

NGHIÊN CỨU PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC VÀ ĐẶC TÍNH LỰC CỦA HỆ TRUYỀN ĐỘNG KHÍ NÉN TRONG THIẾT BỊ LEG PRESS

STUDY ON KINEMATIC ANALYSIS AND FORCE CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC DRIVE SYSTEM IN LEG PRESS EQUIPMENT

Trương Thị Thùy Trang¹, Nguyễn Sỹ Sửu¹, Trần Thị Tú², Trần Thị Thu Trang²

¹Viện Vật lý Y sinh học, Bệnh viện Quân y 175, Bộ Quốc phòng

²Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu mô phỏng động học và đặc tính lực của hệ truyền động khí nén ứng dụng trong thiết bị leg press. Mô tả chuyển động tịnh tiến của piston dưới tác dụng của áp suất khí nén, trong đó lực kích hoạt, lực cản và độ trễ hệ thống được xem xét đầy đủ. Mô phỏng được thực hiện bằng COMSOL Multiphysics với mô đun Global ODEs and DAEs nhằm phân tích các đáp ứng chuyển vị, vận tốc, gia tốc và lực tác dụng theo thời gian. Kết quả cho thấy hệ khí nén có độ trễ rõ rệt trong giai đoạn tăng áp, vận tốc đạt cực đại trong khoảng thời gian ngắn sau khi kích hoạt và lực cản đóng vai trò quan trọng trong việc ổn định chuyển động piston. Các phân tích thu được góp phần mô tả rõ hơn đặc tính đáp ứng của hệ truyền động khí nén, từ đó làm cơ sở tham khảo cho việc thiết kế và điều chỉnh các thông số vận hành của thiết bị leg press.

Từ khóa: Leg press; Khí nén; Động học piston; Mô phỏng COMSOL; Lực kích hoạt; Phục hồi chức năng.

ABSTRACT

This paper presents a study on the kinematic simulation and force characteristics of the pneumatic drive system applied in the leg press device. The translational motion of the piston under the effect of pneumatic pressure is described, in which the activation force, resistance force and system hysteresis are fully considered. The simulation is performed using COMSOL Multiphysics with the Global ODEs and DAEs module to analyze the displacement, velocity, acceleration and force responses over time. The results show that the pneumatic system has a clear hysteresis in the pressurization phase, the velocity reaches its maximum in a short time after activation and the resistance force plays an important role in stabilizing the piston motion. The obtained analysis contributes to a clearer description of the response characteristics of the pneumatic drive system, thereby serving as a reference basis for the design and adjustment of the operating parameters of the leg press device.

Keywords: Leg press; Pneumatic; Piston kinematics; COMSOL simulation; Activation force; Rehabilitation. 

1. GIỚI THIỆU

Thiết bị leg press là một trong những dụng cụ phổ biến trong huấn luyện chi dưới và phục hồi chức năng sau chấn thương khớp gối, khớp háng hoặc sau các phẫu thuật chỉnh hình. Cơ chế hoạt động của thiết bị cho phép tạo tải có kiểm soát lên nhóm cơ tứ đầu đùi, cơ mông và gân kheo, giúp cải thiện sức mạnh cơ và phạm vi vận động khớp [1], [2]. Trong bối cảnh nhu cầu phục hồi chức năng ngày càng tăng, việc phát triển các thiết bị leg press có khả năng điều chỉnh lực linh hoạt, an toàn và phù hợp với thể trạng người bệnh là yêu cầu cấp thiết.

Trong các hệ thống leg press hiện nay, truyền động cơ điện được sử dụng phổ biến nhờ khả năng điều khiển chính xác và hiệu suất cao. Tuy nhiên, các hệ truyền động khí nén lại có ưu điểm về trọng lượng nhẹ, cấu tạo đơn giản, chi phí thấp và khả năng tạo lực lớn trên diện tích tác dụng nhỏ [3]. Ngoài ra, khí nén có tính an toàn cao và dễ bảo trì khi hoạt động trong môi trường phục hồi chức năng. Dù vậy, các hệ khí nén tồn tại một số hạn chế như tính nén của không khí, độ phi tuyến của dòng khí, và độ trễ áp suất, khiến đáp ứng lực – vận tốc – gia tốc của piston trở nên phức tạp hơn so với các cơ cấu truyền động điện hoặc thủy lực [4], [5].

Phân tích động học và đặc tính lực của xi lanh khí nén đóng vai trò quan trọng trong thiết kế và đánh giá hiệu năng thiết bị leg press. Các thông số như chuyển vị, vận tốc, gia tốc và lực tác dụng giúp xác định độ ổn định của hệ thống, mức độ êm ái khi vận hành và khả năng kiểm soát tải tác dụng lên người tập [6], [7]. Những yếu tố này ảnh hưởng trực tiếp đến độ an toàn khớp, hiệu quả phục hồi chức năng, và tuổi thọ cơ cấu truyền động. Mặc dù trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu về mô hình hóa và điều khiển cơ cấu khí nén [8], [9], tại Việt Nam, các nghiên cứu mô phỏng động học hệ khí nén

ứng dụng trong thiết bị tập phục hồi còn hạn chế, đặc biệt là trong việc phân tích đáp ứng quá độ và đặc tính lực theo thời gian.

Trên cơ sở đó, bài báo này tập trung trình bày kết quả mô phỏng hệ truyền động khí nén bằng phần mềm COMSOL Multiphysics, trong đó mô đun Global ODEs and DAEs được sử dụng để mô tả động lực học của piston chịu tác dụng của áp suất khí nén. Kết quả mô phỏng bao gồm các đáp ứng chuyển vị, vận tốc, gia tốc, và lực tác dụng theo thời gian, qua đó đánh giá được độ trễ của hệ thống, ảnh hưởng của ma sát, cũng như mức độ ổn định chuyển động. Những kết quả này tạo nền tảng cho việc thiết kế, điều chỉnh và tối ưu các thông số vận hành của thiết bị leg press trong ứng dụng phục hồi chức năng chi dưới.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Cấu trúc và nguyên lý làm việc của xi lanh khí nén

Hệ truyền động khí nén trong thiết bị leg-press bao gồm xi lanh khí nén, van phân phối, nguồn khí và cụm cơ cấu truyền lực đến bàn đạp. Khi khí được cấp vào buồng xi lanh, áp suất $P(t)$ tác dụng lên diện tích piston A tạo ra lực đẩy tuyến tính $F(t) = A \cdot P(t)$ làm piston và thanh truyền chuyển động tịnh tiến. Ma sát tại các vòng dẫn hướng và tổn thất dòng khí góp phần làm tăng hiệu ứng cản và độ trễ trong đáp ứng chuyển động [10]. Xi lanh bao gồm thân, piston, thanh piston, vòng dẫn hướng và hệ gioăng làm kín; ma sát và lưu lượng khí qua van ảnh hưởng không nhỏ đến đặc tính động lực học hệ.

2.2. Mô hình động lực học của piston

Chuyển động tịnh tiến của piston được mô hình hóa như một hệ bậc một tự do với phương trình [11]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) = A \cdot P(t) \quad (1)$$

Trong đó:

- m là khối lượng tương đương của piston và tải (kg);
- c là hệ số cản tuyến tính tương đương (N·s/m) do ma sát và lưu lượng khí;
- A là diện tích tác dụng của piston (m²);
- $P(t)$ là áp suất khí nén theo thời gian (Pa);
- $x(t)$ là chuyển vị của piston (m).

Lực tác dụng lên piston tại mọi thời điểm được xác định bởi:

$$F(t) = A \cdot P(t) \quad (2)$$

Trong đó, $P(t)$ được mô hình hóa bằng hàm bước (Step Function) để mô phỏng quá trình kích hoạt áp suất đột ngột:

$$P(t) = P_0 \cdot \text{step}(t - t_0) \quad (3)$$

Với P_0 là áp suất đặt (Pa) và t_0 là thời điểm kích hoạt (s). Điều kiện đầu cho hệ là:

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

Phương trình này được thiết lập trong mô-đun Global ODEs and DAEs của COMSOL Multiphysics, cho phép mô phỏng đáp ứng theo thời gian của hệ thống trong điều kiện khí nén thực tế.

2.3. Các giả thiết mô hình hóa

Nhằm mô phỏng hệ truyền động khí nén một cách hiệu quả và giảm độ phức tạp tính toán, nghiên cứu này đưa ra một số giả thiết sau. Khí nén được coi là khí lý tưởng và quá trình nén – xả được giả định là đẳng nhiệt, điều này cho phép bỏ qua ảnh hưởng của biến thiên

hiệt độ trong buồng xi lanh. Lực ma sát giữa piston và thành xi lanh được thay thế bằng hệ số cản tuyến tính c , biểu diễn ảnh hưởng tổng hợp của ma sát khô và nhớt. Áp suất nguồn P_0 được giả định ổn định và không đổi theo thời gian, phản ánh điều kiện cấp khí ổn định của máy nén. Hiện tượng rò rỉ khí và thay đổi nhiệt độ được bỏ qua vì chuyển động của piston có biên độ nhỏ, không tạo ra dao động đáng kể. Ngoài ra, toàn bộ tải trọng của cơ cấu (bàn đạp, chân người, thanh piston) được quy đổi thành khối lượng điểm m gắn trực tiếp vào piston để đơn giản hóa mô hình.

Các giả thiết này giúp mô hình phản ánh chính xác hành vi động học của hệ thống trong điều kiện làm việc thực tế của thiết bị leg press, nơi chuyển động chủ yếu xảy ra ở vận tốc thấp, lực tác dụng ổn định và môi trường hoạt động có kiểm soát. Các giả thiết tương tự đã được sử dụng trong nhiều nghiên cứu trước đây về mô hình động học của hệ truyền động khí nén [10].

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

3.1. Khai báo thông số trong COMSOL

Mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm COMSOL Multiphysics 6.1, sử dụng mô-đun Global ODEs and DAEs để giải hệ phương trình vi phân bậc hai mô tả chuyển động tịnh tiến của piston dưới tác dụng của áp suất khí nén. Phương trình mô hình hóa được trình bày ở phương trình (1) trong phần trước. Để đảm bảo tính chính xác trong mô phỏng, các thông số vật lý và kỹ thuật của hệ truyền động được thiết lập theo Bảng 1.



Bảng 1. Thông số mô phỏng của hệ thống truyền động khí nén

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Mô tả
A	0,0031	m ²	Diện tích piston
P ₀	5×10 ⁵	Pa	Áp suất khí nén đầu vào
m	20	kg	Khối lượng tải tương đương
c	200	N·s/m	Hệ số giảm chấn của hệ [11]
k	1000	N/m	Độ cứng đàn hồi của hệ

Tham số diện tích piston A được tính từ đường kính D = 63 mm, theo công thức:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0,063)^2}{4} \approx 0,0031m^2 \quad (4)$$

3.2. Xây dựng hàm áp suất và khai báo biến phụ thuộc thời gian

Mô phỏng quá trình cấp áp suất khí nén theo thời gian, một hàm bậc thang (step function) được sử dụng nhằm mô phỏng sự thay đổi áp suất đột ngột tại thời điểm xác định. Trong COMSOL Multiphysics, hàm này được khai báo dưới dạng step1(t) với các tham số như sau:

- Location: 0,05 s (thời điểm xảy ra bước nhảy);
- From: 0 (giá trị trước khi cấp áp);
- To: 1 (giá trị sau khi cấp áp).

Hàm step1(t) được thiết lập nhằm mô phỏng điều kiện thực tế khi hệ thống bắt đầu tiếp nhận áp suất khí nén tại thời điểm t = 0,05 s, tương ứng với thời điểm van cấp khí được kích hoạt. Để đảm bảo quá trình tăng áp diễn ra một cách liên tục và tránh sai số số học trong mô phỏng, một hàm bước được làm mượt (smoothed step function) đã được dùng, với vùng chuyển tiếp hẹp nhằm mô phỏng chính xác sự biến thiên của áp suất đầu vào. Hình

dạng hàm được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Hàm bước smoothed step1(t) với thời điểm chuyển tiếp tại 0,05 [s]

Hình 1 biểu diễn hàm bước được tạo trong COMSOL, với giá trị chuyển đổi từ 0 lên 1 xảy ra tại thời điểm 0,05 s. Vùng chuyển tiếp (transition zone) được thiết lập là 0,005 s nhằm đảm bảo sự mượt mà trong quá trình thay đổi và tránh gây ra sự bất ổn định số trong mô phỏng. Hàm này được dùng để mô phỏng quá trình tăng áp suất đột ngột nhưng vẫn đảm bảo liên tục đạo hàm bậc một của tín hiệu áp suất theo thời gian.

Sau đó, một biến phụ thuộc thời gian P được khai báo theo biểu thức:

$$P(t) = P_0 \cdot \text{step1}(t) \quad (5)$$

Trong đó:

- P₀ = 5×10⁵ Pa là áp suất khí nén đầu vào, được thiết lập trong phần tham số mô phỏng;

• step1(t) là hàm bước thời gian định nghĩa bên trên.

Cách khai báo này cho phép mô phỏng chính xác quá trình hệ thống chịu tác động của áp suất theo thời gian, đồng thời đảm bảo mô hình phản ánh đúng hiện tượng vật lý trong vận hành thực tế của hệ truyền động khí nén.

3.3. Thiết lập mô hình trong COMSOL

Mô hình mô phỏng được triển khai trong phần mềm COMSOL Multiphysics, sử dụng mô đun Global ODEs and DAEs nhằm giải hệ phương trình mô tả chuyển động tịnh tiến tuyến tính của piston dưới tác dụng của áp suất khí nén. Phương trình được mô phỏng là phương trình (1) đã nêu trong phần trước, với các tham số được thiết lập như trong Bảng 1.

Để mô phỏng chuyển động của piston, biến phụ thuộc $x(t)$ được định nghĩa là vị trí theo thời gian. Phương trình vi phân được khai báo dưới dạng:

$$f(u, \dot{u}, \ddot{u}, t) = m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x - A \cdot P(t) \quad (6)$$

Với $u = x$, $\dot{u} = \dot{x}$, và $\ddot{u} = \ddot{x}$. Hàm $P(t)$ là áp suất phụ thuộc thời gian được định nghĩa thông qua hàm step như đã mô tả trong mục 3.2.

Khai báo Global Equations: Trong mô đun Global ODEs and DAEs, phương trình được thiết lập với tên biến là u , đại diện cho vị trí x . COMSOL yêu cầu nhập phương trình dưới dạng tổng quát:

$$f(u, \dot{u}, \ddot{u}, t) = 0 \quad (7)$$

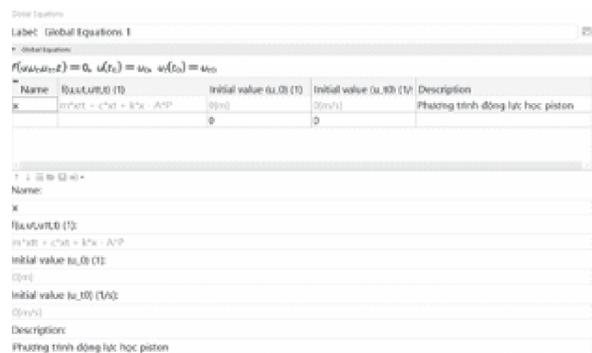
Do đó, phương trình được chuyển về dạng:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u - A \cdot P(t) = 0 \quad (8)$$

Điều kiện ban đầu để mô phỏng từ trạng thái tĩnh, điều kiện ban đầu được thiết lập như sau:

- $u(0) = 0(m)$: Piston ở vị trí gốc;
- $\dot{u}(0) = 0(m/s)$: Piston không có vận tốc ban đầu.

Hình 2 thể hiện giao diện khai báo phương trình vi phân trong mô đun Global ODEs and DAEs của COMSOL Multiphysics. Trong hình, có thể quan sát rõ cấu trúc khai báo các thành phần tương ứng với gia tốc, vận tốc, vị trí và áp suất đầu vào.



Hình 2. Khai báo phương trình động lực học piston trong COMSOL.

Thiết lập bài toán trong miền thời gian để phân tích đáp ứng chuyển động của piston dưới tác động của áp suất khí nén, mô phỏng được thực hiện trong môi trường Time Dependent của phần mềm COMSOL Multiphysics. Đây là lựa chọn phù hợp nhằm giải bài toán dao động phi tuyến có biến thiên theo thời gian.

Các thông số được thiết lập như sau:

- Time unit: Seconds (s);
- Time range: Range (0; 0,01; 0,5);
- Tolerance: Physics controlled.

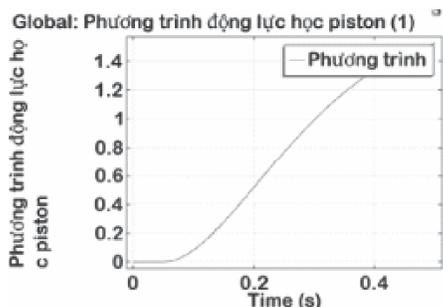


Thời gian mô phỏng được chọn là 0,5 giây, với bước thời gian là 0,01 giây, nhằm đảm bảo đủ độ phân giải để ghi nhận chi tiết đáp ứng quá độ của hệ thống ngay sau khi nhận áp suất đầu vào. Mốc thời gian này đặc biệt quan trọng để quan sát sự thay đổi ban đầu về vị trí và vận tốc của piston, trước khi hệ tiến tới trạng thái ổn định. Phần mềm COMSOL tự động sử dụng bộ giải thích hợp với bài toán vi phân phi tuyến, đảm bảo độ chính xác trong miền thời gian.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Biến thiên của phương trình động lực học piston

Hình 3 thể hiện sự biến thiên của giá trị phương trình động lực học piston theo thời gian từ 0 đến 0,5 s. Trong giai đoạn đầu (0-0,05 s), giá trị lực gần như bằng 0 do tín hiệu áp suất khí nén chưa được kích hoạt. Khi hàm bước bắt đầu tác động tại thời điểm khoảng 0,05 s, lực bắt đầu tăng lên theo dạng cong mượt với độ dốc tăng dần.



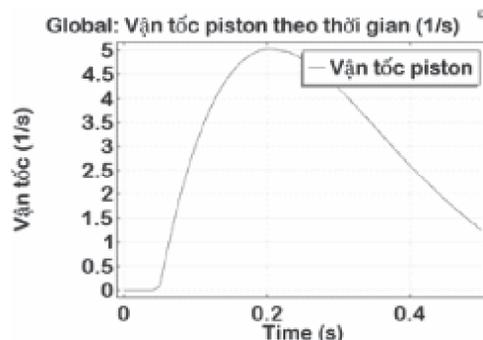
Hình 3. Đồ thị biến thiên của phương trình động lực học piston theo thời gian trong mô phỏng miền thời gian.

Đồ thị thể hiện rõ quá trình tăng lực đặc trưng của hệ truyền động khí nén: lực không tăng đột ngột mà có độ cong nhẹ trong giai đoạn 0,05-0,25 s, phản ánh ảnh hưởng của quán tính khối lượng piston, lực cản và tính nén của khí. Sau mốc 0,3 s, đường cong tiến dần tới trạng

thái ổn định, cho thấy hệ đã đạt cân bằng giữa lực kích hoạt và lực phản kháng từ lò xo và lực cản. Dạng đáp ứng không xuất hiện dao động hay overshoot, chứng tỏ hệ có hệ số tắt dần lớn và hoạt động êm, phù hợp với yêu cầu an toàn khi áp dụng vào thiết bị leg press trị liệu.

4.2. Đáp ứng vận tốc của piston

Hình 4 mô tả sự thay đổi vận tốc của piston theo thời gian trong suốt 0,5 s mô phỏng. Trong giai đoạn đầu (0-0,05 s), vận tốc gần như bằng 0 do tín hiệu áp suất khí nén chưa được kích hoạt; điều này phản ánh pha tích áp ban đầu của buồng xi lanh, khi áp suất chưa đủ lớn để tạo chuyển động thực sự.



Hình 4. Vận tốc của piston theo thời gian dựa trên mô phỏng Time Dependent.

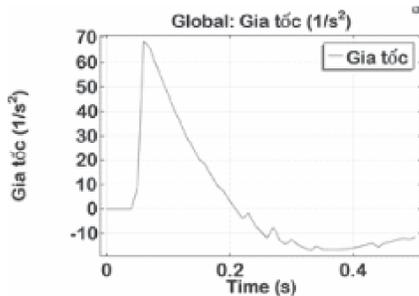
Khi áp suất bắt đầu tăng ($t > 0,05$ s), piston tăng tốc nhanh và vận tốc tăng gần tuyến tính trong khoảng 0,05-0,15 s. Trong giai đoạn này, lực kích hoạt từ khí nén chiếm ưu thế hoàn toàn so với lực cản và độ cứng lò xo, tạo ra gia tốc lớn. Vận tốc đạt cực đại khoảng 5 s^{-1} tại $t \approx 0,20$ s, thời điểm hệ đang ở pha quá độ mạnh nhất.

Sau khi đạt cực đại, vận tốc giảm dần do các lực phản kháng (lực cản tuyến tính và lực đàn hồi) bắt đầu chiếm ưu thế, làm hệ tiến từ pha gia tốc sang pha giảm tốc và dần ổn định. Đặc biệt, đường cong vận tốc không xuất hiện

đỉnh nhọn, nhiều hoặc dao động ngược, thể hiện hệ khí nén có đặc tính tắt dần cao (highly damped) – một yếu tố quan trọng để đảm bảo độ ổn định và tính an toàn của thiết bị trong môi trường phục hồi chức năng.

4.3. Đáp ứng gia tốc của piston

Đáp ứng gia tốc của piston (Hình 5) trong khoảng thời gian mô phỏng 0-0,5 s. Ngay sau khi áp suất khí nén được kích hoạt ($t > 0,05$ s), gia tốc tăng rất nhanh và đạt giá trị cực đại khoảng 68 s^{-2} tại gần $t \approx 0,07$ s. Đây là pha gia tốc mạnh nhất, phản ánh quá trình chuyển đổi đột ngột từ trạng thái tĩnh sang chuyển động khi lực khí nén vượt qua lực ma sát ban đầu và quán tính hệ cơ khí.



Hình 5. Đáp ứng gia tốc của piston theo thời gian trong mô phỏng miền thời gian.

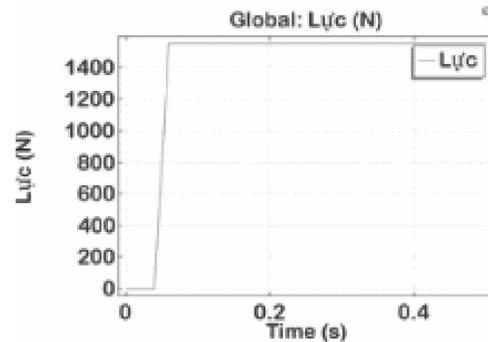
Sau đỉnh cực đại, gia tốc giảm nhanh và tiến về vùng gần bằng 0 trong khoảng $t = 0,15-0,25$ s, cho thấy lực tác dụng lên piston bắt đầu được cân bằng bởi lực cản và độ cứng lò xo. Đáng chú ý, gia tốc chuyển sang giá trị âm trong giai đoạn 0,25-0,40 s, với các biên độ dao động nhỏ khoảng -5 đến -10 s^{-2} . Đây là pha giảm tốc tự nhiên khi hệ truyền động tiến dần đến trạng thái ổn định, và hoàn toàn không phải là dao động cơ học, vì biên độ rất nhỏ và triệt tiêu nhanh theo thời gian.

Đường cong gia tốc không xuất hiện dao động lớn hay vượt mức, cho thấy hệ khí

nén có đặc tính tắt dần cao, nhất quán với kết quả vận tốc và lực kích hoạt. Đặc tính này đảm bảo chuyển động của piston êm và an toàn khi sử dụng cho các bài tập phục hồi chức năng, đặc biệt đối với bệnh nhân có khớp yếu hoặc hạn chế vận động.

4.4. Đáp ứng lực kích hoạt

Hình 6 trình bày sự thay đổi của lực kích hoạt tác dụng lên piston, được xác định từ biểu thức $F_{act} = A \cdot P(t)$, trong khoảng thời gian mô phỏng 0-0,5 s. Kết quả cho thấy lực gần như bằng 0 trong giai đoạn đầu ($t \leq 0,05$ s) do áp suất khí nén chưa được kích hoạt. Ngay sau thời điểm này, lực tăng gần như tức thời và đạt giá trị xấp xỉ 1500 N, phản ánh đặc tính của tín hiệu áp suất dạng hàm bước (step input) được sử dụng trong mô phỏng.



Hình 6. Đáp ứng lực kích hoạt $A \cdot P(t)$ tác dụng lên piston theo thời gian.

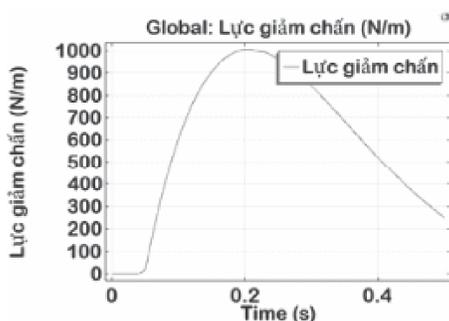
Dạng đường cong nằm ngang sau khi lực đạt giá trị cực đại cho thấy áp suất đầu vào được duy trì ổn định, dẫn đến lực kích hoạt không thay đổi trong suốt quá trình chuyển động của piston. Điều này là phù hợp với cấu hình mô phỏng, vốn sử dụng tín hiệu áp suất bật tắt (On-Off) thay vì tín hiệu điều chế hoặc tuyến tính theo thời gian.

Sự tăng nhanh của lực kích hoạt giải thích cho pha tăng tốc đột ngột của piston trong

mục 4.3, đồng thời cho phép xác định khả năng cung cấp tải của hệ thống khí nén. Giá trị lực này đóng vai trò quan trọng trong thiết kế thiết bị leg press, vì nó xác định giới hạn tải tối đa mà hệ truyền động có thể tạo ra trong các bài tập phục hồi chức năng.

4.5. Đáp ứng lực giảm chấn

Hình 7 minh họa sự biến thiên của lực giảm chấn $F_{\text{damp}} = c \cdot \dot{u}(t)$ trong khoảng thời gian mô phỏng 0-0,5 s. Do lực giảm chấn phụ thuộc trực tiếp vào vận tốc piston, đường cong thu được phản ánh chính xác đặc tính tăng, giảm của vận tốc đã trình bày ở mục 4.2.



Hình 7. Đáp ứng lực giảm chấn $c \cdot \dot{u}(t)$ theo thời gian.

Ngay sau khi piston bắt đầu chuyển động ($t > 0,05$ s), lực giảm chấn tăng nhanh và đạt giá trị cực đại xấp xỉ 950 N/m tại khoảng $t \approx 0,18-0,20$ s, trùng với thời điểm vận tốc đạt giá trị lớn nhất. Điều này cho thấy lực cản tuyến tính đóng vai trò quan trọng trong việc hạn chế quá trình tăng tốc của piston, giúp hệ không vượt quá tốc độ mong muốn.

Sau khi đạt cực đại, lực giảm chấn giảm dần theo vận tốc và tiến về các giá trị nhỏ hơn trong nửa sau của quá trình mô phỏng. Dạng đường cong mượt và không xuất hiện dao động chứng minh rằng hệ truyền động có đặc tính tắt dần tốt, góp phần ổn định chuyển động và ngăn ngừa rung động trong thiết bị.

Đáp ứng lực giảm chấn phù hợp với đặc tính của hệ khí nén và khẳng định rằng tham số cản được lựa chọn giúp kiểm soát tốc độ piston hiệu quả, đảm bảo chuyển động an toàn trong ứng dụng phục hồi chức năng.

4.6. Thảo luận

Các kết quả mô phỏng phản ánh quá trình biến đổi động học của hệ truyền động khí nén khi chịu tác động của tín hiệu áp suất dạng hàm bước. Trong giai đoạn đầu, độ trễ xuất hiện đồng thời ở chuyển vị, vận tốc và gia tốc, phù hợp với quá trình tích áp và ma sát tĩnh trong xi lanh. Sau thời điểm kích hoạt áp suất, vận tốc và gia tốc tăng theo thời gian, với các giá trị cực đại xuất hiện trong khoảng ngắn, thể hiện ảnh hưởng của lực kích hoạt đối với chuyển động ban đầu của piston.

Lực kích hoạt duy trì giá trị ổn định sau khi đạt mức cực đại do đặc tính của tín hiệu áp suất vào, trong khi lực giảm chấn biến thiên theo vận tốc và đạt giá trị lớn nhất tại vùng vận tốc cực đại. Sự phân bố của các lực này dẫn đến đáp ứng chuyển động có dạng tắt dần, không xuất hiện dao động vượt mức trong suốt quá trình mô phỏng.

Các đặc tính động học thu được cho thấy vai trò của các tham số hệ (m , c , k) trong việc quyết định mức độ ổn định và tốc độ đáp ứng của xi lanh khí nén. Những kết quả này có thể được sử dụng làm cơ sở tham khảo cho việc lựa chọn tham số, thiết kế cơ cấu và xây dựng thuật toán điều khiển phù hợp trong các hệ thống leg press sử dụng truyền động khí nén.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày mô phỏng động học và đặc tính lực của hệ truyền động khí nén trong thiết bị leg press bằng phương pháp

phân tích số, trong đó mô đun Global ODEs and DAEs của COMSOL Multiphysics được sử dụng để mô tả chuyển động tịnh tiến của piston dưới tác dụng của tín hiệu áp suất dạng hàm bước. Mô hình xem xét đồng thời các thành phần lực gồm lực kích hoạt, lực cản và độ cứng đàn hồi, qua đó phân tích các đáp ứng chuyển vị, vận tốc, gia tốc và lực theo thời gian.

Kết quả cho thấy hệ truyền động khí nén xuất hiện độ trễ đặc trưng trong giai đoạn tích áp ban đầu; vận tốc và gia tốc đạt cực đại trong khoảng thời gian ngắn sau khi kích hoạt; lực kích hoạt duy trì ổn định theo đặc tính áp suất đầu vào; và lực giảm chấn biến thiên theo vận tốc, đóng vai trò quan trọng trong giai đoạn điều hòa chuyển động. Các đáp ứng thu được đều có dạng tắt dần, không xuất hiện dao động vượt mức, phản ánh ảnh hưởng của các tham số m , c , k đến mức độ ổn định và tốc độ đáp ứng của hệ.

Những phân tích này góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn tham số, thiết kế cơ cấu và xây dựng thuật toán điều khiển trong các thiết bị leg press sử dụng truyền động khí nén. Trong thực tiễn phát triển thiết bị, các kết quả mô phỏng có thể được dùng để hiệu chỉnh cấu hình xi lanh, van cấp khí, tham số giảm chấn và đặc tính áp suất đầu vào nhằm đạt được chuyển động ổn định, độ mượt phù hợp và mức tải an toàn cho quá trình phục hồi chức năng chi dưới. Mô phỏng hiện tại chưa xét đến rò rỉ khí và mô hình phi tuyến lưu lượng thực tế; đây sẽ là hướng mở rộng quan trọng cho nghiên cứu tiếp theo. Nghiên cứu có thể được mở rộng theo hướng tích hợp mô hình điều khiển phản hồi, mô phỏng phi tuyến có xét đến rò rỉ, ma sát hỗn hợp và tính nén của khí, hoặc kết hợp với mô hình hóa cơ sinh học để đánh giá chính xác hơn phân bố tải lên các nhóm cơ, dây chằng và khớp trong suốt quá trình tập luyện cũng như trong các cấu hình thiết bị khác nhau.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Bệnh viện “Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thiết bị leg press”, mã số: ĐT.2025.002, do Viện Vật lý Y Sinh học – Bệnh viện Quân y 175 chủ trì. ❖

Ngày nhận bài: **14/11/2025**

Ngày phản biện: **25/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. R. F. Escamilla, N. Zheng, G. S. Fleisig, S. W. Barrentine, K. E. Wilk, J. R. Andrews, “*The effects of technique variations on knee biomechanics during the squat and leg press*”. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 33, no. 9, pp. 1552-1566, 2001.
- [2]. I. Martín-Fuentes et al., “*Evaluation of the Lower Limb Muscles' Electromyographic Activity during the Leg Press Exercise: A Systematic Review*”. *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 21, 2020.
- [3]. T. Sénac, A. Lelevé, R. Moreau, C. Novales, L. Nouaille, M. T. Pham, P. Vieyres, “*A Review of Pneumatic Actuators Used for the Design of Medical Simulators and Medical Tools*”. *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 3, no. 3, p. 47, 2019.
- [4]. M. Sorli, “*Dynamic analysis of pneumatic actuators*”. *Mechatronics*, vol. 9, no. 5, pp. 567-582, 1999.
- [5]. Y. Kawakami, J. Akao, S. Kawai, T. Machiyama, “*Some considerations on the dynamic characteristics of pneumatic cylinders*”. *Journal of Fluid Control*, vol. 19, no. 2, pp. 22-36, 1988.
- [6]. S. Jamian, “*Review on controller design in pneumatic actuator drive system*”. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 6, pp. 3175-3183, 2020.
- [7]. V. N. Cococi, “*Dynamic behaviour of pneumatic actuators in open-loop valve controlled systems*”. *E3S Web of Conferences*, vol. 150, 2020.
- [8]. T. Abelleira-Lamela, A. Rodriguez-Sanchez, F. Sánchez-Muñoz, “*Comparative Electromyographic Analysis in Leg Press of Different Foot Plate Inclination and Feet Placement*”. *Applied Sciences*, vol. 14, no. 16, 2024.
- [9]. E. David, “*Muscle activation comparison of leg press versus back squat exercises among trained men*”. *Conference Proceedings*, 2014.
- [10]. S. R. Majumdar, “*Pneumatic System: Principles and Maintenance*”. Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2016.
- [11]. M. Sorli, “*Dynamic analysis of pneumatic actuators*”. *Mechatronics*, vol. 9, no. 5, pp. 567-582, 1999.