

NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN PLC ĐỒNG BỘ CẤP PHÔI CHO MÁY CẮT SỢI NHỎ

RESEARCH ON A SYNCHRONOUS PLC-BASED FEEDING CONTROL SYSTEM FOR A SMALL-FILAMENT CUTTING MACHINE

Phạm Tuấn Hải¹, Nguyễn Trung Kiên^{1,*}, Mai Xuân Hải¹, Nguyễn Văn Toàn²

¹Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

²Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: nguyentrungkien.vcn@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu thiết kế và triển khai hệ thống điều khiển PLC vô cấp cho cơ cấu đồng bộ giữa chuyển động kéo phôi và chuyển động cắt trong máy cắt sợi nhỏ. Mục tiêu của nghiên cứu là nâng cao độ chính xác cắt, tăng tính ổn định vận hành và khả năng thích ứng với các điều kiện sản xuất khác nhau. Một cơ cấu điều chỉnh chính xác cao được tích hợp với chiến lược điều khiển biến thiên liên tục nhằm đảm bảo sự đồng bộ theo thời gian thực giữa hai chuyển động. Thuật toán điều khiển được xây dựng dựa trên tín hiệu phản hồi từ các cảm biến vị trí và tốc độ, cho phép bù sai lệch động và giảm thiểu sai số pha. Một thiết bị máy cắt sợi nhỏ đã được chế tạo và thử nghiệm trong nhiều chế độ làm việc khác nhau. Kết quả cho thấy giải pháp đề xuất cải thiện đáng kể độ chính xác cắt, giảm hao phí vật liệu và mở rộng dải làm việc so với các phương pháp điều khiển tốc độ cố định truyền thống. Nghiên cứu này cung cấp một phương pháp thực tiễn và đóng góp vào sự tiến bộ của công nghệ điều khiển tự động trong các hệ thống sản xuất chính xác.

Từ khóa: Máy cắt sợi nhỏ; Thiết kế cơ khí; Thông số cắt; Thử nghiệm.

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a continuously variable PLC-based control system for synchronizing the feeding and cutting motions in a small-filament cutting machine. The objective of the study is to improve cutting accuracy, enhance operational stability, and increase adaptability under various production conditions. A high-precision adjustment mechanism was integrated with a continuously variable control strategy to ensure real-time synchronization between the two motions. The control algorithm was developed based on feedback signals from position and speed sensors, enabling dynamic error compensation and phase deviation reduction. A prototype small-filament cutting machine was fabricated and experimentally evaluated under different operating conditions. The results demonstrate that the proposed approach significantly improves cutting accuracy, reduces material waste, and extends the operating range compared with conventional fixed-speed control methods. This study provides a practical solution and contributes to the advancement of automatic control technologies in precision manufacturing systems.

Keywords: Small-filament cutting machine; Mechanical design; Cutting parameters; Experiment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quy trình sản xuất sợi hóa chất có chiều dài từ 0,8 đến 12 mm và đường kính từ 0,6 đến 4,0 mm, công đoạn cắt tạo hình đóng vai trò quan trọng trong việc bảo đảm độ chính xác kích thước, tính đồng đều và chất lượng kỹ thuật của sản phẩm đầu ra. Hiệu quả của quá trình cắt ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất, độ ổn định công nghệ và độ tin cậy của toàn bộ hệ thống sản xuất. Trong bối cảnh xu hướng tự động hóa ngày càng được đẩy mạnh trong công nghiệp chế tạo, yêu cầu về các hệ thống cắt có khả năng vận hành liên tục, chính xác và ổn định đang trở thành một trong những yếu tố then chốt nhằm giảm lao động thủ công, hạn chế tỷ lệ phế phẩm và nâng cao mức độ an toàn cho người vận hành.

Tại nhiều cơ sở sản xuất hiện nay, quá trình cắt sợi hóa chất vẫn chủ yếu sử dụng các phương pháp thủ công hoặc bán tự động. Mặc dù các phương pháp này có ưu điểm nhất định về tính linh hoạt và chi phí đầu tư ban đầu thấp, chúng vẫn tồn tại nhiều hạn chế như độ chính xác cắt chưa cao, sai số kích thước lớn và năng suất vận hành không ổn định. Đặc biệt, đối với các loại vật liệu hóa chất có đặc tính dễ cháy nổ, việc phụ thuộc nhiều vào thao tác thủ công còn tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn lao động và ảnh hưởng đến độ tin cậy của quá trình sản xuất [1]. Ngoài ra, sự thiếu đồng bộ giữa thiết kế cơ khí và các thông số công nghệ trong quá trình vận hành có thể gây ra hiện tượng biến dạng sản phẩm, nứt gãy vi mô hoặc sai lệch hình học, từ đó làm suy giảm chất lượng cũng như tuổi thọ sử dụng của sản phẩm [2].

Cùng với sự phát triển của các hệ thống sản xuất thông minh, yêu cầu về khả năng đồng bộ hóa chuyển động và độ chính xác điều khiển trong các máy cắt ngày càng trở nên khắt khe hơn nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện

đại và tối ưu hóa hiệu quả sản xuất. Tuy nhiên, nhiều hệ thống cắt hiện nay vẫn sử dụng cơ chế truyền động theo cấp hoặc vận hành ở tốc độ cố định, dẫn đến khó khăn trong việc phối hợp chính xác giữa chuyển động kéo phôi và chuyển động cắt. Sự không đồng bộ này thường gây ra sai lệch chiều dài sản phẩm, làm gia tăng tỷ lệ phế phẩm và giảm hiệu suất tổng thể của hệ thống sản xuất [3].

Trong những năm gần đây, các hệ thống điều khiển dựa trên PLC đã được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp nhờ khả năng vận hành ổn định, chống nhiễu tốt và phù hợp với các bài toán điều khiển tuần tự phức tạp [4]. Tuy nhiên, việc triển khai các chiến lược điều khiển vô cấp nhằm đồng bộ hóa các chuyển động liên tục với độ chính xác cao vẫn còn là một thách thức lớn, đặc biệt đối với các hệ thống phi tuyến chịu ảnh hưởng của nhiễu động và thay đổi tải trong quá trình vận hành như máy cắt sợi nhỏ [5]. Bên cạnh đó, phần lớn các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào cải tiến cơ cấu cơ khí hoặc tối ưu riêng lẻ từng chuyển động, trong khi bài toán đồng bộ hóa thời gian thực giữa cơ cấu kéo phôi và cơ cấu cắt vẫn chưa được nghiên cứu một cách toàn diện.

Xuất phát từ các vấn đề nêu trên, bài báo này đề xuất một giải pháp tích hợp giữa cơ cấu điều chỉnh có độ chính xác cao và hệ thống điều khiển PLC vô cấp nhằm thực hiện đồng bộ hóa thời gian thực giữa chuyển động kéo phôi và chuyển động cắt trong máy cắt sợi nhỏ. Giải pháp được phát triển với mục tiêu nâng cao độ chính xác cắt, giảm sai lệch pha giữa các cơ cấu chuyển động và cải thiện tính ổn định của hệ thống trong các điều kiện vận hành khác nhau. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng hướng tới việc nâng cao hiệu quả sản xuất, giảm tỷ lệ phế phẩm và tăng độ tin cậy cho các hệ thống cắt sợi hóa chất trong môi trường công nghiệp hiện đại.



2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện theo hướng kết hợp giữa mô hình hóa lý thuyết, thiết kế kỹ thuật và kiểm chứng thực nghiệm nhằm đảm bảo tính khoa học và khả năng ứng dụng thực tiễn của hệ thống. Trước hết, phương pháp phân tích và mô hình hóa được sử dụng để xây dựng mô hình động học của hệ thống kéo phôi – cắt. Các mối quan hệ giữa vận tốc kéo phôi, tần số cắt và sai lệch pha được thiết lập, từ đó hình thành cơ sở cho việc thiết kế điều khiển đồng bộ. Tiếp theo, phương pháp thiết kế kỹ thuật được tiến hành để phát triển cơ cấu cơ khí có khả năng điều chỉnh vô cấp với độ chính xác cao. Đồng thời, hệ thống điều khiển PLC được xây dựng với cấu trúc phù hợp, bao gồm lựa chọn phần cứng, cấu hình tín hiệu vào/ra và tích hợp các cảm biến vị trí, tốc độ nhằm thu thập tín hiệu phản hồi theo thời gian thực. Thuật toán điều khiển được phát triển dựa trên nguyên lý điều khiển phản hồi, cho phép đồng bộ hóa liên tục giữa chuyển động kéo phôi và chuyển động cắt thông qua việc điều chỉnh tốc độ và vị trí. Cơ chế bù sai lệch được tích hợp nhằm giảm thiểu sai số pha và nâng cao độ ổn định của hệ thống trong các điều kiện vận hành khác nhau [6, 7].

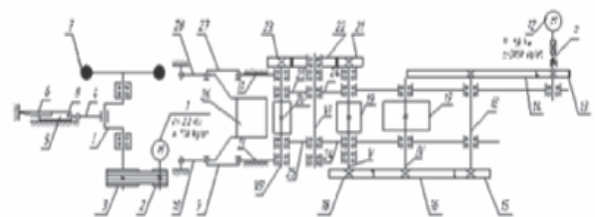
Cuối cùng, phương pháp thực nghiệm được thực hiện thông qua việc chế tạo máy cắt sợi nhỏ và tiến hành thử nghiệm ở nhiều chế độ làm việc. Dữ liệu thu thập được xử lý và phân tích để đánh giá độ chính xác cắt, mức độ đồng bộ và hiệu quả vận hành. Kết quả được so sánh với phương pháp điều khiển truyền thống nhằm xác nhận tính hiệu quả của giải pháp đề xuất.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xây dựng sơ đồ nguyên lý máy cắt sợi nhỏ

Dựa trên sơ đồ nguyên lý các máy cắt

trong và ngoài nước [8], Viện Công nghệ - Tổng cục Công nghiệp quốc phòng nghiên cứu thiết kế, chế tạo máy cắt sợi nhỏ dựa trên nguyên lý Máy San Galli của Nga và tham khảo máy cắt PCK hiện có tại Nhà máy Z195 với mục đích nhằm thiết kế, chế tạo máy cắt sợi nhỏ vừa kế thừa ưu điểm của máy PCK, vừa loại bỏ các nhược điểm của máy cũ. Sơ đồ nguyên lý hệ dẫn động được xây dựng theo hướng dung hòa giữa kế thừa và cải tiến, qua đó làm rõ vai trò của từng thành phần trong việc nâng cao hiệu quả tổng thể. Động cơ điện chính truyền chuyển động qua bộ truyền đai đến trục khuỷu; cơ cấu tay quay – con trượt tạo chuyển động tịnh tiến cho dao cắt; động cơ servo điều khiển chuyển động kéo phôi với độ chính xác cao thông qua hệ bánh răng truyền động giữa các trục con lăn; Hệ thống điều khiển PLC sẽ phối hợp hai chuyển động này thông qua các hệ dẫn động cơ khí để đảm bảo năng suất và hiệu suất cắt sợi nhỏ đạt theo yêu cầu. Nguyên lý phối hợp giữa chuyển động cắt và tiếp dẫn phôi, một trong những điểm then chốt để đạt được chiều dài cắt chính xác được làm sáng tỏ qua mô tả chuyển động tuần hoàn của dao và chuyển động gián đoạn của động cơ servo.



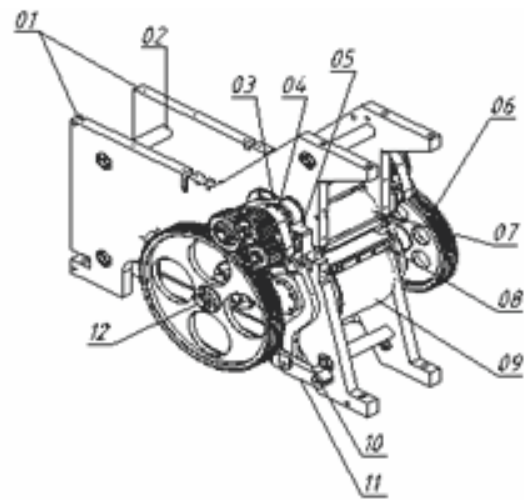
Hình 1. Sơ đồ hệ thống dẫn động của máy cắt sợi nhỏ (1 - Động cơ điện phòng nổ; 2, 3 - Bộ truyền đai; 4 - Trục truyền; 5 - Giá đỡ; 6 - Dao cắt; 7 - Bánh đà; 8 - Cảm biến vị trí; 9 - Thanh truyền; 10 - Con trượt dừng; 11 - Giá đỡ cố định; 12 - Động cơ servo phòng nổ; 13, 14, 15, 16, 18, 21, 22, 23 - Bánh răng; 17 - Lô cố định; 19 - Lô ép tĩnh; 20 - Lô ép động; 24, 25 - Gối đỡ có khoảng cách cố định; 26 - Đối trọng điều chỉnh).

Nguyên lý hoạt động của máy cắt sợi nhỏ có thể được mô tả như sự phối hợp giữa hai hệ truyền động riêng biệt nhưng được đồng bộ hóa chặt chẽ, bao gồm hệ cắt và hệ cấp phôi. Ở hệ cắt, động cơ phòng nổ (1) truyền chuyển động quay thông qua bộ truyền đai (2, 3) đến trục lệch tâm I; tại đây, chuyển động quay được biến đổi thành chuyển động tịnh tiến của giá đỡ (5) mang dao cắt (6) thông qua trục truyền (4), thực hiện quá trình cắt phôi theo yêu cầu công nghệ. Song song, hệ cấp phôi được dẫn động bởi động cơ servo (12), với chuyển động được truyền qua hệ trục (II–VII) và các cặp bánh răng (13, 14, 15, 16, 18, 21, 22, 23) đến các lô kéo phôi (lô ép động 20, lô ép tĩnh 19 và lô cố định 17). Cơ cấu này đảm nhiệm việc đưa phôi vào vùng cắt với chế độ chuyển động gián đoạn, phù hợp với chu kỳ làm việc của dao cắt. Lưu lượng phôi cấp vào được điều chỉnh thông qua khe hở giữa lô ép động (20) và lô ép tĩnh (19), với cơ cấu hiệu chỉnh gồm con trượt đứng (10) và thanh truyền (9), đồng thời được duy trì ổn định nhờ đối trọng (26). Đáng chú ý, chiều dài sản phẩm cắt phụ thuộc trực tiếp vào mức độ đồng bộ giữa chuyển động cắt và chuyển động cấp phôi. Sự đồng bộ này được điều khiển thông qua chương trình của động cơ servo (12), dựa trên tín hiệu phản hồi từ cảm biến vị trí (8). Cụ thể, trong pha đi lên của giá đỡ (5), động cơ servo thực hiện kéo phôi; ngược lại, trong pha đi xuống, động cơ dừng để đảm bảo quá trình cắt diễn ra ổn định. Tốc độ và góc quay của động cơ servo được thiết lập tương ứng với chiều dài sản phẩm yêu cầu, qua đó cho phép điều chỉnh linh hoạt chế độ làm việc của hệ thống.

3.2. Thiết kế cụm kéo phôi tối ưu cho máy cắt sợi nhỏ

Quá trình vận hành của máy cắt sợi nhỏ được đặc trưng bởi sự phối hợp đồng thời giữa hai chuyển động chính: chuyển động cắt và

chuyển động cấp (kéo) phôi sợi vào vị trí cắt. Trong đó, chuyển động cấp phôi được thực hiện bởi cụm kéo phôi, đóng vai trò đảm bảo sự ổn định và chính xác của quá trình cấp phôi. Cụm này bao gồm các thành phần chính như bánh răng, trục lô, thanh truyền, giá đỡ, bạc cách và lô kéo trên (Hình 2). Việc bố trí và tương tác giữa các chi tiết trong cụm kéo phôi có ảnh hưởng trực tiếp đến độ đồng đều của chuyển động cấp, từ đó tác động đến chất lượng và độ ổn định của quá trình cắt.



Hình 2. Cấu tạo cụm kéo phôi và cơ cấu cắt của máy cắt sợi nhỏ (01 - Giá cố định; 02 - Cỡ chặn; 03, 04 - Gối ổ; 05 - Giá trượt; 06 - Bánh răng; 07 - Lô động; 08 - Giá đỡ phôi; 09 - Lô cố định; 10 - Càn; 11 - Đối trọng; 12 - Lô tĩnh).

Chuyển động cấp sợi vào vị trí cắt được thực hiện dưới dạng quay gián đoạn (quay – dừng – quay) của hệ truyền động, nhằm đảm bảo sự đồng bộ với chu kỳ cắt. Cụ thể, mômen từ động cơ servo được truyền qua hộp số đến bánh răng sau đó tiếp tục phân phối tới cụm kéo phôi thông qua các cặp bánh răng liên kết. Cụm kéo phôi nhận và truyền chuyển động qua hệ trục bánh răng đến các lô kéo (lô cố định 09, lô tĩnh 12 và lô động 07), thực hiện chức năng đưa phôi vào vùng cắt. Cụm kéo phôi được lắp đặt trên hai giá cố định (01), với khoảng cách giữa

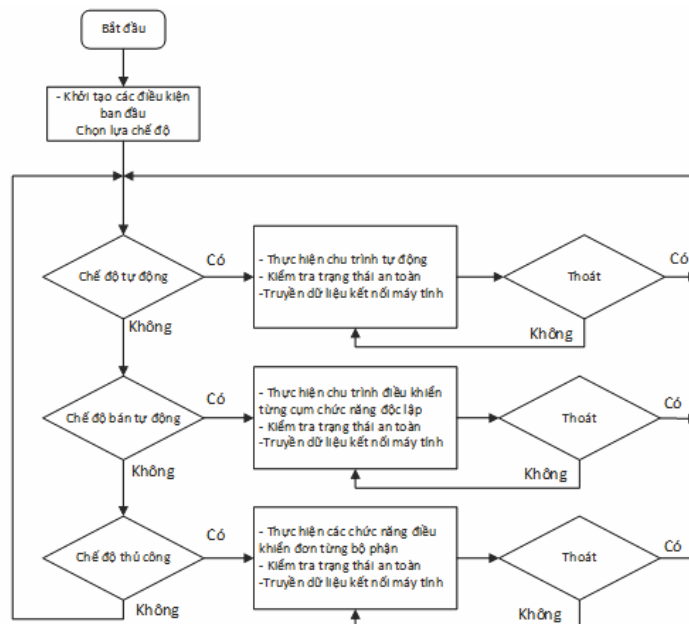
hai giá được duy trì nhờ các cỡ chặn (02), góp phần đảm bảo độ cứng vững của hệ. Đáng chú ý, chiều dày phôi phụ thuộc trực tiếp vào khoảng cách trục giữa lô tĩnh và lô động. Khoảng cách này được điều chỉnh thông qua cơ cấu gồm gối ổ cố định (03, 04) và giá trượt (05). Trong đó, lô động (07) được liên kết với giá trượt và có khả năng dịch chuyển theo phương thẳng đứng khi các trục quay, cho phép điều chỉnh linh hoạt khe hở giữa hai lô. Để duy trì trạng thái làm việc ổn định sau khi hiệu chỉnh, cụm sử dụng cơ cấu càng (10) kết hợp với đối trọng (11). Khi đối trọng đạt trạng thái cân bằng (song song với mặt sàn), lô động tương ứng ở vị trí thấp nhất, đảm bảo điều kiện làm việc ổn định. Bên cạnh đó, cụm kéo phôi còn được trang bị giá đỡ phôi (08) nhằm định hướng phôi vào vùng cắt. Giá đỡ này được chế tạo từ vật liệu đồng Br 9-4 kết

hợp cao su, không chỉ giảm ma sát mà còn hạn chế nguy cơ phát sinh tia lửa trong quá trình vận hành, qua đó nâng cao mức độ an toàn của hệ thống.

3.3. Xây dựng thuật toán chương trình điều khiển máy cắt

3.3.1. Xây dựng sơ đồ thuật toán và chương trình điều khiển hệ thống điều khiển trung tâm

Chương trình điều khiển được xây dựng nhằm đảm bảo hệ thống vận hành đồng bộ theo chu trình tự động. Các thiết bị được cấu hình với ba chế độ làm việc: tự động, bán tự động và bằng tay (Hình 3).



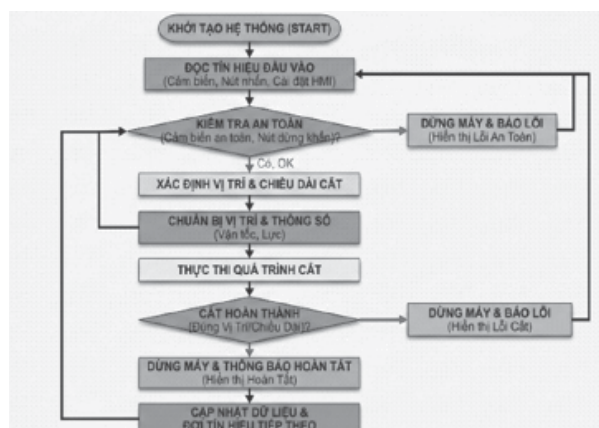
Hình 3. Sơ đồ thuật toán lựa chọn chế độ

Kiến trúc điều khiển PLC cho phép chuyển đổi linh hoạt giữa các chế độ mà không làm gián đoạn quá trình vận hành, đồng thời vẫn duy trì các điều kiện an toàn cần thiết. Cách

tiếp cận này góp phần nâng cao tính ổn định và hiệu quả của hệ thống trong các điều kiện vận hành khác nhau.

3.3.2. Thuật toán điều khiển máy cắt ở chế độ tự động

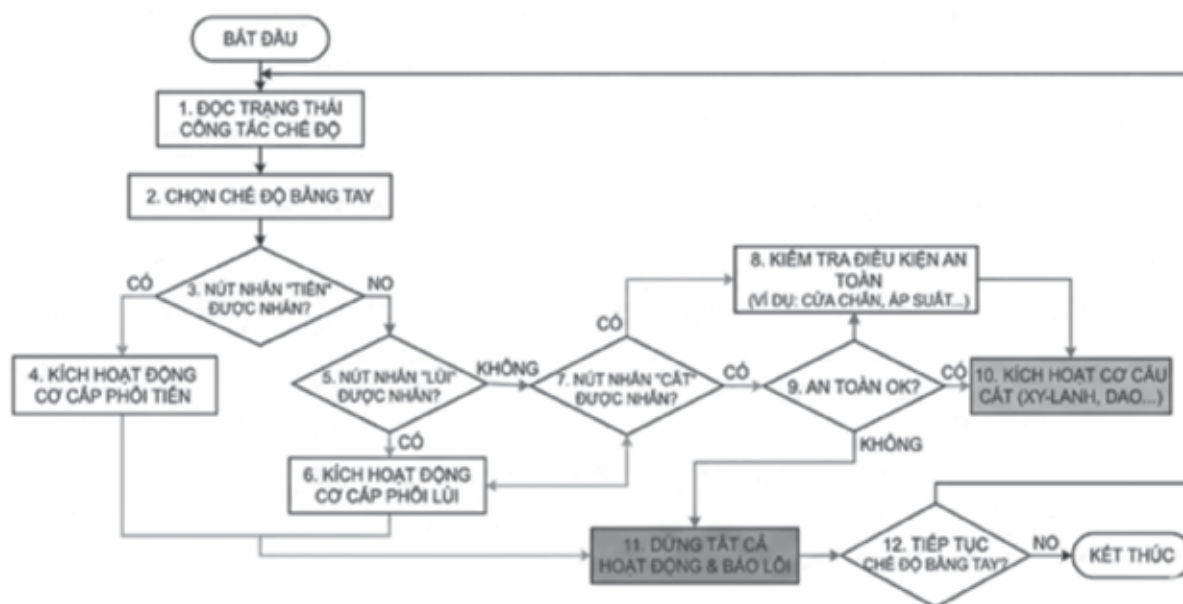
Thuật toán điều khiển chế độ tự động được xây dựng theo cấu trúc tuần tự kết hợp điều kiện rẽ nhánh nhằm bảo đảm an toàn và hiệu quả vận hành. Hệ thống khởi tạo bằng việc thu thập tín hiệu từ cảm biến vị trí, cảm biến an toàn và người vận hành. Cơ chế kiểm tra an toàn được triển khai ngay từ giai đoạn đầu để phát hiện và xử lý kịp thời các trạng thái bất thường, qua đó nâng cao độ tin cậy hệ thống. Sau khi các điều kiện an toàn được đáp ứng, thuật toán xác định vị trí và chiều dài cắt dựa trên tín hiệu phản hồi từ cảm biến nhằm bảo đảm độ chính xác sản phẩm. Các thông số vận hành như tốc độ và lực cắt được điều chỉnh phù hợp với vật liệu gia công. Quá trình cắt tiếp tục được giám sát thông qua bước kiểm tra hoàn thành để phát hiện sai lệch và duy trì chất lượng đầu ra trước khi chuyển sang chu trình kế tiếp.



Hình 4. Sơ đồ khối thuật toán điều khiển máy chạy tự động

3.3.3. Thuật toán điều khiển máy cắt ở chế độ bằng tay

Khác với chế độ tự động hoạt động theo chu trình khép kín, chế độ bằng tay yêu cầu hệ thống phản hồi trực tiếp theo thao tác của người vận hành thông qua HMI hoặc nút nhấn cơ. Vì vậy, thuật toán điều khiển được xây dựng với trọng tâm là an toàn và ngăn ngừa thao tác sai gây hư hỏng thiết bị hoặc mất an toàn lao động.



Hình 5. Sơ đồ khối thuật toán điều khiển chế độ bằng tay

Khi kích hoạt chế độ bằng tay, hệ thống hủy chu trình tự động, đặt lại trạng thái và chuyển sang giám sát liên tục các tín hiệu điều khiển. Bộ điều khiển quét các lệnh chức năng như tiến/lùi trục, nâng/hạ dao và cắt, đồng thời kiểm tra nghiêm ngặt các điều kiện liên động trước khi thực thi. Các cơ chế khóa an toàn giúp ngăn xung đột chuyển động, chẳng hạn không cho phép hạ dao khi trục đang di chuyển. Chuyển động chỉ duy trì khi nút điều khiển được giữ và dừng ngay khi nhả nút hoặc đạt giới hạn hành trình, trong khi lệnh cắt được thực hiện theo cơ chế một lần để tăng độ an toàn và độ tin cậy vận hành.

Sơ đồ khối (Hình 5) cho thấy thuật toán hoạt động trong vòng lặp quét tốc độ cao, bao gồm các nhánh kiểm tra an toàn, điều khiển trục và điều khiển cắt. Cách tiếp cận này đảm bảo khả năng phản hồi tức thời, đồng thời duy trì tính ổn định và an toàn trong quá trình vận hành thủ công.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và triển khai thành công hệ thống điều khiển PLC vô cấp cho cơ cấu đồng bộ giữa chuyển động kéo phôi và chuyển động cắt trong máy cắt sợi nhỏ. Việc tích hợp cơ cấu điều chỉnh chính xác cao với chiến lược điều khiển vô cấp cho phép hệ thống đạt được sự đồng bộ theo thời gian thực, đồng thời bù sai lệch động và giảm thiểu sai số pha trong quá trình vận hành. Kết quả thực nghiệm trên mô hình chế tạo cho thấy giải pháp đề xuất cải thiện rõ rệt độ chính xác cắt, nâng cao tính ổn định làm việc và giảm hao phí vật liệu so với các phương pháp điều khiển tốc độ cố định truyền thống. Bên cạnh đó, hệ thống còn thể hiện khả năng làm việc linh hoạt trong nhiều chế độ vận hành, đáp ứng tốt các yêu cầu sản xuất khác nhau. Nhìn chung, nghiên cứu đã cung cấp một giải pháp hiệu quả và có tính ứng

dụng cao cho các hệ thống cắt chính xác, góp phần thúc đẩy sự phát triển của công nghệ điều khiển tự động trong lĩnh vực chế tạo. Trong tương lai, cần tiếp tục hoàn thiện thuật toán điều khiển, tích hợp các cảm biến thông minh và mở rộng phạm vi ứng dụng cho các hệ thống quy mô lớn và phức tạp hơn. ♦

Ngày nhận bài: **28/4/2026**

Ngày phản biện: **10/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. P.D. Nhan (2013), “*Propellant and Nitroxellol Rocket Fuel Production Technology*”. Military Technical Academy, 286pp (in Vietnamese).
- [2]. T. Urbanski (1984), “*Chemistry and Technology of Explosives*”. Oxford, UK: Pergamon Press.
- [3]. Smith, J., & Brown, L. (2018), “*Precision cutting in propellant manufacturing systems*”. Journal of Manufacturing Processes.
- [4]. Li, X., & Wang, H. (2019), “*Adaptive control strategies for precision mechatronic systems*”. Mechanical Systems and Signal Processing.
- [5]. Zhang, Y., et al. (2020), “*Synchronization control of multi-axis motion systems based on feedback compensation*”. IEEE Access.
- [6]. Factory Z195 (2008), “*Technical Conditions of NDSI-2K Propellant*”, 20pp (in Vietnamese).
- [7]. Factory Z195 (2008), “*Technical Conditions of ΦCF-2.B41M Propellant*”, 18pp (in Vietnamese).
- [8]. Richard Budynas, Keith Nisbett (2010), “*Shigley's Mechanical Engineering Design*”. McGraw-Hill. ISBN-13 978-0073529288.