

# NGHIÊN CỨU DỰ ĐOÁN ĐIỀU KIỆN ỔN ĐỊNH TRONG QUÁ TRÌNH PHAY SỬ DỤNG DAO PHAY NGÓN PHẪNG LIÊN KHỐI

STUDY ON THE PREDICTION OF STABILITY CONDITIONS IN MILLING PROCESS USING A SOLID FLAT-END MILL CUTTER

Nguyễn Như Tùng<sup>1,\*</sup>,  
Hoàng Tiến Dũng<sup>2</sup>, Lê Văn Phong<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.022>

## TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện để dự đoán về trạng thái ổn định và xây dựng mô hình dự đoán miền ổn định trong quá trình phay thép SKD11 bằng dao phay ngón phẳng liên khối. Lực cắt động và điều kiện ổn định đã được mô hình hoá là các hàm số của các thông số khác nhau bao gồm: thông số dụng cụ cắt, thông số phôi, hệ số lực cắt đơn vị, thông số về cấu trúc động lực học của hệ thống công nghệ, thông số chế độ cắt,... Lực cắt tức thời đã được mô hình hoá và kiểm tra bằng nghiên cứu thực nghiệm với kết quả rất dự đoán rất gần với kết quả thực tế, mặc dù vẫn còn nhiều điểm khác biệt về giá trị tức thời của lực cắt. Mô hình dự đoán miền ổn định đã được xây dựng và kiểm tra thông qua các nghiên cứu thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, với hệ thống công nghệ được sử dụng, quá trình phay sẽ ổn định khi gia công ở chiều sâu cắt nhỏ hơn 0,25mm với tất cả các giá trị của tốc độ trục chính. Ngoài ra, các điểm ổn định và không ổn định trong biểu đồ ổn định được dự đoán đã được kiểm tra đảm bảo độ chính xác. Tuy nhiên, tại những điểm chuyển tiếp giữa vùng ổn định và vùng không ổn định, độ chính xác của mô hình thấp hơn. Nghiên cứu kiểm tra mô hình dự đoán miền ổn định với các cặp vật liệu dụng cụ cắt - phôi khác nhau sử dụng các hệ thống công nghệ khác nhau là các hướng tiếp theo của nghiên cứu này.

**Từ khóa:** Lực cắt; mô hình hoá; ổn định; quá trình phay; thép SKD11.

## ABSTRACT

The study was conducted to predict the stable cutting status and build a model to predict the stable diagram in the milling process of SKD11 steel using a solid flat-end mill cutter. The instantaneous dynamic cutting forces and stable cutting conditions were modeled as functions of different parameters including cutting tool parameters, workpiece parameters, cutting force coefficients, dynamics structural parameters of the technological system, cutting parameters, etc. The instantaneous dynamic cutting forces were modeled and verified by experimental process with predicted results to be very close to the measured results, although there are still many differences in the instantaneous values of the cutting forces. A prediction model of stability conditions was also built and verified through the experimental process. With the technology system that was used in this study, the milling process will be stable when machining at a depth of cut less than 0.25mm with all values of spindle speed. Additionally, the stable and unstable points in the predicted stability diagram were verified with ensuring the accuracy. However, at the transition points between stable and unstable zones, it seems that the accuracy of model is lower. The studies to verify and improve the model to predict the stable condition with different cutter - workpiece material pairs using different technology systems are the next direction of this study.

**Keywords:** Cutting forces; modeling; stability; milling process; SKD11 steel.

<sup>1</sup>Trường Quốc tế, Đại học Quốc gia Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>3</sup>Trường Đại học Phenikaa

\*Email: tungnn@vnuis.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

## 1. GIỚI THIỆU

Độ chính xác và chất lượng bề mặt gia công phụ thuộc vào rất nhiều thông số như thông số hình học và vật liệu của dụng cụ cắt, thông số chế độ cắt, rung động, thông số về ma sát, thông số về nhiệt, thông số về cấu trúc động lực học của hệ thống công nghệ [1-3].

Một trong những thông số luôn luôn tồn tại và có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng bề mặt, đến lực cắt và chi phí năng lượng trong quá trình cắt đó là rung động [1-4]. Rung động có thể dẫn tới hiện tượng mất ổn định, hiện tượng va đập trong quá trình gia công, từ đó có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng và hiệu quả của quá trình gia công như làm giảm chất lượng bề mặt, tăng mòn dao, gây ra nứt vỡ đối với các ổ bi của trục chính,... [4-6].

Hiện tượng va đập hoặc mất ổn định nếu xuất hiện trong quá trình gia công sẽ làm tăng lực cắt, tăng rung động, tăng công suất cắt, giảm tuổi thọ của dụng cụ cắt và ảnh hưởng tiêu cực đến cấu trúc của hệ thống công nghệ [7, 8]. Chính vì vậy, nghiên cứu để phát hiện và tránh các hiện tượng mất ổn định và va đập trong quá trình gia công được rất nhiều nhà khoa học và doanh nghiệp quan tâm [8, 9].

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để dự đoán hiện tượng mất ổn định từ đó lựa chọn được thông số chế độ cắt phù hợp để khắc phục những nhược điểm đã nêu trên, đặc biệt, nhiều nghiên cứu đã thực hiện để khảo sát trong quá trình gia công phay và đối với quá trình sản xuất hàng loạt [4-9].

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng và kiểm tra mô hình lực cắt tức thời, từ đó, xây dựng mô hình dự đoán miền ổn định và kiểm tra mô hình được xây dựng bằng các kết quả nghiên cứu thực nghiệm khi phay thép SKD11 bằng dao phay ngón phẳng liền khối.

**2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

**2.1. Cơ sở lý thuyết về mô hình lực cắt và mô hình dự đoán điều kiện ổn định khi phay**

Trong quá trình phay, chiều dày phoi tức thời không biến dạng  $h_j(\phi_j(z))$  bao gồm: Chiều dày phoi tĩnh:  $h_s(\phi_j(z))$ , chiều dày phoi được tạo từ dao cắt (độ đảo mặt của dao):  $h_{run-out}(\phi_j(z))$  và chiều dày phoi động được tạo nên từ rung động của hệ máy - dụng cụ cắt và hệ Máy-Phôi:  $h_d(\phi_j(z))$ . Vì vậy, độ dày phoi động được tính bằng phương trình (1), [1].

$$h_j(\phi_j(z)) = h_s(\phi_j(z)) + h_{run-out}(\phi_j(z)) + h_d(\phi_j(z)) \tag{1}$$

Độ dày phoi tĩnh được tính bằng phương trình (2), [2, 10].

$$h_s(\phi_j(z)) = f_t \sin(\phi_j(z)) \tag{2}$$

Sử dụng dao mới, do đó, giả sử chiều dày phoi được tạo từ dao cắt (độ đảo mặt của dao) bằng không.

$$h_{run-out}(\phi_j(z)) = 0 \tag{3}$$

Độ dày phoi động được tính bằng phương trình (4).

$$h_d(\phi_j(z)) = (w_t^c(\phi_j) - w_t^w(\phi_j)) - (w_{t-\tau}^c(\phi_j) - w_{t-\tau}^w(\phi_j)) \tag{4}$$

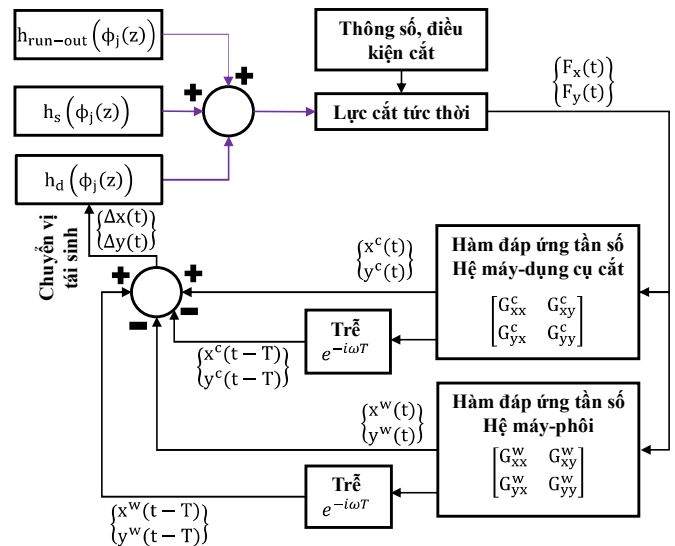
Trong đó:  $w_t^c(\phi_j)$  và  $w_{t-\tau}^c(\phi_j)$  là rung động do Máy - Dụng cụ cắt gây ra ở góc quay  $\phi_j(z)$  của lần chạy dao hiện tại và trước đó.

$w_t^w(\phi_j)$  và  $w_{t-\tau}^w(\phi_j)$  là dịch chuyển động vì Máy - Phôi rung động tương ứng với góc quay  $\phi_j(z)$  của lần cắt hiện tại và trước đó.

Lực cắt động tức thời được tính theo phương trình:

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi_j, z) = K_{te} * dz + K_{tc} * h_j(\phi_j(z)) * dz \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) = K_{re} * dz + K_{rc} * h_j(\phi_j(z)) * dz \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) = K_{ae} * dz + K_{ac} * h_j(\phi_j(z)) * dz \end{cases} \tag{5}$$

Trong đó:  $K_{tc}$  = hệ số lực cắt tiếp tuyến (N/mm<sup>2</sup>),  $K_{rc}$  = hệ số lực cắt xuyên tâm (N/mm<sup>2</sup>),  $K_{ac}$  = hệ số lực cắt dọc trục (N/mm<sup>2</sup>),  $K_{te}$  = hệ số lực cạnh tiếp tuyến (N/mm),  $K_{re}$  = hệ số lực hướng tâm (N/mm),  $K_{ae}$  = hệ số lực dọc trục (N/mm). Từ những phân tích trên, lực cắt động được tính toán theo sơ đồ ở hình 1.



Hình 1. Sơ đồ tính toán lực cắt tức thời

Để đảm bảo điều kiện cắt ổn định, chiều sâu cắt dọc trục giới hạn được tính theo công thức (6), [1, 7-9].

$$\begin{aligned} a_{lim} &= -\frac{2\pi}{N_t K_t} \Lambda_R \left( 1 + \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \cdot \frac{\sin \omega_c T}{1 - \cos \omega_c T} \right) \\ &= -\frac{2\pi}{N_t K_t} \Lambda_R (1 + \mathcal{K}^2) \end{aligned} \tag{6}$$

Trong đó,  $\Lambda_R$  và  $\Lambda_I$  là phần thực và phần ảo của hàm đáp ứng tần số của hệ động lực học máy - dụng cụ cắt - phôi (ở đây đã bao gồm các thành phần trung gian liên kết với nhau).

Tần số đáp ứng phụ thuộc vào tốc độ trục chính được xác định bằng độ lệch pha về độ nhấp nhô bề mặt giữa hai răng cắt liên tục (giống như độ lệch góc trung bình giữa các răng cắt). Khi đó, độ lệch pha (rad), từ vị trí góc hình thành sóng (độ nhấp nhô) bề mặt đến vị trí góc mà cạch cắt tiếp theo cắt vào sóng bề mặt của vùng này là  $\epsilon$  được xác định theo phương trình sau:

$$\epsilon = \pi - 2\psi \text{ (rad)} \tag{7}$$

Trong đó:

$$\psi = \tan^{-1}(\mathcal{K}) \text{ (rad)} \tag{8}$$

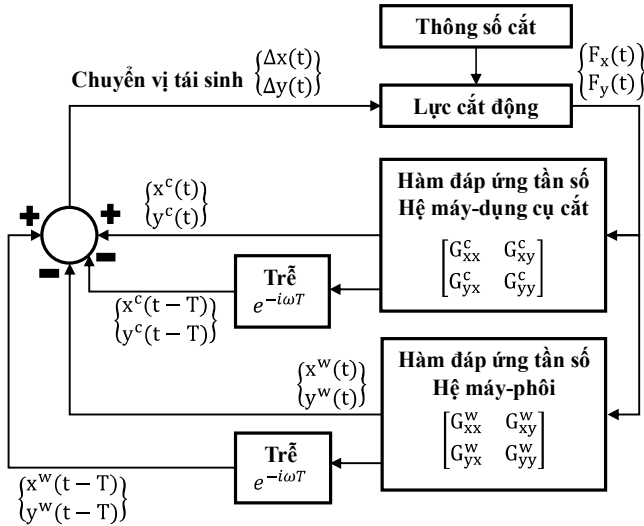
Khi đó, chu kỳ của răng cắt được xác định theo phương trình sau:

$$\mathcal{T} = T = \frac{1}{\omega_c} (\epsilon + j \cdot 2\pi) \text{ (giây)} \tag{9}$$

Với  $j = 0, 1, 2, \dots$  theo thứ tự của các sóng bề mặt được tạo thành giữa các răng cắt. Khi đó, tốc độ trục chính (n) được xác định theo phương trình sau đây:

$$n = \frac{1}{T} \left( \frac{\text{lần}}{\text{giây}} \right) = \frac{1}{T} \frac{1}{60} \left( \frac{\text{vòng}}{\text{phút}} \right) = \frac{60}{N_t T} \left( \frac{\text{vòng}}{\text{phút}} \right) \quad (10)$$

Hiệu ứng rung động tái sinh - va đập (chatter) trong quá trình phay sử dụng dao phay ngón phẳng được mô tả theo sơ đồ ở hình 2.



Hình 2. Sơ đồ tính toán dự đoán miền ổn định

Trong đó, chuyển vị động tái sinh của hệ máy - dụng cụ cắt và hệ máy - phôi có thể biểu diễn ở miền tần số là tích của hàm đáp ứng tần số và lực cắt động như mô tả ở phương trình dưới đây:

$$\begin{Bmatrix} \Delta x^c(i\omega) \\ \Delta y^c(i\omega) \end{Bmatrix} = (1 - e^{-i\omega T}) \begin{bmatrix} G_{xx}^c & G_{xy}^c \\ G_{yx}^c & G_{yy}^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x(i\omega) \\ F_y(i\omega) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Và:

$$\begin{Bmatrix} \Delta x^w(i\omega) \\ \Delta y^w(i\omega) \end{Bmatrix} = (1 - e^{-i\omega T}) \begin{bmatrix} G_{xx}^w & G_{xy}^w \\ G_{yx}^w & G_{yy}^w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x(i\omega) \\ F_y(i\omega) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Hệ rung động có thể coi là hệ rung động lò xo - giảm chấn, vì vậy hàm đáp ứng tần số trên các phương X và Y có thể viết dưới dạng sau đây:

$$\begin{cases} G_{xx}^c(s) = \frac{x^c(s)}{F_x(s)} = \frac{\omega_{ncx}^2}{k_{cx}(s^2 + 2\zeta_{cx}\omega_{ncx}s + \omega_{ncx}^2)} \\ G_{yy}^c(s) = \frac{y^c(s)}{F_y(s)} = \frac{\omega_{ncy}^2}{k_{cy}(s^2 + 2\zeta_{cy}\omega_{ncy}s + \omega_{ncy}^2)} \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó: s là toán tử Laplace,  $\omega_{nc}$  và  $\zeta_c$  lần lượt là tần số tự nhiên và hệ số giảm chấn cấu trúc của hệ máy - dụng cụ cắt. Khi đó, các thông số cấu trúc của hệ có thể được tính như sau:

$$\begin{cases} \omega_{ncx} = \sqrt{\frac{k_{cx}}{m_{cx}}} \\ \zeta_{cx} = \frac{c_{cx}}{2\sqrt{k_{cx}m_{cx}}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \omega_{ncy} = \sqrt{\frac{k_{cy}}{m_{cy}}} \\ \zeta_{cy} = \frac{c_{cy}}{2\sqrt{k_{cy}m_{cy}}} \end{cases} \quad (15)$$

Tương tự đối với hàm đáp ứng tần số của hệ máy-phôi, ta cũng có được các hàm đáp ứng tần số như sau:

$$\begin{cases} G_{xx}^w(s) = \frac{x^w(s)}{F_x(s)} = \frac{\omega_{nwx}^2}{k_{wx}(s^2 + 2\zeta_{wx}\omega_{nwx}s + \omega_{nwx}^2)} \\ G_{yy}^w(s) = \frac{y^w(s)}{F_y(s)} = \frac{\omega_{nwy}^2}{k_{wy}(s^2 + 2\zeta_{wy}\omega_{nwy}s + \omega_{nwy}^2)} \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó:  $\omega_{nw}$  và  $\zeta_w$  lần lượt là tần số tự nhiên và hệ số giảm chấn cấu trúc của hệ máy - phôi. Khi đó, các thông số cấu trúc của hệ có thể được tính như sau:

$$\begin{cases} \omega_{nwx} = \sqrt{\frac{k_{wx}}{m_{wx}}} \\ \zeta_{wx} = \frac{c_{wx}}{2\sqrt{k_{wx}m_{wx}}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \omega_{nwy} = \sqrt{\frac{k_{wy}}{m_{wy}}} \\ \zeta_{wy} = \frac{c_{wy}}{2\sqrt{k_{wy}m_{wy}}} \end{cases} \quad (18)$$

Quá trình phay là quá trình động lực học với nhiều bậc tự do, do đó các hàm đáp ứng tần số có thể được viết lại dưới dạng tổng quát như sau:

- Đối với hệ máy - dụng cụ cắt:

$$\begin{cases} G_{xx}^c(s) = \sum_{j=1}^{l_{cx}} \frac{\alpha_{cxj}s + \beta_{cxj}}{s^2 + 2\zeta_{cxj}\omega_{ncxj}s + \omega_{ncxj}^2} \\ G_{yy}^c(s) = \sum_{j=1}^{l_{cy}} \frac{\alpha_{cyj}s + \beta_{cyj}}{s^2 + 2\zeta_{cyj}\omega_{ncyj}s + \omega_{ncyj}^2} \end{cases} \quad (19)$$

- Đối với hệ máy - phôi:

$$\begin{cases} G_{xx}^w(s) = \sum_{j=1}^{l_{wx}} \frac{\alpha_{wxj}s + \beta_{wxj}}{s^2 + 2\zeta_{wxj}\omega_{nwxj}s + \omega_{nwxj}^2} \\ G_{yy}^w(s) = \sum_{j=1}^{l_{wy}} \frac{\alpha_{wyj}s + \beta_{wyj}}{s^2 + 2\zeta_{wyj}\omega_{nwyj}s + \omega_{nwyj}^2} \end{cases} \quad (20)$$

Trong đó:

- l là số mode

-  $\alpha_j$  và  $\beta_j$  là thông số cấu trúc của mode thứ j.

Từ những phân tích trên, quá trình tính toán dự đoán miền ổn định (mối quan hệ giữa tốc độ trục chính và chiều sâu cắt được thực hiện theo sơ đồ gồm các bước dưới đây:

**Bước 1:** Lựa chọn tần số tính toán  $\omega_c$

**Bước 2:** Xác định phần thực ( $\Lambda_R$ ), phần ảo ( $\Lambda_I$ ) và góc giữa phần thực và phần ảo ( $\psi$ ) của hàm đáp ứng tần số.

$$\psi = \tan^{-1}(\mathcal{I}) \text{ (rad)} \quad (21)$$

**Bước 3:** Tính toán góc lệch pha ( $\varepsilon$ ).

$$\varepsilon = \pi - 2\psi \text{ (rad)} \quad (22)$$

**Bước 4:** Xác định chu kỳ cắt của răng cắt:

$$T = T = \frac{1}{\omega_c} (\varepsilon + j \cdot 2\pi) \text{ (giây)} \quad (23)$$

Với  $j = 0, 1, 2, \dots$  theo thứ tự của các sóng bề mặt được tạo thành giữa các răng cắt.

**Bước 5:** Xác định tốc độ trục chính theo phương trình:

$$n = \frac{1}{T} \left( \frac{\text{lần}}{\text{giây}} \right) = \frac{60}{N_t T} \left( \frac{\text{vòng}}{\text{phút}} \right) \quad (24)$$

**Bước 6:** Tính toán chiều sâu cắt dọc trục giới hạn theo phương trình:

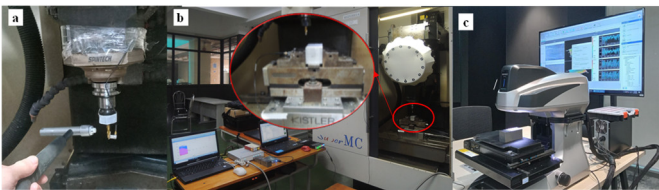
$$a_{lim} = -\frac{2\pi}{N_t K_t} \Lambda_R \left( 1 + \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \cdot \frac{\sin \omega_c T}{1 - \cos \omega_c T} \right) = -\frac{2\pi}{N_t K_t} \Lambda_R (1 + \mathcal{K}^2), \text{ với } \mathcal{K} = \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \quad (25)$$

**Bước 7:** Sắp xếp và vẽ đồ thị theo từng cặp ( $a_{lim-n}$ ), theo thứ tự tăng dần của j.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Máy phay CNC 3 trục (CNC HS Super MC500) đã được sử dụng để thực hiện quá trình nghiên cứu thực nghiệm. Dao phay ngón phẳng có vật liệu chế tạo là HSSCo8 được phủ lớp phủ là NiT, dao có đường kính 6mm và với 2 cạnh cắt đã được sử dụng để tiến hành quá trình cắt rãnh thép SKD11. Đây là loại thép cứng được sử dụng phổ biến, loại thép này có thành phần hoá học là: 1,5% C; 0,25% Si; 0,45% Mn; 0,025% P; 0,1% S; 12,0% Cr; 1,0% Mo; 0,35% V. Phôi có kích thước 80 x 40 x 40mm. Máy gia công, dao và phôi được thiết lập trong thực nghiệm được mô tả trên hình 3.

Các thông số cấu trúc của hệ động lực học và rung động trong quá trình gia công được đo bằng hệ thống đo của Bruel&Kjaer gồm có bộ xử lý dữ liệu LAN-XI với 4 kênh vào và 2 kênh ra (51,2kHz) sử dụng phần mềm phân tích PULSE FFT 770. Một cảm biến gia tốc một phương (DeltaTron# Accelerometer 4513-B-002) và búa tác động (Types 8206) được sử dụng để đo lực tác động, đo rung động phản hồi, từ đó xác định hàm đáp ứng tần số và xác định được các thông số cấu trúc của hệ thống động lực học.



Hình 3. Thiết lập hệ thống thực nghiệm

Một cảm biến đo gia tốc ba phương (Type 4525-B-001) được sử dụng để đo rung động trong quá trình gia công. Ngoài ra, một hệ thống đo lực cắt (Kistler Type 9139AA) với bộ xử lý dữ liệu (3160-B-042) và phần mềm DynoWare software cũng đã được sử dụng để đo lực cắt trong quá trình gia công. Để đánh giá chất lượng bề mặt gia công trong các quá trình chạy ổn định và không ổn định, chất lượng bề mặt gia công được đo bằng hệ thống kính hiển vi kỹ thuật số 3D Optical Profilometer VR-6000 series của hãng Keyence (Nhật Bản). Thiết lập quá trình đo trong nghiên cứu thực nghiệm được trình bày trong hình 3.

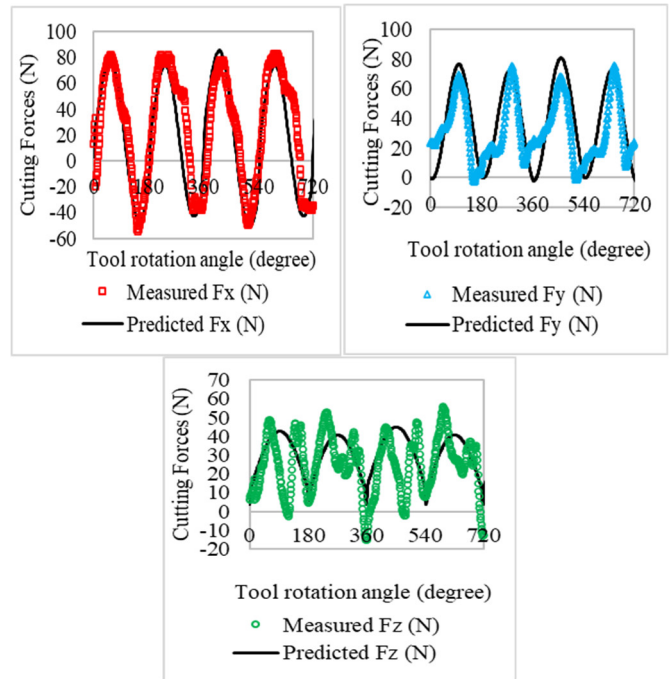
Trong quá trình thực nghiệm, các thông số chế độ cắt được lựa chọn dựa trên miền ổn định và không ổn định được dự đoán. Các kết quả thực nghiệm sẽ được phân tích, đánh giá để kiểm tra tính chính xác và khả năng sử dụng của mô hình dự đoán.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Kết quả dự đoán và kiểm tra mô hình lực cắt tức thời

Kết quả so sánh lực cắt dự đoán và lực cắt đo được khi phay thép cứng sử dụng dao phay ngón phẳng liền khối

được mô tả trong hình 4. Theo vị trí góc quay của dụng cụ cắt, dạng đường của lực cắt dự đoán và rất tương đồng với dạng đường của lực cắt thực nghiệm trên cả ba hướng khác nhau.

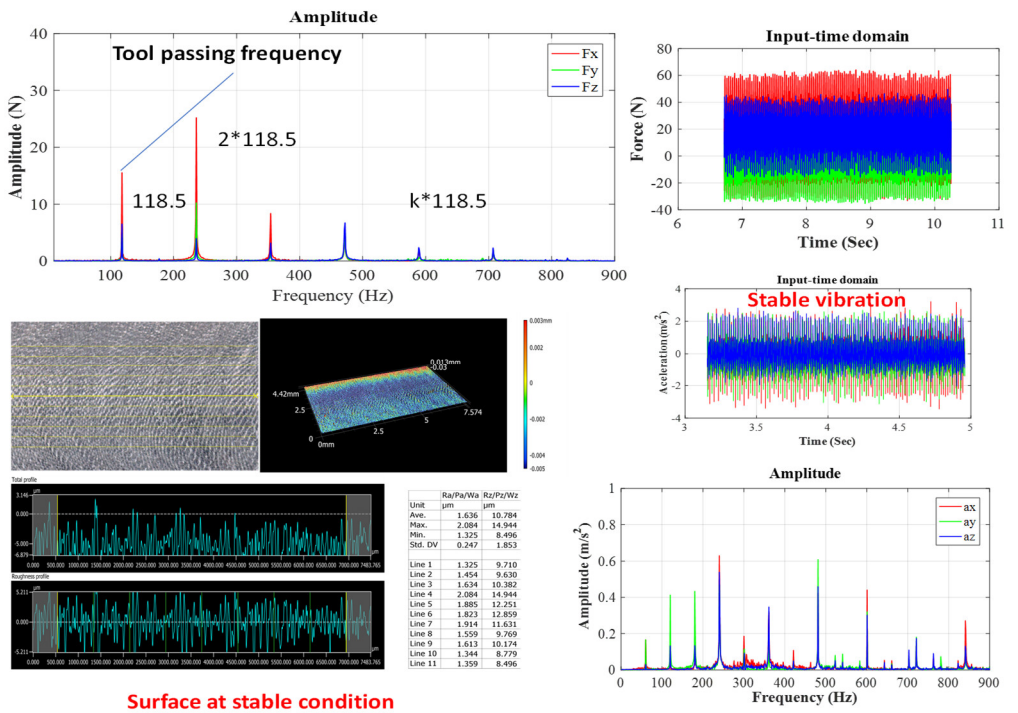


Hình 4. Dự đoán và thử nghiệm MFs

Về giá trị, trên cả ba hướng khác nhau, giá trị của lực cắt dự đoán cũng tương đối sát với giá trị của lực cắt thực nghiệm. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại nhiều điểm khác biệt giữa các giá trị tức thời của lực cắt dự đoán và lực cắt đo được từ thực nghiệm. Có nhiều nguyên nhân dẫn tới nhưng sự khác biệt này như: Một số thông số chưa được đưa vào mô hình tính toán lực cắt tức thời như: Góc của cạnh cắt, độ đảo mặt đầu của dao, sự chuyển vị của dao cắt khi gia công, nhiệt độ trong quá trình cắt,... các thông số này cần tiếp tục được nghiên cứu để đưa vào mô hình dự đoán nhằm nâng cao độ chính xác của mô hình.

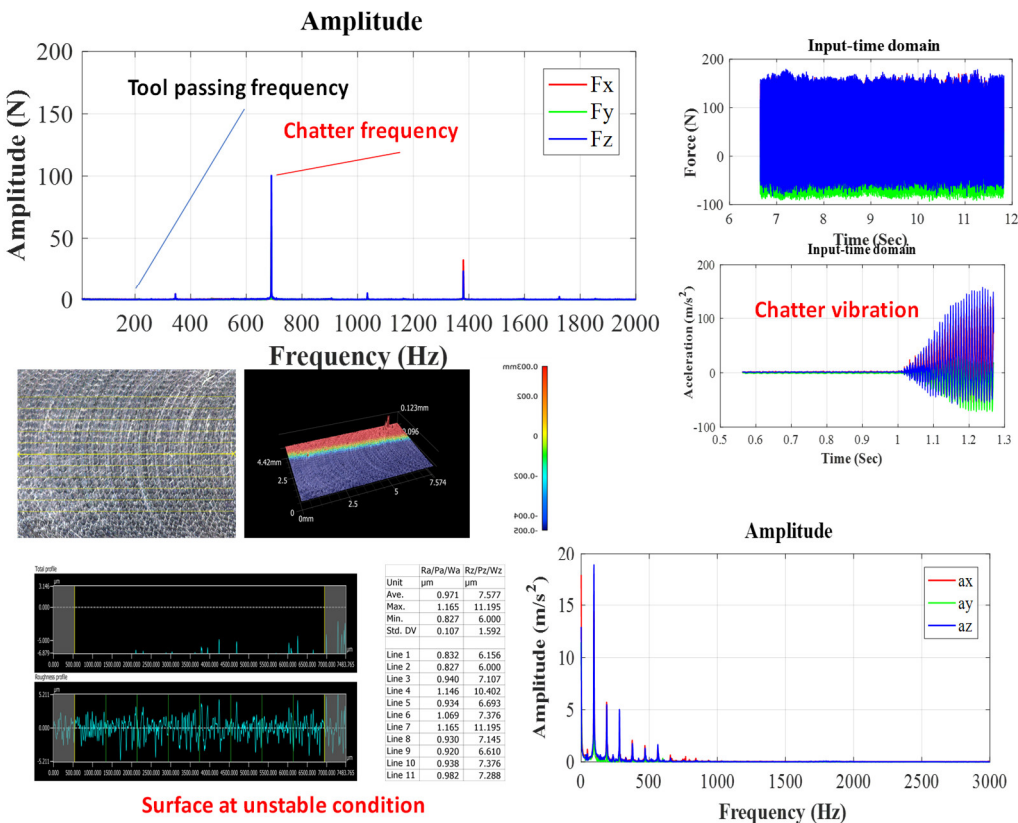
### 3.2. Kết quả dự đoán và kiểm tra điều kiện ổn định khi phay

Mô hình dự đoán miền ổn định được kiểm tra thông qua việc thực hiện các thực nghiệm kiểm tra. Các điểm kiểm tra bao gồm các điểm trong vùng ổn định, các điểm thuộc vùng chuyển tiếp giữa điều kiện ổn định và điều kiện mất ổn định và các điểm thuộc vùng mất ổn định. Tốc độ trục chính được chọn ở ba mức giá trị là 2000 vòng/phút, 4000 vòng/phút và 6000 vòng/phút với chiều sâu cắt được chọn tăng dần từ vùng ổn định đến vùng chuyển tiếp và sang vùng mất ổn định. Dựa trên kết quả phân tích lực cắt, rung động trên miền tần số bằng phương pháp biến đổi fourier nhanh FFT và dựa trên kết quả kiểm tra, đánh giá về chất lượng bề mặt của quá trình gia công. Quá trình cắt được đánh giá là ổn định thể hiện rõ nét trên đồ thị phân tích lực cắt trên miền tần số (hình 5). Trong đó, tần số lực cắt gần như bằng số nguyên lần của tần số chuyển động quay của răng cắt  $\omega_f = N \cdot \omega_T$  (với N là số nguyên). Trong trường hợp này, cả lực cắt, rung động và độ nhấp nhô bề mặt gia công đều rất ổn định.



Surface at stable condition

Hình 5. Kiểm tra một số đặc trưng của quá trình cắt ở điều kiện cắt ổn định



Surface at unstable condition

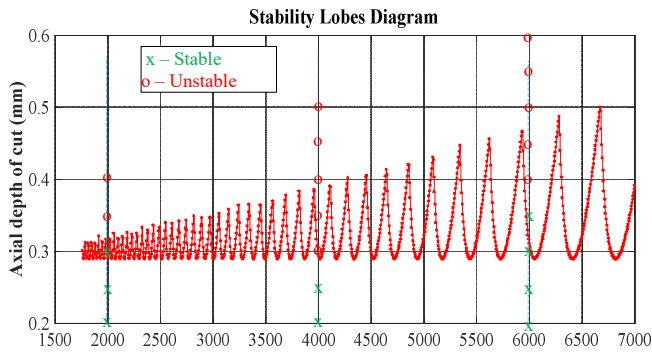
Hình 6. Kiểm tra một số đặc trưng của quá trình cắt ở điều kiện cắt mất ổn định

Trong trường hợp ngược lại, trong điều kiện gia công không ổn định, kết quả phân tích lực cắt trên miền tần số chỉ ra rằng, tần số lực cắt lúc này không còn là N lần của tần số

chuyển động quay của răng cắt nữa mà là một giá trị tần số có biên độ lớn hơn rất nhiều so với biên độ tại vị trí có tần số bằng số nguyên N lần tần số chuyển động của răng cắt (hình 6). Trong trường hợp này, lực cắt và rung động đều rất lớn trong đó rung động ngày càng tăng và làm cho chất lượng bề mặt khi gia công cũng giảm xuống.

Bằng phương pháp phân tích này, trạng thái ổn định hay mất ổn định của quá trình phay được xác định cho toàn bộ các thực nghiệm kiểm tra, kết quả đánh giá được thực hiện tại các giá trị tốc độ quay của trục chính khác nhau. Các kết quả phân tích, đánh giá được mô tả trên hình 7. Kết quả kiểm tra đã chỉ ra rằng các điểm ổn định và không ổn định được dự đoán đã được kiểm tra đảm bảo độ chính xác. Tuy nhiên, tại những điểm chuyển tiếp giữa vùng ổn định và vùng không ổn định, độ chính xác của mô hình giảm xuống. Cụ thể là: khi thực nghiệm tại các điểm chuyển tiếp giữa vùng ổn định và vùng không ổn định, các điểm này dù được dự đoán là không ổn định nhưng trên thực tế đó là điểm ổn định và ngược lại một số điểm được dự đoán là không ổn định nhưng thực nghiệm lại chỉ ra đó là điểm ổn định.

Trong nghiên cứu này, sử dụng hệ thống gia công được chọn để phay thép cứng SKD11 bằng dao phay ngón phẳng liền khối, quá trình cắt sẽ ổn định khi gia công ở chiều sâu cắt nhỏ hơn 0,25mm với tất cả các giá trị của tốc độ trục chính, khi tốc độ trục chính càng lớn thì miền ổn định khi phay sẽ càng rộng hơn.



Hình 7. Kết quả kiểm tra mô hình dự đoán điều kiện ổn định

**4. KẾT LUẬN**

Một số kết luận được rút ra từ nghiên cứu này đó là:

- Lực cắt động và điều kiện ổn định đã được mô hình hoá là các hàm số của rất nhiều các thông số khác nhau bao gồm: thông số dụng cụ cắt, thông số của phôi, hệ số lực cắt đơn vị, thông số về cấu trúc động lực học của hệ thống công nghệ, thông số chế độ cắt, ...

- Lực cắt tức thời đã được mô hình hoá và kiểm tra bằng nghiên cứu thực nghiệm với kết quả rất dự đoán rất gần với kết quả thực tế, mặc dù vẫn còn nhiều điểm khác biệt về giá trị tức thời của lực cắt.

- Mô hình dự đoán miền ổn định đã được xây dựng và kiểm tra thông qua các nghiên cứu thực nghiệm. Kết quả kiểm tra đã chỉ ra rằng các điểm ổn định và không ổn định trong biểu đồ ổn định được dự đoán đã được kiểm tra đảm bảo độ chính xác. Tuy nhiên, tại những điểm chuyển tiếp giữa vùng ổn định và vùng không ổn định, độ chính xác của mô hình giảm xuống.

- Với hệ thống công nghệ được sử dụng trong nghiên cứu này, quá trình phay sẽ ổn định khi gia công ở chiều sâu cắt nhỏ hơn 0,25mm với tất cả các giá trị của tốc độ trục chính, khi tốc độ trục chính càng lớn thì miền ổn định khi phay sẽ càng rộng hơn.

Các nghiên cứu để kiểm tra mô hình dự đoán miền ổn định với các cặp vật liệu dụng cụ cắt và phôi khác nhau sử dụng các hệ thống công nghệ khác nhau để nâng cao độ chính xác của mô hình là các hướng tiếp theo của nghiên cứu này.

**LỜI CẢM ƠN**

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội thông qua việc hỗ trợ các thiết bị đo trong nghiên cứu.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Altintas Y., *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge University Press, 2012, doi: https://doi.org/10.1115/1.1399383

[2]. Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka, "Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping," *CIRP Ann*, 57, 371-374, 2008. doi: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.048

[3]. Munoa J, Beudaert X, Dombovari Z, Altintas Y, Budak E, Brecher C., "Chatter suppression techniques in metal cutting," *CIRP Ann-Manuf Techn*, 65(2):785-808, 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004

[4]. Quintana G, Ciarana J., "Chatter in machining processes: a review," *Int J Mach Tool Manuf*, 51(5), 363-76, 2011. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.01.001

[5] Ding Y, Zhu LM., "Investigation on chatter stability of thin-walled parts considering its flexibility based on finite element analysis," *Int J Adv Manuf Technol*, 1-15, 2016. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9471-x

[6]. Shi JH, Song QH, Liu ZQ, Ai X., "A novel stability prediction approach for thin-walled component milling considering material removing process," *Chin J Aeronaut*, 30(5), 1789-98, 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.05.011

[7]. Zheng J., Zhang Y., Qiao H., "Milling Mechanism and Chattering Stability of Nickel-Based Superalloy Inconel 718," *Materials*, 16(17), 5748, 2023. doi: https://doi.org/10.3390/ma16175748

[8]. Rusinek R., Lajmert P., "Chatter detection in milling of carbon fiber-reinforced composites by improved Hilbert-Huang transform and recurrence quantification analysis," *Materials*, 13(18), 4105, 2020. doi: https://doi.org/10.3390/ma13184105

[9]. Moradi H., Movahhedy M. R., Vossoughi G., "Dynamics of regenerative chatter and internal resonance in milling process with structural and cutting force nonlinearities," *Journal of Sound and Vibration*, 331(16), 3844-3865, 2012. doi: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.03.003

[10]. Kao Y. C., Nguyen N. T., Chen M. S., Su S. T., "A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 1793-1809, 2015. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-014-6550-8.

**AUTHORS INFORMATION**

**Nguyen Nhu Tung<sup>1</sup>, Hoang Tien Dzung<sup>2</sup>, Le Van Phong<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>International School, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>3</sup>Phenikaa University, Vietnam