

REVIEW ON SYNCHRONOUS CONTROL OF MULTIPLE HYDRAULIC ACTUATORS

Nguyen Ngoc Hai^{1,2}, Tran Xuan Bo^{1*}

¹School of Mechanical Engineering - Hanoi University of Science and Technology, ²Hanoi University of Civil Engineering

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 25/02/2025	Hydraulic synchronization control systems are extensively utilized across various industrial sectors and play a pivotal role in advancing the field of mechanical engineering. Research on hydraulic synchronization control has emerged as a crucial area of study, aiming to enhance system performance, stability, and adaptability to diverse operating conditions. This paper provides a comprehensive review of the current research trends and development in hydraulic synchronization control systems. It includes system classification, key characteristics, factors influencing synchronization accuracy, and a synthesis of domestic and international researches. Furthermore, it explores prospective advancements in synchronization control technology. The research methods used include analysis, synthesis, and comparison of existing research papers to provide objective and valuable assessments. This study aims to facilitate a systematic approach for researchers new to the field of motion synchronization of hydraulic actuators, enabling them to comprehend developmental trends and establish a foundation for future research. This is also a reference document for research orientation and application of hydraulic synchronization systems in industry.
Revised: 25/5/2025	
Published: 26/5/2025	
KEYWORDS	
Hydraulic synchronization	
Hydraulic actuator	
Synchronization control	
Hydraulic servo system	
Hydraulic on-off valve	

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ NHIỀU CƠ CẤU CHẤP HÀNH THỦY LỰC

Nguyễn Ngọc Hải^{1,2}, Trần Xuân Bộ^{1*}

¹Trường Cơ khí - Đại học Bách khoa Hà Nội, ²Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 25/02/2025	Hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp và đóng vai trò quan trọng trong sự phát triển của ngành cơ khí. Việc nghiên cứu điều khiển đồng bộ thủy lực trở thành một hướng đi quan trọng nhằm nâng cao hiệu suất, tính ổn định và thích nghi với các điều kiện làm việc khác nhau. Bài báo này phân tích tổng quan về tình trạng nghiên cứu và xu hướng phát triển của hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực bao gồm: phân loại, đặc điểm các hệ thống đồng bộ thủy lực, các yếu tố ảnh hưởng đến điều khiển chính xác đồng bộ, tóm tắt tình hình nghiên cứu trong, ngoài nước và xu hướng phát triển của hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực trong tương lai. Phương pháp nghiên cứu được sử dụng bao gồm phân tích, tổng hợp và so sánh các tài liệu nghiên cứu hiện có để đưa ra những nhận xét, đánh giá khách quan, có giá trị. Bài báo này giúp người bắt đầu nghiên cứu về lĩnh vực đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực có thể tiếp cận một cách hệ thống, nắm bắt được các xu hướng phát triển và định hướng cho các nghiên cứu tương lai của họ. Đây cũng là tài liệu tham khảo định hướng nghiên cứu và ứng dụng hệ thống đồng bộ thủy lực trong công nghiệp.
Ngày hoàn thiện: 25/5/2025	
Ngày đăng: 26/5/2025	
TỪ KHÓA	
Đồng bộ chuyển động thủy lực	
Cơ cấu chấp hành thủy lực	
Điều khiển đồng bộ	
Hệ thống servo thủy lực	
Van on-off thủy lực	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12132>

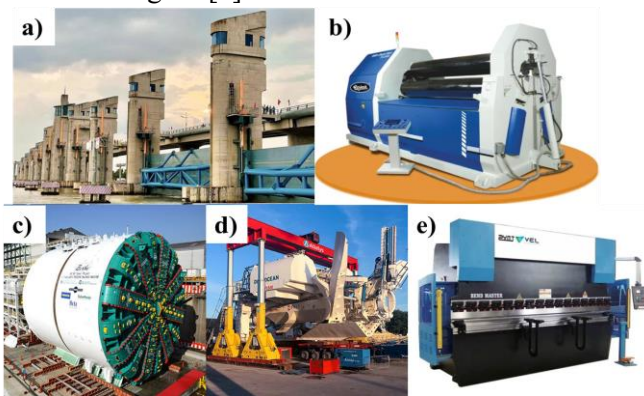
* Corresponding author. Email: bo.tranxuan@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Hệ thống truyền động thủy lực nổi bật với các ưu điểm như công suất đầu ra lớn, độ bền cao, tính ổn định và độ tin cậy cao, tốc độ phản ứng nhanh, thiết kế nhỏ gọn và linh hoạt [1]. Hệ truyền động này được ứng dụng rộng rãi trong các thiết bị cơ khí như máy gia công kim loại, thiết bị luyện kim, máy móc nông nghiệp, ngành hàng không vũ trụ và nhiều lĩnh vực công nghiệp khác. Truyền động thủy lực đã trở thành một yếu tố then chốt thúc đẩy sự phát triển của ngành cơ khí. Trong đó, hệ thống điều khiển đồng bộ các cơ cấu chấp hành thủy lực đóng vai trò quan trọng trong lĩnh vực này, có ảnh hưởng lớn đến quá trình nghiên cứu và phát triển công nghệ truyền động thủy lực.

Hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực là một hệ thống có hai hay nhiều chấp hành thủy lực có khả năng được điều khiển chuyển động song song, với cùng một vận tốc và vị trí tương đối với nhau mặc dù mỗi cơ cấu chấp hành chịu tải khác nhau. Trong hệ thống điều khiển đồng bộ, khi được điều khiển chính xác, vị trí và vận tốc các cơ cấu chấp hành tại cùng một thời điểm là như nhau. Với các hệ thống điều khiển đồng bộ, tải trọng chất lên các cơ cấu chấp hành khác nhau không ảnh hưởng đến vị trí và vận tốc chuyển động đồng bộ. Do đó, vị trí của các cơ cấu chấp hành tương ứng với giá trị đặt đầu vào còn vận tốc các chấp hành tương ứng được tự động điều chỉnh sao cho sự đồng bộ được thực hiện càng chính xác càng tốt [2].

Hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực với các tính chất như trên được sử dụng rộng rãi trong dân dụng và công nghiệp. Một số ứng dụng điển hình của việc đồng bộ chuyển động cơ cấu chấp hành thủy lực có thể kể đến như: hệ thống nâng hạ cửa công thủy điện, hệ thống nâng hạ cầu đường, máy chấn tôn, máy cán thép, máy khoan hầm. Cụ thể, hệ thống thủy lợi cống Cái Lớn Cái Bé (Hình 1a [3]) có cửa cống được nâng hạ nhờ hệ thống xy lanh thủy lực điều khiển đồng bộ. Máy cán thép (Hình 1b [4]) sử dụng các xy lanh dẫn động con lăn được điều khiển đồng bộ để đảm bảo độ phẳng và đồng đều cho toàn bộ tấm thép.



Hình 1. Ứng dụng đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực [3]-[7]: a) Hệ thống thủy lợi, b) Máy cán thép, c) Máy đào hầm, d) Giàn nâng thủy lực, e) Máy chấn tôn

Máy đào hầm (Hình 1c [5]) với hệ thống đẩy khiên được điều khiển bởi các xy lanh thủy lực song song được đồng bộ chuyển động. Các xy lanh cũng được đồng bộ trong hệ thống giàn thủy lực sử dụng để thi công các đoạn đường trên cao (Hình 1d [6]). Máy chấn tôn (Hình 1e [7]) sử dụng đồng bộ chuyển động các xy lanh có gắn dao chấn để uốn các tấm kim loại thành biên dạng mong muốn.

Hiện nay, có nhiều cách để thực hiện đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực [8], [9]. Việc đồng bộ chuyển động có thể thực hiện bởi liên kết cơ học, điều khiển lưu lượng, điều khiển thể tích. Các phần tử sử dụng trong mạch thủy lực đồng bộ có thể là van ổn tốc, van tỷ lệ, van servo, bơm thay đổi được lưu lượng. Trong thực tế, việc đồng bộ chuyển động gặp nhiều khó khăn bởi các yếu tố như ma sát, tải tác dụng lên cơ cấu chấp hành không đều, rò rỉ trong hệ thống, sự bất đối xứng của hệ thống. Các yếu tố này sẽ được đề cập và phân tích trong phần 3.2. Để đạt được hiệu quả cao trong đồng bộ chuyển động nhiều cơ cấu chấp hành thủy lực, các nhà nghiên cứu chủ yếu đi sâu vào phát triển thuật toán điều khiển sử dụng van, bơm thủy lực, thay vì đồng bộ bằng liên kết cơ học có độ chính xác thấp. Mặc dù vấn đề đồng bộ chuyển động thủy lực là cấp thiết nhưng có rất ít nghiên cứu được thực hiện trong nước về vấn đề này [2], [10]. Trong công nghiệp, các kỹ sư chủ yếu sử dụng đồng bộ cơ học hoặc các van chia lưu lượng có độ chính xác đồng bộ thấp, các hệ thống đòi hỏi độ chính xác đồng bộ cao đều được nhập khẩu từ nước ngoài. Ở nước ngoài, vấn đề này rất được quan tâm. Từ phương pháp đồng bộ chuyển động điều khiển vòng hở [11] đến điều khiển vòng kín [12] - [22], các nghiên cứu đã đạt được nhiều thành tựu quan trọng.

Bài báo này tập trung nghiên cứu tổng quan về tình hình phát triển điều khiển đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực. Bài báo giải thích về khái niệm, phân loại các hệ thống đồng bộ thủy lực, chỉ ra nguyên nhân gây sai số đồng bộ hóa và tóm tắt các nghiên cứu đã thực hiện. Cuối cùng, dựa trên các phân tích, xu hướng phát triển của hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực được dự đoán và triển vọng tương lai được đề xuất.

2. Phương pháp nghiên cứu

Điều khiển đồng bộ chuyển động nhiều cơ cấu chấp hành thủy lực là một lĩnh vực quan trọng trong thủy lực, đã và đang được quan tâm nghiên cứu trên thế giới. Tuy nhiên tại Việt Nam, có rất ít nghiên cứu về vấn đề này. Vì vậy, trong nghiên cứu tổng quan này, chúng tôi sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

Phân tích hệ thống

Nghiên cứu tổng quan này sử dụng phân tích hệ thống để xác định và phân tích các vấn đề liên quan như: đặc điểm động lực học của hệ thống đồng bộ chuyển động thủy lực, các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác đồng bộ, các thách thức gặp phải trong quá trình điều khiển đồng bộ nhiều cơ cấu chấp hành. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành phân tích tài liệu để thu thập, tổng hợp và so sánh các phương pháp điều khiển hiện có.

Phân tích tài liệu

Phân tích tài liệu dùng để phân tích, đánh giá các tài liệu đã xuất bản đề cập đến vấn đề đồng bộ chuyển động thủy lực. Quá trình thu thập tài liệu được dựa trên các nguồn uy tín như IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, ASME Digital Collection, các cơ sở dữ liệu khoa học như Scopus, Web of Science, thư viện quốc gia Việt Nam và các tạp chí khoa học trong nước. Các từ khóa tìm kiếm bao gồm “đồng bộ chuyển động thủy lực”, “đồng tốc thủy lực”, “điều khiển chuyển động nhiều cơ cấu chấp hành thủy lực”, “hydraulic actuator synchronization”, “multi-actuator hydraulic system”, v.v.

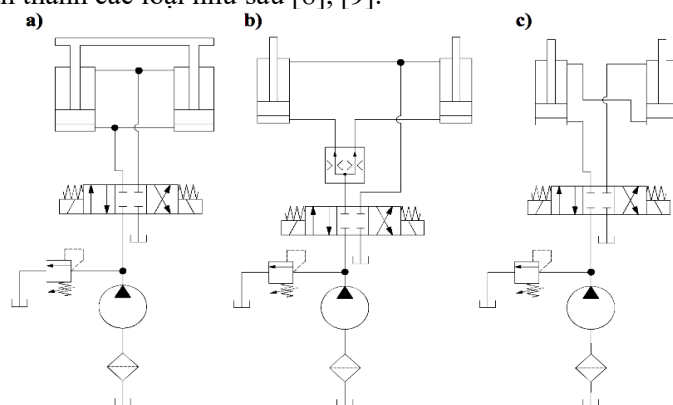
Phân tích nội dung

Sau khi thu thập tài liệu, nghiên cứu tiến hành phân tích nội dung dựa trên các tiêu chí như mức độ liên quan đến điều khiển đồng bộ, tính mới của phương pháp điều khiển và kết quả điều khiển đạt được. Kết quả phân tích giúp xác định các thành tựu đạt được và khó khăn khi nghiên cứu lĩnh vực này, từ đó đề xuất các giải pháp cải tiến nhằm nâng cao chất lượng điều khiển đồng bộ chuyển động thủy lực.

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

3.1. Loại và đặc điểm các hệ thống đồng bộ thủy lực

Tùy theo lĩnh vực ứng dụng, chế độ điều khiển và nhiệm vụ khác nhau, hệ thống đồng bộ thủy lực có thể được phân thành các loại như sau [8], [9]:

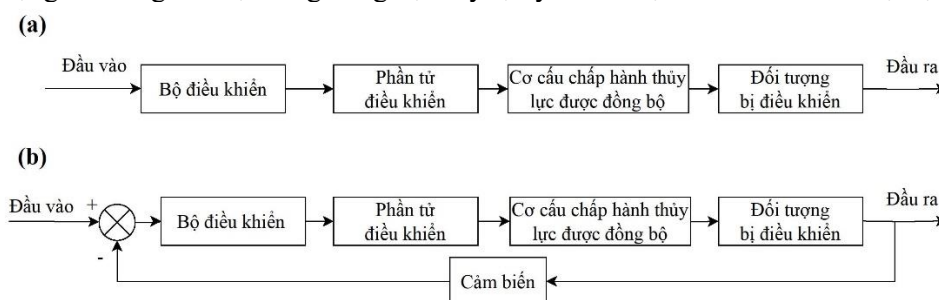


Hình 2. Mạch điều khiển đồng bộ phân loại theo nguyên lý đồng bộ:

a) Đồng bộ bằng cơ học, b) Đồng bộ điều khiển lưu lượng, c) Đồng bộ điều khiển thể tích

Theo nguyên lý đồng bộ, mạch đồng bộ có thể phân chia thành đồng bộ cơ học, đồng bộ điều khiển lưu lượng và đồng bộ điều khiển thể tích như thể hiện trong Hình 2. Đồng bộ bằng cơ học (Hình 2a) tận dụng cấu trúc vật lý để đạt được kết nối cứng giữa các pít tông. Cách này có đặc điểm là cấu trúc đơn giản và vận hành đáng tin cậy. Tuy nhiên, mạch này chỉ phù hợp trong trường hợp hai xy lanh gần nhau và chênh lệch tải giữa các xy lanh là nhỏ. Mạch đồng bộ điều khiển lưu lượng (Hình 2b) sử dụng các van điều khiển lưu lượng chất lỏng vào hoặc ra khỏi xy lanh thủy lực để đạt được đồng bộ. Mạch đồng bộ điều khiển thể tích (Hình 2c) thực hiện kiểm soát thể tích của khoang kín. Cách điều khiển này được áp dụng trong các xy lanh thủy lực nối tiếp hoặc song song, động cơ hoặc bơm song song, và các ứng dụng tương tự. Hiệu suất thể tích và sai số kích thước vật lý của hệ thống là các yếu tố chính ảnh hưởng đến độ chính xác đồng bộ.

Tùy thuộc vào việc có phản hồi trong hệ thống điều khiển đồng bộ hay không, hệ thống đồng bộ được chia thành đồng bộ vòng hở hoặc đồng bộ vòng kín (Hình 3). Mạch đồng bộ thủy lực điều khiển vòng hở không thực hiện việc phát hiện, phản hồi và điều khiển đầu ra của các cơ cấu chấp hành như thể hiện trong Hình 3a. Đặc điểm chung của loại mạch này là chuyển động đồng bộ của các cơ cấu chấp hành chỉ được đảm bảo bởi độ chính xác của các thành phần thủy lực, do đó độ chính xác đồng bộ thấp và tính ổn định kém, làm hạn chế ứng dụng thực tế của phương pháp điều khiển này. Mạch đồng bộ thủy lực điều khiển vòng kín (Hình 3b) có thể thực hiện điều chỉnh sai số và phản hồi trên đầu ra của các cơ cấu chấp hành. Mặc dù mạch điều khiển vòng kín có cấu trúc phức tạp và chi phí cao hơn, nó có thể khắc phục nhiều từ các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác đồng bộ, từ đó đạt được điều khiển đồng bộ có độ chính xác cao. Phương pháp điều khiển này được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống đồng bộ thủy lực yêu cầu độ chính xác cao và tự động hóa.



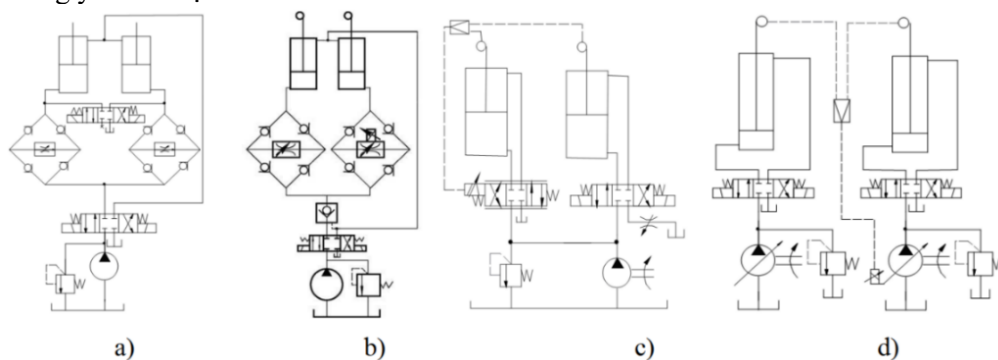
Hình 3. Mạch điều khiển đồng bộ phân loại theo phản hồi trong hệ thống:

a) Đồng bộ vòng hở, b) Đồng bộ vòng kín

Tùy thuộc vào việc hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực có bù hay không, nó có thể được chia thành đồng bộ không bù và đồng bộ có bù. Hệ thống đồng bộ thủy lực không bù rất đơn giản, có độ chính xác điều khiển thấp và độ bền vững kém, trong khi hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực có bù kịp thời bù đắp sai số đồng bộ, do đó độ chính xác điều khiển của cao và bền vững hơn.

Theo các phản tử điều khiển khác nhau, hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực được chia thành đồng bộ điều khiển bằng bơm và đồng bộ điều khiển bằng van. Hiệu suất đồng bộ hóa được điều khiển bằng bơm cao, tốc độ phản hồi chậm, độ chính xác điều khiển trong điều kiện tải không đổi cao. Trong khi đó, hiệu suất đồng bộ hóa được điều khiển bằng van thấp, nhưng tốc độ phản hồi nhanh và độ chính xác đồng bộ hóa trong điều kiện tải động cao. Theo các loại van điều khiển khác nhau, hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực điều khiển bằng van được chia thành đồng bộ dòng chảy, đồng bộ tỷ lệ điện - thủy lực, và đồng bộ servo điện - thủy lực thể hiện trong Hình 4 [8]. Sơ đồ thủy lực đồng bộ dòng chảy sử dụng van ổn tốc và van bypass thể hiện trong Hình 4a. Van ổn tốc được sử dụng để làm cho hai xy lanh thủy lực đồng bộ chuyển động hai chiều một cách tổng thể. Trong quá trình hoạt động, cảm biến liên tục kiểm tra vị trí dịch chuyển của hai pít tông. Nếu dịch chuyển vượt quá ngưỡng cho phép, van phân phối 4/3 sẽ thay đổi vị trí điều khiển để thực hiện dòng chảy bypass, giúp xy lanh tăng, giảm tốc. Trong quá trình sửa lỗi, van phân phối đóng mở liên tục dẫn đến dao động áp suất lớn trong hệ thống, gây ra rung động và tiếng ồn, do đó ảnh

hường đến độ chính xác. Hệ thống đồng bộ này có cấu trúc đơn giản và chi phí thấp, nhưng áp suất trong hệ thống không ổn định và mức tiêu thụ năng lượng cao, nên độ chính xác đồng bộ thấp khi tải thay đổi. Phương pháp sử dụng van tỷ lệ điện - thủy lực trong mạch đồng bộ được thể hiện trong Hình 4b, áp dụng phương pháp điều khiển chính - phụ. Chuyển động qua lại của xy lanh bên trái được thiết lập bởi van ổn tốc bên trái và được xem là đầu ra lý tưởng; xy lanh bên phải được điều khiển bởi van tỷ lệ điện - thủy lực, có thể thực hiện đồng bộ hóa thông qua theo dõi liên tục. Kế hoạch này có thể thực hiện điều khiển điện - thủy lực tỷ lệ liên tục và khắc phục nhược điểm dao động áp suất hệ thống do việc đảo chiều thường xuyên của van điện từ trong phương pháp dùng van ổn tốc và van bypass. Ngưỡng sửa lỗi nhỏ, áp suất hệ thống ổn định và quá trình vận hành thử dễ dàng, tuy nhiên chi phí cao hơn. Phương pháp sử dụng van servo điện - thủy lực trong mạch đồng bộ được thể hiện trong Hình 4c, cũng áp dụng phương pháp điều khiển chính - phụ. Khi hai xy lanh di chuyển lên, tốc độ của xy lanh bên phải được thiết lập bởi van tiết lưu và được xem là đầu ra lý tưởng, trong khi tốc độ của xy lanh bên trái được điều khiển bởi van servo điện - thủy lực theo tín hiệu phản hồi để thực hiện đồng bộ hóa. Van servo điện-thủy lực là một thành phần điều khiển thủy lực có độ chính xác cao và đáp ứng tần số nhanh, và các mạch điều khiển đồng bộ thủy lực sử dụng nó đạt tốc độ phản hồi cao và độ chính xác điều khiển đồng bộ cao hơn. Tuy nhiên, van servo điện - thủy lực có cấu trúc phức tạp, chi phí xây dựng cao và nhạy cảm với ô nhiễm. Thiết bị điều khiển điện tương ứng phức tạp, khó bảo trì và đòi hỏi đầu tư lớn. Phương pháp sử dụng bơm biến đổi tỷ lệ điện - thủy lực trong mạch điều khiển đồng bộ được thể hiện trong Hình 4d, cũng áp dụng phương pháp điều khiển chính - phụ, coi một xy lanh là đầu ra lý tưởng và xy lanh còn lại sẽ theo dõi. Khi thiết bị kiểm tra dịch chuyển phát hiện sự khác biệt dịch chuyển của thanh piston hai xy lanh thủy lực đạt đến ngưỡng sửa lỗi đã thiết lập, hệ thống điều khiển điện thay đổi giá trị dòng điện đưa vào cuộn từ tỷ lệ của bơm biến đổi tỷ lệ, tức là thay đổi lưu lượng cung cấp cho xy lanh thủy lực bên phải từ bơm biến đổi tỷ lệ để đạt được mục tiêu. Mạch này cần ít thành phần hơn và có độ chính xác cao. Áp suất đầu ra của bơm được quyết định bởi tải, và lưu lượng được quyết định bởi tốc độ, do đó thực hiện được việc phù hợp công suất, tiết kiệm năng lượng và giảm nhiệt thải. Hệ thống có hiệu suất cao và tuổi thọ của dầu thủy lực được kéo dài. Tuy nhiên, bơm biến đổi có cấu trúc phức tạp và yêu cầu đầu tư lớn. Kế hoạch này phù hợp với hệ thống đồng bộ có sự thay đổi lớn về tải và tốc độ, cũng như những trường hợp khi hai xy lanh cách xa nhau nhưng yêu cầu độ chính xác cao.



Hình 4. Mạch điều khiển đồng bộ phân loại theo phân tử điều khiển [8]: a) Van ổn tốc, b) Van tỷ lệ điện - thủy lực, c) Van servo điện - thủy lực, d) Bơm biến đổi tỷ lệ điện - thủy lực

Ngoài ra, các hệ thống đồng bộ hóa thủy lực khác được chia thành đồng bộ xy lanh thủy lực và đồng bộ mô tơ thủy lực theo các cơ cấu chấp hành khác nhau. Theo các nhiệm vụ điều khiển, nó có thể được chia thành đồng bộ vị trí và đồng bộ tốc độ. Theo số lượng cơ cấu chấp hành, nó có thể được chia thành đồng bộ chuyển động kép và đồng bộ nhiều cơ cấu chấp hành. Theo các phương pháp lắp đặt khác nhau, nó có thể được chia thành đồng bộ hóa ngang và đồng bộ hóa dọc.

3.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác đồng bộ

Để đạt được chuyển động đồng bộ hệ thống thủy lực, lý tưởng nhất là chỉ cần cho phép áp suất bằng nhau và lượng dầu thủy lực bằng nhau chảy qua bộ truyền động có các thông số cấu trúc giống hệt nhau [9]. Nhìn chung, hệ thống đồng bộ thủy lực có lỗi đồng bộ do ô nhiễm dầu và rò rỉ trong hệ thống đồng bộ thủy lực, ma sát và tải không đều của bộ truyền động, bố trí không đối xứng, áp suất ngược của bộ truyền động, dao động áp suất dầu, lỗi sản xuất và lắp đặt các thành phần và các yếu tố khác. Ngay cả khi áp dụng điều khiển vòng kín, hệ thống đồng bộ thủy lực trong điều kiện làm việc thực tế vẫn phức tạp và phi tuyến tính do hiện tượng trễ điều khiển của nó. Rất khó để thiết lập mô hình toán học chính xác của nó để đạt được khả năng điều khiển có độ chính xác cao, do đó việc tạo ra lỗi đồng bộ là không thể tránh khỏi. Có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác đồng bộ chuyển động thủy lực, chủ yếu được tóm tắt do các nguyên nhân sau [8]:

(a) Tải không đều của hệ thống đồng bộ thủy lực: trong quá trình hoạt động, tải tác động lên cơ cấu chấp hành có thể thay đổi do nhiều nguyên nhân như sự thay đổi lực cản do ma sát, thay đổi độ lớn và hướng của tải bên ngoài, lực quán tính, v.v. Khi tải trên các cơ cấu chấp hành thủy lực khác nhau, sẽ xảy ra lỗi đồng bộ hóa và cơ cấu chấp hành thủy lực có tải lớn sẽ có lượng dầu nạp vào nhỏ dẫn đến tốc độ chuyển động chậm và ngược lại. Điều này gây nghiêng hoặc xoắn kết cấu, nguy hiểm cho hệ thống và người vận hành.

(b) Sự bất đối xứng của hệ thống thủy lực: tính bất đối xứng của hệ thống thủy lực sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác đồng bộ. Sai số về đường kính của các xy lanh làm cho diện tích tác động khác nhau dẫn đến tốc độ di chuyển khác nhau dù được cấp cùng lưu lượng dầu, lực đẩy/kéo khác nhau dù cùng áp suất làm việc. Độ nhám bề mặt giữa các bộ phận chuyển động tương đối khác nhau dẫn đến lực ma sát khác nhau hay tải tác động lên xy lanh khác nhau. Chiều dài đường ống và số lượng đoạn gấp khúc khác nhau làm cho lực cản dòng chảy giữa các xy lanh khác nhau dẫn đến một số xy lanh chuyển động nhanh hơn gây mất đồng bộ.

(c) Rò rỉ hệ thống: do độ chính xác chế tạo khác nhau của các thành phần thủy lực và khe hở do ma sát khi chuyển động lâu dài gây ra, đường ống thủy lực bị lỏng dẫn đến rò rỉ dầu thủy lực. Rò rỉ dầu có thể làm giảm áp suất trong hệ thống, cơ cấu chấp hành thủy lực hoạt động kém hiệu quả. Rò rỉ dầu ở một xy lanh làm giảm lưu lượng dầu đến xy lanh đó dẫn đến tốc độ di chuyển khác nhau giữa các xy lanh, mất sự đồng bộ chuyển động.

(d) Sự biến đổi và khác biệt về tính chất của các thành phần thủy lực: đặc tính vận hành hệ thống sẽ thay đổi sau thời gian hoạt động dài, và sự thay đổi này không giống nhau giữa các thành phần. Các bơm, van điều khiển trong hệ thống sau một thời gian hoạt động có thể bị mài mòn, kẹt do bụi bẩn, thay đổi hiệu suất gây ra sai số điều khiển. Các cảm biến đo vị trí xy lanh có thể bị lỗi hoặc mất chính xác, đường dây kết nối tín hiệu kém làm chậm phản hồi điều khiển. Độ nhớt dầu thủy lực thay đổi, dầu bị nhiễm bẩn dẫn đến lưu lượng không ổn định, các xy lanh di chuyển không đồng đều, v.v. Các phần tử trong hệ thống liên tục biến đổi theo thời gian, ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác đồng bộ chuyển động.

3.3. Tổng quan tình hình nghiên cứu trong nước về đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực

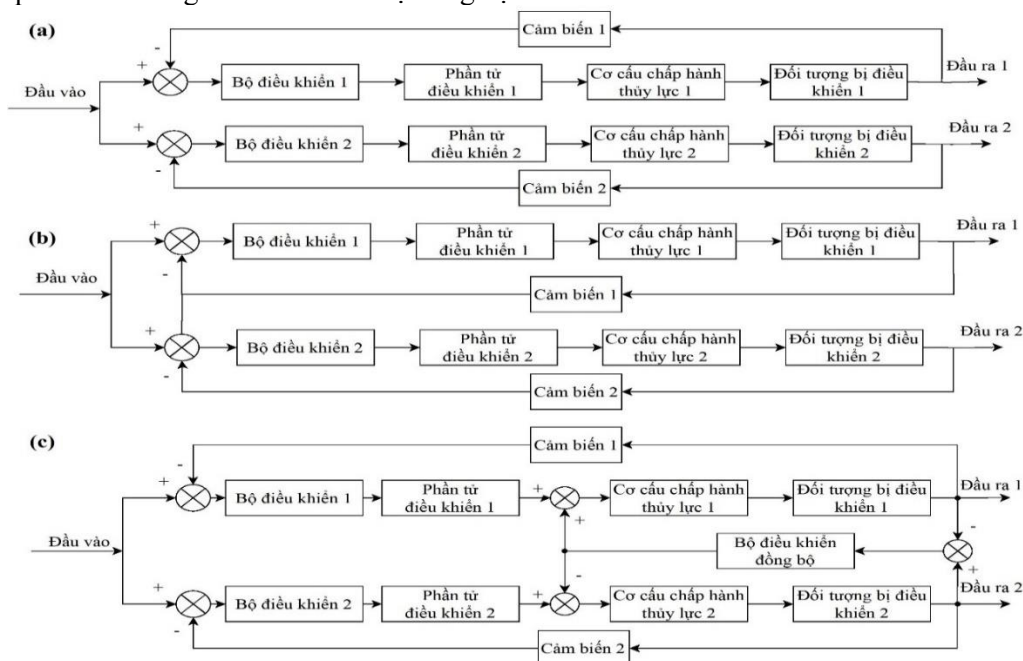
Tại Việt Nam, phương pháp kết nối cứng cơ khí và phương pháp sử dụng các bộ chia lưu lượng để đồng bộ chuyển động của các xy lanh thủy lực thông thường được sử dụng bởi kỹ sư thiết kế. Tuy nhiên, các phương pháp này chỉ được áp dụng với những hệ thống đòi hỏi độ chính xác đồng bộ thấp. Rất ít các công trình nghiên cứu hoặc ứng dụng về điều khiển đồng bộ chính xác cao các xy lanh thủy lực được thực hiện tại Việt Nam. Lý Thanh Hà [2] đã nghiên cứu đề xuất một bộ điều khiển đồng bộ hai xy lanh thủy lực ứng dụng trong đóng mở tự động cửa van thủy lợi và thủy điện. Trong đó, hệ thống sử dụng một bộ chia lưu lượng để chia lưu lượng từ nguồn cấp đến hai xy lanh thủy lực. Hai van tỉ lệ 2/2 điện - thủy lực được sử dụng để điều chỉnh lưu lượng từ bộ chia lưu lượng đến các xy lanh. Tác giả đã đề xuất bộ điều khiển phi tuyến gồm 3 mạch điều khiển gồm mạch điều khiển servo vòng kín, mạch

phản hồi lực tải và mạch khử sai số tĩnh cùng tác động. Mô phỏng với chênh lệch tải trọng giả định 90%/10%, kết quả mô phỏng cho thấy sai số của hệ là 1,5% tổng hành trình làm việc của hệ thống điều khiển đồng bộ. Trường hợp tín hiệu vào dạng sin cho kết quả sai số dưới 2%. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đã điều khiển đồng bộ chuyển động của hai xy lanh thủy lực với yêu cầu mong muốn. Sai số của hệ thống gần như không phụ thuộc tải trọng. Hệ thống đáp ứng được trong thời gian thực.

Trần Xuân Bộ và cộng sự [10] đã nghiên cứu điều khiển đồng bộ hai xy lanh thủy lực sử dụng các van servo thủy lực áp dụng trong máy chấn tôn 40 tấn. Trong hệ thống này, hai van servo điện - thủy lực giống nhau loại bốn cửa ba vị trí được sử dụng để có thể điều khiển chính xác được vị trí của pít tông của từng xy lanh, từ đó đồng bộ chuyển động của hai xy lanh. Hệ thống điều khiển bao gồm ba bộ điều khiển, trong đó hai bộ điều khiển xy lanh và một bộ điều khiển đồng tốc. Hai bộ điều khiển xy lanh trái và phải có chức năng điều khiển sao cho các vị trí pít tông xy lanh trái và xy lanh phải có thể bám chính xác theo đầu vào vị trí mong muốn. Bộ điều khiển đồng tốc có chức năng điều khiển bù sai lệch vị trí của hai xy lanh từ đó đồng bộ chuyển động hai xy lanh. Ba bộ điều khiển đều sử dụng thuật toán điều khiển PID. Kết quả mô phỏng cho thấy ở trạng thái ổn định, sai số vị trí đạt được lần lượt là 0,5 mm và 0,55 mm với từng xy lanh.

3.4. Tổng quan tình hình nghiên cứu ngoài nước về đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực

Trên thế giới, nhiều công trình nghiên cứu về đồng bộ chuyển động của các cơ cấu chấp hành thủy lực đã được công bố. Ding và cộng sự [11] đã đề xuất một phương pháp điều khiển đồng bộ hóa vòng hở bao gồm một bộ cảm biến tải và một van đồng bộ hóa. Bộ cảm biến tải bao gồm một bơm cảm biến tải và một van cảm biến tải. Bơm cảm biến tải trọng cung cấp áp suất và lưu lượng theo yêu cầu của hệ thống thông qua điều khiển áp suất vòng kín. Van cảm biến tải có thể cải thiện khả năng chống lại sự lệch tải thông qua bù áp suất. Van đồng bộ được đặt giữa bơm cảm biến tải và van cảm biến tải để đạt được sự phân chia đều dòng chảy do bơm cung cấp. Kết quả thực nghiệm cho thấy so với điều khiển dùng van đồng bộ truyền thống, chế độ điều khiển này có độ chính xác, hiệu quả và khả năng điều chỉnh tốc độ đồng bộ cao hơn.



Hình 5. Các chế độ điều khiển vòng kín trong hệ thống đồng bộ thủy lực [9]:
a) Điều khiển tương đương, b) Điều khiển chính - phụ, c) Điều khiển ghép nối chéo

Với sự phát triển của lý thuyết điều khiển và công nghệ điều khiển hiện đại, các hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực vòng kín đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống đồng bộ thủy lực có độ chính xác cao. Hệ thống đồng bộ vòng kín có độ chính xác cao do có phản hồi. Bộ điều khiển so sánh phản hồi trực tuyến giữa giá trị đầu ra và giá trị mong muốn sau đó điều chỉnh để giảm độ lệch. Các chế độ điều khiển vòng kín có thể chia thành điều khiển chính - phụ, điều khiển tương đương và điều khiển ghép nối chéo theo chế độ phản hồi khác nhau của giá trị đầu ra thể hiện trong Hình 5.

Lorenz và cộng sự [12] đề xuất hai chế độ điều khiển đồng bộ: điều khiển tương đương và điều khiển chính - phụ. Điều khiển tương đương (Hình 5a) là một cấu trúc song song, trong đó nhiều cơ cấu chấp hành thủy lực tạo thành một vòng khép kín độc lập để từng cơ cấu có thể đạt được điều khiển đồng bộ. Điều khiển tương đương yêu cầu thành phần thủy lực và thành phần điện của hệ thống có tính nhất quán cao, nếu tính nhất quán của từng thành phần tốt thì hệ thống thủy lực có điều khiển tương đương có độ chính xác đồng bộ cao. Điều khiển chính - phụ (Hình 5b) có cấu trúc một cơ cấu chấp hành là mạch chính, và cơ cấu chấp hành còn lại là mạch phụ. Tín hiệu phản hồi sai số trong mạch chính được nhập vào mạch phụ. Điều khiển chính - phụ có thể vì mạch phụ phải tuân theo tín hiệu của mạch chính. Huayong và cộng sự [13] đề xuất hệ thống đồng bộ chuyển động của các xy lanh thủy lực đẩy trên máy đào hầm. Việc đồng bộ chuyển động các xy lanh được thực hiện bằng cách sử dụng bộ điều khiển PID chính - phụ với bù khoảng chết cho sai lệch dịch chuyển. Các thí nghiệm về điều khiển áp suất, tốc độ đẩy cũng như đồng bộ hóa chuyển động xy lanh được tiến hành trên giàn thử nghiệm mô phỏng máy đào hầm. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đề xuất có thể đáp ứng các yêu cầu của quá trình đào hầm với sai số đồng bộ trong khoảng ± 4 mm.

Điều khiển ghép nối chéo (Hình 5c) [14] thiết lập ghép nối giữa các nhánh thủy lực, phát hiện các giá trị độ lệch đầu ra của nhiều nhánh thủy lực và đưa chúng trở lại bộ điều khiển. Khi độ lệch đồng bộ vượt quá một phạm vi nhất định, bộ điều khiển đồng bộ ngay lập tức bù cho sự kết nối của hai cơ cấu chấp hành, do đó làm giảm sai số đồng bộ. Điều khiển ghép nối chéo kết hợp các ưu điểm của điều khiển chính - phụ và điều khiển tương đương. So với điều khiển chính - phụ và điều khiển tương đương, điều khiển ghép nối chéo có thể đạt được độ chính xác đồng bộ cao hơn. Do đó, ngày càng có nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp này. Sun và cộng sự [15] đã đề xuất một chiến lược điều khiển ghép nối chéo bền vững thích nghi thu được sai số đồng bộ hóa tối đa không quá $\pm 0,1$ mm, giúp cải thiện đáng kể độ chính xác đồng bộ của hệ thống điều khiển điện - thủy lực cần chỉnh trượt của máy ép thủy lực. Li và cộng sự [16] đã đề xuất hệ thống điều khiển điện - thủy lực để đồng bộ chuyển động các xy lanh trong thang máy thủy lực. Hệ thống gồm hai bộ điều khiển: bộ điều khiển vận tốc và bộ điều khiển đồng bộ có thể hoạt động độc lập. Một bộ điều khiển phản hồi gia tốc đã được áp dụng để điều khiển vận tốc và một bộ điều khiển PD có bước hạn chế để giảm thiểu lỗi đồng bộ hóa ở các vị trí xy lanh. Kết quả thực nghiệm cho thấy sai số đồng bộ khi áp dụng phương pháp điều khiển này đạt tới ± 2 mm. Sun và Chiu [17] đề xuất hệ thống đồng bộ hóa chuyển động của hai xy lanh trong hệ thống nâng tải trọng 40 kN. Trong đó, chuyển động của hai xy lanh thủy lực được điều khiển bởi hai van servo. Tác giả đã tổng hợp bộ điều khiển thông qua hai quá trình xử lý từng bước bằng cách sử dụng bộ điều khiển đồng bộ hóa chuyển động đa đầu vào – đa đầu ra tuyến tính làm bộ điều khiển vòng ngoài và bộ quan sát nhiễu loạn đơn đầu vào – đầu ra phi tuyến tính dựa trên bộ điều khiển áp suất làm bộ điều khiển vòng trong của mỗi xy lanh. Tác giả chứng minh hiệu suất đồng bộ hóa vẫn đáng kể hơn đáng kể so với việc sử dụng liên kết cơ học và trong hầu hết các trường hợp di chuyển sai số trong khoảng 0,005 inch. Li và cộng sự [18] đã phát triển hệ thống đồng bộ hóa nhóm xy lanh được sử dụng trong thiết bị đẩy cầu đường sắt. Hệ thống điều khiển kín bao gồm hai phần: bộ điều khiển vòng trong và bộ điều khiển vòng ngoài. Thuật toán PID phi tuyến được áp dụng để thực hiện bộ điều khiển vòng ngoài cho việc điều chỉnh sai lệch. Các bộ điều khiển dựa trên phản hồi áp suất được thiết kế riêng cho từng bộ xy lanh như bộ điều khiển vòng trong để xử lý nhiễu và tăng cường hiệu suất điều khiển. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển được thiết kế có thể thực hiện đồng bộ hóa chuyển động của các xy lanh và có khả năng đối phó tốt với các sự cố. Vì vậy, thiết kế phù hợp với các tình huống thực tế và có thể hoàn thành công việc xây dựng cầu đường sắt. Chen và cộng sự [19] thiết kế bộ điều khiển đồng bộ chuyển động một hệ thống điện - thủy lực xy lanh

kép. Hệ thống điều khiển bao gồm một bộ điều khiển mờ đồng bộ chuyển động hai xy lanh và một bộ điều khiển từng xy lanh. Bộ điều khiển cho từng xy lanh bao gồm một bộ điều khiển phản hồi và một bộ điều khiển theo dõi mờ. Trong thiết kế bộ điều khiển mờ tích hợp, bộ điều khiển mờ đồng bộ chịu trách nhiệm phân phối các lệnh đồng bộ hóa chuyển động cho các bộ điều khiển từng xy lanh. Mỗi bộ điều khiển xy lanh sau đó thực hiện điều khiển vị trí từng xy lanh. Kết quả thực nghiệm cho thấy thiết kế bộ điều khiển mờ tích hợp được đề xuất có thể đạt được hiệu quả mục tiêu đồng bộ vị trí trong hệ thống điện - thủy lực xy lanh kép, với sai số đồng bộ tối đa trong khoảng ± 4 mm. Kassem và cộng sự [20] đề xuất hệ thống đồng bộ hóa hai xy lanh thủy lực được sử dụng để tạo dao động cho khuôn nặng của máy đúc liên tục. Kỹ thuật điều khiển ghép nối chéo với bộ điều khiển logic mờ (FLC) được đề xuất nhằm cải thiện sự đồng bộ chuyển động của hai xy lanh servo thủy lực. Việc triển khai thực tế bộ điều khiển liên kết chéo đề xuất trong một nhà máy thép đã xác minh các kết quả lý thuyết. Sử dụng bộ điều khiển liên kết chéo đề xuất sẽ cải thiện sự đồng bộ chuyển động của các xy lanh trong hệ thống HMO khi có nhiễu, và giúp tránh được việc gián đoạn sản xuất không mong muốn. Dong và Zhu [21] đề xuất một chiến lược điều khiển phân tán cho hệ thống nâng quy mô lớn. Chiến lược điều khiển phân tán cho hệ thống nâng quy mô lớn được đề xuất, trong đó các xy lanh phối hợp với các xy lanh lân cận để đạt được sự đồng bộ chuyển động. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống có khả năng đồng bộ tốt sáu xy lanh. Mặc dù vậy, tác giả cho rằng công nghệ này vẫn cần phải kiểm chứng thực nghiệm và nghiên cứu thêm. Wang và cộng sự [22] đề xuất chiến lược điều khiển đồng bộ chuyển động hai xy lanh thủy lực để đạt được điều khiển đồng bộ hóa vị trí có độ chính xác cao của hệ thống điều khiển vị trí tỉ lệ điện - thủy lực (EPPS) điển hình khi tồn tại sự phi tuyến của vùng chết van. Hệ thống điều khiển bao gồm hai phần: một là các bộ điều khiển nghịch đảo vùng chết thích ứng của mỗi cơ cấu chấp hành thủy lực để bù đắp các vùng chết không xác định. Phần còn lại là bộ điều khiển khử nhiễu chủ động tuyến tính (LADRC) cho sai số đồng bộ vị trí. Hiệu suất của giải pháp điều khiển đề xuất đã được kiểm chứng thông qua mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho thấy sai số đồng bộ vị trí đạt trong khoảng $\pm 2,5$ mm.

Ngoài các nghiên cứu đồng bộ chuyển động thủy lực sử dụng van ổn tốc, van tỉ lệ, van servo, hệ thống đồng bộ chuyển động thủy lực còn có thể điều khiển bằng bơm. So với hệ thống điều khiển bằng van, hệ thống điều khiển bằng bơm có hiệu suất cao, tỏa nhiệt ít, tổn thất năng lượng thấp, nguyên lý điều khiển tương đối đơn giản, tiếng ồn thấp, dễ bảo trì và lắp đặt thuận tiện [23]. Prabhakar và cộng sự [24] so sánh hiệu suất động của điều khiển bơm và điều khiển van cho động cơ thủy lực, và kết quả cho thấy hệ thống động cơ thủy lực điều khiển bằng van nhạy hơn. Ngoài ra, hệ thống đồng bộ chuyển động thủy lực còn có thể kết hợp điều khiển van với điều khiển bơm. Hệ thống điều khiển đồng bộ mới với điều khiển bơm là chính và điều khiển van là phụ trợ có thể tích hợp các ưu điểm tương ứng của điều khiển van và điều khiển bơm, làm cho hệ thống có các đặc điểm của cả độ chính xác điều khiển và tốc độ phản hồi. Ge và cộng sự [25] đã áp dụng điều khiển van và điều khiển bơm cho hệ thống đồng bộ của máy đào thủy lực để cải thiện tốc độ phản ứng và độ chính xác điều khiển của hệ thống, thiết kế áp suất dòng chảy để phù hợp với điều khiển độc lập của đầu vào và đầu ra, áp dụng nó cho hệ thống máy đào thủy lực để giảm biến động áp suất của cần cẩu thủy lực hoạt động từ 6,9 Mpa đến 1,7 Mpa, đồng thời, mức tiêu thụ năng lượng của một chu kỳ làm việc của cần cẩu đã giảm 15%.

3.5. Xu hướng phát triển về điều khiển đồng bộ thủy lực

Với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, hệ thống điều khiển thủy lực nói chung và hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực nói riêng được thiết kế để đáp ứng các yêu cầu như: điều khiển thông minh, tăng tính ổn định và hiệu suất, các thành phần nhẹ và thu gọn, an toàn và các đặc tính khác [26]. Dự đoán về triển vọng phát triển hệ thống đồng bộ thủy lực có thể được tóm tắt như sau:

(a) Độ tin cậy, an toàn và bảo vệ môi trường: trên tiền đề đảm bảo tính chính xác của đồng bộ thủy lực, với sự cải tiến của công nghệ điều khiển, hệ thống đồng bộ thủy lực sẽ phát triển theo hướng an toàn và tin cậy hơn trong tương lai. Một thuật toán điều khiển thông minh và các thành phần thủy lực với cấu trúc mới sẽ cải thiện hiệu quả và tốc độ đáp ứng của hệ thống thủy lực, do đó làm giảm mức tiêu thụ năng lượng của hệ thống, giảm rò rỉ dầu và cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng.

(b) Tích hợp và phát triển các phần tử thủy lực: các thành phần thủy lực tích hợp có thể làm cho cấu trúc của hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực nhỏ gọn hơn, không cần kết nối các phụ kiện đường ống thủy lực, do đó loại bỏ hiệu quả rung động và rò rỉ dầu tại các đường ống và khớp nối. Trong tương lai, máy bơm thủy lực mới thông minh, van điện thủy lực (kỹ thuật số) thông minh, xi lanh đồng bộ điều khiển điện tử thông minh, v.v. có thể làm cho độ chính xác của hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực cao hơn.

(c) Tự động hóa, trí tuệ nhân tạo và dữ liệu lớn: chiến lược điều khiển thông minh mới sẽ được áp dụng để cho phép điều chỉnh tự động và cải thiện hơn nữa hiệu quả điều khiển của hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực. Việc sử dụng phương pháp trí tuệ nhân tạo [27] và các thuật toán điều khiển liên quan khác sẽ trở thành xu hướng phát triển của các hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực trong tương lai do ưu điểm của nó là tự học liên tục, tiếp cận nhanh với các mô hình phức tạp phi tuyến và độ chính xác điều khiển cao.

(d) Số hóa: đặc điểm nổi bật nhất của van điều khiển số là khả năng đáp ứng nhu cầu điều khiển bằng máy tính, sử dụng tín hiệu số để thực hiện điều khiển, bỏ qua bộ chuyển đổi D/A thường dùng trong hệ thống điều khiển máy tính [28]. Van điều khiển số cũng có khả năng chống ô nhiễm tốt, tiết kiệm chi phí, hiệu suất cao [29]. Với sự phát triển của công nghệ điều khiển thủy lực và sản xuất các van điều khiển số mới [30], [31], phương pháp điều khiển đồng bộ này sẽ có triển vọng sáng lạn.

4. Kết luận

Bài báo đã phân tích tổng quan về tình hình nghiên cứu hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực, bao gồm: phân loại và đặc điểm các hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực; các yếu tố ảnh hưởng đến điều khiển chính xác đồng bộ; tóm tắt kết quả đạt được của các nghiên cứu trong và ngoài nước về đồng bộ chuyển động thủy lực. Xu hướng phát triển nâng cao độ tin cậy, an toàn, bảo vệ môi trường, tích hợp và phát triển các phần tử thủy lực, phát triển các thuật toán điều khiển thông minh sử dụng trí tuệ nhân tạo, số hóa, sử dụng các van điện - thủy lực dạng on-off trong hệ thống điều khiển đồng bộ thủy lực đã được dự đoán nhằm thúc đẩy sự phát triển của lĩnh vực này trong tương lai. Bài báo này hỗ trợ người mới bắt đầu tiếp cận lĩnh vực đồng bộ chuyển động các cơ cấu chấp hành thủy lực theo hướng hệ thống, qua đó giúp họ nhận diện các xu hướng phát triển hiện nay cũng như định hướng cho các nghiên cứu trong tương lai. Bên cạnh vai trò cung cấp kiến thức tổng quan, bài báo còn có thể được sử dụng như một tài liệu tham khảo trong việc nghiên cứu và ứng dụng các hệ thống đồng bộ thủy lực trong thực tiễn công nghiệp.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ kinh phí bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo theo đề tài mã số B2024-BKA-14.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Galal Rabie, *Fluid Power Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill, 2009.
- [2] T. H. Ly, "Research on Electro-Hydraulic Synchronous Control Systems for Automatic Gate Operation in Irrigation and Hydropower Projects in Vietnam," (in Vietnamese), Ph.D. Thesis, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam, 2012.
- [3] VNA, "PM attends inauguration ceremony of irrigation system in Kien Giang," VietnamPlus, Mar. 06, 2022. [Online]. Available: <https://en.vietnamplus.vn/pm-attends-inauguration-ceremony-of-irrigation-system-in-kien-giang-post223056.vnp>. [Accessed Feb. 10, 2025].
- [4] Rajesh Power Press, "3 Roll Hydraulic Rolling," 2025. [Online]. Available: <https://rajeshpowerpress.ae/hydraulic-3-roller-rolling-machine/>. [Accessed Feb. 10, 2025].
- [5] Hitachi Zosen Corporation, "Shield Tunneling Machines," 2025. [Online]. Available: <https://www.hitachizosen.co.jp/english/business/field/infrastructure/shield.html>. [Accessed Feb. 10, 2025].
- [6] Allelys, "Hydraulic lifting systems," 2025. [Online]. Available: <https://allelys.co.uk/hydraulic-lifting-systems/>. [Accessed Feb. 10, 2025].
- [7] S & T Machine Tools, "Hydraulic Sheet Bending Machine," 2025. [Online]. Available: <https://www.stmachinetools.in/hydraulic-sheet-bending-machine.html>. [Accessed Feb. 10, 2025].

- [8] X. N. Chen and S. Z. Xu, "Study of the Hydraulic Synchronous Circuit and Synchronous Control of the Hydraulic Hoist," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 275-277, pp. 2487-2490, 2013.
- [9] R. Li, W. Yuan, X. Ding, J. Xu, Q. Sun, and Y. Zhang, "Review of Research and Development of Hydraulic Synchronous Control System," *Processes*, vol. 11, no. 4, art. 981, 2023.
- [10] X. B. Tran and V. T. Truong, "Hydraulic control system of 40 tons press brake machine," (in Vietnamese), *Vietnam Mechanical Engineering Journal*, no. 3, pp. 106-111, 2020.
- [11] H. G. Ding, Y. Z. Liu, and Y. B. Zhao, "A New Hydraulic Synchronous Scheme in Open-Loop Control: Load-Sensing Synchronous Control," *Measurement and Control*, vol. 53, pp. 119-125, 2020.
- [12] R. D. Lorenz and P. B. Schmidt, "Synchronized Motion Control for Process Automation," in *Proceedings of IEEE Industry Applications Annual Meeting*, IEEE Press, Piscataway, USA, vol. 2, pp. 1693-1698, 1989.
- [13] H. Yang, H. Shi, G. Gong, and G. Hu, "Electro-hydraulic proportional control of thrust system for shield tunneling machine," *Automation in Construction*, vol. 18, no. 7, pp. 950-956, 2009.
- [14] Y. Koren, "Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 102, pp. 265-272, 1980.
- [15] C. Sun and R. Yuan, "Adaptive robust cross-coupling position synchronization control of a hydraulic press slider-leveling," *Scientific Programming*, vol. 104, pp. 1-19, 2021.
- [16] K. Li, M. A. Mannan, M. Xu, and Z. Xiao, "Electrohydraulic Proportional Control of Twin Cylinder Hydraulic Elevators," *Control Engineering Practice*, vol. 9, pp. 367-373, 2001.
- [17] H. Sun and G. Chiu, "Motion synchronization for dual cylinder electrohydraulic lift systems," *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 2, pp. 171-181, 2002.
- [18] C. Li, Y. Li, and L. Yang, "Study of motion synchronization for dual-path electro-hydraulic control systems based on computer visual feedback," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2006, pp. 1-6.
- [19] C. Y. Chen, L. Q. Liu, C. C. Cheng, and G. T.-C. Chiu, "Fuzzy controller design for synchronous motion in a dual-cylinder electro-hydraulic system," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 6, pp. 658-673, 2008.
- [20] S. Kassem, T. S. El-Din, and S. Helduser, "Motion Synchronization Enhancement of Hydraulic Servo Cylinders for Mould Oscillation," *International Journal of Fluid Power*, vol. 13, no. 1, pp. 51-60, 2012.
- [21] L. Dong and C. Zhu, "Distributed control strategy for large-scale hydraulic synchronous lifting systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 232, no. 3, pp. 213-222, 2018.
- [22] L. Wang, D. Zhao, F. Liu, Q. Liu, and Z. Zhang, "Active Disturbance Rejection Position Synchronous Control of Dual-Hydraulic Actuators with Unknown Dead-Zones," *Sensors*, vol. 20, 2020, Art. no. 6124.
- [23] R. Li, Y. Zhang, Z. Feng, J. Xu, X. Wu, M. Liu, Y. Xia, Q. Sun, and W. Yuan, "Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems," *Processes*, vol. 11, no. 12, 2023, Art. no. 3304.
- [24] P. Kushwaha, K. Dasgupta, and S. K. Ghoshal, "A comparative analysis of the pump controlled, valve controlled, and prime mover controlled hydromotor drive to attain constant speed for varying load," *ISA Transactions*, vol. 120, pp. 305-317, 2022.
- [25] L. Ge, Z. Dong, W. Huang, L. Quan, J. Yang, and W. Li, "Research on the performance of hydraulic excavator with pump and valve combined separate meter in and meter out circuits," in *International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*, Harbin, China, pp. 37-41, 2015.
- [26] Brennan Industries, "Six Hydraulic Industry Trends," *Brennan Blog*, Jan. 10, 2024. [Online]. Available: <https://blog.brennaninc.com/six-hydraulic-industry-trends>. [Accessed Feb. 10, 2025].
- [27] G. Filo, "Artificial intelligence methods in hydraulic system design," *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023, Art. no. 3320, doi: 10.3390/en16083320.
- [28] B. Xu, J. Shen, S. Liu, Q. Su, and J. Zhang, "Research and development of electro-hydraulic control valves oriented to Industry 4.0: A review," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 33, no. 29, 2020, doi: 10.1186/s10033-020-00446-2.
- [29] R. Brandstetter, T. Deubel, R. Scheidl, B. Winkler, and K. Zeman, "Digital hydraulics and 'Industrie 4.0'," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 231, no. 2, pp. 82-93, 2017, doi: 10.1177/0959651816636734.
- [30] H. Wang, Z. Chen, J. Huang, L. Quan, and B. Zhao, "Development of high-speed on-off valves and their applications," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 67, 2022, doi: 10.1186/s10033-022-00720-5.
- [31] F. Sciatti, P. Tamburrano, E. Distaso, and R. Amirante, "Digital hydraulic valves: Advancements in research," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, 2024, Art. no. e27264, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27264.