

Thiết kế máy thử mòn khớp háng toàn phần

Phạm Ngọc Tuấn^{1*}, Hồ Thị Thu Nga¹, Phan Phương Trình²

¹Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về Điều khiển số và Kỹ thuật hệ thống,

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

²Trung tâm Phát triển công nghệ và thiết bị công nghiệp Sài Gòn

Ngày nhận bài 25.9.2015, ngày chuyển phản biện 28.9.2015, ngày nhận phản biện 29.10.2015, ngày chấp nhận đăng 6.11.2015

Hiện nay, mòn khớp háng toàn phần (KHTP) là một vấn đề lâm sàng cần chú ý liên quan đến nhiều bệnh nhân. Để có tri thức về hiện tượng ma sát học của khớp háng nhân tạo, cần tiến hành thử mòn trên khớp này nhằm đánh giá khả năng kéo dài tuổi thọ của các khớp cấy ghép. Loại thiết bị thử nghiệm cơ bản nhất là máy thử mòn và ngày nay loại máy này có khả năng tái tạo quá trình mòn chính xác hơn trong điều kiện in vivo, nên còn được gọi là máy mô phỏng. Máy thử mòn được thiết kế để mô phỏng các chuyển động của KHTP, bao gồm chuyển động: co - duỗi, dạng - khép và xoay trong - xoay ngoài trong điều kiện gần giống với cơ thể người. Các đặc tính kỹ thuật của máy và quá trình thử nghiệm trên máy phải đảm bảo các yêu cầu của tiêu chuẩn ISO 14242.

Từ khóa: ISO 14242, khớp háng toàn phần, máy thử mòn.

Chỉ số phân loại 2.6

DESIGN OF THE TOTAL HIP WEAR TESTING MACHINE

Summary

Wear of total hip is a significant clinical problem that involves, nowadays, a large number of patients. In order to acquire further knowledge on the tribological phenomena that involve total hip, wear tests are conducted to evaluate the possibility of extending its lifetime. The most basic type of test device is the wear testing machine, and nowadays, this type of machine may more accurately reproduce some of the in vivo conditions, then is also called simulator. The simulator is designed to simulate movements of the total hip, which consist of flexion - extension, abduction - adduction and inward - outward rotation, under the conditions rather similar to those occurring in human body. Its specifications and the test process must be assured the requirements of ISO 14242 standard.

Keywords: ISO 14242 standard, total hip, wear testing machine.

Classification number 2.6

Phân mở đầu

Trong vài thập niên qua, thế giới đã có nhiều cố gắng trong nghiên cứu phát triển các khớp háng nhân tạo thay thế cho khớp háng người. Trường hợp khớp háng nhân tạo được thay thế bao gồm đầy đủ các chi tiết của một bộ khớp háng thì được gọi là KHTP. Quá trình nghiên cứu và phát triển KHTP nói chung phải trải qua các bước như sau: 1- Lựa chọn các vật liệu tiềm năng dựa trên cơ sở tính tương thích về sinh học, tính chất cơ lý và mài mòn; 2- Thiết kế khớp háng nhân tạo và đánh giá thiết kế cuối cùng bằng thử nghiệm KHTP trong các điều kiện in vivo giống như khớp háng thật; 3- Đánh giá thử nghiệm trên động vật tính tương thích sinh học của tất cả các chi tiết KHTP; 4- Đánh giá thử nghiệm lần cuối trong bệnh viện trước khi đưa KHTP vào sử dụng.

Trong quá trình nghiên cứu, để thực hiện bước thử nghiệm trong điều kiện in vivo (bước 2) thì các thử nghiệm liên quan đến máy thử mòn đóng một vai trò quan trọng trong việc đánh giá mức độ mòn của KHTP.

Các vật liệu hợp kim titan sinh học, polyme sinh học thường được dùng để chế tạo các chi tiết của KHTP (chuôi, chòm, lót trong, vỏ ngoài). Vấn đề lựa chọn vật liệu và thiết kế các chi tiết của KHTP là những yếu tố đóng vai trò quan trọng đảm bảo hiệu năng và tuổi thọ của KHTP. Mòn của KHTP là một vấn đề lâm sàng

*Tác giả liên hệ: Email: phamngoctuan.vn@gmail.com

quan trọng, bởi vì mài mòn có thể gây nên phản ứng mô bất lợi dẫn đến tổn hao xương xung quanh KHTP, do đó làm nổi lỏng KHTP đã được cố định. Mòn khớp háng có thể dẫn đến lỏng và nguy hiểm hơn là trật khớp. Tuy nhiên, vấn đề quan trọng nhất là khi vật liệu bị mòn sẽ tích tụ lại trong cơ thể và trong máu, khi xảy ra trong nhiều năm sẽ gây ra cho người sử dụng thêm nhiều bệnh mới, có thể dẫn đến ung thư.

Vì vậy, song song với quá trình chế tạo KHTP cần thiết kế và chế tạo một máy thử mòn nhằm đo chính xác độ mòn của KHTP, từ đó xác định tuổi thọ và thời gian thay thế bộ KHTP mới. Chức năng của máy thử mòn KHTP là xác định độ mòn của KHTP sau một thời gian làm việc, thông qua 3 chuyển động chính của khớp háng là: co - duỗi, dạng - khép, xoay vào trong - xoay ra, đồng thời có tải tác động trong mỗi chu kỳ hoạt động.

Trong khuôn khổ đề tài “Nghiên cứu thiết kế, chế tạo và thử nghiệm KHTP”, việc nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy thử mòn KHTP đã được tiến hành theo tiêu chuẩn ISO 14242-1 [1]. Máy có thể được hiệu chỉnh và kiểm soát lực tác động trên mẫu KHTP, được thiết kế mô phỏng đầy đủ các chuyển động của khớp háng khi con người hoạt động, đó là các chuyển động co - duỗi (FE: flexion and extension), quay vào - ra (IOR: inwards and outwards rotation) và dạng - khép (AA: adduction and abduction). Trong khuôn khổ bài báo này, các tác giả sẽ trình bày việc thiết kế máy thử mòn KHTP nêu trên.

Nội dung chính

Tổng quan về máy thử mòn

Máy thử mòn KHTP đã trở thành một công cụ hiệu quả cho nghiên cứu cơ bản cũng như để thử nghiệm tiền lâm sàng, giúp giảm thiểu nguy cơ của bệnh nhân khi được cấy ghép KHTP. Lịch sử phát triển máy mô phỏng KHTP đã dẫn đến sự phát triển của nhiều mẫu mã đa dạng. Động học khớp háng tự nhiên của con người được mô phỏng chặt chẽ hơn bởi các máy 3 trục thực hiện các chuyển động được điều khiển độc lập, so với máy đơn trục chỉ thực hiện một chuyển động co - duỗi (FE). Bên cạnh các chuyển động và chế độ tải sử dụng, thành phần của chất lỏng thử nghiệm có thể thay đổi tùy thuộc phòng thí nghiệm.

Đã có nhiều nghiên cứu thiết kế chế tạo máy mô phỏng khớp háng trong phòng thí nghiệm được ứng dụng rộng rãi trong thực tế. Các máy này thường khác

nau về số trạm hoạt động, số chuyển động được tạo ra, giới hạn các chuyển động, cơ cấu truyền động, dung dịch huyết thanh sử dụng thử nghiệm... tùy thuộc vào tiêu chuẩn và vật liệu được thử mòn (bảng 1).

So sánh về chức năng hoạt động và kết cấu của các máy nêu trên, có thể thấy máy của hãng AMTI, Shore Western và BioPuls là các loại máy hiện đại, đạt độ chính xác cao, tuy nhiên máy khá phức tạp và có giá thành cao. Trong khi đó, các loại máy TE86 (hãng Phonix tribology), HUT-4 (Đại học Helsinki, Phần Lan) do được thiết kế bằng cam nên độ chính xác hoạt động không cao, chi phí chế tạo thấp.

Sau khi phân tích các loại máy mô phỏng đã được nghiên cứu và sử dụng trên thế giới, kết hợp với điều kiện chế tạo và sử dụng trong trường hợp thử nghiệm KHTP ở dạng đơn chiếc, có thể lựa chọn phương án máy thử mòn bao gồm 1 trạm thử nghiệm, 3 chuyển động quay và lực tác dụng thay đổi theo chu kỳ được điều khiển bằng động cơ servo. Các giá trị giới hạn chuyển động và tải trọng được tuân theo tiêu chuẩn ISO 14242-1 [1].

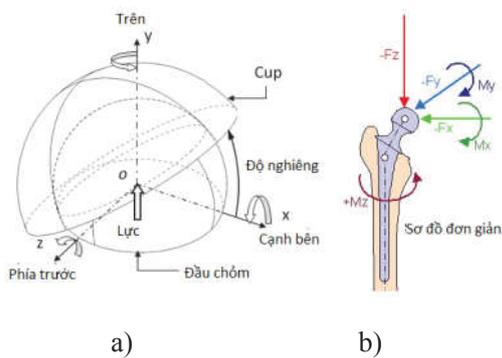
Bảng 1: một số kiểu máy thử mòn KHTP đã được phát triển trên thế giới

STT	Tên máy	Số trạm	Số chuyển động	Giới hạn chuyển động	Lực tác động tối đa (kN)	Cơ cấu truyền động
1	TE86 [2]	6	2	EF ($\pm 23^\circ$) AA ($\pm 6^\circ$)	2	Dùng cam tạo chuyển động và dùng khí nén để tạo lực
2	V. Saikko [3]	5	3	EF ($-17^\circ/25^\circ$) AA ($\pm 7^\circ$) IOR ($-10^\circ/2^\circ$)	Không có	Dùng cam tạo chuyển động, tạo lực bằng lò xo
3	AMTIADL [4]	12	3	EF ($\pm 55^\circ$) AA ($\pm 20^\circ$) IOR ($\pm 20^\circ$)	4,5	Dùng động cơ servo tạo 3 chuyển động và tải tác động bằng thủy lực
4	Shore Western Hip Simulator [5]	12	3	EF ($-18^\circ/25^\circ$) AA ($-4^\circ/7^\circ$) IOR ($-10^\circ/2^\circ$)	4,5	Động cơ servo tạo 3 chuyển động và tải tác động bằng thủy lực
5	BioPuls™ Dual-Station [6]	2	3	EF ($-18^\circ/25^\circ$) AA ($-4^\circ/7^\circ$) IOR ($-10^\circ/2^\circ$)	Không có	Động cơ servo tạo 3 chuyển động
6	HUT-4 [7]	12	2	FE (46°) AA (12°)	2	Tay quay truyền dẫn bằng động cơ điện

Thiết kế máy thử mòn

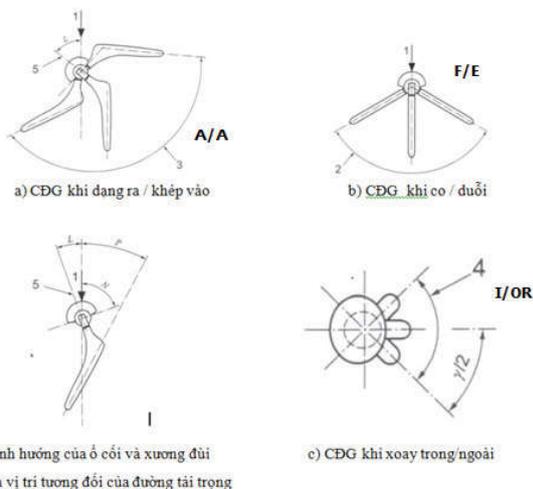
Phân tích động học máy thử mòn:

Chức năng hoạt động của máy mô phỏng là mô phỏng các chuyển động của khớp háng người trong các hoạt động hàng ngày. Theo nghiên cứu của Bergmann G và cộng sự [8], lực tác dụng và các chuyển động của khớp háng được mô tả trong hệ tọa độ Descartes theo quy tắc bàn tay phải, có gốc tọa độ tại tâm khớp (hình 1a).



Hình 1: các thành phần lực và chuyển động của khớp háng người trong hoạt động hàng ngày [9]

Lực tổng hợp tác dụng lên tâm khớp háng được xác định là một véc tơ tức thời (hình 1b): $F_0 = [F_x; F_y; F_z]$; trong đó: F_x, F_y, F_z lần lượt là thành phần lực theo trục x, y, z . Các chuyển động của khớp háng được thể hiện thông qua véc tơ dịch chuyển góc: $\Theta = [\theta_a; \theta_{fe}; \theta_{ie}]$; với θ_a là góc quay dạng ra - khép vào; θ_{fe} là góc co - duỗi; θ_{ie} là góc xoay vào trong - ra ngoài (hình 2).

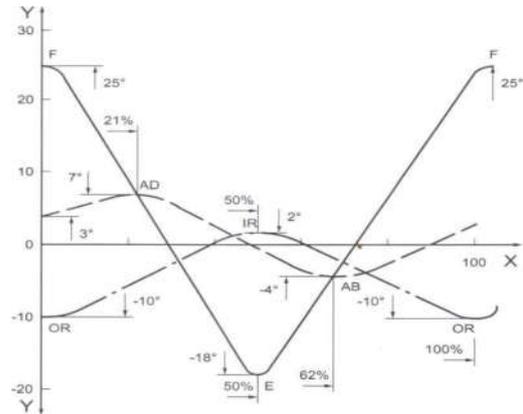


d) Định hướng của ổ cối và xương đùi ở giữa vị trí tương đối của đường tải trọng

Hình 2: chuyển động góc (CDG) của đùi và định hướng các thành phần liên quan đến đường tải [1]

1- tải trọng trục; 2- góc co/duỗi; 3- góc dạng ra/khép vào; 4- góc xoay trong/ngoài; 5- trục tâm của ổ cối; L - độ nghiêng giữa trục tâm của ổ cối và đường tải trọng; N - độ nghiêng của bề mặt thành phần ổ cối bằng $60^\circ \pm 30'$; hoặc theo quy định của nhà sản xuất; P - độ nghiêng của trục góc để đường tải vào giữa vị trí dạng ra/khép vào

Máy thử mòn được thiết kế với các chuyển động và tải trọng tác dụng lên mẫu KHTP thử nghiệm theo tiêu chuẩn ISO 14242-1 [1]. Các sơ đồ biến thiên của các chuyển động và tải trọng tác dụng theo thời gian được thể hiện trên hình 3, 4.



Hình 3: sơ đồ biến thiên theo thời gian của chuyển động góc áp dụng cho mẫu KHTP [1]

X - thời gian, tỷ lệ phần trăm của chu kỳ hoạt động

Y - góc cử động xương đùi, đơn vị độ

E - duỗi

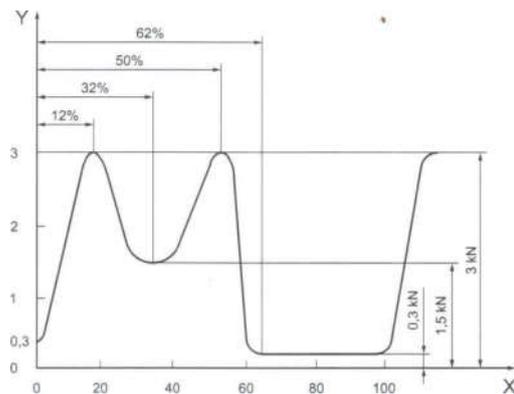
F - co

AB - dạng

AD - khép

IR - quay vào trong

OR - quay ra ngoài



Hình 4: biến thiên theo thời gian của các lực tác dụng dọc theo trục tải [1]

X - thời gian, tỷ lệ phần trăm của chu kỳ hoạt động

Y - lực tác dụng tương ứng (kN)

Lựa chọn phương án thiết kế máy thử mòn:

Qua tham khảo và phân tích các loại máy thử mòn đã và đang được nghiên cứu, sử dụng trong phòng thí nghiệm và thương mại hóa, có thể có một số phương án thiết kế máy như sau:

- Số trạm: có thể 1 trạm, 3 trạm, 5, 6 hoặc 12 trạm điều khiển.
- Bộ phận tạo chuyển động: có thể dùng cơ cấu cam, động cơ servo, khí nén...
- Bộ tạo lực: lò xo, xi lanh thủy lực...
- Dung dịch bôi trơn: nước, huyết thanh, dầu nhờn.

Chọn phương án máy thiết kế và các yêu cầu kỹ thuật như sau:

- Số trạm: do quá trình sản xuất của ta là sản xuất đơn chiếc, sản xuất theo đơn đặt hàng không liên tục nên sẽ chọn máy tương ứng với số trạm là 1.

- Điều khiển chuyển động: sử dụng động cơ servo để tạo chuyển động và tạo lực cho KHTP.

- Bôi trơn: sử dụng huyết thanh bò để bôi trơn KHTP, huyết thanh sẽ được tái tạo liên tục để giống chất bôi trơn trong khớp háng tự nhiên và sẽ được thay mới hoàn toàn sau 500.000-1.000.000 chu kỳ.

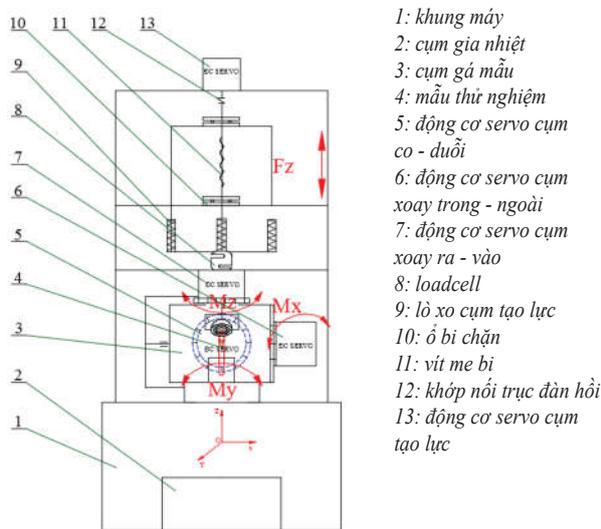
- Nhiệt độ: nhiệt độ thí nghiệm luôn được duy trì ở $37 \pm 1^\circ\text{C}$ thông qua nhiệt độ của huyết thanh, cơ cấu duy trì nhiệt độ này được điều khiển bằng role nhiệt.

- Máy có khả năng tạo các chuyển động được xác định như hình 3 và liên kết tương ứng với tải trọng lực xác định như hình 4.

- Máy hoạt động êm, không gây va đập để tránh gây sai số khi thử nghiệm.

- Mẫu KHTP được thử nghiệm với tần số 1 Hz trong 5.000.000 chu kỳ (ứng với tuổi thọ trung bình của KHTP là 5 năm theo tiêu chuẩn ISO 14242).

Cấu trúc của máy thử mòn được trình bày trong hình 5.



Hình 5: cấu trúc của máy thử mòn

Máy bao gồm các bộ phận chính như sau:

- Cụm tạo lực: chuyển động được truyền từ động cơ servo (13) khớp nối (12) sang cơ cấu vít me (11)

tạo chuyển động tịnh tiến theo phương Z tạo ra lực nén lên lò xo (9), lực truyền xuống từ cụm tạo lực tác động lên mẫu thử nghiệm (4), lực được kiểm tra thông qua loadcell (8).

- Cụm xoay ra - vào: chuyển động được truyền từ động cơ servo (7) sang cụm giá mẫu (3) trên tạo chuyển động quay M_z từ $(-4^\circ \text{ đến } +7^\circ) \pm 3^\circ$.

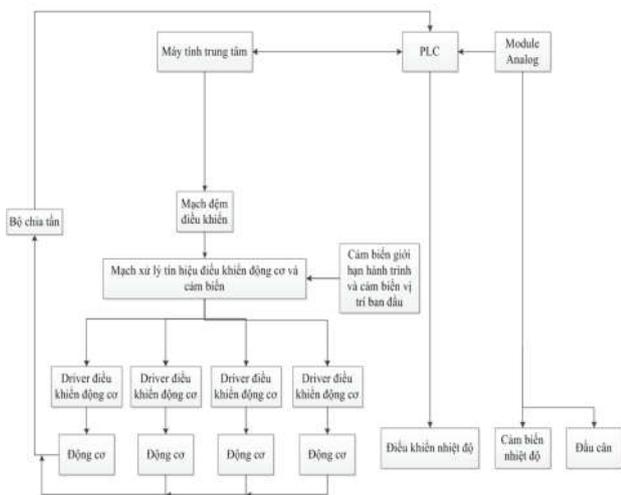
- Cụm xoay co - duỗi: chuyển động được truyền từ động cơ servo (5) sang cụm giá mẫu sau tạo chuyển động lắc My tạo thành chuyển động co - duỗi $(-18^\circ \text{ đến } 25^\circ) \pm 3^\circ$ cho khớp háng.

- Cụm xoay trong - ngoài: chuyển động được truyền từ động cơ servo (6) sang cụm giá mẫu bên tạo chuyển động lắc My tạo thành chuyển động xoay trong - ngoài $(2^\circ \text{ đến } -10^\circ) \pm 3^\circ$ cho khớp háng.

- Giá đặt mẫu thử: mẫu KHTP được giá đặt đúng với tư thế làm việc của khớp háng tự nhiên (cổ xương đùi nghiêng một góc 30° so với ổ cối). Đồ gá sử dụng vật liệu chống ăn mòn, có khả năng cố định xương đùi và ổ cối. Mẫu thử phải sử dụng loại mẫu tương ứng với mẫu được dùng để giải phẫu. Đồ gá phải được bao bọc cẩn thận để ngăn chặn sự ô nhiễm từ máy thử nghiệm và không khí.

Thiết kế hệ thống điều khiển máy thử mòn:

Xác định phương án điều khiển: dựa vào chức năng và yêu cầu của máy thử mòn, bộ điều khiển cần điều khiển và giám sát được trạng thái của máy thử mòn bao gồm: điều khiển 4 trục của máy chạy theo đúng yêu cầu của máy thử mòn, giám sát chu kỳ chạy, giám sát lực tác động lên KHTP, giám sát quỹ đạo chạy của trục co - duỗi, trục xoay dạng - khép, trục xoay trong - ngoài. Từ đó, vẽ đồ thị quỹ đạo chạy của trục co - duỗi, trục xoay dạng - khép, trục xoay trong - ngoài. Vậy bộ điều khiển cần có 8 ngõ vào xung tốc độ cao, 8 ngõ ra xuất xung và chiều cho động cơ các trục, các ngõ vào xử lý tín hiệu cảm biến lực, cảm biến tiệm cận, các nút nhấn. Từ các phân tích trên cho ra sơ đồ cấu hình bộ điều khiển của máy thử mòn (hình 6).



Hình 6: cấu hình hệ thống điều khiển máy thử mòn

Bộ điều khiển bao gồm: 1- Một máy tính trung tâm có chức năng giám sát và điều khiển các trục của máy thử mòn; 2- Một mạch đếm giao tiếp máy tính: làm nhiệm vụ cấp xung và điều khiển hướng cho các động cơ, nhận tín hiệu cảm biến giới hạn hành trình, cảm biến vị trí ban đầu; 3- Bộ chia tần số có nhiệm vụ giảm tần số từ encoder của các động cơ, sau đó đưa vào bộ đọc xung tốc độ cao của PLC. Theo tìm hiểu các PLC có trên thị trường thường có bộ đọc xung tốc độ cao ở chế độ đọc xung đôi < 100 kHz. Theo đó, cần thiết kế bộ chia tần số xuống 4 lần để đảm bảo tốc độ đọc cho các động cơ (bảng 2 thể hiện tần số xung sau khi qua bộ chia tần số xuống 4 lần); 4- Một PLC làm nhiệm vụ thu thập dữ liệu encoder từ các động cơ, thu thập dữ liệu cảm biến nhiệt độ qua cổng AI, thu thập dữ liệu lực nén trên khớp háng qua cổng AI để đảm bảo tốc độ đọc dữ liệu, tránh sai số khi đọc dữ liệu, điều khiển cụm gia nhiệt (bảng 3). Theo ISO 14242-1 và các phân tích ở trên, tốc độ thu thập dữ liệu của PLC phải < 10 ms, tức là tần số đọc AI phải lớn hơn 100 Hz, tần số quét phải lớn hơn 100 Hz.

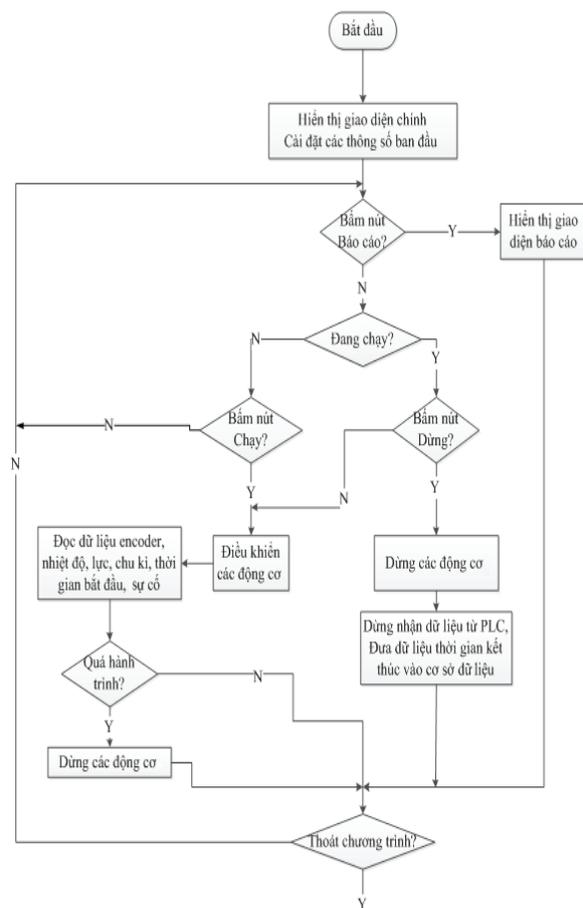
Bảng 2: tần số xung encoder sau khi qua bộ chia tần

Tên các trục	Tần số xung sau khi qua bộ chia tần (kHz)
Trục co - duỗi	29,825
Trục xoay dạng - khép	24,4
Trục xoay trong - ngoài	8,325
Trục tạo lực	62,5

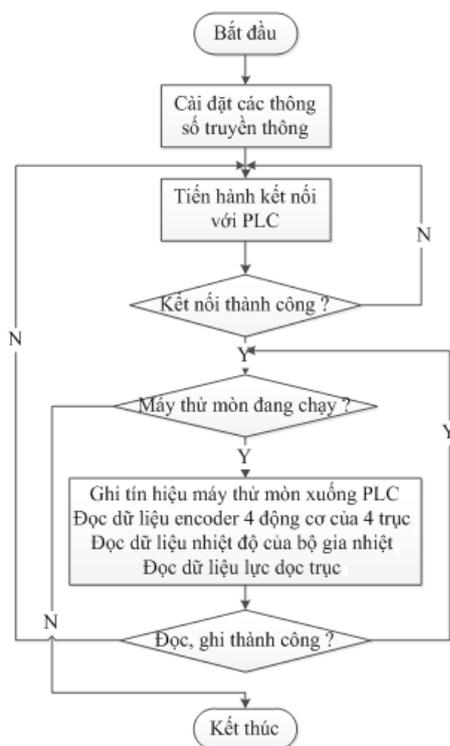
Bảng 3: tín hiệu cần thu thập và điều khiển của PLC

TT	Tín hiệu	Số lượng	Kiểu tín hiệu	Mô tả
1	Tín hiệu xung encoder	8	Xung tốc độ cao (HSC)	Các xung trả về từ động cơ các trục có tần số xung được mô tả ở bảng 2
2	Tín hiệu nhiệt độ	1	Ngõ vào tương tự (Analog)	Tín hiệu từ cảm biến nhiệt của cụm gia nhiệt
3	Tín hiệu lực đọc trực	1	Ngõ vào tương tự (Analog)	Tín hiệu từ đầu cân trả về
4	Tín hiệu điều khiển nhiệt độ	1	Ngõ ra số	Điều khiển nhiệt độ cụm gia nhiệt

Xây dựng giải thuật chương trình điều khiển máy: dựa vào cấu hình của bộ điều khiển máy thử mòn, giải thuật chương trình điều khiển máy bao gồm giải thuật chương trình máy tính và giải thuật chương trình PLC. Giải thuật chương trình điều khiển máy được trình bày trên hình 7, 8.



Hình 7: giải thuật chương trình điều khiển máy

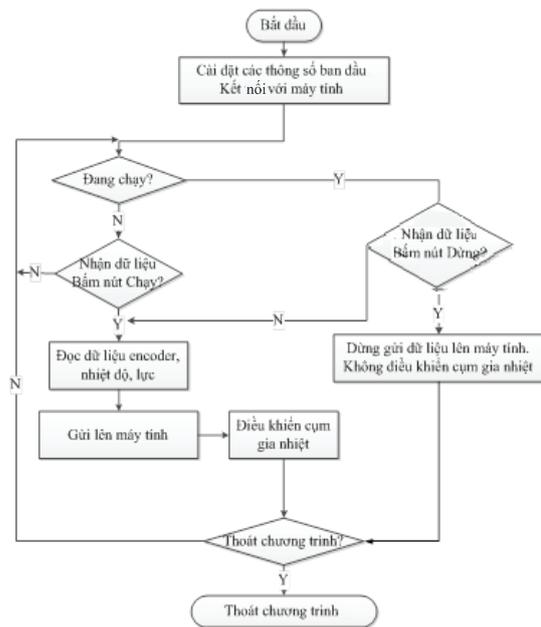


Hình 8: giải thuật truyền thông giữa máy tính và PLC

Giải thuật điều khiển PLC: PLC trong hệ thống điều khiển máy thử mòn có nhiệm vụ thu thập dữ liệu encoder, nhiệt độ, lực, lỗi, chạy dừng, đồng thời điều khiển nhiệt độ cho bộ gia nhiệt. Encoder từ các trục của máy thử mòn được đưa về từ mạch đệm xử lý tín hiệu là tín hiệu 2 xung A, B có tần số cao. Do đó, cần xây dựng giải thuật xử lý tín hiệu encoder. PLC có mô đun là HSC (High Speed Counter) là mô đun có chức năng đọc xung tốc độ cao với tốc độ đọc 3 kênh 80 kHz, một kênh 30 kHz.

Các cảm biến nhiệt độ là PT100 đưa tín hiệu về là dữ liệu tương tự nên cần có một mô đun chuyển đổi từ tương tự sang số để xử lý tín hiệu nhiệt độ nên cần xử lý tín hiệu tương tự sang số và điều khiển nhiệt độ.

PLC cần truyền dữ liệu lên máy tính trung tâm để lưu giá trị thu thập được vào cơ sở dữ liệu phục vụ báo cáo và hiển thị. Do đó, cần có mô đun truyền thông giao tiếp máy tính. Giải thuật PLC được mô tả trong hình 9.



Hình 9: giải thuật điều khiển trên PLC

Chế tạo máy thử mòn

Sau khi thiết kế hoàn chỉnh, máy thử mòn đã được chế tạo và đưa vào vận hành thử nghiệm tại Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về Điều khiển số và Kỹ thuật hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh từ tháng 7.2015 (hình 10). Nhìn chung, máy hoạt động ổn định, đạt các chức năng và yêu cầu kỹ thuật.



Hình 10: máy thử mòn KHTP

Kết luận

- Máy thử mòn KHTP được thiết kế và chế tạo tại Việt Nam nhằm phục vụ quá trình thử nghiệm mòn của KHTP theo các tiêu chuẩn ISO 14242-1, 14242-2, 14242-3.

- Máy có đặc tính kỹ thuật phù hợp nhằm mô phỏng 3 nhóm hoạt động (co - duỗi, quay trong - ngoài, dạng - khép) của khớp háng người.

- Mẫu thử KHTP được thử nghiệm với 5.000.000 chu kỳ trên máy thử mòn (khoảng 60 ngày chạy máy liên tục), được đo độ mòn theo phương pháp thay đổi thể tích theo quy định của tiêu chuẩn ISO 14242-2.

- Nhờ máy thử mòn, có thể xác định được các thông tin liên quan đến quá trình mài mòn của vật liệu KHTP như tốc độ mòn, cơ chế mài mòn, phân tích bề mặt mòn, phân tích các phần tử vật liệu bị mòn...

- Kinh nghiệm thiết kế và chế tạo máy mô phỏng thử mòn KHTP cho phép phát triển tiếp tục các máy thử nghiệm cột sống hay các bộ phận khớp khác trên cơ thể người.

Lời cảm ơn

Công trình được thực hiện trong khuôn khổ đề tài KH&CN cấp nhà nước mã số KC03.24/11-15 tại Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về Điều khiển số và Kỹ thuật hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

Tài liệu tham khảo

- [1] ISO 14242, *Implant for surgery - Wear of total hip joint prostheses*.
- [2] Phoenix Tribology Ltd (2011), *TE86 MULTI - STATION HIP JOINT SIMULATOR*.
- [3] Saikko V, et al (1992), "A Five-Station Hip Joint Simulator for Wear Rate Studies", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 1992 206:195.
- [4] AMTI force and motion, *ADL Hip Simulator*.
- [5] Shore Western Manufacturing (2009), *Hip Wear Simulator*.
- [6] *BioPulsTM Dual-Station, TMASTM Hip Simulator*.
- [7] V Saikko (2005), "A 12-Station Anatomic Hip Joint Simulator", *Proc. ImechE, Vol.219*, Part H: J. Engineering in Medicine.
- [8] Bergmann G, et al (2001), "Hip contact forces and gait patterns from routine activities", *Journal of Biomechanics*, **34**, pp.859-871.
- [9] Bergmann G, et al (2010), "Standard Loads Hip Joint", *Biomed Mater Eng*, **20(2)**, pp.65-67.