập hai giá trị này chính là điều kiện ban đầu IC1 đã khảo sát trong các phần trên. Trạng thái ổn định chu kỳ đơn được phản ánh qua hình dạng bản đồ Poincaré là một chấm tròn màu vàng duy nhất (ký hiệu điểm 1) trên hình 6. Tất cả các giá trị ban đầu, dù có thay đổi ngẫu nhiên, nhưng nếu nằm trong miền cùng màu với điểm này (các vùng màu tím) sẽ đều dẫn đến trạng thái này. Các miền này chính là tập hút. Quỹ đạo hút tương ứng trở thành một điểm hút như trên hình. Các điểm trạng thái ban đầu bất kỳ ngẫu nhiên, nếu nằm trong những miền cùng màu (xanh) với điều kiện $x_0 = 0.25; v_0 = 0.75$ (chính là điều kiện IC2 đã khảo sát trong các phần trên) dẫn đến quỹ đạo hút là một dải gãy khúc (ký hiệu đường 2 trên hình 6).

Qua phân tích ở đây, có thể thấy việc áp dụng kỹ thuật phân tích tập hút cho phép khảo sát ứng xử động lực học của cơ hệ ứng với hàng loạt các giá trị đầu vào ngẫu nhiên nằm trong một vùng lớn. Nhờ vậy, có thể đánh giá ảnh hưởng của điều kiện ban đầu thay vì phải khảo sát từng trường hợp đơn lẻ nếu dùng các kỹ thuật phân tích đồ thị thời gian, lát cắt Poincaré hay đồ thị pha như phân tích trong các phần trên.

4. Kết luận

Bài báo trình bày các kết quả phân tích tính ổn định của thiết bị tự di chuyển nhờ rung động kết hợp với va đập khi thay đổi điều kiện ban đầu. Năm kỹ thuật phân tích, bao gồm đồ thị thời

gian, lát cắt Poincaré, phân tích FFT, đồ thị pha và bản đồ Poincaré, tập hút và quỹ đạo hút đã được áp dụng. Một số nhận định có thể rút ra như sau:

- Kỹ thuật phân tích đồ thị thời gian khá trực quan, nhưng không cung cấp được thông tin hữu ích cho việc đánh giá tính ổn định của cơ hệ, đặc biệt khi ứng xử động lực học là phức tạp;
- Kỹ thuật FFT có thể cung cấp các tần số dao động thành phần, cho phép đánh giá khái quát mức độ tuần hoàn của dao động, nhưng cũng không cung cấp được thông tin rõ ràng như lát cắt và bản đồ Poincaré kết hợp với đồ thị pha;
- Khi cần khảo sát ảnh hưởng của điều kiện ban đầu thay đổi ngẫu nhiên trong một phạm vi xác định, áp dụng kỹ thuật phân tích tập hút cho phép đánh giá nhanh và đầy đủ ứng xử động lực học của cơ hệ.

Kết quả nghiên cứu có thể được tham khảo, ứng dụng khi phân tích ứng xử động lực học của các cơ hệ khác nhau khi điều kiện đầu thay đổi ngẫu nhiên.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ, mã số B2019-TNA-04. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn nhà tài trợ, trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên đã tạo điều kiện triển khai nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] A. Shukla and H. Karki, "Application of robotics in onshore oil and gas industry- A review Part I," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 490-507, 2016.
- [2] A. Shukla and H. Karki, "Application of robotics in offshore oil and gas industry- A review Part II," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 508-524, 2016.
- [3] L. Liu, S. Towfighian, and A. Hila, "A Review of Locomotion Systems for Capsule Endoscopy," *IEEE Rev Biomed Eng*, vol. 8, pp. 138-151, 2015.
- [4] E. Pavlovskaja, M. Wiercigroch, and C. Grebogi, "Modeling of an impact system with a drift," *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 64, p. 056224, Nov 2001.
- [5] Y. Liu, M. Wiercigroch, E. Pavlovskaja, and H. Yu, "Modelling of a vibro-impact capsule system," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 66, pp. 2-11, 2013.
- [6] Y. Liu, E. Pavlovskaja, D. Hendry, and M. Wiercigroch, "Vibro-impact responses of capsule system with various friction models," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 72, pp. 39-54, 2013.
- [7] V.-D. Nguyen, K.-C. Woo, and E. Pavlovskaja, "Experimental study and mathematical modelling of a new of vibro-impact moling device," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 43, pp. 542-550, 2008.
- [8] V.-D. Nguyen, H.-C. Nguyen, N.-K. Ngo, and N.-T. La, "A New Design of Horizontal Electro-Vibro-Impact Devices," *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, vol. 12, p. 061002, 2017.
- [9] Y. Liu, E. Pavlovskaja, and M. Wiercigroch, "Experimental verification of the vibro-impact capsule model," *Nonlinear Dynamics*, vol. 83, pp. 1029-1041, 2015.
- [10] V.-D. Nguyen, H.-D. Ho, T.-H. Duong, N.-H. Chu, and Q.-H. Ngo, "Identification of the Effective Control Parameter to Enhance the Progression Rate of Vibro-Impact Devices With Drift," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 140, p. 011001, 2017.
- [11] V.-D. Nguyen, H.-C. Nguyen, and T.-H. Duong, *Modeling and dynamic analysis of self-propelled equipment by vibration*. Thai Nguyen University: Thai Nguyen University Publishing House, 2017.
- [12] Y. Liu and J. Páez Chávez, "Controlling multistability in a vibro-impact capsule system," *Nonlinear Dynamics*, vol. 88, pp. 1289-1304, 2017.
- [13] Y. Liu, J. Páez Chávez, B. Guo, and R. Birler, "Bifurcation analysis of a vibro-impact experimental rig with two-sided constraint," *Meccanica*, vol. 55, pp. 2505-2521, 2020.
- [14] B. Guo, Y. Liu, R. Birler, and S. Prasad, "Self-propelled capsule endoscopy for small-bowel examination: Proof-of-concept and model verification," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 174, p. 105506, 2020.
- [15] K.-T. Nguyen, N.-T. La, K.-T. Ho, Q.-H. Ngo, N.-H. Chu, and V.-D. Nguyen, "The effect of friction on the vibro-impact locomotion system: modeling and dynamic response," *Meccanica*, 2021.

-
- [16] V.-D. Nguyen and N.-T. La, "An improvement of vibration-driven locomotion module for capsule robots," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, pp. 1-15, 2020.
- [17] V.-D. Nguyen, T.-H. Duong, N.-H. Chu, and Q.-H. Ngo, "The effect of inertial mass and excitation frequency on a Duffing vibro-impact drifting system," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 124-125, pp. 9-21, 2017.
- [18] É. Ghys, "The Butterfly Effect," in *The Proceedings of the 12th International Congress on Mathematical Education*, Cham, 2015, pp. 19-39.
- [19] A. Steindl and H. Troger, "Chaotic Motion in Mechanical and Engineering Systems," in *Engineering Applications of Dynamics of Chaos*, W. Szemplinska-Stupnicka and H. Troger, Eds., ed Vienna: Springer Vienna, 1991, pp. 149-223.
- [20] H. E. Nusse, J. A. Yorke, B. C. Hunt, B. R. Hunt, and E. J. Kostelich, *Dynamics: Numerical Explorations*: Springer New York, 1998.
- [21] H. E. Nusse, J. A. Yorke, and E. J. Kostelich, "Chapter 7. Basins of Attraction," in *Dynamics: Numerical Explorations*. vol. 101, ed: Springer New York, 1998, pp. 269-314.