Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghệ Đông Á

Thiết kế hệ thống IoT giám sát trạng thái đồ gá dựa trên lực kẹp và rung động trong gia công CNC

Design of an IoT system for monitoring fixture condition based on clamping force and vibration in CNC machining

Bùi Quang Toàn
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghệ Đông Á
Email: toanbq@eaut.edu.vn

Tóm tắt

Nghiên cứu đề xuất thiết kế cơ khí, quy trình chế tạo và phương pháp đánh giá hệ thống Internet vạn vật giám sát lực kẹp và rung động của đồ gá trong phay điều khiển số bằng máy tính. Đồ gá cho chi tiết dạng trụ sử dụng đế thép C45 kích thước 320 mm × 260 mm × 20 mm, cơ cấu kẹp càng, cặp lắp H7/h6, load cell nén 0–5 kN và cảm biến gia tốc ba trục ADXL355. Nút ESP32 lấy mẫu lực ở 80 Hz và rung động ở 4 kHz, lọc, trích xuất đặc trưng lực–rung, rồi truyền dữ liệu và cảnh báo đến máy chủ qua MQTT. Bộ luật nhận diện bốn trạng thái: bình thường, lực kẹp thấp, lỏng cơ cấu và rung động cao. Với lực ngang 380 N, hệ số ma sát 0,25 và hệ số an toàn 1,5, lực kẹp tối thiểu là 2280 N; lực danh định chọn 2500 N. Ứng suất uốn danh nghĩa và độ võng của càng kẹp là 75,0 MPa và 0,043 mm. Dữ liệu tổng hợp được dùng để kiểm tra tính nhất quán của phương pháp, cho R^2 = 0,99996, sai số phần trăm tuyệt đối trung bình 0,58% đối với lực và 1,74% đối với rung, độ trễ trung vị 82 ms và độ chính xác phân loại 96,67%. Nhìn chung, các kết quả cho thấy kiến trúc được đề xuất là khả thi và đáp ứng được các yêu cầu về giám sát, cảnh báo cũng như phân biệt trạng thái trên tập dữ liệu.

Từ khóa: *đồ gá thông minh, gia công CNC, lực kẹp, MQTT, rung động*

Abstract

This study proposes the mechanical design, fabrication procedure, and evaluation method of an Internet of Things system for monitoring clamping force and fixture vibration in computer numerical control milling. The fixture is designed for a cylindrical workpiece and uses a 320 mm × 260 mm × 20 mm C45 steel base, a strap clamp, H7/h6 locating fits, a 0–5 kN compression load cell installed in the force path, and a triaxial ADXL355 accelerometer mounted near the workpiece–fixture interface. An ESP32 node acquires force at 80 Hz and vibration at 4 kHz, filters the signals, extracts force–vibration features, and transmits one-second data and alarm messages to a local server through MQTT. A rule-based classifier identifies four states: normal operation, insufficient clamping, mechanical looseness, and excessive vibration. For a horizontal load of 380 N, a friction coefficient of 0.25, and a safety factor of 1.5, the minimum clamping force is 2280 N, while the nominal value is 2500 N. The nominal bending stress and calculated deflection of the clamp are 75.0 MPa and 0.043 mm, respectively. A synthetic dataset is used to verify the internal consistency of the method, yielding R^2 = 0.99996, mean absolute percentage errors of 0.58% for force and 1.74% for vibration, a median end-to-end delay of 82 ms, and a four-state classification accuracy of 96.67%. Overall, the results demonstrate that the proposed architecture is feasible and meets the requirements for monitoring, alerting, and state discrimination on the dataset.

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

Journal of Science and Technology of East Asia University of Technology

Keywords: *clamping force, CNC machining, MQTT, smart fixture, vibration*

1. Đặt vấn đề

Đồ gá tạo chuẩn định vị, duy trì vị trí và bảo đảm độ cứng vững của phôi trong gia công điều khiển số bằng máy tính (CNC). Lực kẹp quá nhỏ có thể gây trượt hoặc nhấc phôi; lực kẹp quá lớn làm tăng biến dạng đàn hồi và sai số gia công. Các nguyên tắc định vị, kẹp chặt và thiết kế đồ gá chuyên dùng được trình bày trong các tài liệu cơ khí trong nước [1; 2], trong khi cặp dung sai H7/h6 được lựa chọn theo hệ thống dung sai và lắp ghép TCVN [3].

Xu hướng đồ gá hiện đại là tích hợp cảm biến và kết nối số. Tổng quan của Gameros và cộng sự cho thấy vai trò ngày càng lớn của đồ gá có cảm biến trong sản xuất linh hoạt [5, tr. 1–21]. Denkena và cộng sự tích hợp cảm biến vào phần tử kẹp thủy lực để giám sát áp suất, hành trình và lực quá trình [6, tr. 235–244]; Rezvani và cộng sự phát triển ê tô đo đồng thời lực kẹp tĩnh và lực cắt động [7, tr. 1–17]. Zuperl và Cus kết nối đo lường, mô phỏng lực kẹp và ứng dụng đám mây trong một hệ thống đồ gá không gian mạng - vật lý [8, tr. 112–124]. Các nghiên cứu giám sát gia công cũng nhấn mạnh chuỗi xử lý từ cảm biến, trích xuất đặc trưng đến quyết định trạng thái [9, tr. 717–739].

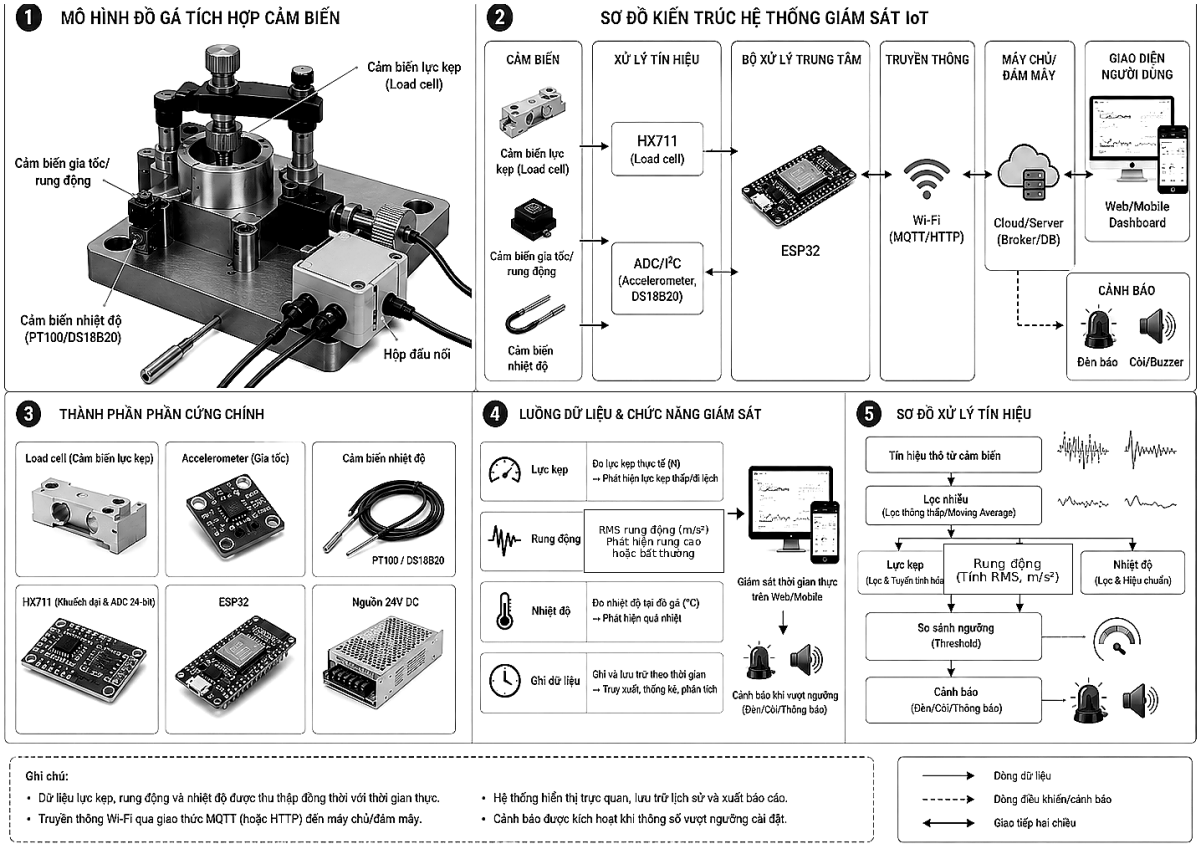
Từ khoảng trống về một giải pháp lắp bổ sung, chi phí hợp lý và có khả năng cảnh báo tại chỗ, nghiên cứu đề xuất: (i) kết cấu đồ gá tích hợp load cell và cảm biến gia tốc; (ii) kiến trúc xử lý biên hai tốc độ và truyền dữ liệu; (iii) bộ quy tắc nhận diện bốn trạng thái; và (iv) quy trình kiểm tra tính nhất quán bằng dữ liệu tổng hợp trước khi triển khai hiệu chuẩn và thí nghiệm truy xuất chuẩn.

2. Thiết kế hệ thống giám sát

2.1. Kiến trúc chức năng và yêu cầu kỹ thuật

Hình 1 mô tả bốn lớp của hệ thống: cảm biến, xử lý tín hiệu, xử lý biên - truyền thông và giao diện người dùng. Load cell được số hóa qua bộ chuyển đổi tương tự - số (ADC) 24 bit; ADXL355 truyền dữ liệu qua giao tiếp ngoại vi nối tiếp (SPI); ESP32 thực hiện lọc, trích xuất đặc trưng và phát cảnh báo. Giao thức Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) được lựa chọn nhờ mô hình công bố/đăng ký và tải bản tin nhỏ; một nghiên cứu trong nước cũng ghi nhận thời gian gửi gói của MQTT thấp hơn giao thức truyền siêu văn bản (HTTP) trong hệ thống Internet vạn vật thời gian thực [4, tr. 51–55]. Dữ liệu telemetry được công bố ở 1 Hz với mức chất lượng dịch vụ (QoS) 0, còn bản tin cảnh báo sử dụng QoS 1 theo chuẩn MQTT 5.0 [10]. Kênh nhiệt độ trên Hình 1 và Hình 6 chỉ giám sát hộp điện, không tham gia bộ phân loại lực - rung.

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54



Hình 1. Kiến trúc tổng thể của hệ thống IoT giám sát đồ gá, gồm mô hình tích hợp cảm biến, phần cứng, luồng dữ liệu và xử lý tín hiệu.

Kiến trúc này tách rõ đường đo, xử lý và cảnh báo; các thông số ở Bảng 1 cho thấy dải lực 0–5 kN và tần số lấy mẫu rung 4 kHz bao phủ miền quan tâm, đồng thời vẫn duy trì mục tiêu độ trễ cảnh báo dưới 250 ms.

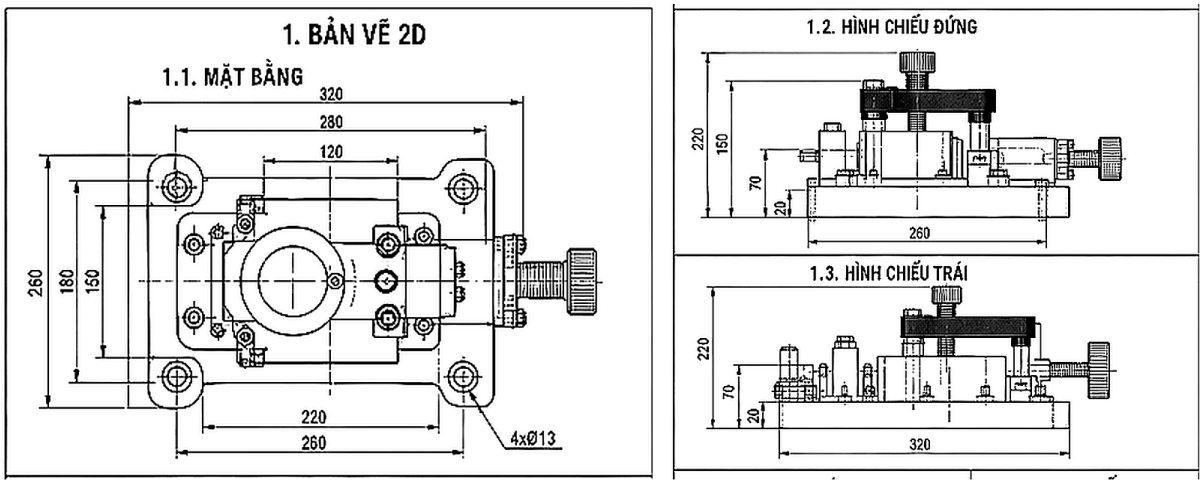
Bảng 1. Các chỉ tiêu thiết kế chính của hệ thống.

Chỉ tiêu	Giá trị thiết kế	Cơ sở lựa chọn
Dải lực kẹp	0–5 kN	Bao phủ lực danh định 2,5 kN và dự phòng quá tải
Sai số kênh lực	≤ ±2% giá trị đo	Sau hiệu chuẩn nhiều điểm
Dải rung phân tích	10–1000 Hz	Bao phủ tần số răng dao và các hài chính
Tần số lấy mẫu rung	4 kHz	Đáp ứng định lý Nyquist và bộ lọc số
Chu kỳ telemetry	1 s	Phù hợp giám sát vận hành
Độ trễ cảnh báo	< 250 ms	Từ nút biên đến dashboard
Bộ đệm sự kiện	10 s trước và 20 s sau cảnh báo	Phục vụ truy nguyên nguyên nhân

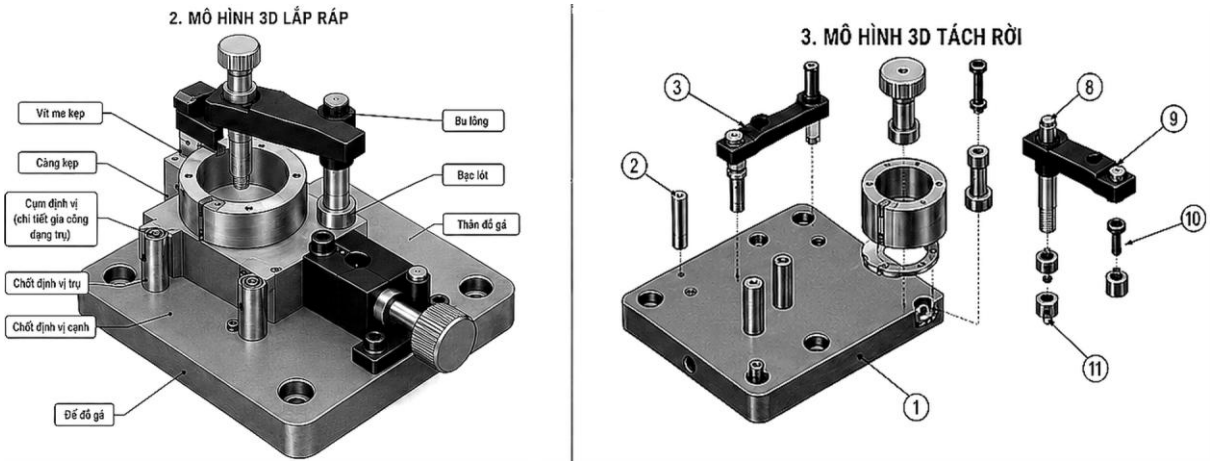
DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

2.2. Thiết kế cơ khí của đồ gá

Đồ gá được thiết kế cho chi tiết dạng trụ có đường kính ngoài danh nghĩa 60 mm. Đế có kích thước bao 320 mm × 260 mm × 20 mm, bốn lỗ lắp Ø13 mm và khoảng cách tâm lỗ 280 mm × 220 mm. Cụm định vị sử dụng mặt tỳ đáy, chốt trụ, chốt trám và chốt cạnh; cơ cấu kẹp càng ép theo phương Z. Bố trí này khống chế đủ bậc tự do nhưng không tạo trạng thái siêu định vị [1]. Vị trí lỗ lắp, cụm định vị và cơ cấu kẹp; bố trí này tạo đường truyền lực rõ qua load cell và dành vị trí cảm biến rung gần phôi



Hình 2. Bản vẽ thiết kế 2D với các hình chiếu, mặt cắt và cặp lắp H7/h6.

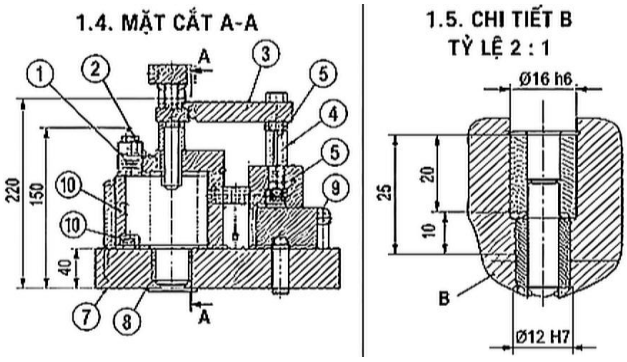


Hình 3. Mô hình 3D lắp ráp và mô hình tách rời của đồ gá giám sát IoT.

Các bề mặt chuẩn trên đế được gia công trong cùng một lần gá; lỗ chốt được doa sau khi lắp ghép thử. Cặp lắp định vị sử dụng miền dung sai H7/h6 theo TCVN 2245:1999 [3]. Hình 4 minh họa mặt cắt cụm kẹp và chi tiết lắp ghép chốt định vị. Các bề mặt truyền lực của vít kẹp, đệm tự lựa và load cell phải đồng trục; độ không song song của hai mặt tỳ load cell không vượt 0,02 mm trên đường kính 25 mm. Bệ cảm biến gia tốc được phay liền trên đế, cách mép vùng gia công khoảng 25 mm để giảm ảnh hưởng của biến dạng cục bộ nhưng vẫn duy trì độ nhạy rung.

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

2.3. Tính toán lực kẹp và yêu cầu chế tạo



Hình 4. Mặt cắt A-A của cụm kẹp và chi tiết lắp ghép chốt định vị H7/h6.

Hình 4 và Bảng 2 cho thấy các yêu cầu công nghệ tập trung tại chuỗi định vị và đường truyền lực: cặp H7/h6 bảo đảm khả năng lắp ghép, còn độ phẳng của đế và đệm tỳ giúp hạn chế tải lệch tâm lên load cell.

Bảng 2. Chi tiết cơ khí và yêu cầu công nghệ.

Chi tiết	Vật liệu	Yêu cầu chính
Đế đồ gá	C45	320 mm × 260 mm × 20 mm; độ phẳng ≤ 0,03 mm
Cụm định vị	C45	Lỗ chốt H7; Ra ≤ 1,6 µm
Chốt trụ/trám	40Cr	Ø12 h6; tôi 45–50 HRC, mài
Càng kẹp	C45	135 mm × 30 mm × 20 mm; bo R3
Vít kẹp	40Cr	M16 × 2; tôi cải thiện
Đệm tỳ	SKD11	Tôi 58–60 HRC; độ phẳng ≤ 0,01 mm
Bệ cảm biến	Al 6061	35 mm × 28 mm × 12 mm; taro M3

Nguồn: thông số thiết kế của nghiên cứu; ký hiệu dung sai theo [3].

Với thành phần lực ngang bất lợi F_h = 380 N, hệ số ma sát bảo thủ µ = 0,25 và hệ số an toàn K_s = 1,5, điều kiện chống trượt được viết:

$$F_{\mathrm{k,min}} = \frac{K_s F_h}{\mu} \tag{1}$$

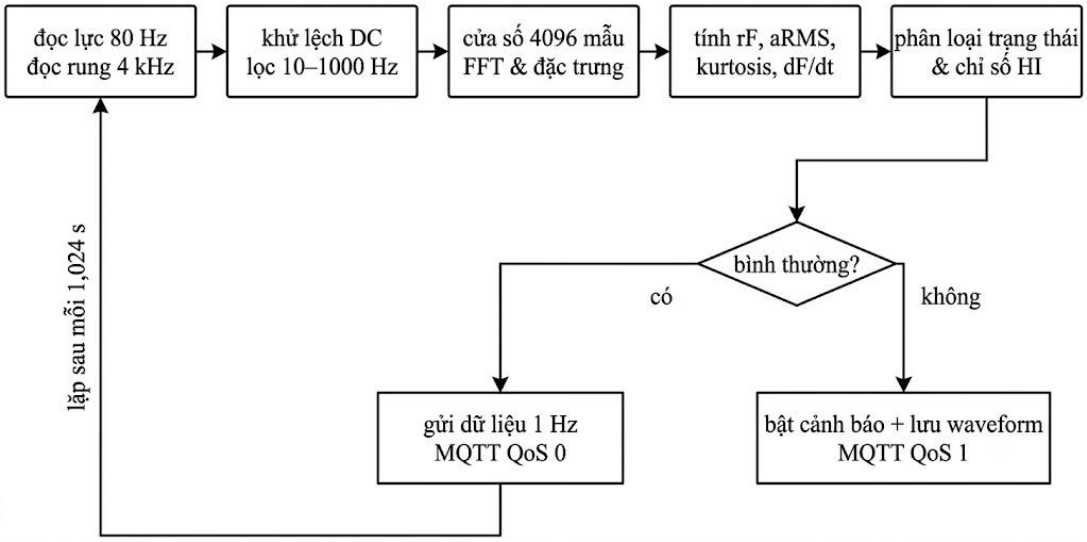
Kết quả $F_{k,min}$ = 2280 N. Lực danh định chọn F_0 = 2500 N, cao hơn 9,65% so với giá trị tối thiểu đã bao gồm hệ số an toàn. Với càng kẹp có tiết diện b × h = 30 mm × 20 mm, chiều dài tính toán L = 60 mm và mô đun đàn hồi E = 210000 N/mm², mô hình dầm công-xôn cho:

$$\sigma_{\max} = \frac{6F_0 L}{bh^2} = 75{,}0\ \mathrm{MPa};\quad \delta = \frac{4F_0 L^3}{Ebh^3} = 0{,}043\ \mathrm{mm} \tag{2}$$

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

Ứng suất và độ võng tính toán nhỏ hơn đáng kể giới hạn chảy của thép C45 tôi cải thiện. Tuy nhiên, cụm kẹp phải được thử tải tĩnh ở 1,25F_0 = 3125 N để kiểm tra biến dạng dư, độ ổn định điểm không và khả năng chịu tải lệch tâm của load cell.

2.4. Xử lý tín hiệu và nhận diện trạng thái



Hình 5. Lưu đồ xử lý tín hiệu và phát hiện bất thường tại nút biên.

Lưu đồ ở Hình 5 cho thấy việc lọc, trích xuất đặc trưng và quyết định trạng thái được thực hiện tại nút biên; dữ liệu tổng hợp được gửi định kỳ, còn dạng sóng chỉ được lưu khi phát sinh cảnh báo để giảm lưu lượng mạng.

3. Phương pháp thu thập và đánh giá

3.1. Phần cứng, lấy mẫu và truyền dữ liệu

Load cell nén 0–5 kN có độ nhạy danh nghĩa 2 mV/V được đọc ở 80 mẫu/s. ADXL355 được chọn nhờ đầu ra số 20 bit, dải ±2/±4/±8 g và tần số dữ liệu đầu ra đến 4 kHz [11, tr. 1, 5, 23–26]. Tín hiệu lực được lọc thông thấp 10 Hz và lấy trung bình trượt 0,5 s. Tín hiệu rung được khử thành phần một chiều, lọc thông dải 10–1000 Hz và chia thành cửa sổ N = 4096 mẫu, tương ứng 1,024 s. Trong (3) và (4), a_i là mẫu gia tốc tổng hợp sau khi loại bỏ thành phần một chiều, ā là giá trị trung bình và s_a là độ lệch chuẩn mẫu.

$$a_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_i^2} \tag{3}$$

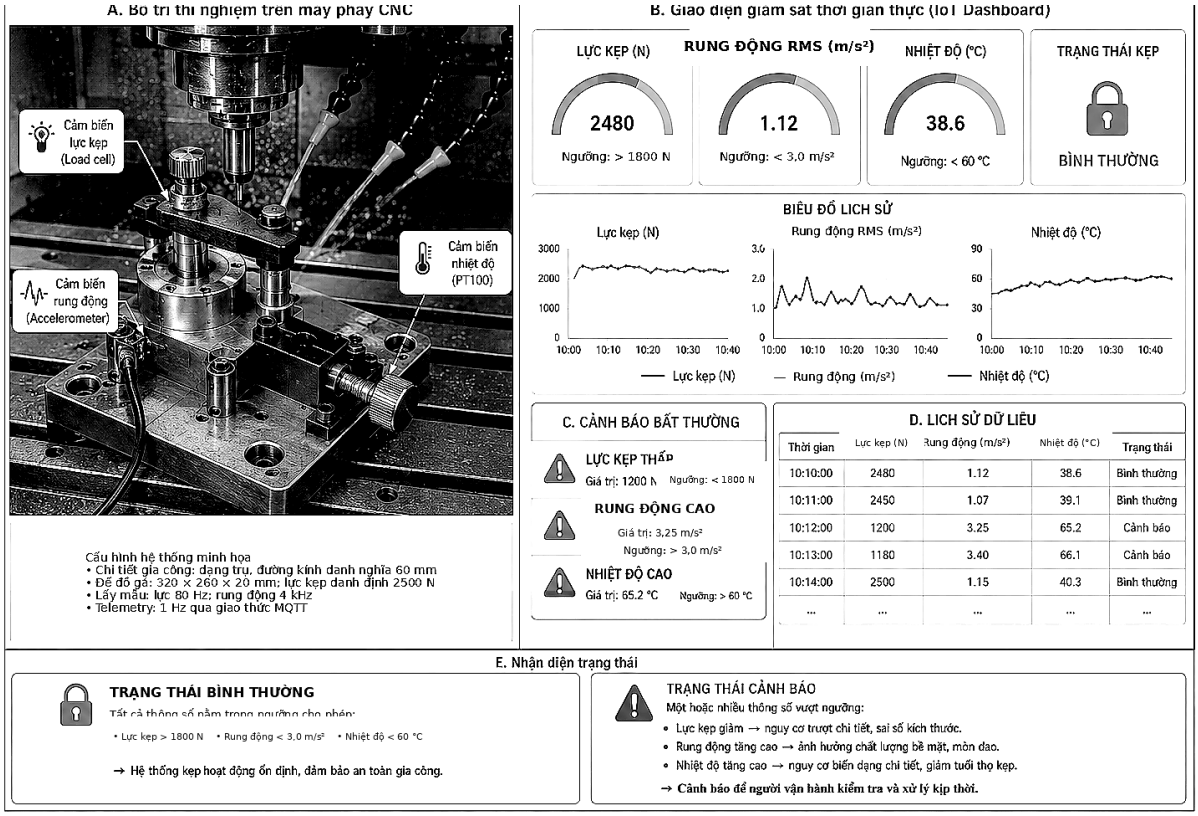
$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^{N}(a_i - \overline{a})^4}{N s_a^4} \tag{4}$$

$$r_F = \frac{\overline{F}}{F_0}; \quad v_F = \frac{d\overline{F}}{dt} \tag{5}$$

Biến đổi Fourier nhanh (FFT) được tính sau cửa sổ Hann trên trục có gia tốc hiệu dụng lớn nhất. Tần số răng dao f_t = zn/60 được dùng để đối chiếu các đỉnh phổ. Bộ luật phân loại áp dụng theo thứ tự: lực kẹp thấp → lỏng cơ cấu → rung động cao → bình thường. Ngưỡng của

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

bộ dữ liệu tổng hợp là $r_{F,low} = 0,72$; $r_{F,loose} = 0,94$; $v_{F,lim} = -5$ N/s; $a_{RMS,lim} = 3,0$ m/s² và $\kappa_{lim} = 4,5$. Trạng thái lỏng được xác định khi $0,72 \le r_F < 0,94$ và $v_F < -5$ N/s hoặc $\kappa \ge 4,5$; trạng thái rung cao yêu cầu $r_F \ge 0,94$ và $a_{RMS} \ge 3,0$ m/s².



Hình 6. Bố trí hệ thống trên máy phay CNC và giao diện giám sát thời gian thực.

Bảng 3. Trạng thái tổng hợp.

Mã	Lực kẹp	Đặc trưng
S0	2500 ± 50 N	a_{RMS} thấp; $\kappa \approx 3$
S1	1500 ± 50 N	$r_F < 0,72$
S2	2400 → 2100 N	$v_F \approx -7,5$ N/s; $\kappa \ge 4,5$
S3	≈ 2450 N	$a_{RMS} \ge 3,0$ m/s²

Bảng 4. Cấu hình thu thập và kiểm tra.

Nội dung	Giá trị
Hiệu chuẩn lực	0–3000 N; 7 điểm
Đối chứng rung	50–800 Hz; 5 điểm
Cửa sổ rung	4096 mẫu; 1,024 s
Số cửa sổ phân loại	30 cửa sổ/trạng thái
Kịch bản phổ Hình 10	n = 3500 r/min; z = 3; f_t = 175 Hz
Telemetry	JSON 1 Hz; MQTT QoS 0

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

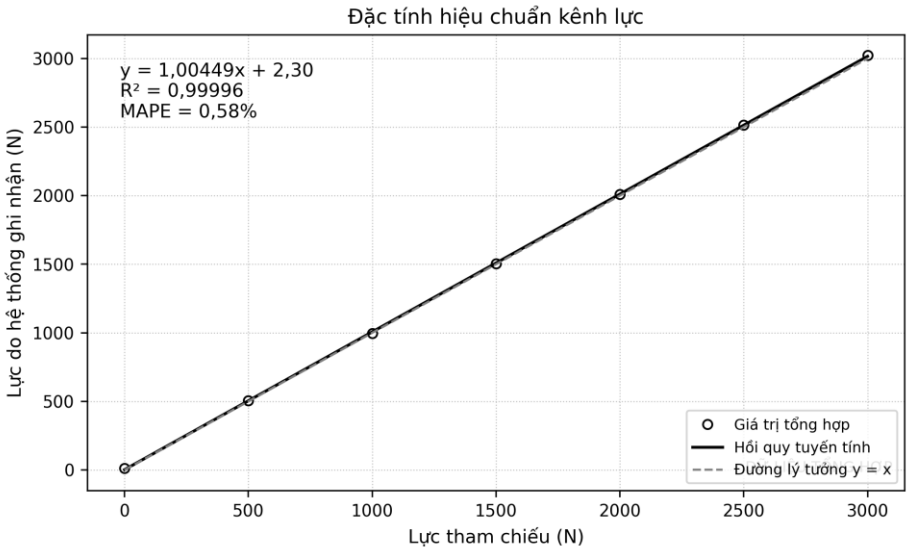
Hình 6 minh họa vị trí cảm biến và giao diện cảnh báo, trong khi Bảng 3–4 ghép kịch bản trạng thái với cấu hình lấy mẫu. Cách bố trí này bảo đảm mỗi trạng thái có điều kiện tạo lập, đặc trưng nhận diện và số cửa sổ đánh giá tương ứng.

4. Kết quả đánh giá trên bộ dữ liệu tổng hợp

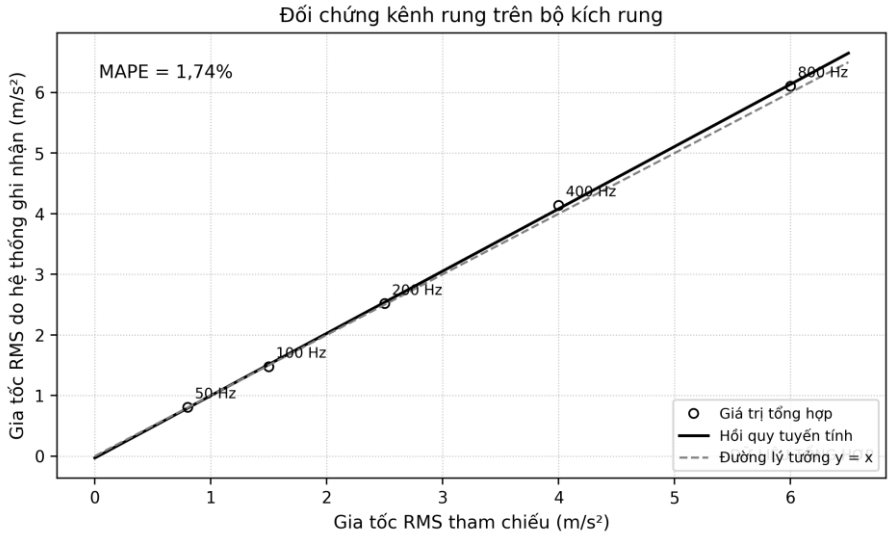
4.1. Đặc tính hiệu chuẩn của hai kênh đo

Các giá trị ở mục này được sinh tổng hợp theo dải đo và sai số mục tiêu trong Bảng 1, nhằm kiểm tra phép tính, cách trình bày và liên kết giữa bảng với hình. Sai số tương đối tại Xref ≠ 0 được xác định theo (6).

$$\varepsilon = \frac{|X_{\mathrm{IoT}} - X_{\mathrm{ref}}|}{|X_{\mathrm{ref}}|} \times 100\%, \quad X_{\mathrm{ref}} \neq 0 \tag{6}$$



Hình 7. Đường hiệu chuẩn kênh lực trên bộ dữ liệu tổng hợp.



Hình 8. Đối chứng kênh rung trên bộ dữ liệu tổng hợp.

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

Bảng 5a. Kênh lực.

F_{ref} (N)	F_{IoT} (N)	ε (%)
0	11,3	—
500	505,1	1,02
1000	996,3	0,37
1500	1505,4	0,36
2000	2009,1	0,46
2500	2513,9	0,56
3000	3022,1	0,74

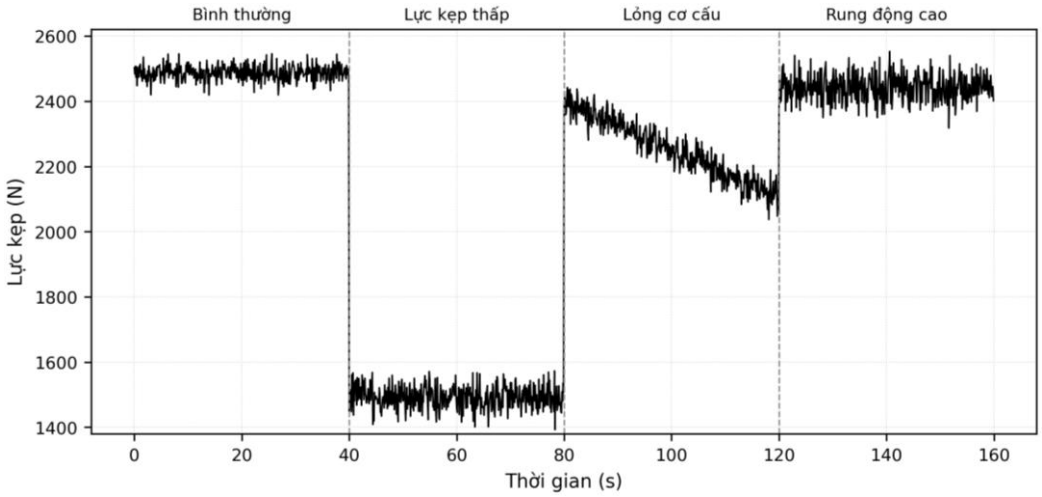
Bảng 5b. Kênh rung.

f (Hz)	a_{ref} (m/s²)	a_{IoT} (m/s²)	ε (%)
50	0,80	0,81	1,25
100	1,50	1,48	1,33
200	2,50	2,52	0,80
400	4,00	4,14	3,50
800	6,00	6,11	1,83

Hình 7, Hình 8 và Bảng 5a–5b cho thấy cả hai kênh đo bám sát giá trị tham chiếu. Hồi quy từ các giá trị trong Bảng 5a cho phương trình $F_{IoT} = 1{,}00449F_{ref} + 2{,}30$ và $R^2 = 0{,}99996$. Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE) của sáu điểm khác 0 N bằng 0,58%; sai số lớn nhất bằng 1,02%. Kênh rung có MAPE bằng 1,74% và sai số lớn nhất bằng 3,50% tại 400 Hz.

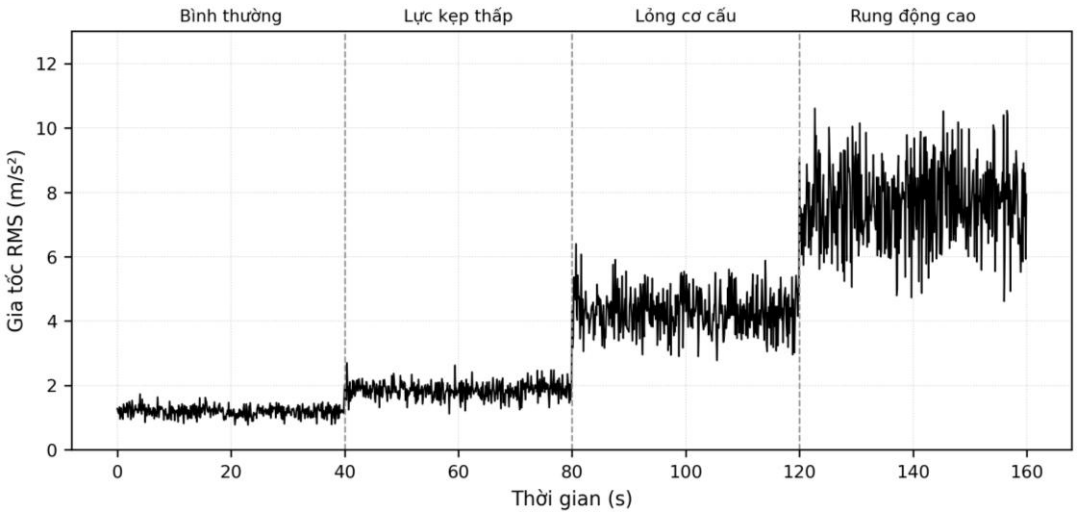
4.2. Đặc trưng lực và rung theo trạng thái

Hình 9 cho thấy hai kênh cung cấp thông tin bổ sung. Trạng thái S1 làm lực giảm về khoảng 1500 N nhưng a_{RMS} chỉ tăng nhẹ; S2 làm lực giảm từ khoảng 2400 N xuống 2100 N trong 40 s, đồng thời tăng độ nhọn; S3 giữ lực gần danh định nhưng rung tăng rõ rệt. Vì vậy, điều kiện lực được xét trước điều kiện rung trong cây quyết định.



Hình 9a. Lịch sử lực kẹp của bốn trạng thái.

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54



Hình 9b. Lịch sử a_{RMS} của bốn trạng thái.

Hình 9a–9b cho thấy hai kênh cung cấp thông tin bổ sung. Trạng thái S1 làm lực giảm về khoảng 1500 N nhưng a_{RMS} chỉ tăng nhẹ; S2 làm lực giảm từ khoảng 2400 N xuống 2100 N trong 40 s, đồng thời tăng độ nhọn; S3 giữ lực gần danh định nhưng rung tăng rõ rệt. Vì vậy, điều kiện lực được xét trước điều kiện rung trong cây quyết định.

Bảng 6. Thống kê đặc trưng theo trạng thái (trung bình ± độ lệch chuẩn).

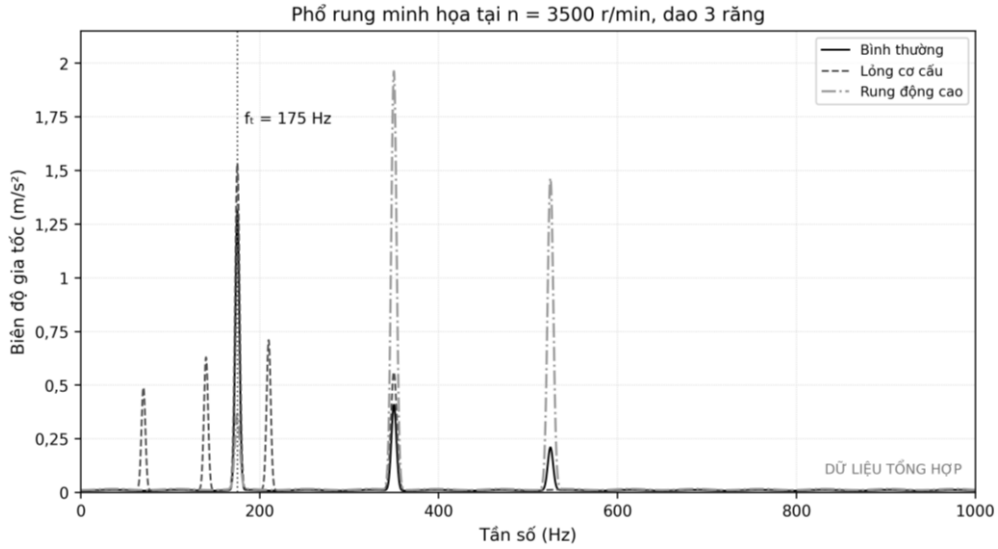
Trạng thái	Lực kẹp (N)	r_F	a_{RMS} (m/s²)	v_F (N/s)	κ
Bình thường	2487 ± 22	0,995	1,20 ± 0,17	-0,2	3,1
Lực kẹp thấp	1494 ± 34	0,598	1,86 ± 0,24	-0,5	3,4
Lỏng cơ cấu	2250 ± 89	0,900	4,31 ± 0,61	-7,5	5,2
Rung động cao	2443 ± 41	0,977	7,82 ± 1,18	-0,7	4,8

Các tỷ số r_F trong Bảng 6 được tính trực tiếp từ $F_0 = 2500$ N và khớp với ngưỡng ở Mục 3.1. Cụ thể, S1 có $r_F = 1494/2500 = 0{,}598 < 0{,}72$; S2 có $r_F = 2250/2500 = 0{,}900$ và $v_F = -7{,}5$ N/s; S3 có $r_F = 0{,}977$ nhưng $a_{RMS} = 7{,}82$ m/s². Việc báo cáo đồng thời r_F, v_F và κ giúp tránh diễn giải sai khi chỉ xem xét một biến đơn lẻ.

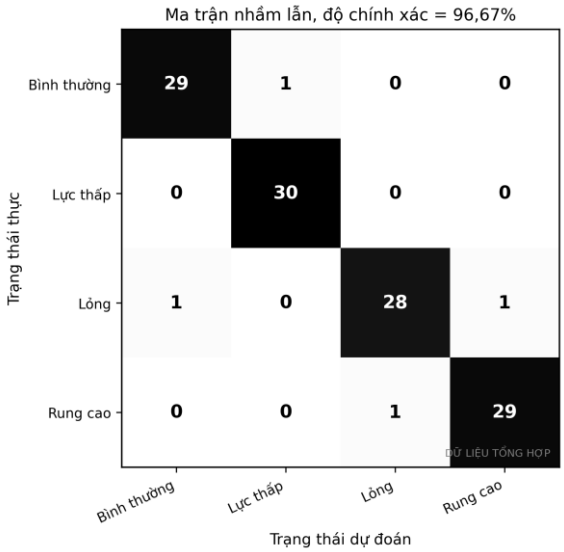
4.3. Phổ rung và khả năng phân loại

Ở n = 3500 r/min và dao z = 3, tần số răng dao bằng $f_t = 175$ Hz. Trạng thái lỏng cơ cấu xuất hiện thêm thành phần tần số thấp và dải bên, trong khi trạng thái rung cao có năng lượng lớn ở 350–525 Hz. Đặc điểm này phù hợp với nguyên tắc giám sát gia công dựa trên đặc trưng thời gian - tần số [9, tr. 717–739].

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54



Hình 10. Phổ rung của ba trạng thái tại 3500 r/min.



Hình 11. Ma trận nhầm lẫn trên 120 cửa sổ dữ liệu.

Ma trận nhầm lẫn cho 116/120 dự đoán đúng, tương ứng độ chính xác 96,67%. Các phần tử ngoài đường chéo gồm một cửa sổ bình thường bị nhận là lực thấp, một cửa sổ lỏng bị nhận là bình thường, một cửa sổ lỏng bị nhận là rung cao và một cửa sổ rung cao bị nhận là lỏng. Các chỉ tiêu trong Bảng 7 được tính trực tiếp từ ma trận này.

Bảng 7. Chỉ tiêu phân loại theo lớp.

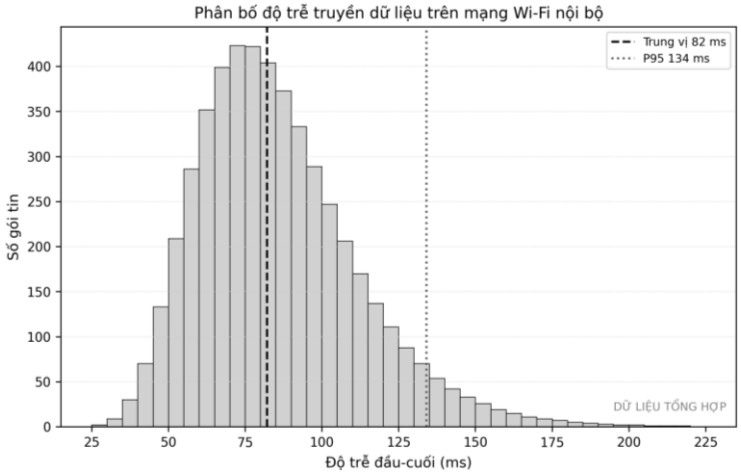
Trạng thái	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
Bình thường	96,67	96,67	96,67
Lực kẹp thấp	96,77	100,00	98,36
Lỏng cơ cấu	96,55	93,33	94,92
Rung động cao	96,67	96,67	96,67

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

Bảng 7 cho thấy F1-score thấp nhất thuộc trạng thái lỏng cơ cấu (94,92%), phù hợp với các nhầm lẫn chuyển tiếp thể hiện ở Hình 11. Độ chính xác cao phản ánh mức tách biệt đã được đặt trước trong dữ liệu tổng hợp, không phản ánh độ khái quát trên dữ liệu xưởng. Khi thử nghiệm thật, tập kiểm tra phải độc lập với tập chọn ngưỡng; cần bổ sung hysteresis và yêu cầu trạng thái bất thường tồn tại liên tục trong ít nhất hai cửa sổ để giảm báo giả ở vùng chuyển tiếp.

4.4. Hiệu năng truyền thông

Độ trễ đầu - cuối được tính từ dấu thời gian tại nút biên và thời điểm dashboard nhận bản tin. Phân bố tổng hợp trên Hình 12 có trung vị 82 ms và phân vị 95% (P95) bằng 134 ms, nhỏ hơn mục tiêu 250 ms. Nghiên cứu trong nước về hệ thống Internet vạn vật thời gian thực cũng cho thấy MQTT có ưu thế về thời gian gửi và độ chập chờn so với HTTP khi bản tin nhỏ [4, tr. 51–55]. MQTT phù hợp cho giám sát và cảnh báo vận hành, nhưng không được dùng làm kênh an toàn duy nhất để dừng máy [10].



Hình 12. Phân bố độ trễ MQTT trên dữ liệu tổng hợp.

Các giá trị ở Bảng 8 đồng thời cho thấy tải bộ xử lý khoảng 42% và dung lượng telemetry khoảng 1,8 MB/h, phù hợp với một nút ESP32 dùng cho giám sát vận hành.

Bảng 8. Hiệu năng truyền thông và lưu trữ.

Chỉ tiêu	Giá trị	Kiểm tra
Độ trễ trung vị	82 ms	< 250 ms
Độ trễ P95	134 ms	Đạt
Mất gói QoS 0	0,18%	Chấp nhận cho telemetry
Tải bộ xử lý nút biên	≈ 42%	FFT 4096 điểm
Telemetry 1 Hz	≈ 1,8 MB/h	Bản tin 500 byte
Dạng sóng 30 s	1,44 MB	3 trục × 4 kHz × 32 bit

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

4.5. Thảo luận và giới hạn của nghiên cứu

Thiết kế đề xuất kết hợp phép đo trực tiếp lực kẹp với rung động ba trục. So với chỉ dùng rung, kênh lực có tính giải thích cao đối với nguy cơ trượt phôi; so với chỉ dùng lực, kênh rung nhạy hơn với lỏng liên kết và bất ổn động lực học. Cách tiếp cận này phù hợp với định hướng đồ gá cảm biến [6, tr. 235–244; 7, tr. 1–17] và hệ thống đồ gá kết nối IoT [8, tr. 112–124]. Xử lý đặc trưng tại nút biên giúp giảm lưu lượng mạng; chỉ dạng sóng của sự kiện bất thường mới được truyền hoặc lưu dài hạn.

Hình 7–12 sử dụng dữ liệu tổng hợp nên chưa thể suy rộng sai số, độ tin cậy hoặc độ chính xác nhận diện sang môi trường xưởng. Kênh lực 80 Hz chỉ theo dõi lực kẹp tĩnh hoặc biến thiên chậm, không thay thế lực kế áp điện khi cần đo lực cắt động.

5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng thiết kế cơ khí và kiến trúc IoT cho đồ gá giám sát lực kẹp và rung động trong gia công CNC. Lực kẹp tối thiểu được tính là 2280 N và lực danh định chọn 2500 N; ứng suất uốn danh nghĩa của càng kẹp là 75,0 MPa, độ võng tính toán là 0,043 mm. Hệ thống sử dụng load cell 0–5 kN, ADXL355, ESP32 và MQTT; bộ luật phân loại dựa trên r_F, v_F, a_{RMS} và κ.

Trên kết quả dữ liệu thu được, kênh lực có R^2 = 0,99996, MAPE lực 0,58%, MAPE rung 1,74%, độ trễ trung vị 82 ms và độ chính xác phân loại 96,67%. Các số liệu xác nhận sự nhất quán của phương pháp tính và kết quả thu được.

Tài liệu tham khảo

1. Trần Văn Địch (2009). *Đồ gá: Giáo trình dùng cho sinh viên cơ khí thuộc các hệ đào tạo*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
2. Nguyễn Đắc Lộc, Lê Văn Tiến, Ninh Đức Tốn và Trần Xuân Việt (2006). *Sổ tay Công nghệ chế tạo máy*, Tập 2, in lần thứ 6, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
3. TCVN 2245:1999 (ISO 286-2:1988) (1999). *Hệ thống ISO về dung sai và lắp ghép - Bảng cấp dung sai tiêu chuẩn và sai lệch giới hạn của lỗ và trục*, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng, Hà Nội.
4. Thái Vũ Hiền (2022). Đánh giá hiệu năng giao thức MQTT và HTTP trong một hệ thống IoT thời gian thực, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Tập 20, Số 3, tr. 51–55.
5. A. Gameros, S. Lowth, D. Axinte, A. Nagy-Sochacki, O. Craig and H. R. Siller (2017). State-of-the-art in fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 123, pp. 1–21, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.07.004.
6. B. Denkena, D. Dahlmann and J. Kiesner (2016). Production Monitoring Based on Sensing Clamping Elements, *Procedia Technology*, Vol. 26, pp. 235–244, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.032.
7. S. Rezvani, C.-J. Kim, S. S. Park and J. Lee (2020). Simultaneous Clamping and Cutting Force Measurements with Built-In Sensors, *Sensors*, Vol. 20, No. 13, Article 3736, doi: 10.3390/s20133736.

DOI: https://doi.org/10.65153/4p0edc54

8. U. Zuperl and F. Cus (2019). A Cyber-Physical System for Smart Fixture Monitoring via Clamping Simulation, *International Journal of Simulation Modelling*, Vol. 18, No. 1, pp. 112–124, doi: 10.2507/IJSIMM18(1)468.

9. R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell and D. Dornfeld (2010). Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 717–739, doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.

10. A. Banks, E. Briggs, K. Borgendale and R. Gupta (eds.) (2019). *MQTT Version 5.0*, OASIS Standard, 7 March 2019.

11. Analog Devices (2024). *ADXL354/ADXL355: Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers*, Data Sheet, Rev. D, 11 September 2024.