

# MÔ PHÒNG ĐÁP ỨNG DAO ĐỘNG CỦA TAY MÁY ROBOT KHI CHỊU KÍCH THÍCH CƯỜNG BỨC TỪ CHUYỂN ĐỘNG SERVO

SIMULATION OF ROBOTIC ARM'S OSCILLATION RESPONSE WHEN SUBJECT TO FORCED EXCITATION FROM SERVO MOTION

KS. Đỗ Văn Tĩnh

Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: [dvtinh@uneti.edu.vn](mailto:dvtinh@uneti.edu.vn)

## TÓM TẮT

Nghiên cứu mô phỏng đáp ứng dao động của cánh tay robot dưới kích thích cưỡng bức từ servo bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình được kích thích theo dạng  $F(t) = 10\sin(\omega t)$  với tần số 20 Hz, và các đại lượng chuyển vị, gia tốc, năng lượng biến dạng được phân tích. Kết quả cho thấy biên độ dao động rất nhỏ, không gây sai số đáng kể cho chuyển động robot, và hệ thống nhanh chóng ổn định mà không xuất hiện cộng hưởng. Kết quả cung cấp cơ sở định lượng cho thiết kế và điều khiển robot nhằm hạn chế rung và tăng độ chính xác.

**Từ khóa:** Cánh tay robot; Dao động cưỡng bức; Servo; FEM; Năng lượng biến dạng.

## ABSTRACT

The study simulates the vibration response of a robot arm under forced excitation from a servo using the finite element method. The model is excited in the form of  $F(t) = 10\sin(\omega t)$  with a frequency of 20 Hz, and the displacement, acceleration, and deformation energy quantities are analyzed. The results show that the oscillation amplitude is very small, does not cause significant errors in the robot motion, and the system quickly stabilizes without resonance. The results provide a quantitative basis for robot design and control to limit vibration and increase accuracy.

**Keywords:** Robot arm; Forced oscillation; Servo; FEM; Strain energy.

## 1. GIỚI THIỆU

Phân tích động lực học tay máy robot đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo độ chính xác và ổn định của hệ thống trong môi trường công nghiệp. Dao động phát sinh từ servo hoặc tải trọng biến đổi có thể gây sai lệch vị trí và làm giảm tuổi thọ cơ cấu, do đó việc mô phỏng đáp ứng dao động dưới kích thích

cưỡng bức là cần thiết cho tối ưu thiết kế và điều khiển.

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào vấn đề này. Pritz (2018) chỉ ra tầm quan trọng của phân tích phổ tần số để tránh vùng cộng hưởng [1]. Ma & Chen (2019) kết hợp mô phỏng FEM và thực nghiệm để dự đoán chính xác biên độ rung tại các khớp [2].

Gupta và cộng sự (2020) đề xuất tối ưu cấu trúc dựa trên dạng dao động riêng nhằm tăng độ cứng và giảm rung [3]. Kim và cộng sự (2021) chứng minh hiệu quả của việc điều chỉnh tham số servo kết hợp giảm chấn cấu trúc để triệt tiêu rung động [4].

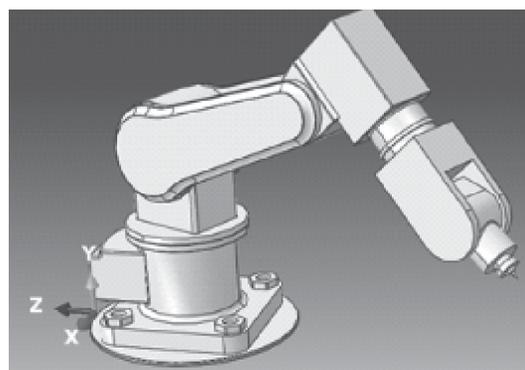
Tại Việt Nam, các nghiên cứu cũng đang phát triển theo hướng thực tiễn. Nguyễn Văn Tú và cộng sự (2021) phân tích ảnh hưởng của vật liệu đến tần số riêng robot SCARA và đề xuất lựa chọn vật liệu có mô-đun lớn để tránh cộng hưởng [5]. Trần Minh Hoàng (2022) nhấn mạnh vai trò của độ cứng khớp nối trong lan truyền và khuếch đại rung động [6].

Tổng quan cho thấy phần lớn nghiên cứu hiện nay tập trung vào phân tích modal hoặc đáp ứng tổng quát, trong khi mô phỏng chi tiết dao động cưỡng bức trong miền thời gian dưới kích thích điều hòa từ servo vẫn còn hạn chế. Bài báo này nhằm khắc phục khoảng trống đó bằng cách mô phỏng đáp ứng động học tay máy robot ở tần số 20 Hz theo phương pháp phần tử hữu hạn, đánh giá các đại lượng chuyển vị, gia tốc và năng lượng biến dạng. Kết quả thu được là cơ sở cho dự đoán sai số động học và thiết kế điều khiển giảm rung cho robot công nghiệp chính xác cao.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Mô hình hình học và điều kiện biên

Mô hình cánh tay robot được xây dựng dựa trên cấu trúc 5 bậc tự do phổ biến trong robot công nghiệp, gồm đế cố định, khớp quay chính, khớp trung gian và tay gấp ở đầu cuối. Hình học mô phỏng được thiết kế trong NX và chuyển sang Abaqus dưới dạng mô hình khối rắn 3D. Hình 1 trình bày mô hình cánh tay robot trong Abaqus.



Hình 1. Mô hình hóa cánh tay robot trong phần mềm Abaqus

Vật liệu sử dụng cho toàn bộ tay máy là thép kết cấu, với các thông số đặc trưng được thể hiện trong bảng 1.

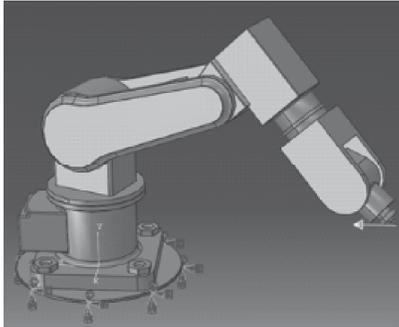
Bảng 1. Thông số vật liệu của thép kết cấu

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng	$\rho$	7850	kg/m <sup>3</sup>
Mô đun đàn hồi	E	200	Gpa
Hệ số Poisson	$\nu$	0.3	-

Để robot được cố định hoàn toàn để mô phỏng điều kiện lắp đặt thực tế khi tay máy gắn vào nền hoặc khung cứng. Lực kích thích động được tác dụng tại đầu cuối cánh tay robot theo phương Z, với biên độ 10 N và tần số servo  $f = 20$  Hz, có dạng:

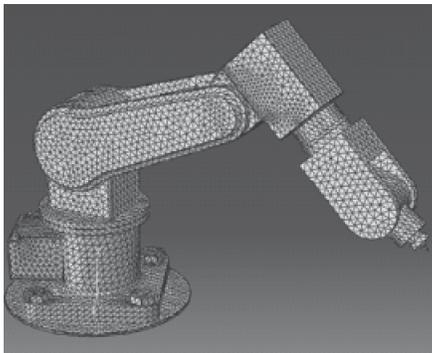
$$F(t) = 10 \sin(\omega t)$$

Phân tích sử dụng mô hình động học theo miền thời gian nhằm đánh giá đáp ứng dao động cưỡng bức. Các đại lượng được trích xuất gồm chuyển vị, gia tốc và năng lượng biến dạng toàn phần của hệ. Hình 2 minh họa quá trình thiết lập điều kiện biên trong Abaqus.



Hình 2. Điều kiện biên của cánh tay robot trong phần mềm Abaqus

Các phần tử sử dụng trong lưới là C3D10 để đảm bảo độ chính xác cao tại các vùng cong và khớp nối. Sau khi hội tụ lưới được kiểm tra, mô hình được sử dụng để tính toán đáp ứng dao động dưới tác động của điều kiện biên đã thiết lập. Hình 3 dưới đây thể hiện quá trình chia lưới cánh tay robot trong phần mềm Abaqus.



Hình 3. Chia lưới cánh tay robot trong phần mềm Abaqus

## 2.2. Thiết lập mô phỏng và các tham số tính toán

Mô phỏng được thực hiện trên Abaqus/Standard với mô-đun Dynamic, Implicit để phân tích dao động cưỡng bức theo miền thời gian, nhằm xác định chuyển vị, gia tốc và năng lượng biến dạng của tay máy robot dưới kích thích tuần hoàn từ servo.

Bài toán giải trong khoảng 0-0,4 s (tương ứng tần số 20 Hz), với thời bước tự động tối đa  $1 \times 10^{-4}$  s để đảm bảo hội tụ. Lực kích thích tại đầu tay máy được mô tả bởi:  $F(t) = F_0 \sin(2\pi ft)$ ,  $F_0 = 10$  N,  $f = 20$  Hz.

Các khớp được giả định liên kết cứng, bỏ qua độ rơ và ma sát. Ma trận khối lượng hình thành theo phương pháp trực tiếp để tăng độ chính xác.

Kết quả trích xuất theo miền thời gian gồm:

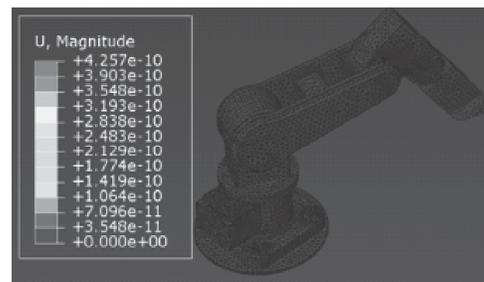
- Chuyển vị cực đại tại đầu tay máy;
- Gia tốc dao động;
- Năng lượng biến dạng toàn phần.

Các dữ liệu này được sử dụng để đánh giá đáp ứng động học và độ ổn định của robot dưới kích thích cưỡng bức.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Phân tích chuyển vị

Đáp ứng chuyển vị của cánh tay robot dưới kích thích cưỡng bức từ động cơ servo được đánh giá dựa trên độ lớn chuyển vị tại trạng thái dao động ổn định. Hình 4 thể hiện phân bố trường chuyển vị trên toàn bộ mô hình khi hệ đã đạt trạng thái ổn định dưới tác dụng lực  $F(t) = 10 \sin(\omega t)$ .



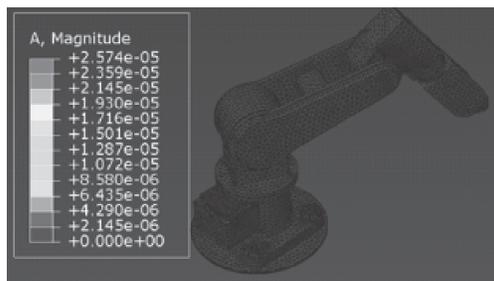
Hình 4. Chuyển vị cánh tay robot dưới tác dụng của lực  $F(t)$ .

Kết quả cho thấy chuyển vị cực đại của hệ đạt  $4.257 \times 10^{-10}$  m, tập trung tại đầu cánh tay robot – vị trí xa đế nhất, nơi biên độ dao động tích lũy lớn nhất. Mặc dù đây là vùng nhạy cảm nhất của tay máy, giá trị chuyển vị cực đại chỉ khoảng 0,426 nm, cho thấy biên độ biến dạng là rất nhỏ. Điều này chứng minh rằng ở tần số kích thích 20 Hz, rung động do servo gây ra hầu như không ảnh hưởng đến độ chính xác định vị trong các ứng dụng robot công nghiệp.

### 3.2. Phân tích gia tốc

Trường gia tốc tại trạng thái ổn định được trình bày trong Hình 5. Gia tốc cực đại của hệ đạt  $2.574 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>, tập trung chủ yếu tại điểm cuối và các khớp xa đế. Giá trị này nhỏ hơn rất nhiều so với gia tốc trọng trường, cho thấy rung động cưỡng bức ở tần số 20 Hz không tạo ra dao động đáng kể đối với cấu trúc robot.

Kết hợp với kết quả chuyển vị vi mô, có thể khẳng định cánh tay robot bằng thép sở hữu độ cứng động học cao, không xuất hiện khuếch đại cộng hưởng trong điều kiện mô phỏng. Điều này đảm bảo tính ổn định và độ bền khi robot làm việc trong môi trường công nghiệp.

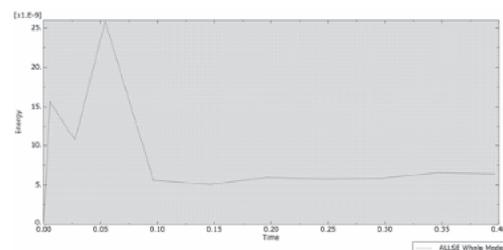


Hình 5. Gia tốc của cánh tay robot dưới tác dụng của lực  $F(t)$ .

### 3.3. Phân tích năng lượng biến dạng

Hình 6 cho thấy sự thay đổi năng lượng

biến dạng của cánh tay robot dưới lực  $F(t) = 10 \sin(\omega t)$ . Trong giai đoạn quá độ (0-0,1 s), năng lượng tăng nhanh và đạt cực đại  $25 \times 10^{-9}$  J tại  $t = 0,055$  s, sau đó giảm mạnh khi hệ tiến vào trạng thái ổn định. Ở trạng thái ổn định, năng lượng duy trì ở mức rất thấp, chứng tỏ tần số kích thích không trùng với tần số cộng hưởng của cấu trúc và không gây khuếch đại dao động. Xu hướng năng lượng giảm dần khẳng định cơ chế tiêu tán hoạt động hiệu quả và mô phỏng đạt độ ổn định cao.



Hình 6. Phân tích phổ năng lượng của cánh tay robot dưới tác dụng của lực  $F(t)$

## 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã mô phỏng thành công đáp ứng động lực học của cánh tay robot 5 bậc tự do bằng thép dưới kích thích cưỡng bức từ servo ở tần số 20 Hz bằng phương pháp phần tử hữu hạn theo thời gian, đồng thời định lượng sai số vị trí do rung động.

Các kết luận chính:

- Ổn định động lực học: Hệ thống đạt trạng thái ổn định sau  $t \approx 0,1$  s. Năng lượng biến dạng toàn phần duy trì rất thấp ( $5-7 \times 10^{-9}$  J), chứng tỏ tần số 20 Hz không gây cộng hưởng nghiêm trọng.

- Sai số định vị và rung động: Chuyển vị cực đại  $4,26 \times 10^{-10}$  m, gia tốc cực đại  $2,57 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>, đều ở mức vi mô. Rung động servo gần như không ảnh hưởng đến độ chính xác, khẳng

định độ cứng động học cao của cánh tay robot thép.

Nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá độ chính xác và độ bền của robot trong môi trường công nghiệp. Nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào đáp ứng động lực học tại các tần số cộng hưởng tiềm năng và giải pháp giảm chấn. ❖

Ngày nhận bài: **06/12/2025**

Ngày phản biện: **17/12/2025**

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pritz, R. A. (2018), “*The necessity of frequency analysis in robot design and control*”. Journal of Mechanical Systems, 12(4), 101-115.
- [2]. Ma, H. B., & Chen, S. B. (2019), “*Finite Element Analysis and Experimental Validation of Parallel Robot Vibration Response*”. International Journal of Robotics and Automation, 34(3), 205-218.
- [3]. Gupta, S. K., et al. (2020), “*Structural optimization of robotic manipulators based on mode shape analysis*”. Engineering Optimization, 52(7), 1189-1205.
- [4]. Kim, G. L., Lee, Y. H., & Park, H. J. (2021), “*Isolation and suppression of servo motor vibration in high-precision robotic manipulators*”. Precision Engineering, 71, 553-561 (Nghiên cứu quốc tế mới).
- [5]. Nguyễn Văn Tú, Lê Anh Dũng, & Hoàng Thị Lan (2021), “*Phân tích modal và ảnh hưởng của vật liệu đến tần số riêng của robot SCARA*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải, 15(2), 45-56.
- [6]. Trần Minh Hoàng (2022), “*Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng khớp nối đến đáp ứng dao động của cánh tay robot công nghiệp*”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 12(1), 1-10.