

# PHÂN TÍCH RUNG ĐỘNG TRONG QUÁ TRÌNH CẮT CỦA MÁY CÔNG CỤ

## VIBRATION ANALYSIS OF CUTTING PROCESS OF MACHINE TOOL

Trương Chí Công<sup>1,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.020>

### TÓM TẮT

Rung động của quá trình cắt rất phức tạp, vì nó bao gồm tiếng ồn ngẫu nhiên và dao động hỗn loạn luôn đi kèm với nhau. Bài báo nghiên cứu mối quan hệ giữa dao động hỗn loạn và tiếng ồn cắt trong quá trình cắt và cho ta thấy rằng rung trong quá trình cắt là kết quả toàn diện của dao động tự kích thích, rung cưỡng bức và dao động hỗn loạn. Bài báo này dùng công nghệ mô phỏng máy tính để nghiên cứu độ ồn cắt và dao động hỗn loạn của quá trình cắt. Kết quả thu được giải thích tốt hơn một số rung động của quá trình cắt mà không thể giải thích được trong nghiên cứu trước đây về rung động.

**Từ khóa:** Quá trình cắt; độ ồn; dao động ngẫu nhiên; dao động tự kích thích; mô phỏng.

### ABSTRACT

Vibration of cutting process is complicated, because it includes random chatter and quasi random chaotic vibration which are always accompanied with each other. The article studies the relationship between the chaotic vibration and chatter in the cutting process and shows that vibration during cutting is a comprehensive result of self-excited, forced and chaotic vibrations. This paper uses computer simulation technology to the chatter and chaotic vibration of the cutting process. The obtained results better explain some of the vibrations of the cutting process that could not be explained in the previous study of vibration.

**Keywords:** Cutting process; chatter; chaotic vibration; self-excited vibration; simulation.

<sup>1</sup>Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: [truongchicong@hau.edu.vn](mailto:truongchicong@hau.edu.vn)

Ngày nhận bài: 25/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

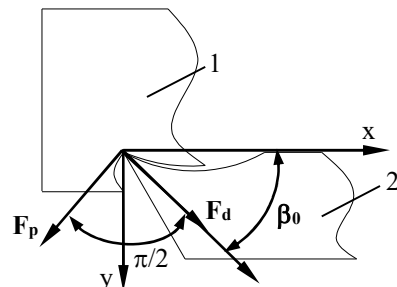
### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Để tìm hiểu đặc tính phi tuyến của lực cắt ta cần phải thiết lập mô hình phi tuyến để khảo sát rung động cắt. Liu và nhóm tác giả đã đề xuất các phương pháp và quy trình thử nghiệm có hệ thống để nghiên cứu độ rung của quá trình cắt [1], tiếng ồn khi cắt và rung động hỗn loạn là những nguyên nhân chính gây ra rung động không đều trong quá trình cắt [2], gây nguy hiểm cho thiết bị. Vì bản chất phi tuyến của quá trình cắt làm cho dao động tương đối giữa dụng cụ và phôi sinh ra các tiếng ồn cắt và dao động hỗn

loạn [3]. Nghiên cứu vấn đề này từ góc độ của đặc tính pha và thấy rằng có ổn định khi độ lệch pha của hai điểm cắt liên kế tương đối ổn định [4]. Do dao động tương đối giữa dụng cụ và chi tiết gia công rất phức tạp nên mô phỏng số là một phương pháp phổ biến để nghiên cứu đặc tính dao động phi tuyến của quá trình cắt [5]. Sử dụng phương pháp số và mô hình phi tuyến để nghiên cứu các đặc tính hỗn loạn của lực cắt và chuyển vị do rung gây ra bởi chiều rộng cắt khác nhau [6]. Liu và các cộng sự đã nghiên cứu hiện tượng cộng hưởng bên trong của quá trình cắt [7]. Li, Yu và Zhang đã nghiên cứu dao động cắt của kết cấu máy công cụ của hệ thống nhiều bậc tự do bằng phương pháp mô phỏng số [8]. Han và nhóm nghiên cứu đã phân tích cơ chế của quá trình gia công cắt gọt CNC dựa trên công nghệ mô phỏng máy tính [9]. Nói chung, nguyên nhân tiếng ồn cắt là rõ ràng, tuy nhiên, bản chất của tiếng ồn cắt tự kích thích cần phải được nghiên cứu thêm. Vì vậy, việc nghiên cứu cơ chế giảm chấn âm do quá trình cắt gây ra rất có ý nghĩa.

### 2. MÔ HÌNH DAO ĐỘNG TỰ KÍCH THÍCH CỦA QUÁ TRÌNH CẮT

Dao động tự kích thích là dao động tự do không suy yếu hoặc tăng dần theo thời gian, chỉ được kích thích bởi nhân tố bên trong sau khi mất cân bằng hệ thống, khi độ tắt dần của hệ thống nhỏ hơn hoặc bằng về không. Mặc dù giảm chấn cấu trúc là nhỏ, tuy nhiên giá trị của nó luôn dương. Khi đó sẽ xuất hiện hiện tượng giảm chấn âm trong quá trình cắt, lúc này sẽ xảy ra rung động tự kích thích.



Hình 1. Mô hình lực của quá trình cắt

1- Phôi; 2- Dụng cụ cắt

Một số giả thiết được đưa ra trước khi nghiên cứu: (1) tần số và biên độ của tiếng ồn xảy ra trong quá trình cắt là không

đổi; (2) lực cắt tức thời tỷ lệ thuận với diện tích cắt tức thời và tỷ lệ thuận với độ dày cắt tức thời trong điều kiện nhất định; (3) khi tiếng ồn cắt tồn tại, hướng của lực cắt kết quả là không đổi và giá trị của nó chỉ phụ thuộc vào sự dịch chuyển rung theo hướng độ sâu cắt và không liên quan gì đến sự dịch chuyển rung theo hướng cắt.

Khối lượng của dụng cụ và giá đỡ dụng cụ là  $m$ ; độ cứng theo hướng chiều sâu cắt và hướng cắt lần lượt là  $k_x$  và  $k_y$ ; giảm chấn của hướng chiều sâu cắt và hướng cắt tương ứng là  $c_x$  và  $c_y$ ;  $F_{cx}$  và  $F_{cy}$  tương ứng là các lực thành phần của lực cắt, bao gồm lực cắt tĩnh và lực cắt động và lực cắt theo phương  $x$  và phương  $y$ .

Mô hình cắt động lực học của máy công cụ có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = F_{cx} \\ m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = F_{cy} \end{cases} \quad (1)$$

Theo [10] độ biến thiên lực cắt ( $\Delta F$ ) tại thời điểm  $t$ , lực cắt động  $F_d(t)$  là:

$$\begin{aligned} F_d(t) &= K_d b [X(t - \tau) - X(t)] \\ &= 2K_d b \sin \frac{\alpha}{2} \left\{ x \cos \left[ 2\pi z t + \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó:  $K_d$  là hệ số lực cắt động,  $b$  là chiều rộng cắt và  $\tau$  là chu kỳ quay của phôi.

Phương trình (2) là mối quan hệ giữa chuyển vị rung và lực cắt động do chuyển vị rung gây ra. Góc pha trước của lực cắt động so với chuyển vị dao động là  $\pi/2 + \alpha/2$ , và  $\alpha$  là góc lệch pha của hai chuyển vị liên kế,  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ .

Các lực thành phần của lực cắt theo phương  $x$  và  $y$  là:

$$\begin{cases} F_{cx} = F_0 \cos \beta_0 + F_d \cos \beta_0 + F_p \cos \left( \beta_0 + \frac{\pi}{2} \right) \\ F_{cy} = F_0 \sin \beta_0 + F_d \sin \beta_0 + F_p \sin \left( \beta_0 + \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Lực cắt tĩnh là: } F_0 = K_0 b h \quad (4)$$

Trong đó:  $K_0$  là hệ số lực cắt tĩnh,  $b$  là chiều rộng cắt,  $h$  là chiều dày cắt trung bình,  $\beta_0$  là góc giữa lực cắt tĩnh và lực cắt động theo phương  $x$ ,  $F_d$  là lực cắt động.

$$\text{Khi đó lực cắt là: } F_p = \frac{\dot{X} F_0}{v} \quad (5)$$

Từ phương trình (2) và (3) ta rút ra được:

$$\begin{cases} F_{cx} = K_0 b h \begin{bmatrix} \cos \beta_0 - \frac{\dot{x}}{v} \sin \beta_0 \\ -2 \frac{K_d b x}{K_0 h b} \cos \beta_0 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( 2\pi z t + \frac{\alpha}{2} \right) \end{bmatrix} \\ F_{cy} = K_0 b h \begin{bmatrix} \sin \beta_0 - \frac{\dot{y}}{v} \cos \beta_0 \\ -2 \frac{K_d b x}{K_0 h b} \sin \beta_0 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( 2\pi z t + \frac{\alpha}{2} \right) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

Suy ra phương trình không thứ nguyên của (1) có dạng:

$$\ddot{X} + C\dot{X} + K_x X = f_x \begin{Bmatrix} \cos \beta_0 - \dot{X} \sin \beta_0 \\ -X \left[ 2k_q \cos \beta_0 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \Omega t + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\ddot{Y} + C\dot{Y} + K_y Y = f_y \begin{Bmatrix} \sin \beta_0 - \dot{Y} \cos \beta_0 \\ -X \left[ 2k_q \sin \beta_0 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \Omega t + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Trong đó:

$$X = \frac{x}{b}; Y = \frac{y}{b}; T = \frac{vt}{b}; C_x = \frac{c_x b}{mv}; C_y = \frac{c_y b}{mv}; K_x = \frac{k_x b^2}{mv^2}; K_y = \frac{k_y b^2}{mv^2};$$

$$f = \frac{K_0 b^2 h}{mv^2}; f_x = f_y = f; k = \frac{K_d}{K_0}; q = \frac{b}{h}; \Omega = \frac{2\pi z b}{v}$$

Đặt  $X_1 = X, X_2 = \dot{X}$  khi đó biểu thức (7) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_x & -(C_x + f_x \sin \beta_0) \end{bmatrix} \begin{cases} X_1 \\ X_2 \end{cases} + \begin{Bmatrix} 0 \\ f_x \cos \beta_0 - X \left[ 2k_q f_x \cos \beta_0 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \Omega T + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Dùng phương pháp số giải được ma trận  $\{X_1 \ X_2\}^T$  sau đó thay vào biểu thức (8) thu được ma trận  $\{Y_1 \ Y_2\}^T$ , trong đó  $Y_1 = Y, Y_2 = \dot{Y}$ , khi đó biểu thức (8) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_y & -C_y \end{bmatrix} \begin{cases} Y_1 \\ Y_2 \end{cases} + \begin{Bmatrix} 0 \\ f_y \left\{ \sin \beta_0 - X \left[ 2k_q \sin \beta_0 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \Omega T + \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \dot{X} \cos \beta_0 \right\} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

### 3. MÔ PHỎNG SỐ DAO ĐỘNG TỰ KÍCH THÍCH CỦA QUÁ TRÌNH CẮT VÀ THẢO LUẬN

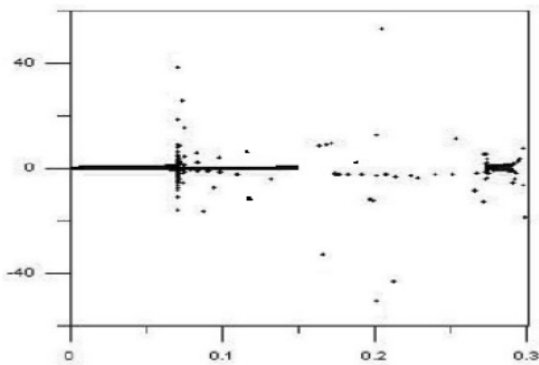
Dùng phương pháp số để phân tích thông qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab, nghiên cứu hiệu suất rung động tự kích thích của quá trình cắt kim loại. Dựa vào tính chất vật liệu của phôi và dụng cụ cắt và điều kiện gia công ta chọn bộ thông số mô phỏng như bảng 1.

Bảng 1. Một bộ thông số dùng để mô phỏng

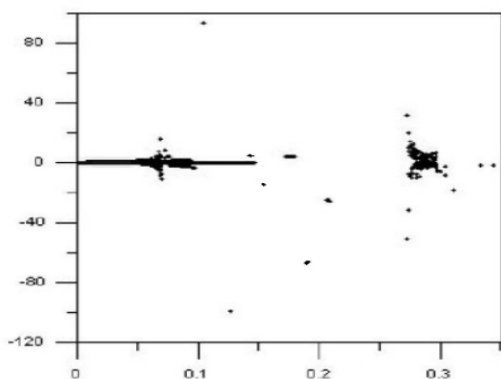
$k_x$	$k_y$	$c_x$	$c_y$	$f$	$k$	$q$	$\beta_0$	$\Omega$
0,5	0,25	0,01	0,01	0,05	2	3	0,75	1

Để phân tích ảnh hưởng của sự thay đổi của một số tham số đến hiệu suất động của hệ thống, ta mô phỏng ảnh hưởng do thay đổi của  $f, \alpha, \Omega$  và  $q$  đối với các độ dịch chuyển của hệ thống.

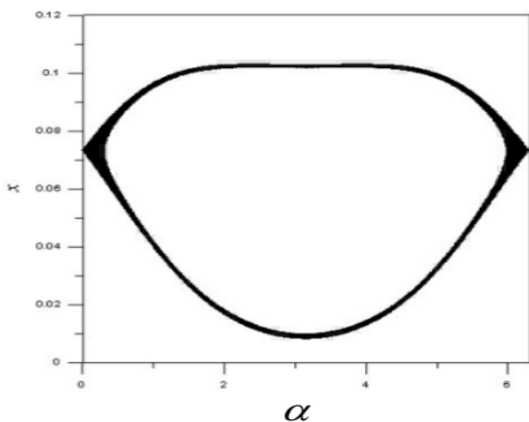
Độ dịch chuyển của hệ thống theo phương  $x$  và  $y$  thay đổi theo  $f$  tương ứng được thể hiện trong hình 2 và 3. Từ các hình có thể thấy rằng, độ ổn của quá trình cắt của máy công cụ dường như là các rung động ngẫu nhiên với sự tăng của  $f$ , nhưng thực chất nó là kết quả do tiếng ồn cắt và rung động hỗn loạn gây ra.



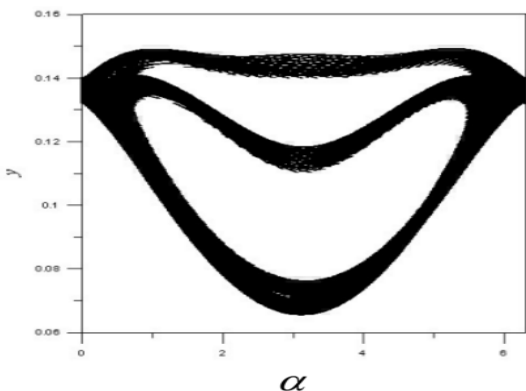
Hình 2. Độ dịch chuyển theo phương x



Hình 3. Độ dịch chuyển theo phương y

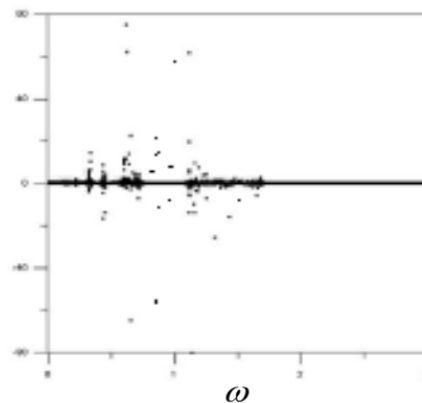


Hình 4. Đồ thị độ dịch chuyển x với góc lệch pha

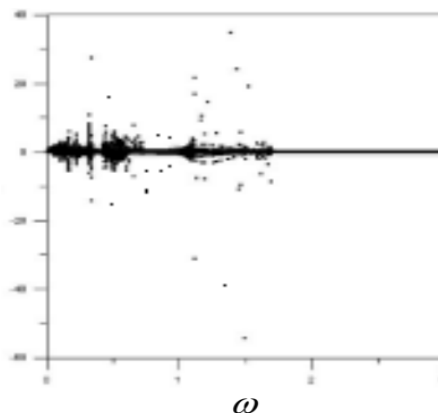


Hình 5. Đồ thị độ dịch chuyển y với góc lệch pha

Độ dịch chuyển của hệ thống theo phương x và y thay đổi theo  $\alpha$  lần lượt được thể hiện trong hình 4 và 5. Từ các hình có thể thấy rằng khi thay đổi  $\alpha$ , biên độ của các rung động phản hồi của quá trình cắt là tuần hoàn có chu kỳ là  $2\pi$  và thể hiện dưới dạng dao động gần giống hỗn loạn. Do độ lệch pha  $\alpha$  là một hàm của tần số rung động z có giá trị thay đổi và biên độ của nó là  $[0, 2\pi]$  nên biên độ rung động phản hồi của quá trình cắt sẽ thay đổi liên tục theo  $\alpha$  và ở trạng thái hỗn loạn. Kết quả phân tích lý thuyết và thực nghiệm cho thấy độ lệch pha của hai lần cắt kế nhau không theo quy luật khi không tồn tại ổn định và tính toán cho thấy ở điều kiện này rung động phản hồi của quá trình cắt ở trạng thái hỗn loạn.



Hình 6. Đồ thị độ dịch chuyển y với tần số góc

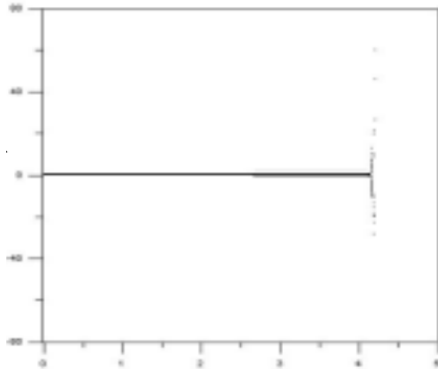


Hình 7. Đồ thị độ dịch chuyển x với tần số góc

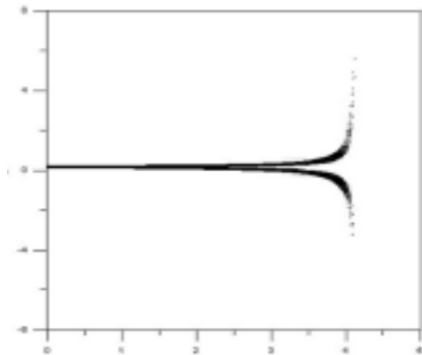
Độ dịch chuyển của hệ thống theo phương x và y thay đổi theo tần số  $\omega$  lần lượt được thể hiện trong hình 6 và 7. Ta thấy rằng các rung động phản hồi của quá trình cắt cho thấy dường như là ngẫu nhiên. Rung động bao gồm rung động hỗn loạn và độ ổn định khi  $\Omega$  không quá 1,68 và nó biểu thị là rung động điều hòa khi  $\Omega$  lớn hơn 1,68.

Độ dịch chuyển của hệ thống theo phương x và y thay đổi theo q tương ứng được thể hiện trong hình 8 và 9. Ta thấy rằng các rung động phản hồi của quá trình cắt là một rung động ổn định khi q không quá 4,16 và là rung động hỗn loạn khi q lớn hơn 4,16. Đối với dao động theo phương x, rung động của quá trình cắt ở trạng thái rung động điều hòa khi q không lớn hơn 4,16 và ở trạng thái rung động hỗn loạn khi q lớn hơn 4,16. Đối với dao động theo hướng y, rung

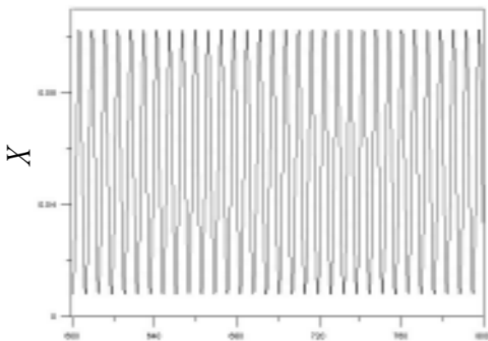
động của quá trình cắt ở trạng thái rung động điều hòa khi  $q$  không quá 2,45, ở trạng thái rung động nhân đôi chu kỳ ổn định khi  $q$  lớn hơn 2,45 và không quá 4,16, ở trạng thái rung động hỗn loạn khi  $q$  lớn hơn 4,16.



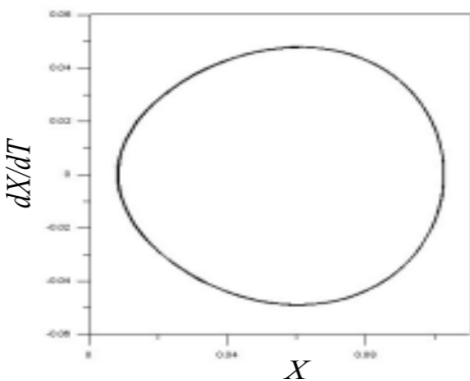
Hình 8. Đồ thị độ dịch chuyển  $y$  với tham số  $q$



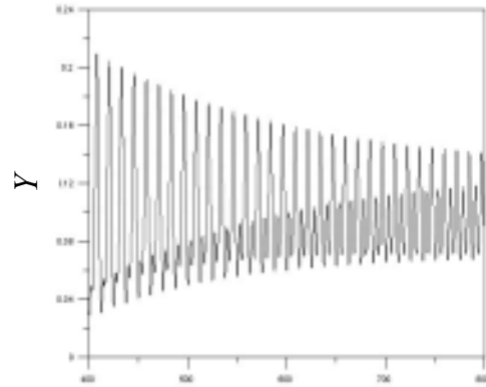
Hình 9. Đồ thị độ dịch chuyển  $y$  với tham số  $q$



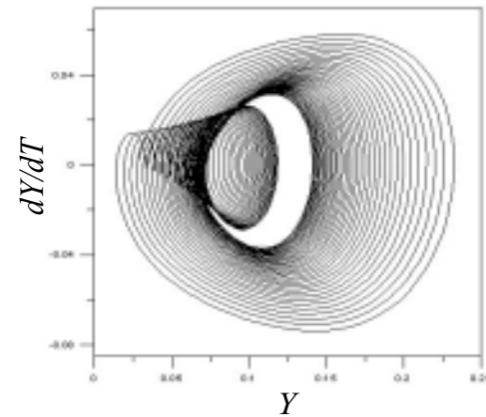
Hình 10. Đồ dịch chuyển theo phương  $x$



Hình 11. Pha vận tốc theo phương  $x$



Hình 12. Đồ dịch chuyển theo phương  $y$



Hình 13. Pha vận tốc theo phương  $y$

Khi  $k_x = 0,5$ ;  $c_x = 0,01$ ;  $k_y = 0,25$ ;  $c_y = 0,01$ ;  $f = 0,05$ ;  $k = 2,0$ ;  $q = 3,0$ ;  $\beta_0 = 0,75$ ;  $\Omega = 1,0$  và  $\alpha = 3,14$ , biểu đồ diễn biến thời gian và biểu đồ pha của hướng  $x$  tương ứng được thể hiện trong hình 10 và 11. Rõ ràng đây là rung động ổn định chu kỳ 2.

Khi  $k_x = 0,5$ ;  $c_x = 0,01$ ;  $k_y = 0,25$ ;  $c_y = 0,01$ ;  $f = 0,05$ ;  $k = 2,0$ ;  $q = 3,0$ ;  $\beta_0 = 0,75$ ;  $\Omega = 1,0$  và  $\alpha = 3,14$ , biểu đồ diễn biến thời gian và biểu đồ pha của hướng  $y$  tương ứng được thể hiện trong hình 12 và 13. Rõ ràng đó là một rung động hỗn loạn.

Từ kết quả trên có thể rút ra kết luận rằng rung động của quá trình cắt gọt máy công cụ rất phức tạp, chịu ảnh hưởng của rất nhiều yếu tố bên trong không chỉ bao gồm rung động ổn định tuần hoàn mà cả rung động gần giống ngẫu nhiên bao gồm độ ổn cắt và rung động hỗn loạn. Do đó, rung động của quá trình cắt là kết quả phức tạp của các rung động khác nhau.

#### 4. KẾT LUẬN

Rung động tự kích thích của quá trình cắt thường là kết quả tổng hợp của ba loại rung động: rung động tự kích thích, rung động cưỡng bức và rung động hỗn loạn. Kết quả mô phỏng số cho thấy không chỉ có tiếng ồn mà còn có rung động hỗn loạn tồn tại trong rung động phức tạp của quá trình gia công và chúng cùng tồn tại với nhau. Rung động tự kích thích của quá trình cắt là kết quả của sự kết hợp của tiếng ồn tự kích thích, có thể cả tiếng ồn cưỡng bức và rung động hỗn loạn. Lý do dao động của quá trình cắt phức tạp là do nó không chỉ bao gồm dao động ngẫu nhiên mà còn bao

gồm cả dao động hỗn loạn dường như ngẫu nhiên luôn đi kèm và cùng tồn tại với nhau. Các kết quả này giải thích một số hiện tượng rung động chưa giải thích được trong nghiên cứu độ rung của quá trình cắt.

---

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Liu C.S, Sun W, Li X.P., "Vibration testing method for CNC machines," *Chinese J Construct Machin* 7:330-335, 2009.
- [2]. Fang G, Zeng P., "Advances in numerical simulation technology for cutting process," *Adv Mechan* 31:394-404, 2001.
- [3]. Yan K.Y, Xie J, Chen Y., "Chaos and application of chaos theory in machine design and manufacture," *Machinery* 28:1-3, 2001.
- [4]. Fu L.Y, Yu J.Y, Bao M., "Study on the phase characteristics of cutting chatter," *J Vibrat Eng* 13:500-515, 2000.
- [5]. Tansel IN, Erkal C, Keramidis T., "The Chaotic Characteristics of Three Dimension Cutting," *Int J Mach Tools Manufact* 32:811-827, 1992.
- [6]. Lu H.W, Yang S.Z., "The research on chaotic characteristics of cutting process based on a nonlinear model," *J Vibrat Eng* 32:169-172, 1996.
- [7]. Liu X.J, Chen Y.S., "Nonlinear analysis of speed type cutting chatter of machine tools," *J Vibrat Shock* 18:5-9, 1999.
- [8]. Li H.Z, Yu X.H, Zhang G.H., "Computer simulation of cutting vibration in face milling," *J Vibrat Eng* 14:292-296, 2001.
- [9]. Han Z.H, Luo X.Y, Zhang C.Y., "Chatter suppression technology research in numerical control machine tool turning process," *J North China Univ Technol* 18:25-29, 2006.
- [10]. Xiaoliang Jin, "Mechanics and Dynamics of Micro-cutting Process". Doctor of philosophy, in the faculty of graduate studies, the university of british columbia (Vancouver), September 2012
- [11]. Tran Van Dich, *Nguyen ly cat kim loai*. Science and Technics Publishing House, Hanoi, 2006

---

#### AUTHOR INFORMATION

##### Truong Chi Cong

School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam