

CHẨN ĐOÁN MÒN DAO KHI PHAY CNC 5 TRỤC: PHƯƠNG PHÁP TRÍCH XUẤT ĐẶC TRƯNG TÍN HIỆU RUNG ĐỘNG TRONG MIỀN THỜI GIAN VỚI THIẾT BỊ GIÁM SÁT RUNG ĐỘNG KHÔNG DÂY

TOOL WEAR DIAGNOSIS IN 5-AXIS CNC MILLING: TIME-DOMAIN VIBRATION SIGNAL FEATURE EXTRACTION METHOD WITH WIRELESS VIBRATION MONITORING DEVICE

KS. NGUYỄN LÊ DƯƠNG, KS. TRẦN THANH THUẬN,
KS. ĐẶNG THÀNH HỮU THUẬN, ThS. NGUYỄN HOÀNG THIÊN,
TS. ĐẶNG HỮU TRỌNG^a,

Khoa Cơ khí, Trường Đại học SPKT Vĩnh Long

*Tác giả liên hệ: trongdh@vlute.edu.vn

Nhận bài (Received): 11/08/2025; Phản biện (Reviewed): 30/08/2025; Chấp nhận (Accepted): 9/10/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu đề xuất một phương pháp chẩn đoán tình trạng dao phay ngón hợp kim liên khối theo thời gian thực trong quá trình gia công trên máy phay CNC 5 trục. Mô hình chẩn đoán bao gồm: Một thiết bị giám sát rung động dao phay tích hợp công nghệ không dây sử dụng cảm biến gia tốc 3 trục H3LIS331DL; Một hệ thống thu nhận, lưu trữ và phân tích tín hiệu rung động sử dụng 10 tham số đặc trưng trên miền thời gian để đánh giá tình trạng dụng cụ cắt. Kết quả cho thấy các tham số đặc trưng tiềm năng: hàm độ nhọn và giá trị hiệu dụng trung bình phản ánh rõ rệt điểm bắt đầu và kết thúc của quá trình cắt, hệ số đỉnh phù hợp để phát hiện dao bị mẻ hoặc mòn cục bộ. Phương pháp đề xuất sẽ bổ sung cho việc xây dựng chuẩn đo lường của hộ chiếu rung động (vibropassport) đối với máy phay CNC 5 trục, từ đó hỗ trợ dự báo tuổi thọ dao phay và nâng cao hiệu quả gia công.

Từ khóa: phay, chẩn đoán, mài mòn dụng cụ, miền thời gian, trích xuất tín hiệu.

ABSTRACT

The study proposes a method for diagnosing the condition of solid end mills in real time during machining on a 5-axis CNC milling machine. The diagnostic model includes: A wireless-integrated milling cutter vibration monitoring device using a 3-axis acceleration sensor H3LIS331DL; A vibration signal acquisition, storage and analysis system using 10 characteristic parameters in the time domain to evaluate the condition of the cutting tool. The results show that the characteristic parameters: kurtosis function and root mean square, reflect the starting and ending points of the cutting process. The crest factor is suitable for detecting chipped or locally worn tools. The proposed method will supplement the construction of a measurement standard of a vibration passport for a 5-axis CNC milling machine, thereby supporting the prediction of milling cutter life and improving machining efficiency.

Keywords: milling, diagnostics, tool wear, time domain, signal extraction.

The study proposes a method for diagnosing the condition of solid end mills in real time during machining on a 5-axis CNC milling machine. The diagnostic model includes a wireless-integrated milling cutter vibration monitoring device equipped with a 3-axis acceleration sensor (H3LIS331DL) and a vibration signal acquisition, storage and analysis system. This system evaluates the condition of the cutting tool using ten characteristic parameters in the time domain. The results show that the characteristic parameters, namely kurtosis function and root mean square effectively reflect the initiation and completion of the

1. Đặt vấn đề

Cạnh tranh quốc tế ngày càng khốc liệt trong ngành sản xuất và chế tạo cơ khí đã khiến tất cả các doanh nghiệp phải liên tục tìm kiếm các giải pháp kỹ thuật để cải thiện hiệu quả sản xuất, giảm chi phí và nâng cao chất lượng sản phẩm [1]. Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ cảm biến và các thuật toán trí tuệ nhân tạo, việc giám sát trực tuyến quá trình cắt đang nhận được sự quan tâm rất lớn của các nhà nghiên cứu khoa học. Trong lĩnh vực gia công cắt gọt kim loại, tình trạng mài mòn của dụng cụ cắt ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng gia công và hiệu quả sản xuất [2]. Tính toán vận bề mặt gia công bị ảnh hưởng chủ yếu bởi tình trạng của dụng cụ cắt, điều này rất khó phát hiện trong quá trình gia công. Việc không giám sát tình trạng của dụng cụ cắt có thể tạo ra một lượng lớn phế phẩm, chi tiết gia công kém chất lượng gây lãng phí và làm tăng chi phí sản xuất không mong muốn [3].

Quy trình giám sát tình trạng dụng cụ cắt bao gồm các giai đoạn: thu thập tín hiệu, trích xuất đặc trưng tín hiệu và thiết lập mô hình giám sát [4]. Các phương pháp giám sát tình trạng dụng cụ cắt đang được tập trung nghiên cứu thực nghiệm theo hai hướng chính: phương pháp trực tiếp và gián tiếp [2]. Tuy nhiên, một vấn đề lớn trong phương pháp nghiên cứu thực nghiệm về động lực học của dụng cụ cắt trong quá trình phay là thiếu cách tiếp cận phổ biến để đo các thông số rung động. Trong nghiên cứu về động lực học máy công cụ, một số lượng lớn thiết bị, cảm biến và dụng cụ chuyên dụng đã được tạo ra. Tuy vậy, hầu hết các chủng loại này không thể đáp ứng các yêu cầu cơ bản trong nghiên cứu thực nghiệm về đo rung động của dao phay. Nguyên nhân chủ yếu do các phép đo với hai thông số đặc trưng

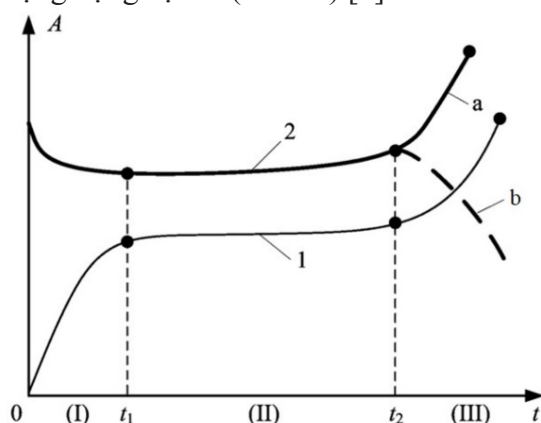
của rung động là biên độ và tần số không đảm bảo sự tương thích [5, 6]. Một kỹ thuật đo gián tiếp cũng đã được thực hiện thông qua xác định các giá trị độ gợn sóng và độ nhám của bề mặt gia công để tính toán các giá trị tần số và biên độ rung động dụng cụ cắt [7, 8]. Tuy nhiên, kỹ thuật đo gián tiếp này với độ chính xác mang tính chất tương đối. Do đó, nghiên cứu rung động dụng cụ cắt trong quá trình phay, đòi hỏi phải phát triển một thiết bị chuyên dụng và phương pháp xử lý tín hiệu theo thời gian thực phản ánh được tình trạng của dụng cụ cắt, là mang tính cấp thiết với giá trị thực tiễn cao. Bên cạnh đó, các thiết bị này phải kiểm soát hiệu quả rung động dụng cụ cắt trong quá trình phay và đáp ứng các yêu cầu đặc biệt liên quan để thuận tiện khi sử dụng trên máy phay CNC [9].

Trong lĩnh vực gia công chính xác, đặc biệt là trong ngành chế tạo khuôn mẫu, việc sử dụng trung tâm gia công phay CNC 5 trục đã trở nên phổ dụng. Dao phay ngón thường được sử dụng cho những nguyên công bán tinh và tinh trên các bề mặt 3D phức tạp, dễ bị mài mòn và gãy do lực cắt lớn và sự tiếp xúc không liên tục với phôi. Sự mài mòn của dao không chỉ làm giảm chất lượng bề mặt sản phẩm mà còn gây ra sai lệch kích thước và làm tăng nguy cơ hỏng hóc nghiêm trọng của dao. Do đó, bài báo đề xuất phương pháp chẩn đoán tuổi thọ dao phay ngón theo thời gian thực, sử dụng các thuật toán để trích xuất đặc trưng tín hiệu trong miền thời gian của thiết bị giám sát rung động dụng cụ cắt bằng công nghệ không dây. Kết quả nghiên cứu sẽ đóng góp, bổ sung cho việc xây dựng chuẩn đo lường của hộ chiếu rung động (vibropassport) đối với máy phay CNC 5 trục, từ đó hoàn thiện kỹ thuật dự báo tuổi thọ dao phay và nâng cao hiệu quả gia công trong sản xuất công nghiệp.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Quy luật mòn dao phay

Trong quá trình gia công, hệ thống công nghệ “máy – đồ gá – dụng cụ cắt – phôi” trải qua dao động cưỡng bức do lực cắt. Những dao động này xảy ra do sai số khi bắt đầu gia công, sai số công nghệ và sự thay đổi hình dạng của dụng cụ cắt khi bị mòn [10, 11]. Trong trường hợp này, dụng cụ cắt thường được coi là lý tưởng và không được tính đến khi đánh giá trạng thái của hệ thống công nghệ [12, 13, 14]. Quy luật mòn dao phay gồm 3 giai đoạn cơ bản và có mối liên hệ chặt chẽ đến biên độ rung động dụng cụ cắt (Hình 1) [9].



Hình 1.1 – Mối quan hệ giữa biên độ rung động với các giai đoạn mòn của dao phay; 2 – Biên độ rung động của hệ thống công nghệ; a – Dụng cụ cắt hư hỏng do mòn, b – Dụng cụ cắt hư hỏng do phá hủy

Giai đoạn (I) đại diện cho quá trình cắt khi dao phay còn mới, giai đoạn này với đặc trưng là biên độ rung động tăng đột ngột và lưỡi cắt mòn nhanh đến mức độ nhất định. Khi đạt đến mức hao mòn này, dụng cụ cắt sẽ bước vào Giai đoạn (II) - giai đoạn mòn ổn định. Giai đoạn (III) được nhận diện: nếu biên độ rung động tăng rất mạnh không có điểm dừng là dấu hiệu nhận biết dụng cụ cắt đang vào giai đoạn mòn thâm khốc, trong trường hợp biên độ rung động giảm mạnh tương ứng với dụng cụ cắt đang trong tình trạng đã bị hư hỏng nặng không còn khả năng cắt gọt.

Xem xét mối liên hệ giữa biên độ rung

động với độ mòn của dụng cụ cắt sẽ giúp phát triển và hoàn thiện hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ cắt.

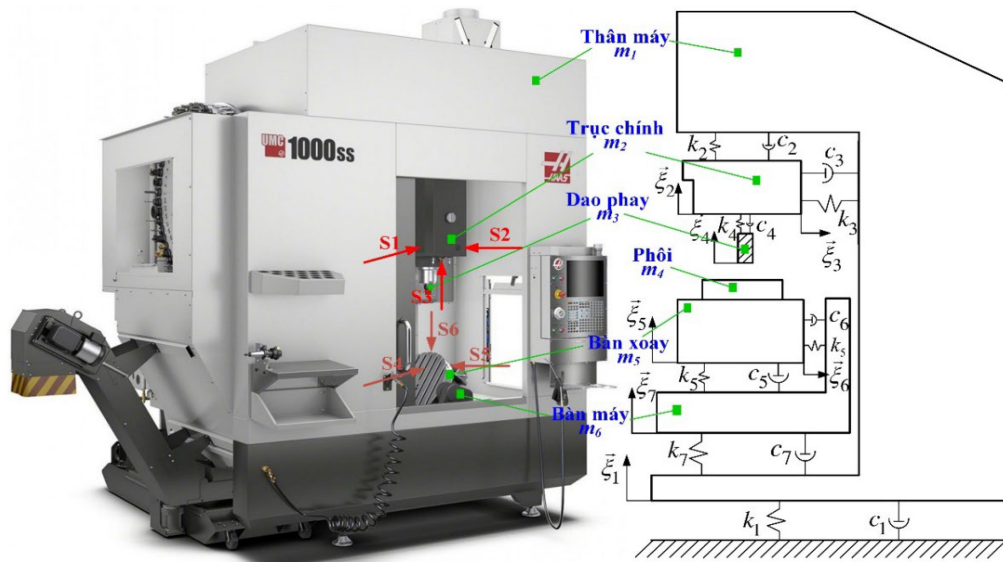
2.2. Mối quan hệ giữa mòn dụng cụ cắt và tín hiệu rung động

Trong quá trình gia công, dao phay thực hiện quá trình bóc tách loại khi tiếp xúc với bề mặt phôi mang tính chu kỳ. Các tín hiệu rung động bắt đầu xuất hiện với tần số và biên độ phụ thuộc vào điều kiện cắt và trạng thái của dao. Khi dao bị mòn, biên độ rung động có xu hướng tăng do lực cắt chính tăng và hiện tượng cộng hưởng dễ xảy ra hơn [9].

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các tham số thống kê của tín hiệu rung có thể dùng để đánh giá trạng thái của dụng cụ cắt [17, 18]: giá trị hiệu dụng trung bình (root mean square), tín hiệu tức thời lớn nhất (maximum) - Phản ánh mức năng lượng rung động; phương sai (variance), độ lệch (skewness) - Mô tả tính bất đối xứng của phân bố rung động; hệ số nhọn (kurtosis), đỉnh dạng sóng (peak-to-peak) - Giúp phát hiện các biến cố đột biến như sự xuất hiện của vết nứt, mẻ dao.

2.3. Hệ thống giám sát rung động dao phay với công nghệ không dây

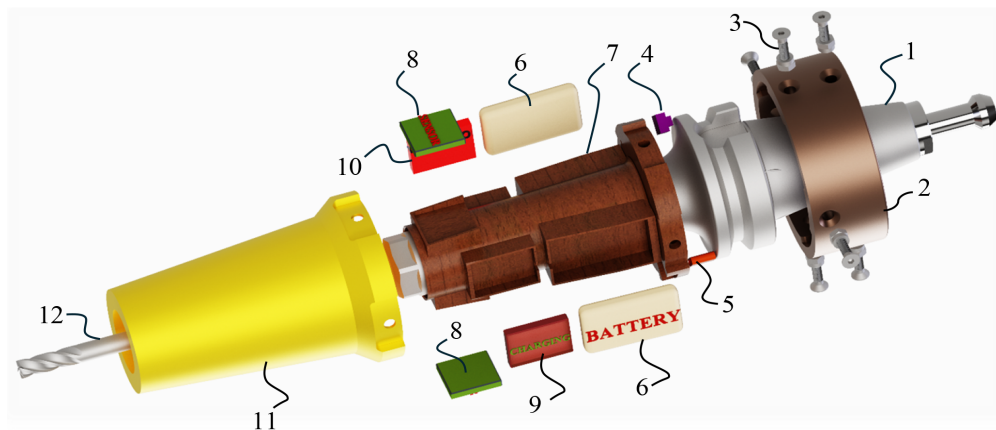
Việc đặt cảm biến gần vùng cắt là cần thiết vì tín hiệu giảm mạnh khi qua các khớp đàn hồi của máy. Trên máy tiện, lắp đặt cảm biến dễ dàng hơn do dụng cụ đứng yên [15], nhưng trên máy phay, công việc này phức tạp hơn rất nhiều. Đối với máy CNC 5 trục, nếu áp dụng theo phương pháp truyền thống, cảm biến sẽ được đặt trên trục chính (S1, S2, S3) hoặc bàn máy (S4, S5, S6) [16], nhưng vị trí này vẫn chưa tối ưu do hệ số độ cứng khác nhau dẫn đến tín hiệu rung động bị hấp thụ và khoảng cách vẫn còn xa vùng cắt (Hình 2). Vì vậy, với phương án tối ưu là sẽ bố trí cảm biến trên Đài dao để thu thập dữ liệu rung động tương đối chính xác và giảm thiểu sai số đo nhỏ nhất có thể.



Hình 2. Mô hình phân tích động lực học và lắp đặt cảm biến rung động áp dụng theo phương pháp truyền thống trên máy phay CNC 5 trục

Để đáp ứng được những yêu cầu về thiết bị giám sát tình trạng dụng cụ cắt theo thời gian thực khi gia công trên máy CNC 5 trục, nhóm tác giả đề xuất một thiết bị chuyên dụng với các yêu cầu kỹ thuật (Hình 3): 1. Cảm biến của thiết bị phải được đặt gần vùng cắt nhất có thể; 2. Việc lắp đặt và bố trí thiết bị không làm ảnh hưởng các

hoạt động của trung tâm gia công như: hệ thống thay dao, hệ thống làm mát; 3. Thiết bị cung cấp các thao tác đo nhanh và chính xác; 4. Thiết bị phải phù hợp với nhiều loại máy phay CNC 5 trục phổ biến trong sản xuất; 5. Thiết bị truyền tín hiệu bằng công nghệ không dây.



Hình 3. Mô hình 3D của thiết bị giám sát rung động công nghệ không dây trên Đài dao

1 - Đài dao BT-40, 2 - Vòng giá, 3 - Bulong-Dai ốc M4x4, 4 - Công tắc, 5 - Cổng sạc, 6 - Pin, 7 - Thân thiết bị, 8 - Cảm biến gia tốc 3 trục H3LIS331DL, 9 - Mạch sạc, 10 - ESP32-C3 Super mini, 11 - Vỏ thiết bị, 12 - Dao phay ngón

Thiết bị hoạt động như sau: Thiết bị được lắp cố định với Đài dao. Điều này có nghĩa là nó sẽ quay cùng với dụng cụ cắt

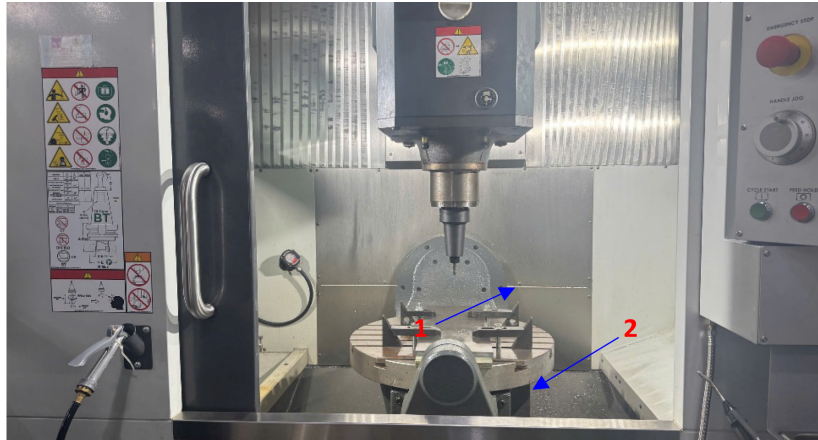
trong quá trình gia công. Cảm biến gia tốc 3 trục H3LIS331DL sẽ ghi lại tín hiệu rung động theo sự thay đổi hành vi động lực

học của dao phay trong quá trình gia công. Tín hiệu rung động sẽ được vi điều khiển ESP32-C3 Super mini xử lý và truyền đến máy tính cá nhân được trang bị phần mềm Serial monitor/Arduino, tại đây dữ liệu được ghi lại và phân tích bằng thuật toán đã xây dựng trên Matlab. Ngoài ra, tính năng độc đáo của thiết bị này là nó phát hiện rung động trực tiếp tại Đài dao

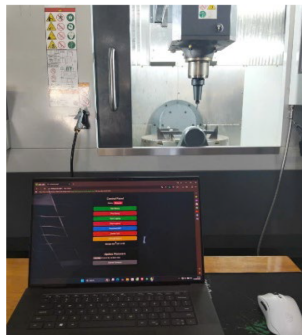
để giảm thiểu sai số đo. Thiết bị giám sát rung động được đề xuất sử dụng cảm biến gia tốc có khả năng chống lại các tác động bên ngoài (phôi thoát ra tác động vào thiết bị và chất làm mát được sử dụng trong quá trình gia công) trong việc thu nhận tín hiệu một cách đáng tin cậy.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Xây dựng mô hình thực nghiệm



Thiết lập thực nghiệm trên Máy phay HAAS CNC 5 trục
1 – Thiết bị giám sát rung động, 2 - Phôi



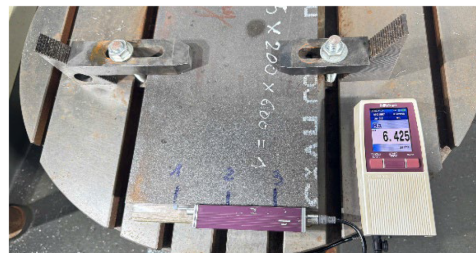
Hệ thống thu nhận tín hiệu



Dao phay ngón X-Power
Sem811080



Máy đo mòn dao - Camera kính hiển vi Olympus GX51



Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ-210

Hình 4. Mô hình thực nghiệm

Thực nghiệm được thực hiện trên Máy phay CNC 5 trục HAAS UMC-1000ss (Hình 4). Dụng cụ cắt là dao phay ngón hợp kim nguyên khối X-Power Sem811080 (4

lưỡi cắt, đường kính $\varnothing 8\text{mm}$), với lớp phủ AlCrN, chuyên dụng cho gia công tinh và bán tinh đối với các vật liệu khó cắt như: SKD11, SKH51, SUS304... Phôi dùng

cho thực nghiệm chuẩn đoán mòn dao là thép dụng cụ SKD11 tiêu chuẩn Nhật Bản (JIS-G4404) với thành phần chủ yếu là Crôm (Cr), Cacbon (C), Molipđen (Mo), Vanadi (V), kích thước 16x200x600 mm. Thép SKD11 là một loại vật liệu khó gia công nhưng được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp khuôn mẫu và công nghiệp ô tô với độ bền, độ dẻo và độ cứng được duy trì tại điều kiện làm việc ở nhiệt độ cao [19].

Hai thông số chính được sử dụng để đánh giá độ mòn dụng cụ: 1. Độ nhám bề mặt (Ra) được đo bằng máy đo độ nhám cầm tay Mitutoyo SJ-210 (độ chính xác $\pm 0,01 \mu\text{m}$). Ba phép đo được thực hiện tại mỗi vị trí trên bề mặt gia công và lấy giá trị trung bình. Khi giá trị Ra tăng được hiểu là tỉ lệ thuận với độ mòn của cạnh cắt; 2. Độ mòn cạnh cắt được đo dưới kính hiển vi kỹ thuật số Olympus GX51. Hai giá trị này phải được đo và lưu

dữ liệu sau mỗi lần gia công.

Phương pháp chuẩn đoán tuổi bền dao theo thời gian thực với chế độ cắt bán tinh (TCVN 2511: 1995 – Cấp độ nhám 5 – Ra: $5 \div 2,5 \mu\text{m}$ và Rz: $20 \div 10 \mu\text{m}$): $v = 1250 \text{ vòng/phút}$, chiều sâu cắt $a_e = 0,2 \text{ mm}$, lượng chạy dao răng $f_z = 0,05 \text{ mm/răng}$. Thực hiện hàng loạt lần cắt cho đến khi vượt giá trị độ nhám bề mặt cho phép tương ứng tuổi bền của dao phay.

Các đặc trưng miền thời gian sẽ được phân tích và đối chiếu với các giá trị mòn dao và Ra tương ứng trong suốt quá trình thực nghiệm. Điều này tạo điều kiện thuận lợi cho việc phát triển mối tương quan dự đoán giữa hành vi rung động và tuổi thọ dụng cụ cắt.

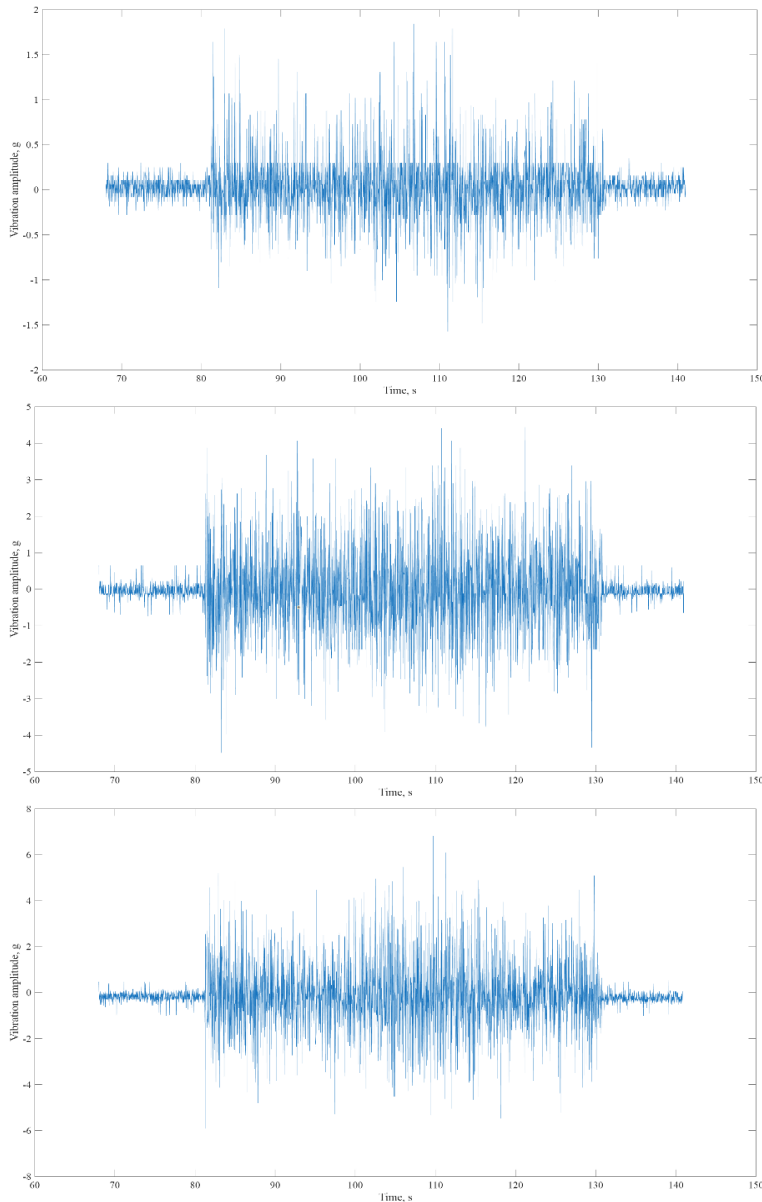
3.2. Xử lý tín hiệu

Bảng 1. Các tham số đặc trưng xử lý tín hiệu trong miền thời gian

STT	Đặc trưng tín hiệu	Mô tả
1	Tín hiệu tức thời lớn nhất (maximum), m/s^2	$A = \max(A_i)$
2	Giá trị trung bình (mean), m/s^2	$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$
3	Giá trị hiệu dụng trung bình (root mean square), m/s^2	$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}$
4	Phương sai (variance), m^2/s^4	$D = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^2}{n-1}$
5	Độ lệch chuẩn (standard deviation), m/s^2	$\bar{\sigma} = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^2}{n-1}}$
6	Hệ số biến thiên (coefficient of variation)	$K_v = \frac{\sigma}{\mu}$
7	Độ lệch (skewness)	$K_s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^3}{\sigma^3}$
8	Độ nhọn (kurtosis)	$K_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \mu)^4}{\sigma^4}$
9	Đỉnh dạng sóng (peak-to-peak), m/s^2	$A_{p2p} = \max(A_i) - \min(A_i)$
10	Hệ số đỉnh (crest factor)	$K_c = \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}}$

Hệ thống xử lý tín hiệu có chức năng cung cấp số hóa và trích xuất đặc tính của tín hiệu nhằm phản ánh tình trạng của dụng cụ cắt. Số lượng tín hiệu lấy mẫu là 350 tín hiệu/giây (Hình 5). Tín hiệu sẽ được xử lý lọc nhiễu từ các nguồn rung động có biên độ rất thấp như: trục chính, cơ cấu truyền động, môi trường... trước khi được thực hiện phân tích bằng các tham số miền thời gian thông qua thuật toán Kalman có sẵn trên phần mềm Matlab. Phương pháp đề xuất sử dụng 10 tham số đặc trưng để trích

xuất tín hiệu rung động trong miền thời gian (Bảng 1). Thông qua kết quả thực nghiệm sẽ lựa chọn những tham số đặc trưng phù hợp, phản ánh được tình trạng của dụng cụ cắt theo thời gian thực như: mức độ mòn, vết nứt, mẻ dao, năng lượng rung động ... Những thông số đặc trưng được lựa chọn sẽ bổ sung vào chuẩn đo lường của hộ chiếu rung động (vibropassport) đối với máy phay CNC 5 trục, hoàn thiện kỹ thuật chẩn đoán tuổi bền dao phay và nâng cao hiệu quả gia công.



Hình 5. Tín hiệu rung động thu được từ cảm biến gia tốc 3 trục H3LIS331DL

a) Tín hiệu rung động trên miền thời gian theo trục Z của hệ tọa độ máy phay CNC 5 trục, phản ánh tín hiệu rung động tương ứng với chiều rộng cắt a_p

b) Tín hiệu rung động trên miền thời gian theo trục Y của hệ tọa độ máy phay CNC 5 trục, phản ánh tín hiệu rung động tương ứng với chiều tiến dao S_z

c) Tín hiệu rung động trên miền thời gian theo trục X của hệ tọa độ máy phay CNC 5 trục, phản ánh tín hiệu rung động tương ứng với chiều sâu cắt a_e

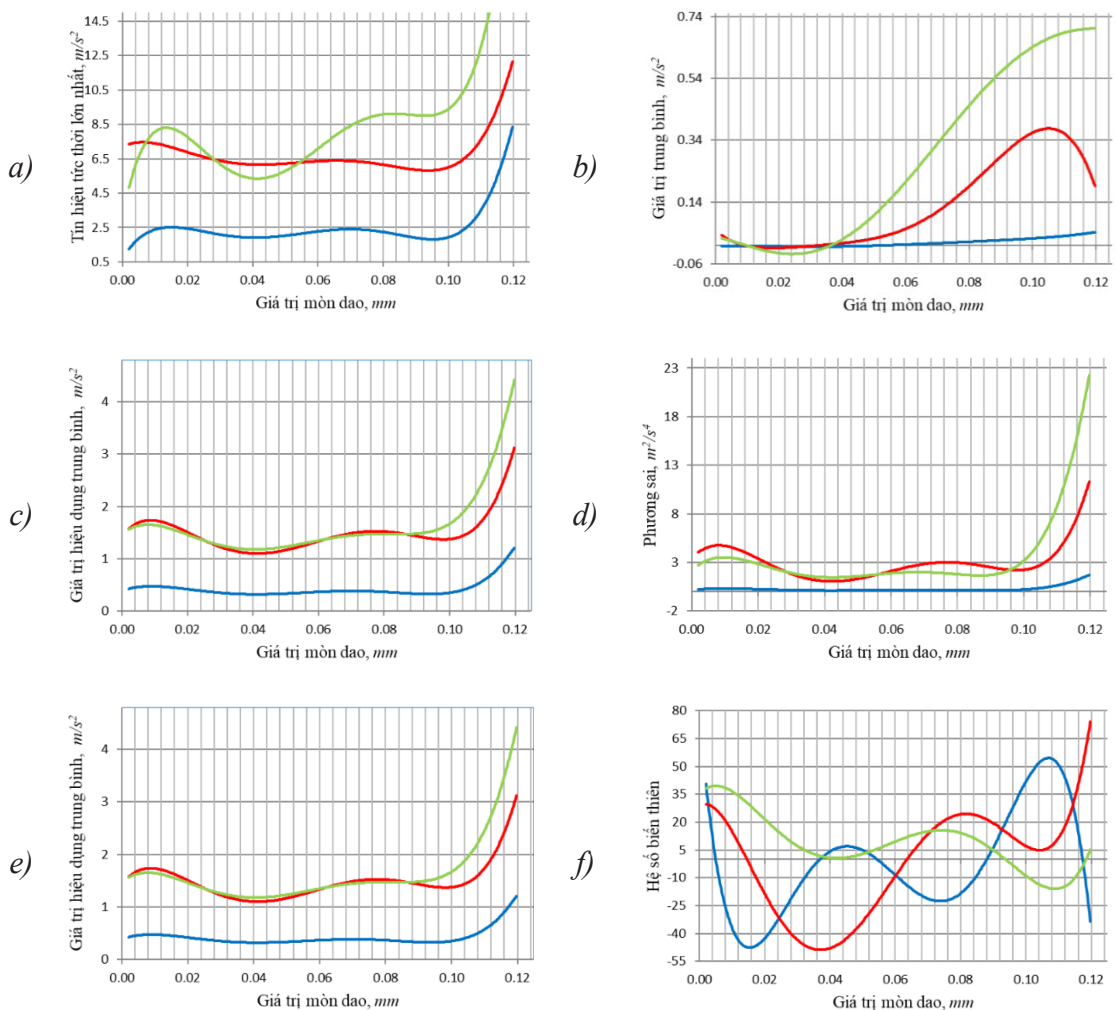
4. Kết quả và thảo luận

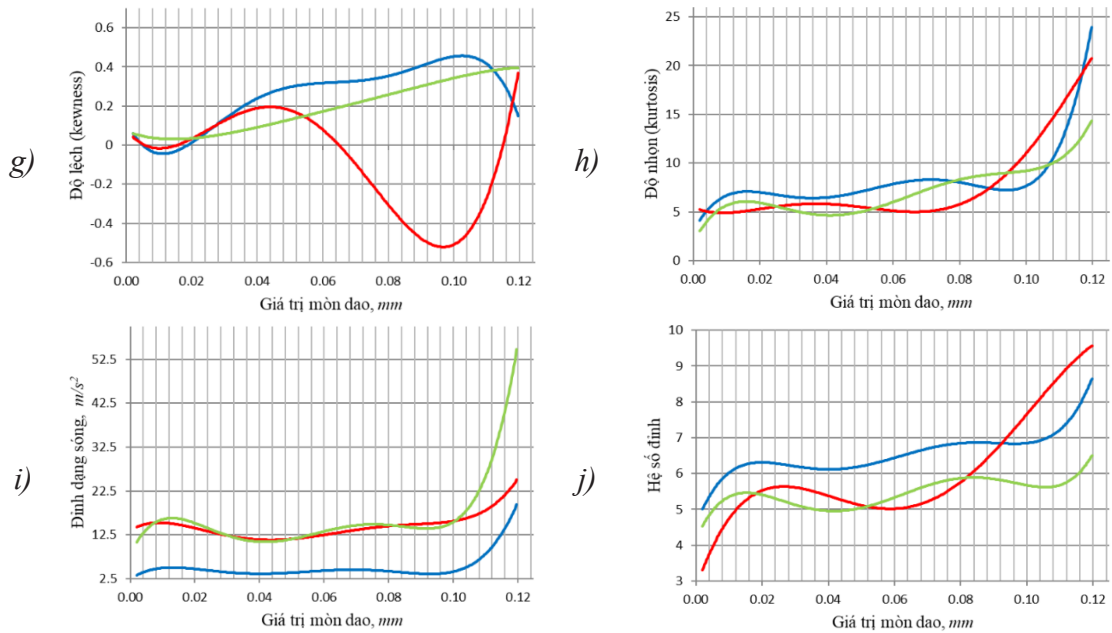
Thực nghiệm đánh giá tuổi bền dao phay trong sự tương quan với các mối quan hệ: biên độ rung động dao phay theo 3 chiều trục của hệ tọa máy CNC và chất lượng bề mặt gia công Ra. Kết quả thực nghiệm đã xác định tuổi bền dụng cụ cắt dừng ở số lần cắt là 181 (số lần lặp lại của thí nghiệm), tương ứng chiều dài cắt là 63,6m. Phân tích kết quả xử lý dữ liệu thực nghiệm của tín hiệu rung động được trình bày trên hình 6 cho thấy: một số tham số đặc trưng được xem xét của tín hiệu rung động theo các trục X, Y, Z là nhất quán và hoạt động theo

các giai đoạn mòn của dụng cụ cắt. Giai đoạn chạy rà của lưỡi cắt khi còn mới sẽ dừng ở mức giá trị mòn 0,02 mm, sau đó chuyển qua giai đoạn mòn ổn định khi đạt giá trị 0,095 mm, vượt qua giá trị này sẽ chuyển qua giai đoạn mòn phá hủy với độ nhám bề mặt Ra > 5μm.

Hệ số biến thiên (Hình 6f) do giá trị trung bình của tín hiệu lớn dao động xung quanh giá trị 0 nên không có nhiều ý nghĩa thực tiễn trong phân tích.

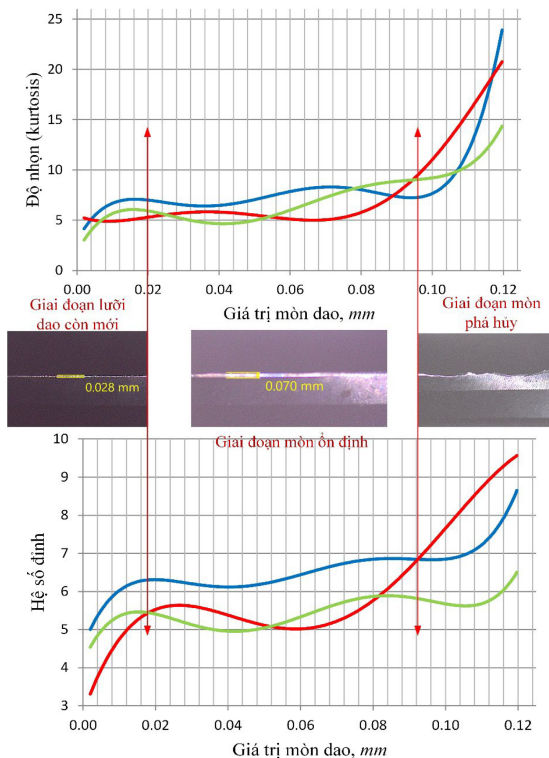
Giá trị trung bình (Hình 6b) và hệ số độ lệch (Hình 6g) không có giá trị chuẩn đoán.





Hình 6. Kết quả trích xuất và xử lí tín hiệu rung động trong miền thời gian theo các trục X, Y, Z của hệ tọa độ máy phay CNC 5 trục

- X Tín hiệu rung động theo trục X tương ứng với chiều sâu cắt a_e
- Y Tín hiệu rung động theo trục Y tương ứng với chiều tiến dao S_z
- Z Tín hiệu rung động theo trục Z tương ứng với chiều rộng cắt a_p



Hình 7. Sự phù hợp của 2 tham số độ nhọn và hệ số đỉnh với các giai đoạn mòn dao

Tín hiệu tức thời lớn nhất (Hình 6a), hệ số đỉnh dạng sóng (Hình 6i) và hệ số đỉnh (Hình 6j) chỉ đặc trưng cho các giá trị tín hiệu rung động cực đại và cực tiểu. Do đó các thông số tín hiệu rung động này chỉ được quan tâm khi tiến hành thí nghiệm, còn trong thực tế sản xuất việc sử dụng các tham số đặc trưng này có thể dẫn đến kết quả không chính xác.

Giá trị hiệu dụng trung bình, phương sai, độ lệch chuẩn có hình dạng tương đồng, nhưng giá trị hiệu dụng trung bình thuận tiện hơn về mặt tính toán.

Hệ số đỉnh và hàm độ nhọn được sử dụng để mô tả đặc điểm hình dạng của tín hiệu và sự thay đổi cùng với các rung động do quá trình gia công tạo ra. Phép tính hệ số đỉnh cho biết mức độ va chạm giữa dao và phôi đang diễn ra ở dạng sóng, nhất là khi dao bị mẻ hoặc mòn cục bộ. Hệ số độ

nhọn trong kết quả phân tích phản ánh rõ rệt điểm bắt đầu và kết thúc của quá trình cắt. Độ nhọn nhạy cảm với tính xung động hoặc “độ nhọn” của dữ liệu. Độ nhọn của tín hiệu ngẫu nhiên là $5,0 \div 7$. Tín hiệu rung động của dao phay trong điều kiện tốt được kỳ vọng sẽ có giá trị này. Mức độ nhọn tăng mạnh lên khoảng 8 khi dao phay bắt đầu hư hỏng rời rạc như: mòn cục bộ, xuất hiện các vết nứt và mẻ nhỏ, giá trị mòn dao đã đạt mức $0,085mm$. Khi độ nhọn tăng trên giá trị 10, tình trạng dao cắt đã bị hư hỏng rất nặng, cạnh mòn lớn, độ nhám bề mặt tăng mạnh (Hình 7).

5. Kết luận

Phân tích tín hiệu rung động trong miền thời gian với thiết bị giám sát không dây là một công cụ hiệu quả để chẩn đoán mòn dao trong gia công CNC 5 trục. Kết quả chỉ ra rằng các tham số hàm độ nhọn và giá trị hiệu dụng trung bình là hai chỉ tiêu nhạy nhất với trạng thái mòn của dao theo thời gian thực, hệ số đỉnh rất phù hợp để phát hiện dao bị mẻ hoặc mòn cục bộ.

Các tham số đặc trưng này sẽ rất tiềm năng khi được sử dụng làm cơ sở toán học cho phương pháp trích xuất thông tin từ tín hiệu rung động phản ánh quá trình mài mòn của dụng cụ cắt. Việc tích hợp phương pháp này vào hệ thống CNC sẽ giúp nâng cao độ tin cậy và hiệu quả của quá trình sản xuất với những tiềm năng:

- Xây dựng vibropassport cho từng loại trung tâm gia công phay CNC.

- Tích hợp hệ thống cảnh báo trên giao diện điều khiển máy CNC dựa trên các tham số đặc trưng tiềm năng, để tự động tạm dừng máy khi dụng cụ đi vào vùng mài mòn quan trọng, đưa ra những cảnh báo thay dao kịp thời đối với gia công những chi tiết đắt tiền.

- Giảm tỷ lệ phế phẩm và khai thác tối ưu tuổi bền dao.

- Kết hợp với mô hình trí tuệ nhân tạo (AI) để phát triển mô hình dự báo tuổi thọ dao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lauro, C.H., Brandao, L.C., Baldo, D., Reis, R.A., Davim, J.P. (2014). Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review. *Measurement*, vol 58, pp. 73–86.
- [2] Shaw, M.C. (2005). *Metal Cutting Principles* (2nd edition). Oxford University Press, New York, America.
- [3] Chang'an Zhou, Kai Guo, Jie Sun (2021). An integrated wireless vibration sensing tool holder for milling tool condition monitoring with singularity analysis. *Measurement*, vol 174 p. 109038.
- [4] Zhu, K.P., Wong, Y.S., Hong, G.S. (2009). Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results. *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, vol 49 (7), pp. 537–553.
- [5] Lei Ma, Shreyes N. Melkote, John B. Morehouse, James B. Castle, James W. Fonda, Melissa A. Johnson (2012). Thin-Film PVDF Sensor-Based Monitoring of Cutting Forces in Peripheral End Milling. *Journal of dynamic systems, measurement, and control.*, Vol 134, Num 5, pp. 051014.1-051014.9.

- [6] Faassen, R. (2007). Chatter prediction and control for high-speed milling modelling and ex-periments. Technische Universiteit Eindhoven, p. 6.
- [7] Suprock, C.A., Jerard, R.B., Fussell, B.K. (2009). In Situ Chatter Fre quency Prediction Using Torque Data From a Wireless Sensor Integrated Tool Holder. Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference, West Lafatette, IN, Paper No. MSEC2009-84357, vol 2, pp. 129–136.
- [8] Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stepan, G. (2016). Chatter suppression techniques in metal cutting. CIRP Annals, vol. 65, p. 785-808.
- [9] Huu Trong Dang, Vinh Phoi Nguyen, Hoang Thien Nguyen, Thien Ngon Dang (2025). Development of a Device for Diagnosing Cutting Tool Life in Surface Milling Based on Vibration Monitoring During Machining. Mechanisms and Machine Science, vol 177, pp. 494-503.
- [10] Budak E., Altintas Y., Armarego EJA (1996). Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. J Manuf Sci E-T ASME, vol 118(2), pp. 216–224.
- [11] Gao G., Wu B.H., Zhang D.H., Luo M. (2013). Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process. Chin J Aeronaut, vol 26(3), pp. 823–830.
- [12] Campatelli G, Scippa A. (2012). Prediction of milling cutting force coefficients for alumi-num 6082–T4. Procedia CIRP, vol 1(1), pp. 563–568.
- [13] Wang J.J., Zheng C.M. (2002). Identification of shearing and ploughing cutting constants from average forces in ball-end milling. Int J Mach Tool Manuf, vol 42(6), pp. 695–705.
- [14] Gonzalo, O., Beristain, J., Jauregi, H., Sanz, C. (2010). A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation. Int J Mach Tool Manuf, vol 50(9), pp.765–74.
- [15] Abimbola M. Jubril (2012). A nonlinear weights selection in weighted sum for convex mul-tiobjective optimization. Facta Universitatis, vol. 27, pp. 357-372.
- [16] Cao, H.R., Zhang, X.W., Chen, X.F. (2017). The concept and progress of intelligent spin-dles: A review. Int. J. Mach. Tools Manuf., vol 112(5), pp. 21-52
- [17] Cai, W., Zhang, W., Hu, X., Liu, Y. (2020). A hybrid information model based on long short-term memory network for tool condition monitoring. J. Intell. Manuf., vol 31, pp. 1497–1510.
- [18] Jinjiang Wang, Junyao Xie, Rui Zhao, Laibin Zhang, Lixiang Duan (2017). Multisensory fusion based virtual tool wear sensing for ubiquitous manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol 45, pp. 47-58
- [19] Nghiêm Hùng (1997). Sách tra cứu Thép & Gang thông dụng, Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội.