CHẨN ĐOÁN TUỔI THỌ DAO PHAY NGÓN DỰA TRÊN PHÂN TÍCH ĐẶC TRƯNG TÍN HIỆU RUNG ĐỘNG TRONG MIỀN TẦN SỐ

END MILLING CUTTER LIFE DIAGNOSIS BASED ON FREQUENCY DOMAIN VIBRATION SIGNAL CHARACTERISTICS ANALYSIS

KS. NGUYỄN LÊ DƯƠNG, KS. ĐẶNG THÀNH HỮU THUẬN,
KS. TRẦN THANH THUẬN, TS. ĐẶNG HỮU TRỌNG[a]
Khoa Cơ khí, Trường Đại học SPKT Vĩnh Long;
[a]Tác giả liên hệ: trongdh@vlute.edu.vn

Nhận bài(Received): 11/8/2025; Phản biện (Reviewed): 23/9/2025; Chấp nhận (Accepted): 1/10/2025

TÓM TẮT

Nội dung nghiên cứu đề xuất một phương pháp chẩn đoán tình trạng dao phay ngón liền khối phủ AlCrN khi gia công thép SKD11 trên máy phay CNC 5 trục HAAS UMC 1000SS. Một thiết bị giám sát rung động dụng cụ cắt tích hợp công nghệ truyền tín hiệu không dây đã được phát triển, mạch vi điều khiển ESP 32 C3 super mini kết hợp cảm biến gia tốc 3 trục H3LIS331DL để thu và truyền tín hiệu. Phương pháp được đề xuất dựa trên trích xuất 7 tham số đặc trưng miền tần số của tín hiệu rung động để đánh giá tình trạng dụng cụ cắt. Kết quả thực nghiệm cho thấy mối tương quan mạnh mẽ giữa quy luật mòn dao và các tham số đặc trưng tiềm năng. Tham số đặc trưng Tổng biên độ phổ tần số phù hợp nhất với trạng thái mòn của dao, phản ánh rõ rệt điểm bắt đầu và kết thúc của quá trình cắt. Tham số đặc trưng Phương sai phổ tần số rất hữu ích cho việc phát hiện các vết nứt mẻ dao, là dấu hiệu nhận biết sự bắt đầu của giai đoạn phá hủy. Phương pháp đề xuất sẽ bổ sung cho kỹ thuật dự báo tuổi thọ dụng cụ cắt và giúp nâng cao hiệu quả gia công phay CNC.

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

ABSTRACT

This study presents a method for diagnosing the condition of an AlCrN-coated solid carbide end mill while machining SKD11 steel on a HAAS UMC-1000SS 5-axis CNC milling center. A vibration monitoring device for cutting tools that incorporates wireless signal transmission technology has been developed. This system employs an ESP32-C3 Super Mini microcontroller alongside an H3LIS331DL 3-axis accelerometer for signal acquisition and transmission. The proposed method involves extracting seven characteristic frequency-domain parameters from the vibration signal to assess the condition of the cutting tool. Experimental results indicate a significant correlation between tool wear progression and essential characteristic parameters. The characteristic parameter "Sum" was determined to be the most appropriate for monitoring the tool's wear state, effectively indicating the initiation and conclusion of the cutting process. The characteristic parameter "Variance" demonstrated significant utility in identifying tool

chipping, acting as an indicator for the initiation of the catastrophic failure phase. This proposed method will augment techniques for predicting cutting tool life and improve the efficiency of CNC milling operations.

Keywords: *milling, diagnostics, tool wear, frequency domain, signal extraction.*

1. Đặt vấn đề

Công nghiệp 4.0 thúc đẩy quá trình sản xuất thông minh, giúp các quốc gia duy trì lợi thế cạnh tranh toàn cầu. Đây được xem như "công cụ đắc lực" của các quốc gia trên thế giới để phát triển đất nước, cũng như duy trì lợi thế cạnh tranh của mình trên trường quốc tế. Quá trình hiện đại hóa đang diễn ra nhanh chóng đã dẫn đến nhu cầu ngày càng tăng về máy móc hiệu suất cao, công nghệ tiên tiến được thiết kế để vận hành hiệu quả đồng thời giảm thiểu các yêu cầu về dịch vụ kỹ thuật và tổng chi phí bảo trì. Đặc biệt, trong lĩnh vực gia công cơ khí, hệ thống thiết bị giám sát đóng một vai trò quan trọng trong việc tự động hoá và vận hành quá trình gia công kim loại [1]. Hiện nay, với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ kỹ thuật cảm biến và trí tuệ nhân tạo, nhu cầu về việc giám sát trực tuyến quá trình cắt đã dần trở thành điểm nóng nghiên cứu [2, 3]. Giám sát hiệu quả có thể giảm đáng kể chi phí sản xuất trong khi vẫn duy trì chất lượng của sản phẩm [4]. Ngoài ra, một hệ thống giám sát tự động cũng sẽ giảm chi phí nhân công để kiểm soát dây chuyền sản xuất và hạn chế đến mức tối thiểu tai nạn lao động [5].

Trong lĩnh vực gia công cơ khí chính xác, mòn dụng cụ cắt là một trong những yếu tố chính ảnh hưởng đến tính toàn vẹn bề mặt, độ chính xác kích thước và năng suất tổng thể trong gia công CNC. Trong sản xuất hiện đại, đặc biệt là khi gia công các vật liệu khó cắt như thép cứng SKD11, việc giám sát tình trạng dụng cụ trở nên cấp thiết để hạn chế hư hỏng dụng cụ cắt mang tính ngẫu nhiên và đảm bảo chất lượng sản phẩm đồng nhất [4].

Việc sử dụng máy trung tâm gia công phay CNC đa trục, đặc biệt là cấu hình phay đứng 5 trục, mang lại tính linh hoạt và độ chính xác đáng kể trong sản xuất các chi tiết cơ khí phức tạp. Tuy nhiên, ứng xử động lực học của các bộ phận trung tâm gia công CNC giữa dụng cụ cắt và phôi gây ra sự thay đổi về lực cắt và rung động, nhất là khi dụng cụ cắt bị mòn. Một trong những phương pháp giám sát tình trạng dụng cụ cắt đáng tin cậy trong quá trình gia công phay là phân tích các đặc trưng của tín hiệu rung động với thiết bị giám sát rung động không dây, sử dụng loại cảm biến gia tốc [6]. Bản chất của quá trình gia công phay đã được xây dựng trên các mô hình động lực học, với hiện tượng vật lý nổi bật là rung động do sự tiếp xúc không liên tục giữa phôi và dụng cụ cắt trong quá trình gia công gây ra [7]. Wang và các cộng sự đã xác định rằng các mức độ rung động được tạo ra trong quá trình phay tăng lên khi tình trạng dao phay mất dần khả năng bóc tách kim loại [8], và tính khả thi của việc áp dụng phân tích tín hiệu rung động cho chẩn đoán tình trạng dụng cụ cắt trong các quy trình phay đã được chứng minh bởi nhiều nghiên cứu sau đó [9, 10]. Phương pháp giám sát tình trạng dụng cụ cắt dựa trên việc giám sát tín hiệu rung động đặc biệt hữu ích do tính chất không làm thay đổi kết cấu hệ thống máy, khả năng xử lý dữ liệu theo thời gian thực và khả năng thích ứng với nhiều hoạt động trong gia công phay.

Mặc dù đã có rất nhiều nghiên cứu về giám sát tình trạng dụng cụ cắt trong quá trình gia công phay, song việc ứng dụng

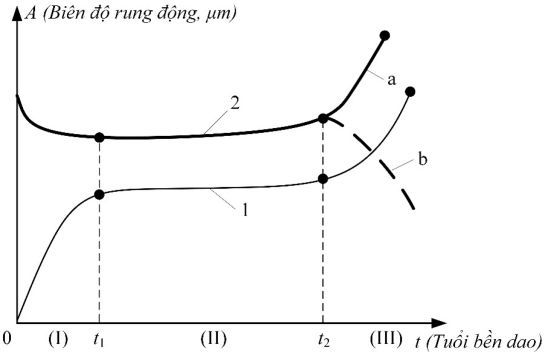
được các kết quả này vào thực tế sản xuất vẫn còn khoảng cách lớn. Các phương pháp tiếp cận truyền thống thường dựa vào lực cắt, cảm biến phát xạ âm thanh, xử lý ảnh… mặc dù có độ chính xác cao, nhưng chỉ phù hợp trong môi trường thực nghiệm, đòi hỏi phải tích hợp sâu vào hệ thống máy công cụ và khó áp dụng trong sản xuất công nghiệp theo thời gian thực [3, 11]. Giám sát dựa trên phân tích rung động hệ thống công nghệ tuy đã được công nhận là một giải pháp thay thế tin cậy do ít bị ảnh hưởng bởi môi trường gia công và không làm thay đổi kết cấu hệ thống máy [3]. Tuy nhiên, phương pháp này đang tồn tại hạn chế do phương pháp và vị trí gá đặt cảm biến chưa phù hợp, kết quả đo tín hiệu rung động vẫn còn đang pha trộn tín hiệu từ nhiều nguồn rung động: trục chính, cơ cấu truyền động, môi trường… chưa tách được dạng tín hiệu rung động cưỡng bức với nguyên nhân mòn dao [6]. Bên cạnh đó, phần lớn các nghiên cứu chỉ tập trung vào máy phay CNC 3 trục, chưa khai thác đầy đủ bối cảnh động lực học phức tạp của máy phay CNC 5 trục [11, 12]. Ngoài ra, phân tích tín hiệu rung động với các tham số đặc trưng miền tần số hứa hẹn đem lại mối tương quan chặt chẽ hơn với quá trình mòn dao, song chưa có nhiều nghiên cứu một cách hệ thống cho phương pháp này, mà hầu hết chỉ dừng ở phân tích phổ FFT (Fast Fourier Transform) thông thường.

Bài báo đề xuất một phương pháp chẩn đoán dụng cụ cắt được thiết kế riêng cho phay CNC 5 trục, các đặc trưng trong miền tần số của tín hiệu rung động sẽ được phân tích để ước tính độ mòn của dao phay ngón theo thời gian thực. Phương pháp đề xuất được xác thực thông qua mô hình thực nghiệm trên phôi thép SKD11, sử dụng dao phay ngón hợp kim liền khối phủ AlCrN cho quá trình phay bề mặt.

2. Tổng quan vấn đề nghiên cứu

2.1. Mối quan hệ giữa biên độ rung động và mòn dao

Đối với phương pháp gia công phay, chuyển động của dụng cụ cắt gây ra một số tác động vật lý lên vùng cắt. Các yếu tố này bao gồm thông số cắt, lực cắt, rung động, v.v. Trong đó, rung động có thể được coi là yếu tố nổi bật nhất. Rung động của dụng cụ cắt là do sự tương tác của hệ thống đàn hồi trong quá trình cắt. Trong quá trình tương tác này, có sự dịch chuyển tương đối giữa dụng cụ cắt và phôi [13]. Rung động chủ yếu là do hành vi động lực học của quá trình cắt trong các điều kiện cắt khác nhau. Nguồn rung động từ vùng cắt là kết quả của các quá trình ma sát và biến dạng [14]. Trong quá trình tạo phoi, rung động được tạo ra do năng lượng đàn hồi được giải phóng tức thời khi vật liệu được bóc tách phá vỡ liên kết cấu trúc. Các quá trình này tạo ra sóng đàn hồi lan truyền qua dụng cụ cắt, phôi và các bộ phận máy. Chính từ những thay đổi về bản chất của quá trình cắt này gây ra những thay đổi về thông số của tín hiệu rung động [15, 16].



Hình 1. ***1 – Mối quan hệ giữa biên độ rung động với các giai đoạn mòn của dao phay [6, 16]; 2 – Biên độ rung của hệ thống công nghệ; a – Dụng cụ cắt hư hỏng do mòn, b – Dụng cụ cắt hư hỏng do phá hủy***

Mặt khác, sự thay đổi hình dạng của dụng cụ cắt khi bị mòn làm gia tăng diện tích tiếp xúc giữa dao và phôi là nguyên

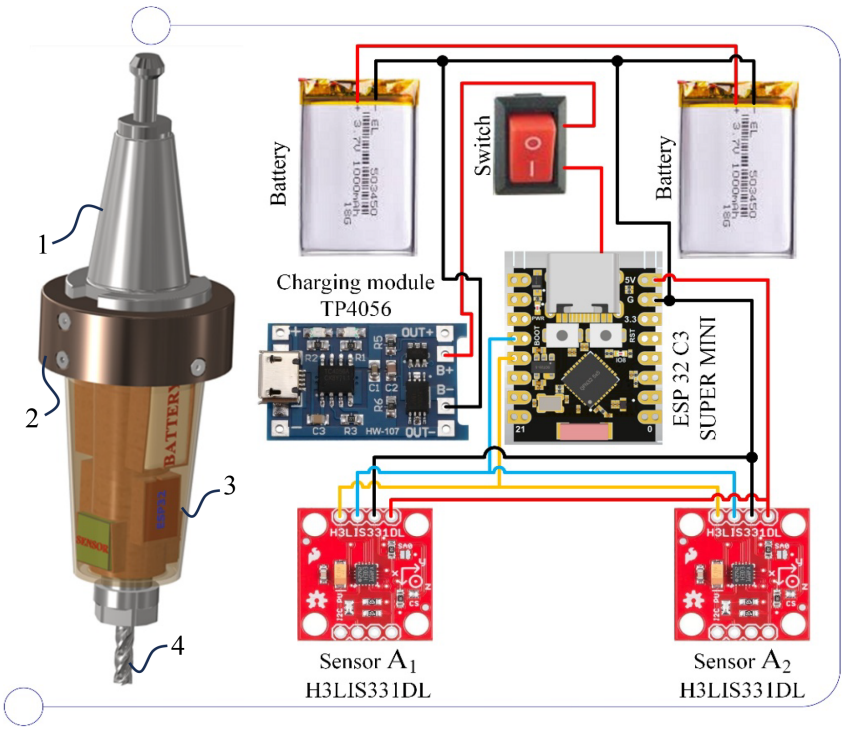
nhân chủ yếu làm tăng lực cắt và gây ra rung động cưỡng bức [6]. Do đó, xem xét mối liên hệ giữa rung động cưỡng bức với độ mòn của dụng cụ cắt sẽ giúp phát triển và hoàn thiện hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ cắt trong gia công phay CNC.

Mối liên hệ chặt chẽ giữa biên độ rung động và mòn dụng cụ cắt được thể thiện thông qua quy luật mòn dao, gồm 3 giai đoạn cơ bản (Hình 1) [6, 16]. 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 thảm 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.

2.2. Phương pháp giám sát rung động dao phay với công nghệ không dây

Công việc giám sát tình trạng dụng cụ cắt trên máy phay CNC 5 trục là tương đối phức tạp. Đặc biệt là cảm biến phải được lắp đặt gần vùng cắt nhất có thể để giảm thiểu sai số đo mức tối thiểu. Phương án tối ưu được đề xuất sẽ bố trí cảm biến trên Đài dao cùng với các yêu cầu sau:

- Cảm biến của thiết bị phải được đặt gần vùng cắt nhất có thể;
- 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;
- Thiết bị cung cấp các thao tác đo nhanh và chính xác;
- Thiết bị phải phù hợp với nhiều loại máy phay CNC 5 trục phổ biến trong sản xuất;
- Thiết bị truyền tín hiệu bằng công nghệ không dây.



Hình 2. ***Cấu tạo của thiết bị giám sát rung động công nghệ không dây***

1 - Đầu BT-40, 2 – Vòng gá, 3 – Thiết bị giám sát rung động, 4 - Dao phay

Với phương án thiết bị giám sát rung động được lắp cố định với Đài dao, có nghĩa là thiết bị sẽ quay cùng với dụng cụ cắt trong quá trình gia công. Thiết bị bao gồm: Cảm biến gia tốc 3 trục H3LIS331DL, vi điều khiển ESP32-C3 Super mini, mạch sạc TP4056 và Pin nguồn. Tín hiệu rung động sẽ được thiết bị thu và truyền tín hiệu bằng công nghệ không dây đến máy tính cá nhân với phần mềm Serial monitor/ Arduino cài sẵn, tại đây dữ liệu được ghi lại và phân tích bằng thuật toán phân tích trên Matlab. Thiết bị giám sát dụng cụ cắt được đề xuất sử dụng cảm biến gia tốc có khả năng chống lại các tác động bên ngoài mà không ảnh hưởng đến chất lượng tín hiệu, như: quá trình tạo phoi có tác động đến thiết bị, chất làm mát được sử dụng trong quá trình gia công.

Thiết bị đề xuất sẽ được chế tạo bằng công nghệ gia công bồi đắp vật liệu nhựa (in 3D nhựa). Do đó, mô hình 3D sau khi được thiết kế hoàn chỉnh đã được thực hiện các bước cân bằng động trên phần mềm Ansys và Inventor nhằm tối ưu hóa hình dạng và loại bỏ yếu tố mất cân bằng động của thiết bị do việc bố trí các bộ phận gây ra.

Một phương pháp hiệu chuẩn thiết bị sau khi được chế tạo cũng đã được đề xuất. Phương pháp sử dụng bổ sung thêm 1 cảm biến gia tốc A2 lắp đối xứng với cảm biến gia tốc A1 trên trục quay của thiết bị. Tham số "Giá trị hiệu dụng trung bình" của miền thời gian được lựa chọn để tính giá trị trung bình tín hiệu của các mẫu. Kết quả thực nghiệm cho thấy, tín hiệu đảm bảo độ ổn định với 350 tín hiệu/giây, hiệu giá trị tham số đầu ra các cặp trục đối xứng của 2 cảm biến nằm trong dải biên độ sai số cho phép của cảm biến ±1g [17], và sai số với giá trị rất nhỏ. Do đó, thiết bị đảm bảo độ tin cậy để ứng dụng cho các mô hình thực nghiệm.

2.3. Đặc trưng tín hiệu rung động dụng cụ cắt trong miền tần số

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

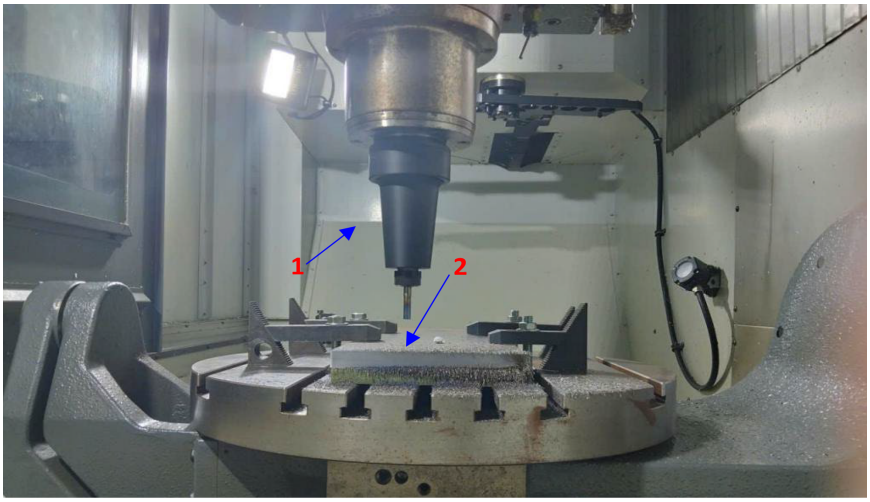
STT	Tham số đặc trưng	Mô tả
1	Phổ tần số lớn nhất (maximum)	$S_{MAX} = \max\left(S(f)_i\right)$
2	Tổng biên độ phổ tần số (sum)	$S_{SUM} = \sum_{i=1}^{n} S(f)_i$
3	Phổ tần số trung bình (mean)	$S_{\mu} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S(f)_i$
4	Phương sai phổ tần số (variance)	$S_V = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S(f)_i - S_{\mu}\right)^2}{n-1}$
5	Độ lệch phổ tần số (skewness)	$S_S = \frac{1}{n}\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S(f)_i - S_V\right)^3}{S_{\sigma}^3}$
6	Độ nhọn phổ tần số (kurtosis)	$S_K = \frac{1}{n}\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S(f)_i - S_V\right)^4}{S_{\sigma}^4}$
7	Phổ công suất đỉnh tương đối (relative spectral peak)	$S_{RSP} = \frac{S_{\max}}{S_{\mu}}$

Trong đó: $S(f)_i$ - phổ công suất ở tần số thứ *i-th*; *n* - số lượng bậc tần số trong phổ.

Tín hiệu rung động thu thập được từ cảm biến gia tốc thường ở dạng sóng phức tạp, chứa cả tín hiệu nhiễu và tín hiệu hữu ích. Việc chuyển đổi sang miền tần số thông qua biến đổi Fourier nhanh (FFT) giúp trích xuất các thành phần đặc trưng liên quan trực tiếp đến trạng thái dụng cụ. 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. Phương pháp đề xuất sử dụng 7 tham số đặc trưng của miền tần số để trích xuất tín hiệu rung động (Bảng 1) [18]. 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.

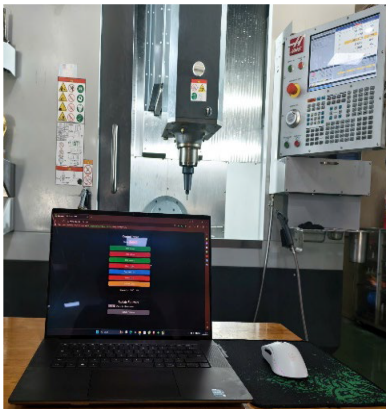
3. Phương pháp thực nghiệm

3.1. Trung tâm gia công phay CNC 5 trục và phôi thực nghiệm



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

b) Máy đo mòn dao Camera kính hiển vi kim tương Olympus GX51



c) Máy tính cá nhân thu nhận tín hiệu rung động từ thiết bị giám sát rung động không dây

d) Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ-210

e) Dao phay X-Power Sem811080

Hình 4. ***Thiết lập mô hình thực nghiệm***

Thực nghiệm được thực hiện trên Máy phay CNC 5 trục HAAS UMC-1000ss (Hình 4). Tốc độ trục chính từ 12.000 ÷ 15.000 vòng/phút, công suất 22.4 kW, Loại đầu trục chính ISO40 (BT40/CAT40), Độ chính xác định vị (X,Y,Z) ± 0.005 mm, hệ điều khiển - HAAS CNC.

Phôi dùng thực nghiệm chẩn đoán tuổi bền dao phay được tiến hành trên thép chưa qua nhiệt luyện SKD11 tiêu chuẩn nhật bản (JIS-G4404). Thép SKD11 được chọn nhờ đặc tính cơ lý ưu việt, phản ánh sát thực tế gia công. Thép SKD11 là loại thép hợp kim được sử dụng phổ biến trong gia công khuôn mẫu [19]. Thép SKD11 có độ cứng và độ bền nén cao, độ dai va đập và tính chống biến dạng tốt. Bên cạnh đó, nó có khả năng giữ được độ cứng ở nhiệt độ cao trong thời gian dài (Bảng 2). Chính vì vậy thép SKD11 thường được dùng trong sản xuất khuôn đùn, khuôn ép nhựa, khuôn đúc áp lực… hoặc những chi tiết có yêu cầu tính chất sử dụng đặc biệt. Khi gia công vật liệu này, dao phay sẽ phải chịu điều kiện làm việc rất khắc nghiệt do lực cắt và mài mòn lớn, giúp phản ánh rõ ràng sự thay đổi tuổi bền của dao theo thời gian. Mặt khác, do quá trình nhiệt luyện được thực hiện theo quy trình chuẩn, thép SKD11 đạt được cấu trúc vi mô đồng đều, ổn định cơ tính cao, ít biến dạng trong quá trình gia công. Điều này đảm bảo rằng các kết quả đo lường độ mòn dao phay được chính xác và tính lặp tốt trong quá trình thực nghiệm.

Bảng 2. Tính chất cơ lý của thép SKD11 [18]

Đặc tính cơ lý	Giá trị
Khối lượng riêng (kg/m^3)	8400
Nhiệt độ nóng chảy (^{o}C)	1733
Hệ số giãn nở nhiệt (10^{-6}/k)	11
Nhiệt dung riêng (J/kg^{o}C)	461
Độ dẫn nhiệt (W/m.K)	20,5

3.2. Dụng cụ cắt và chiến lược chạy dao

Dụng cụ cắt được lựa chọn để chuẩn đoán tuổi bền theo thời gian thực là dao phay ngón hợp kim nguyên khối X-Power Sem811080 (4 lưỡi cắt, đường kính Ø8 *mm*), lớp phủ AlCrN, chuyên dụng cho gia công tinh và bán tinh đối với các vật liệu khó cắt như: SKD11, SKH51, SUS304.... Chất lượng của dao phay đáp ứng theo 5 tiêu chuẩn quốc tế: ISO 9001, ISO 513, DIN 6527 và DIN 7160, Tiêu chuẩn phủ AlCrN [20].

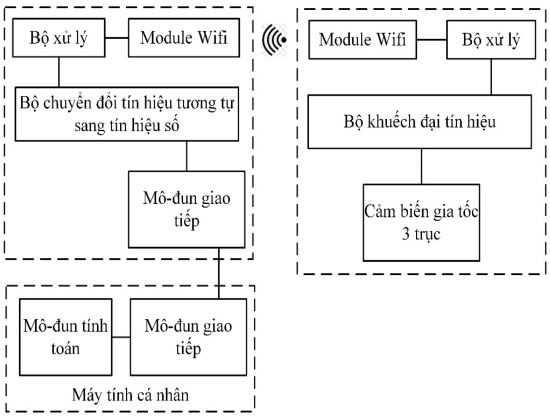
Phương pháp chuẩn đoán tuổi bền dao theo thời gian thực với chế độ cắt bán tinh (TCVN 2511: 1995 – Cấp độ nhám 5 – Ra: 5 ÷ 2.5 µm và Rz: 20 ÷ 10 µm) đã được chỉ định trong sản xuất công nghiệp [21]: v = 1250 *vòng/phút*, chiều sâu cắt a_e = 0.2 *mm*, lượng chạy dao răng f_z = 0.05 *mm/răng*, bề rộng cắt a_p = 16 *mm* (chiều dày phôi). Thực hiện hàng loạt lần cắt theo chiều rộng của phôi (210 *mm/mỗi lần cắt*) cho đến khi vượt giá trị độ nhám bề mặt cho phép tương ứng tuổi bền của dao phay.

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 ±0,01 µm). 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.

Các tham số đặc trưng miền tần số 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.

3.3. Hệ thống đo rung động và xử lý tín hiệu

Hệ thống đo rung động bao gồm các thành phần sau: cảm biến ba trục, mô-đun khuếch đại tín hiệu, mô-đun WiFi, bộ chuyển đổi tương tự sang kỹ thuật số và máy tính (Hình 5). Phần mềm xử lý tín hiệu rung bao gồm 2 module chính, đó là phương pháp đa tạp tần số thời gian và bộ lọc Kalman để giảm nhiễu dữ liệu.

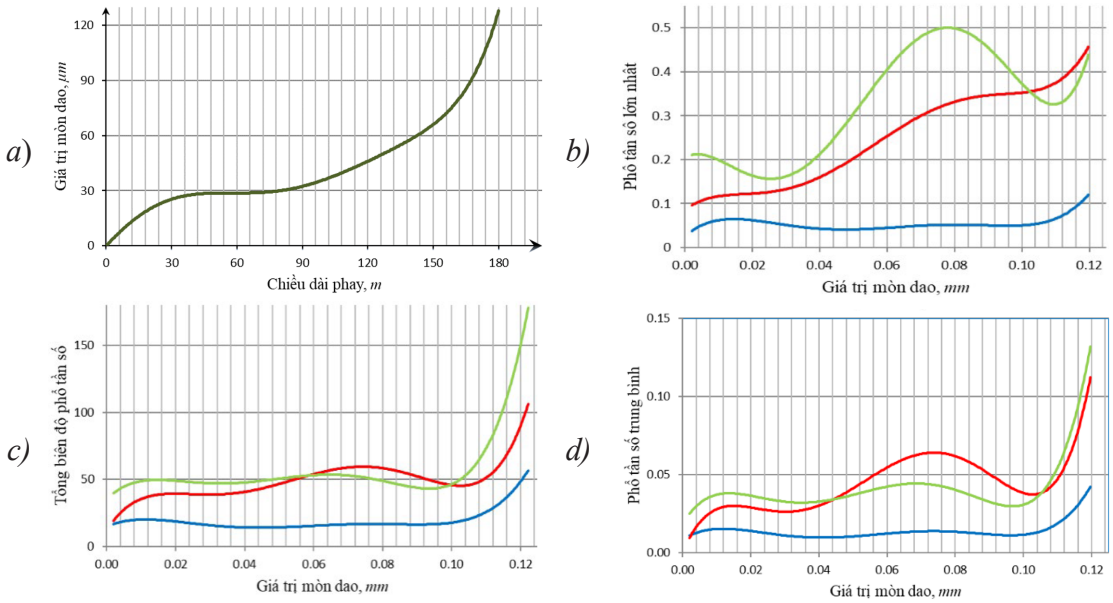


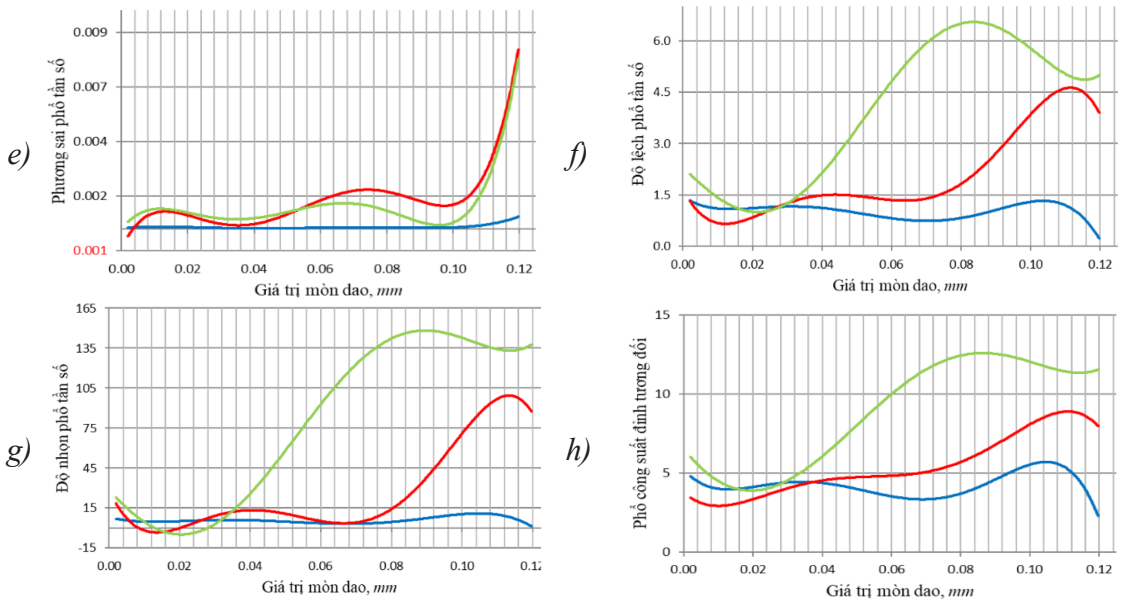
Hình 5. ***Hệ thống đo rung động xử lý tín hiệu***

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. Tín hiệu sẽ được xử lý lọc nhiễu bằng thuật toán Kalman có sẵn trên phần mềm Matlab đối với 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 tần số.

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 63,6*m*. Thiết bị giám sát rung động dao phay được thiết kế với cảm biến H3LIS331DL và ESP32-C3 đã được kiểm chứng độ lặp lại và độ tin cậy trong nhiều chu kỳ cắt, tín hiệu luôn đảm bảo sự ổn định ngay cả trong môi trường gia công khắc nghiệt ở giai đoạn cuối – Mòn thảm khốc của tuổi thọ dao phay (giai đoạn này được ghi nhận với biên độ và năng lượng rung động, nhiệt cắt tăng đột biến).





Hình 6. ***Kết quả trích xuất và xử lí tín hiệu rung động trong miền tần số theo các trục X, Y, Z của hệ tọa độ máy phay CNC 5 trục; a) Tuổi bền dao của kết quả thực nghiệm***

X Tín hiệu rung động theo trục X tương ứng với chiều tiến dao S_z

Y Tín hiệu rung động theo trục Y tương ứng với chiều sâu cắt a_e

Z Tín hiệu rung động theo trục Z tương ứng với chiều rộng cắt a_p

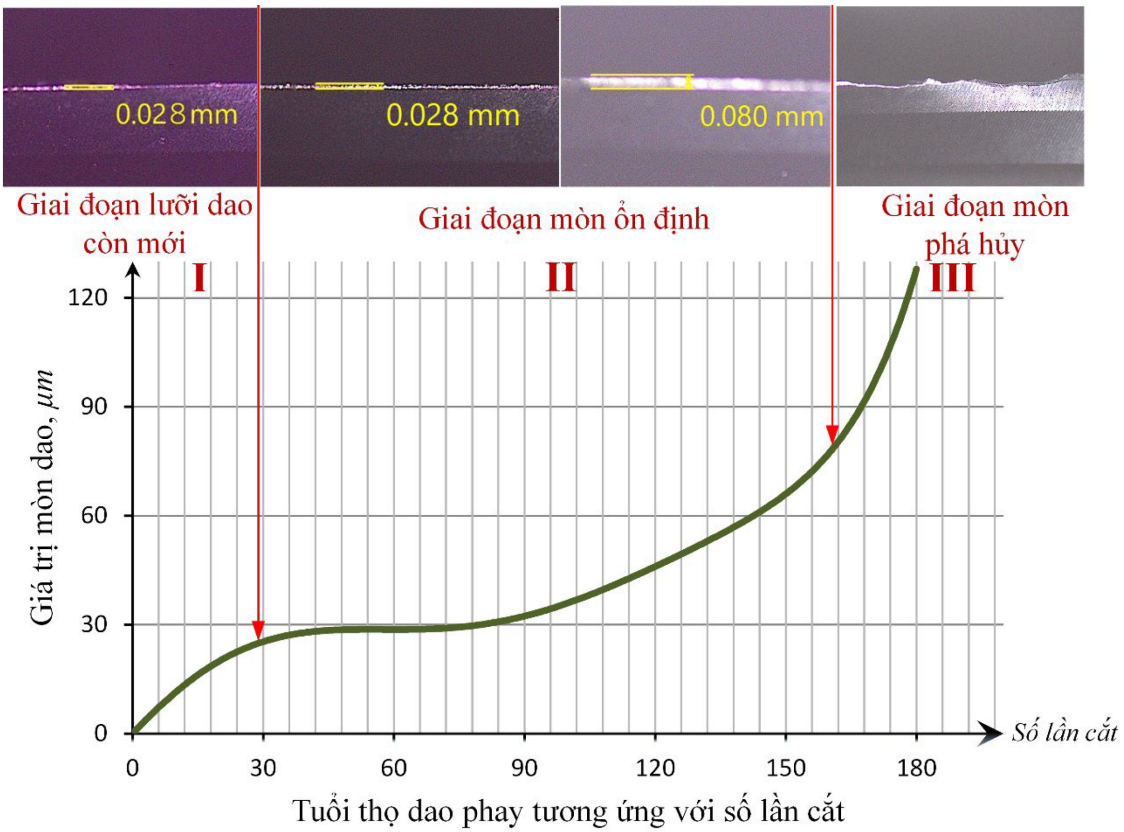
Phân tích kết quả xử lý dữ liệu thực nghiệm của tín hiệu rung động được trình bày trên hình 5 cho thấy: một số tham số đặc trưng phổ tần số được xem xét của tín hiệu rung động theo các trục X, Y, Z là nhất quán và hoạt động theo các giai đoạn mòn của dụng cụ cắt. Giai đoạn chạy rà của lưỡi cắt còn mới sẽ dừng ở mức 28 μm, sau đó chuyển qua giai đoạn mòn ổn định khi đạt giá trị 80 μm, vượt qua giá trị này sẽ chuyển qua giai đoạn mòn phá hủy với độ nhám bề mặt Ra > 5µm và Ra > 10µm (Hình 7). Ở giai đoạn mòn thảm khốc, lưỡi cắt mất hình học tối ưu, xuất hiện nhiều vết mẻ và diện tích tiếp xúc tăng, làm rung động và nhiệt cắt tăng gấp 2÷2.3 lần so với các giai đoạn trước.

Tham số Phổ tần số lớn nhất (Hình 6*b*) với biên độ phổ tần số lớn nhất tăng rõ rệt ở trục Y và Z. Nguyên nhân do sự mòn dao làm tăng rung động cưỡng bức tại tần số đặc trưng của quá trình cắt (thường là tần số ăn dao hoặc bội số của nó).

Các tham số Phổ tần số trung bình (Hình 6*d*) và Độ nhọn phổ tần số (Hình 6*g*) tăng nhẹ ở giai đoạn đầu, sau đó tăng nhanh khi mòn dao > 100 μm. Điều này cho thấy khi dao mòn nặng, năng lượng rung động dịch chuyển lên vùng tần số cao hơn (đặc trưng của hiện tượng bén dao giả, các mảnh vật liệu bám gây mòn lẹo dao, mẻ vi mô trên lưỡi cắt).

Tham số Độ lệch phổ tần số (Hình 6*f*) có xu hướng tăng dần khi giá trị mòn tăng, phổ có sự bất đối xứng lớn hơn. Điều này cho thấy mòn dao làm lệch năng lượng rung động về phía tần số cao.

Tham số Phổ công suất đỉnh tương đối (Hình 6*h*) với đặc trưng là tăng mạnh ở giai đoạn cuối khi giá trị mòn dao > 80 μm. Thể hiện sự biến thiên mạnh của biên độ rung động cực trị theo tần số, đặc trưng cho trạng thái cắt không ổn định.



Hình 7. Giá trị mòn dao với sự chuyển tiếp của các giai đoạn tuổi thọ dao phay

Xét về tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tính tiện lợi khi áp dụng thực tế, các tham số đặc trưng Tổng biên độ phổ tần số (Hình 6*c*) và Phương sai phổ tần số (Hình 6*e*) có thể được sử dụng làm cơ sở toán học cho phương pháp trích xuất thông tin từ các tín hiệu rung động. Tham số đặc trưng Tổng biên độ tần số trong kết quả phân tích phản ánh rõ rệt điểm bắt đầu và kết thúc của quá trình cắt, được xem xét trong mối quan hệ chặt chẽ với giá trị độ nhám bề mặt (Hình 7). Bên cạnh đó, tham số này phản ánh năng lượng rung động tỉ lệ thuận với mức độ mòn dao: ở vùng quá độ giữa cuối giai đoạn II và giai đoạn III năng lượng rung động tăng đột biến, phù hợp với tình trạng mòn dao có cùng thời điểm gây mất ổn định cắt, rung động mạnh hơn ở toàn dải tần số. Tham số đặc trưng Phương sai phổ tần số rất hữu ích cho việc phát hiện các vết nứt mẻ dao xuất hiện trong quá trình cắt, đặc biệt là dấu hiệu nhận biết sự bắt đầu của giai đoạn phá hủy, dấu hiệu giúp giảm thiểu phế phẩm và hoàn thiện quy trình tự động hóa sản xuất với điều khiển thông minh quá trình gia công.

5. Kết luận

Phương pháp trích xuất tham số đặc trưng miền tần số từ tín hiệu rung động cho thấy mối tương quan chặt chẽ với quá trình mòn dao. Thiết bị giám sát dụng cụ cắt không dây được phát triển có tính mới, phù hợp với xu thế sản xuất thông minh. Các kết quả nghiên cứu đạt được có thể ứng dụng rộng rãi cho hầu hết các loại máy phay CNC 5 trục và các loại dao phay ngón thông dụng. Để tăng độ tin cậy và hạn chế nhiễu động do môi trường, cần kết hợp các cảm biến lực và nhiệt độ, đồng

thời ứng dụng các thuật toán học máy để tự động hóa quá trình nhận diện tình trạng dao [22, 23].

Dựa trên các kết quả đã đạt được, phương pháp được đề xuất có thể được triển khai trong các trung tâm gia công phay CNC 5 trục hiện có mà không cần sửa đổi bất kỳ bộ phận phần cứng nào. Phương pháp trích xuất tham số đặc trưng của tín hiệu rung động trong miền tần số với thiết bị giám sát không dây là một công cụ hiệu quả để chẩn đoán mòn dao trong gia công CNC phay 5 trục. Kết quả chỉ ra rằng tham số đặc trưng Tổng biên độ phổ tần số phù hợp nhất với trạng thái mòn của dao, tham số đặc trưng Phương sai phổ tần số rất hữu ích cho việc phát hiện các vết nứt mẻ dao xuất hiện trong quá trình cắt, đặc biệt là dấu hiệu nhận biết sự bắt đầu của giai đoạn phá hủy. 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 tự động trên giao diện điều khiển của máy CNC sẽ giúp tăng độ chủ động cho người vận hành, giảm thiểu rủi ro, đưa ra cảnh báo thay dao kịp thời khi gia công những chi tiết đắt tiền, nâng cao chất lượng sản phẩm.

- 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.

Tuy nhiên, bản chất của phổ tín hiệu rung động chỉ phản ánh sự thay đổi về mặt tần số của tín hiệu và không cung cấp bất kỳ tham chiếu nào về thời gian gia công sản phẩm. Hạn chế này có thể được khắc phục bằng cách sử dụng miền kết hợp Thời gian - Tần số để cung cấp tham chiếu về phổ của tín hiệu rung động theo thời gian.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Oborski, P. (2014). Developments in the integration of advanced monitoring systems. Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 75, pp. 1613-1632.

[2] Shaw, M.C. (2005). Metal Cutting Principles (2nd edition). Oxford University Press, New York, America.

[3] Danil Yu. Pimenov, Munish Kumar Gupta, Leonardo R.R. da Silva, Maitri Kiran, Navneet Khanna, Grzegorz M. Krolczyk (2022). Application of measurement systems in tool condition monitoring of Milling: A review of measurement science approach. Measurement, vol 199, pp. 111503.

[4] Mukherjee, I. A review of optimization techniques in metal cutting processes / I. Mukher-jee, P. K. Ray. – Text : unmediated // Computers & Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50. – P. 15–34.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Altintas, Y. (2012). Manufacturing automation & Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design (2nd edition). Cambridge University Press.

[8] Wang, G.F., Yang, Y.W., Zhang, Y.C., Xie, Q.L. (2014). Vibration sensor based tool condition monitoring using v support vector machine and local ity preserving projection. Sens. Ac-tuators A, Phys., vol. 209, pp. 2432.

[9] Zhang, C., Yao, X., Zhang, J., Jin, H. (2016). Tool condition monitoring and remaining useful life prognostic based on a wireless sensor in dry milling operations. Sensors, vol. 16, p. 795.

[10] Cuka, B., Kim, D.W. (2017). Fuzzy logic based tool condition monitoring for end-milling. Robot. Comput.-Integr. Manuf., vol. 47, pp. 2236.

[11] Hongrui Cao, Xingwu Zhang, Xuefeng Chen (2017). The concept and progress of intelligent spindles: A review. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol 112, pp. 21-52.

[12] Mohanraj, T., Shankar, S., Rajasekar, R., Sakthivel, N.R., Pramanik, A. (2022). Tool condition monitoring techniques in milling process - a review. Journal of materials research and technology, vol 9, pp. 1032-1042.

[13] 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, pp. 051014.1-051014.9.

[14] Faassen, R. (2007). Chatter prediction and control for high-speed milling modelling and ex-periments. Technische Universiteit Eindhoven, p. 6.

[15] Suprock C. A., Jerard R. B., Fussell B. K. (2009). In Situ Chatter Frequency 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.

[16] 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.

[17] STMicroelectronics, "H3LIS331DL datasheet – High-g, low-power 3-axis digital accelerometer." [Online]. Available: https://www.mouser.vn/ProductDetail/STMicroelectro nics/H3LIS331DLTR?qs=TAo1I7FhABsAZFqkqNUSRA%3D%3D&srslti-d=AfmBOoovSv8XTl2wliR_PegVrfDAxxmaweIVS1-Ccd0y4tj-N2-v8OrS.

[18] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnellc, G., Dornfeld, D (2010). Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals- Manufacturing Technology, vol 59, pp. 717-739.

[19] Nghiêm Hùng (1997). Sách tra cứu Thép & Gang thông dụng, Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội.

[20] Universal series/Tools with replaceable inserts – Text: electronic, Website of the Korean company "YG-1". https://16k20.ru/files/Universal_Line_YG-1_2017.pdf. Accessed January 8, 2024.

[21] General engineering standards for time and cutting modes for rationing work performed on universal and multi-purpose machines with numerical control: Part II, Standards for cutting conditions, Moscow: Economics, 2021.

[22] Minghui Cheng, Li Jiao, Pei Yan, Hongsen Jiang, Ruibin Wang, Tianyang Qiu. Xibin Wang (2022). Intelligent tool wear monitoring and multi-step prediction based on deep learning model. Journal of Manufacturing Systems, vol 62, pp. 286-300.

[23] Tanner Jones, Yang Cao (2025). Tool wear prediction based on multisensor data fusion and machine learning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 137, pp. 5213–5225.