

CÔNG NGHỆ THU HỒI NĂNG LƯỢNG ỨNG DỤNG TRÊN MÁY XÚC THỦY LỰC

TECHNOLOGY OF ENERGY RECOVERY APPLIED ON HYDRAULIC EXCAVATORS

Đỗ Trí Cường¹, Bùi Văn Trâm^{2*}, Đỗ Hữu Tuấn², Đặng Trí Dũng¹, Nguyễn Xuân Hòa², Phan Thị Cẩm Trang³

¹Trường Công nghệ và Thiết kế, Trường Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, Việt Nam

³Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: trambv@utt.edu.vn

(Nhận bài / Received: 21/11/2024; Sửa bài / Revised: 16/12/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 17/12/2024)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.487

Tóm tắt - Các ngành xây dựng, giao thông và công nghiệp ngày càng đòi hỏi các máy và thiết bị có khả năng vận hành hiệu quả và thân thiện với môi trường. Trong bối cảnh này, máy xúc thủy lực đóng vai trò quan trọng, là thiết bị chủ đạo trong nhóm máy làm đất. Nhưng do máy xúc tiêu thụ nhiên liệu lớn và phát thải nhiều chất ô nhiễm, gây ra những tác động không nhỏ đến môi trường. Bài báo trình bày các công nghệ đã được các nhà khoa học nghiên cứu nhằm thu hồi thể năng, động năng từ cơ cấu dẫn động cần và quay sàn máy xúc cũng như các kết quả về khả năng thu hồi (hiệu suất thu hồi) các năng lượng này. Bên cạnh đó, các ứng dụng thực tế và hướng phát của các hệ thống thu hồi năng lượng được nêu ra nhằm định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa - Thu hồi năng lượng; hệ thống truyền động hybrid; máy xúc hybrid điện; máy xúc hybrid thủy lực

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng toàn cầu ngày càng tăng cao và các nguồn nhiên liệu không thể tái tạo dần cạn kiệt, việc tối ưu hóa năng lượng trong các ngành công nghiệp nặng đã trở thành một vấn đề cấp thiết [1-3]. Máy xúc thủy lực là thiết bị quan trọng trong các lĩnh vực như xây dựng, giao thông, khai thác khoáng sản và công nghiệp, nhưng cũng là một trong những phương tiện tiêu thụ nhiều nhiên liệu và phát thải khí nhà kính lớn [4-6]. Do yêu cầu công suất cao và tần suất vận hành liên tục, máy xúc thủy lực không chỉ tiêu thụ lượng nhiên liệu đáng kể mà còn là một nguồn phát thải CO₂ lớn, gây ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường và sức khỏe cộng đồng [7-9].

Trong máy xúc thủy lực, có những vị trí mà năng lượng sinh ra trong quá trình vận hành có thể được thu hồi và tái sử dụng, như ở các hệ thống nâng hạ cần và quay sàn. Khi cần được hạ xuống, lực hấp dẫn có thể hỗ trợ di chuyển mà không cần thêm công suất từ bơm thủy lực [10, 11]. Tương tự, trong hệ thống xoay, động năng sinh ra trong quá trình tăng và giảm tốc của động cơ thủy lực có thể được thu hồi để sử dụng cho các chu kỳ vận hành sau [12, 13]. Tận dụng các nguồn năng lượng này không chỉ giúp giảm tiêu thụ nhiên liệu mà còn là cơ hội để nâng cao hiệu quả năng lượng của máy xúc thủy lực [14-17].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung

Abstract - The construction, transportation, and industrial sectors increasingly demand machines and equipment capable of operating efficiently and in an environmentally friendly manner. In this context, hydraulic excavators play a crucial role as the primary equipment in the earth-moving machinery group. However, due to their high fuel consumption and significant pollutant emissions, they have considerable impacts on the environment. This paper presents technologies studied by scientists to recover potential and kinetic energy from the boom drive mechanism and the excavator's rotary platform, along with the results regarding the recovery potential (recovery efficiency) of these energies. Additionally, practical applications and the development direction of energy recovery systems are discussed to guide future research.

Key words - Energy recovery; hybrid drive system; electric hybrid excavator; hydraulic hybrid excavator

phát triển các công nghệ tái tạo năng lượng trong máy xúc thủy lực nhằm khai thác các nguồn năng lượng có thể thu hồi này [18, 19]. Các hệ thống thu hồi năng lượng đã được đề xuất, với các công nghệ lưu trữ đa dạng như ắc quy, tụ điện và hệ thống lưu trữ khí nén [20-24]. Những cải tiến này mang lại tiềm năng giảm tiêu thụ năng lượng, chi phí vận hành và giảm thiểu tác động đến môi trường [25-27].

Bài báo này nhằm đánh giá toàn diện các công nghệ thu hồi năng lượng trong máy xúc thủy lực hiện có, phân loại và phân tích chi tiết về hiệu suất thu hồi năng lượng, khả năng tiết kiệm nhiên liệu của từng công nghệ. Ngoài ra, bài báo còn thảo luận về các hệ thống đã được ứng dụng vào thực tế và định hướng phát triển các hệ thống thu hồi năng lượng cho máy xúc thủy lực trong tương lai. Nghiên cứu này không chỉ cung cấp cái nhìn tổng quan về các công nghệ hiện có mà còn đưa ra những gợi ý cho các hướng phát triển mới nhằm nâng cao hiệu quả năng lượng và phát triển các thiết bị công nghiệp thân thiện với môi trường.

2. Các công nghệ thu hồi và tái sử dụng năng lượng hiện nay

2.1. Hệ thống tái thu hồi năng lượng sử dụng cho cơ cấu dẫn động cần

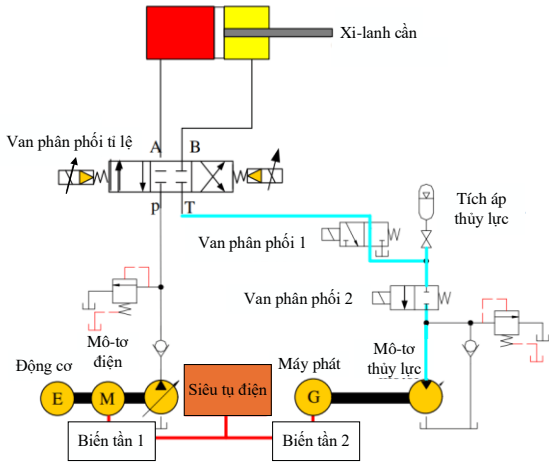
T. Lin và cộng sự [28] đã chứng minh hệ thống tái tạo năng lượng (ERS) sử dụng thiết bị tích năng Hình 1 có thể

¹ College of Technology and Design, University of Economics Ho Chi Minh City, Vietnam (Do Tri Cuong, Dang Tri Dung)

² University of Transport Technology, Vietnam (Bui Van Tram, Do Huu Tuan, Nguyen Xuan Hoa)

³ Hanoi University of Civil Engineering, Vietnam (Phan Thi Cam Trang)

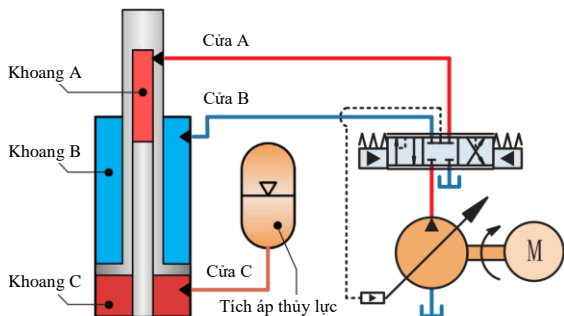
cải thiện hiệu quả sử dụng nhiên liệu của các máy xúc hybrid thủy lực (HHE). Tuy nhiên, các hệ thống ERS thông thường có hiệu suất truyền động kém hơn so với các hệ thống sử dụng điều khiển van truyền thống. Ngoài ra, cả động cơ thủy lực và máy phát điện đều cần có công suất đủ lớn để tránh tình trạng quá tải. Dựa trên những nghiên cứu toàn diện, nhóm tác giả đề xuất hệ thống ERS phức hợp kết hợp các ưu điểm của bộ tích điện và bộ tích áp thủy lực.



Hình 1. Hệ thống thu hồi năng lượng sử dụng bình tích năng [28]

Bằng mô phỏng và thực nghiệm nhóm tác giả ước tính hệ thống đề xuất có thể tái tạo khoảng 39% tổng năng lượng tiềm năng trong điều kiện hoạt động tiêu chuẩn, trong khi đó hệ thống ERS cơ bản tái tạo được khoảng 36%. Ngoài ra, hiệu suất thu hồi cũng được cải thiện trong các điều kiện làm việc nặng. Kết quả cũng cho thấy, hệ thống ERS mới có hiệu suất điều khiển tốt hơn so với hệ ERS ban đầu, trong khi dung lượng của bộ tái tạo năng lượng có thể giảm hơn 65%.

Khi cần máy xúc thủy lực hạ xuống, thế năng do trọng lực tích lũy. Tuy nhiên, trong quá trình nâng năng lượng này bị biến đổi thành nhiệt năng do hiệu ứng tiết lưu của van thủy lực. Đây là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến hiệu suất năng lượng thấp và làm tăng nhiệt độ dầu thủy lực. Để giải quyết các vấn đề trên, L. Xia và cộng sự đề xuất hệ thống truyền động tích hợp và thu hồi năng lượng dựa trên xi-lanh thủy lực ba khoang Hình 2 [29]. Trong hệ thống này một khoang của xi-lanh được kết nối trực tiếp với một bộ tích áp thủy lực, lưu trữ và tái sử dụng năng lượng của cần. Hai khoang còn lại được kết nối với mạch truyền động chính.

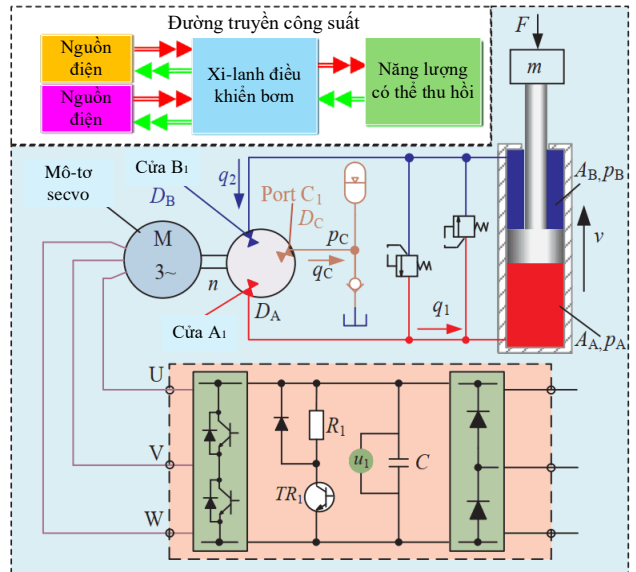


Hình 2. Xi-lanh 3 khoang trong hệ thống nâng hạ cần [29]

So với hệ thống truyền động xi-lanh thủy lực hai khoang, mức tiêu thụ năng lượng trong quá trình vận hành

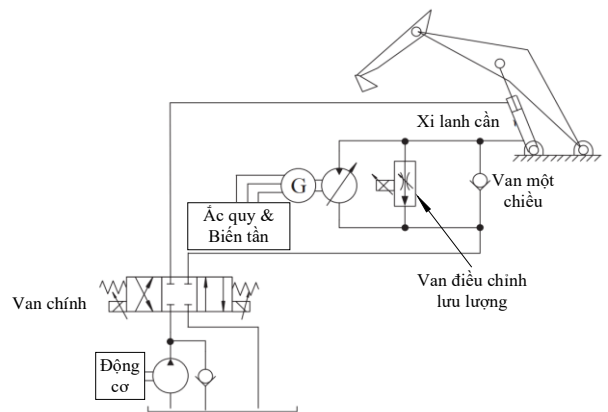
cần của hệ thống mới giảm 50,1%. Ngoài ra, công suất lớn nhất của nguồn giảm 64,9%. Như vậy, hệ thống đề xuất có thể tiết kiệm năng lượng đáng kể.

Hệ thống thủy lực tồn tại tổn thất năng lượng đáng kể tại vị trí tiết lưu và không có hệ thống thu hồi thế năng khi hạ cần, điều này làm cho hiệu suất hệ thống thủy lực không cao và hiệu suất sử dụng năng lượng rất thấp. Do đó, L. Ge cùng cộng sự đã cải thiện hiệu suất năng lượng của máy xúc thủy lực bằng cách giảm tổn thất tiết lưu và tái tạo năng lượng trực tiếp sử dụng bơm bất đối xứng để giảm tiêu thụ năng lượng được thể hiện ở sơ đồ Hình 3; trong đó, hai cửa được kết nối với xi-lanh thủy lực, và cửa còn lại được kết nối với một bộ tích áp thủy lực [30].



Hình 3. Mạch thủy lực hệ thống cần sử dụng bơm 3 khoang [30]

Với sơ đồ hệ thống truyền động này, hiệu suất chuyển đổi từ thế năng trọng trường sang năng lượng thủy lực đạt tới 82,7% trong quá trình hạ cần. Năng lượng này có thể được tái sử dụng trực tiếp để hỗ trợ cho quá trình nâng cần tiếp theo. So với hệ thống điều khiển độc lập, mức tiêu thụ năng lượng có thể giảm 75% trong một chu kỳ làm việc hoàn chỉnh bao gồm cả nâng và hạ cần.



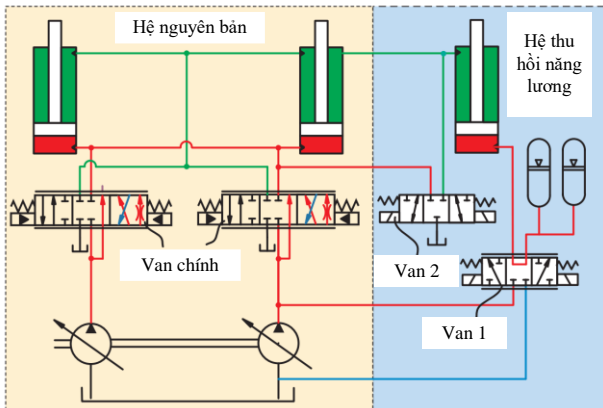
Hình 4. Hệ thống thu hồi năng lượng sử dụng động cơ thủy lực và máy phát điện [31]

Y.-X. Yu cùng cộng sự đã chỉ ra việc tiết kiệm năng lượng là điều quan trọng và cần thiết đối với máy xúc thủy lực. Nhóm tác giả đã đề xuất một hệ thống tái tạo năng

lượng cho cần máy xúc được thể hiện ở sơ đồ Hình 4. Hệ thống này có thể điều chỉnh được lưu lượng và van điều khiển lưu lượng được sử dụng để điều chỉnh mô-men xoắn và tốc độ của máy phát điện, đồng thời điều chỉnh lưu lượng qua mô-tơ thủy lực [31].

Hiệu suất tái tạo năng lượng của hệ thống mới dao động từ 33,8% đến 57,4%, điều này không thể đạt được trong hệ thống cũ của máy xúc truyền thống. So với hệ thống tái tạo năng lượng cũ của máy ban đầu, hiệu suất tái tạo năng lượng của hệ thống mới được cải thiện từ 3,2% đến 4,1% khi máy làm việc với tốc độ chậm và trung bình.

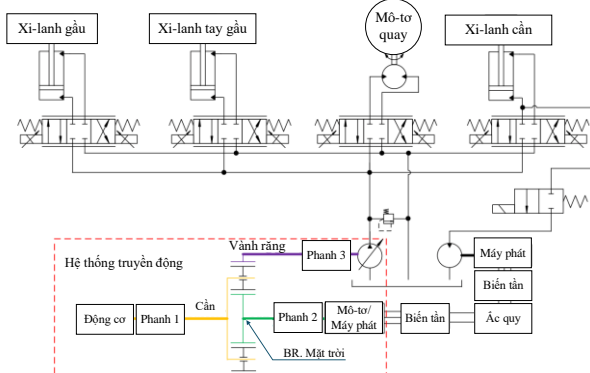
L. Ge và cộng sự khi nghiên cứu để cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng của máy đào thủy lực đã đề xuất sơ đồ mạch Hình 5. Sơ đồ này sử dụng một xi-lanh thủy lực và bình tích áp để thu hồi thể năng khi hạ cần đồng thời tái sử dụng năng lượng tích lũy này trong thao tác nâng cần [32].



Hình 5. Hệ thống cần sử dụng 3 xy lanh thủy lực [32]

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã chứng minh rằng, hiệu suất thu hồi thể năng đạt 75,9%. Ngoài ra, công suất đầu ra của bơm giảm được 52% khi thực hiện thao tác nâng cần.

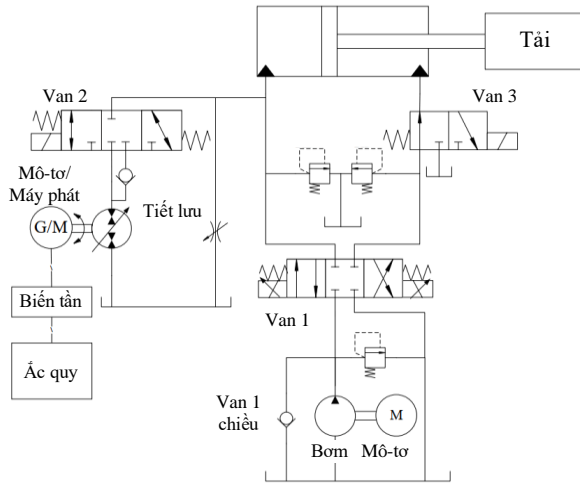
Ngoài ra, Y. Yu cùng cộng sự đã chỉ ra việc tái sử dụng năng lượng đã thu hồi là vô cùng quan trọng [33]. Vì vậy, nhóm tác giả đã đề xuất sơ đồ nguyên lý hybrid cho hệ thống này được thể hiện ở sơ đồ Hình 6. Trong đó, hệ thống truyền động thủy lực biến thiên liên tục dẫn động được sử dụng để dẫn động bơm chính. Trong nghiên cứu này, cả tốc độ và mô-men xoắn của động cơ được kiểm soát để đảm bảo các điểm làm việc của động cơ nằm trong phạm vi hiệu suất cao. Hệ thống tái tạo năng lượng cũng được áp dụng để tái sinh thể năng của hệ thống nâng hạ cần [33].



Hình 6. Hệ thống nguồn cấp có kết hợp hệ thống thu hồi năng lượng [33]

Từ kết quả thực nghiệm chứng minh rằng động cơ đốt trong hoạt động trong vùng làm việc hiệu suất cao. Hiệu quả tiết kiệm năng lượng từ 36,69% đến 45,16%.

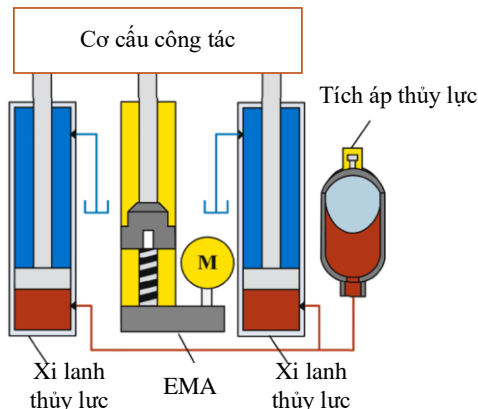
T. C. Do cùng đồng nghiệp đề xuất mạch thu hồi năng lượng cho xi-lanh nâng hạ cần của máy đào thủy lực Hình 7. Khi cần ở quá trình hạ, năng lượng tích lũy dưới dạng điện năng tại ắc-quy. Năng lượng này được tái sử dụng trong quá trình nâng cần [34].



Hình 7. Hệ thống thu hồi năng lượng sử dụng bơm-động cơ thủy lực [34]

Kết quả của nghiên cứu bằng mô phỏng cho thấy, hiệu suất thu hồi năng lượng đạt 44%. Ngoài ra, vận tốc và vị trí của xi-lanh cũng được điều khiển tốt hơn khi dùng mạch đề xuất trong nghiên cứu.

Z. Li cùng cộng sự chỉ ra rằng, các cơ cấu đa khớp chịu tải nặng, như bộ công tác của máy xúc thủy lực, chủ yếu được dẫn động bởi các xi-lanh thủy lực. Do hiệu suất sử dụng năng lượng của hệ thống thủy lực thấp dẫn đến lãng phí năng lượng một cách đáng kể. Để khắc phục nhược điểm này, nhóm tác giả đề xuất hệ thống dẫn động kết hợp điện-thủy lực (EHHD) Hình 8. Hệ thống bao gồm một bộ phận dẫn động chủ động dùng điện và một bộ phận dẫn động thụ động dùng thủy lực [35].



Hình 8. Hệ thống dẫn động kết hợp điện-thủy lực [35]

Kết quả thử nghiệm cho thấy, so với hệ thống cảm biến áp tải (LS), hiệu quả tiết kiệm năng lượng của hệ thống được đề xuất là rất đáng kể. Điều này là do hệ thống LS không có chức năng tái thu hồi năng lượng, trong khi năng lượng này có thể hỗ trợ đáng kể cho bơm. Hệ thống đề xuất

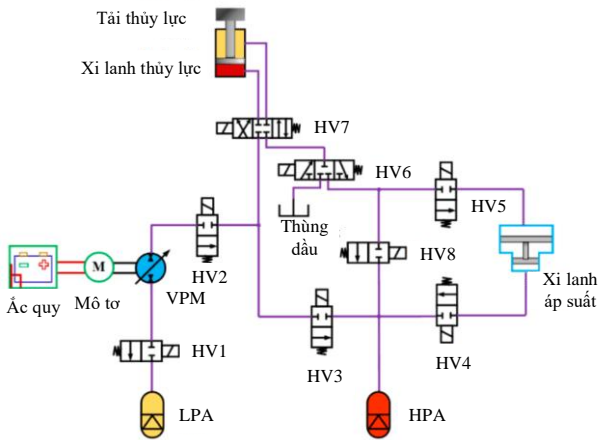
loại bỏ hoàn toàn tổn thất tiết lưu có trong hệ thống LS và có thể tái thu hồi hiệu quả thế năng khi hạ cần. Bằng cách này, hiệu quả tiết kiệm năng lượng của hệ thống đề xuất có thể đạt tới 70%.

L. Li cùng cộng sự thấy rằng, tích áp thủy lực có ưu điểm là mặc dù kích thước nhỏ nhưng có thể tích trữ năng lượng đáng kể, phản hồi nhanh, hoạt động ổn định và chi phí không cao. Tuy nhiên, so với phương pháp dùng các bộ lưu điện, tích áp thủy lực có mật độ năng lượng thấp và dao động áp suất lớn trong khi tích và xả năng lượng, điều này làm giảm đáng kể việc ứng dụng chúng trong máy xúc thủy lực. Trong nghiên cứu [36] nhóm tác giả sử dụng hệ thống truyền động điện-thủy lực và thu hồi năng lượng cho cần hệ thống này dùng ắc-quy và tích áp thủy lực Hình 9.

hệ thống thủy lực dưới 30% do tổn thất đáng kể tại các van tiết lưu và tiêu hao các dạng năng lượng có thể thu hồi (thế năng, động năng). Để cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng của máy xúc, hệ thống nâng hạ cần loại truyền động kép (thủy lực-điện) Hình 10 được đề xuất. Hệ thống bao gồm bộ phận cơ điện và bộ phận thủy lực. Tốc độ nâng hạ cần được điều khiển bởi bộ phận cơ điện thay vì van thủy lực để giảm tổn thất tiết lưu. Khoang pit-tông được kết nối với bộ tích năng để tái sử dụng thế năng của cần [37].

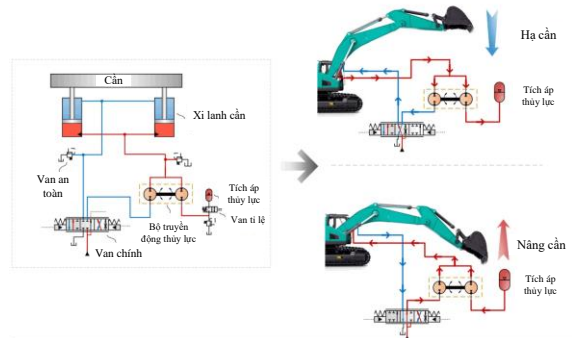
Kết quả thí nghiệm trên máy xúc 6 tấn cho thấy, hệ thống được đề xuất có thể giảm tổn thất tiết lưu và tái sử dụng hiệu quả thế năng của cần. Trong quá trình nâng hạ cần, tỷ lệ tái sử dụng thế năng của cần là 67,6% và mức tiêu thụ năng lượng giảm 66,1%. Khi kết hợp thao tác giữa cần và tay gầu để san lấp, tổn thất do tiết lưu giảm 49,6% đồng thời tiêu thụ năng lượng cũng giảm 38,1%.

Do điều kiện làm việc phức tạp và đặc điểm làm việc của hệ thống thủy lực mà máy xúc thủy lực thường tiêu tốn nhiều nhiên liệu, hiệu suất sử dụng năng lượng thấp và gây ô nhiễm khi thời gian làm việc kéo dài. Để cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng và giảm tiêu thụ năng lượng của máy xúc thủy lực, J. Zhu cùng cộng sự đề xuất hệ thống tái tạo năng lượng sử dụng cho hệ thống cần của máy xúc hybrid thủy lực Hình 11 [38].



Hình 9. Hệ thống sử dụng xylanh áp suất [36]

So với máy xúc điện ban đầu, hệ thống mới đạt được mức tiết kiệm năng lượng đáng kể ở bốn chế độ làm việc: dẫn động điện, dẫn động thủy lực, thu hồi thủy lực và thu hồi điện. Kết quả cho thấy tỷ lệ thu hồi năng lượng là 92%. Hầu hết năng lượng thu hồi được biến đổi thành điện năng lưu trữ trong ắc-quy. Ngoài ra, mô-men xoắn lớn nhất của động cơ trong hệ thống mới giảm 66,7% so với hệ thống ban đầu, giúp giảm đáng kể tải trọng động trong quá trình khởi động và dừng động cơ.



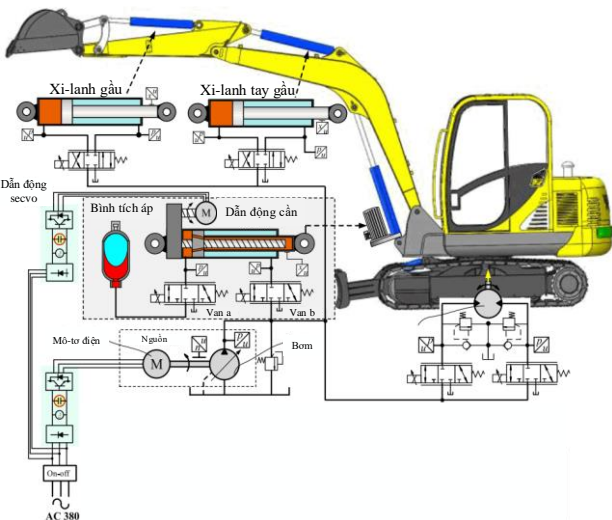
Hình 11. Hệ thống thu hồi năng lượng sử dụng bơm và động cơ thủy lực [38]

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã đưa ra một số kết luận như sau: hệ thống có cấu tạo đơn giản, có thể thu hồi năng lượng ngay cả trường hợp áp suất xi-lanh cần thấp hơn áp suất của tích áp thủy lực. Với mô phỏng bằng phần mềm Amesim kết quả cho thấy, khi sử dụng hệ thống này có thể thu hồi đến 79,1% thế năng khi hạ cần; đồng thời có thể giảm được khoảng 54,6% năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ nâng, hạ cần. Trong quá trình thực nghiệm trên máy xúc 50 tấn, kết quả lần lượt là 86,1% và 44,6%.

2.2. Hệ thống tái thu hồi năng lượng sử dụng trên cơ cấu quay sàn

Y.-X. Yu cùng cộng sự đề xuất một hệ thống tái tạo năng lượng sử dụng cho cơ cấu quay của máy xúc thủy lực với mục tiêu giảm mức tiêu thụ năng lượng Hình 12. Hệ thống này sử dụng hai tích áp thủy lực độc lập trong cơ cấu quay. Để cải thiện hiệu quả tái tạo năng lượng và đảm bảo hiệu suất của hệ thống, các tác giả đã sử dụng phương pháp điều khiển kết hợp giữa thế tích động cơ thủy lực và van điều khiển lưu lượng, cùng với điều khiển tích áp thủy lực biến đổi [39].

Kết quả thử nghiệm cho thấy, hiệu quả tái tạo năng lượng của hệ thống dao động từ 23% đến 56% tùy vào các



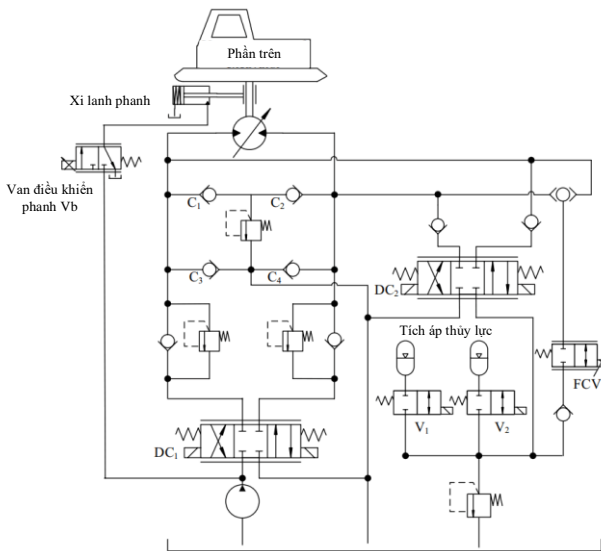
Hình 10. Hệ thống nâng hạ cần loại truyền động kép [37]

Y. Hao cùng cộng sự khi nghiên cứu máy xúc sử dụng nguồn là điện thấy rằng, hiệu suất sử dụng năng lượng của

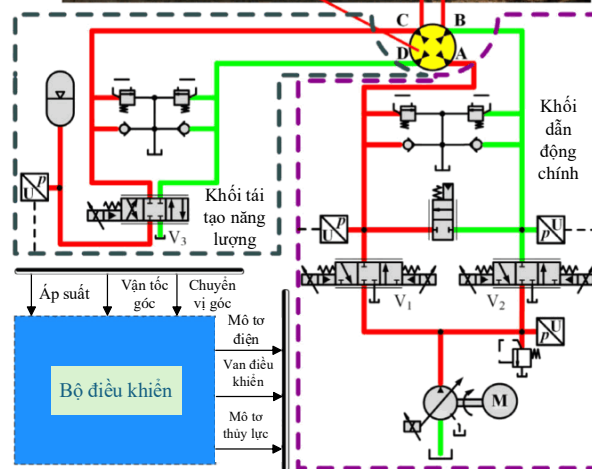
điều kiện khác nhau. So với các loại máy xúc hybrid điện hệ thống này mang lại hiệu quả tái tạo năng lượng cao hơn. Bên cạnh đó, chi phí để lắp đặt hệ thống này cũng thấp hơn nhiều so với các máy xúc hybrid điện hoặc máy xúc hybrid thủy lực sử dụng bộ truyền động thủy lực. Do vậy, hệ thống quay này không chỉ dễ dàng lắp đặt vào máy xúc thực tế mà còn có chi phí thấp và hiệu quả tái tạo năng lượng cao.

tác giả sử dụng một động cơ thủy lực được dẫn động từ hai nguồn với lưu lượng khác nhau, động cơ này có thể dẫn động chế quay tần số cao một cách hiệu quả Hình 13. Động cơ thủy lực có hai mạch dẫn động khác nhau, tương ứng với các yêu cầu lưu lượng khác nhau. Hai mạch này lần lượt kết nối với khối thu hồi năng lượng và khối dẫn động chính. Trong quá trình khởi động cơ cấu quay, khối thu hồi năng lượng hỗ trợ khối dẫn động chính để cùng dẫn động, giúp giảm mô-men xoắn đầu ra của khối dẫn động chính và tổn thất tràn; trong quá trình phanh, khối thu hồi năng lượng sẽ thu hồi năng lượng phanh [40].

Trong nghiên cứu này, một số kết quả đáng lưu ý như sau: Trong hệ thống dẫn động hai nguồn, khối thu hồi năng lượng hỗ trợ khối dẫn động chính trong dẫn động hệ thống quay toa do đó giúp giảm đáng kể tiêu thụ năng lượng của bơm chính. So với hệ thống dùng một nguồn, năng lượng đầu ra của bơm thủy lực khi toàn tải và không tải lần lượt giảm 58,6% và 57,1% khi α là 0,4; giảm 48,6% và 46,6% khi α là 0,6; và giảm 42,4% và 40,4% khi α là 0,8. Trong đó, α là tỷ số lưu lượng của mạch hỗ trợ và mạch chính.

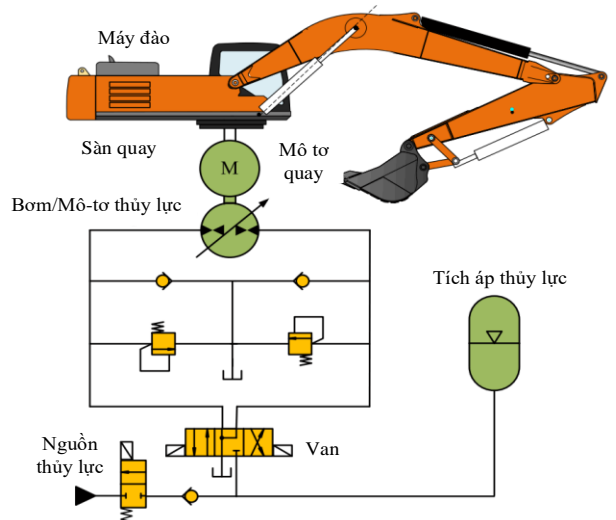


Hình 12. Hệ thống kết hợp giữa thể tích động cơ thủy lực và van điều khiển lưu lượng [39]



Hình 13. Hệ thống quay sàn có phần lưu trữ năng lượng trong bình tích áp [40]

W. Huang cùng cộng sự đã chứng minh rằng, suốt quá trình tăng tốc của hệ thống quay sàn sử dụng nguồn dẫn động thủy lực trên các máy xây dựng công suất lớn một phần năng lượng động đáng kể được tích lũy và sau đó sẽ bị tiêu tán khi dầu thủy lực chảy qua lỗ nhỏ ở cửa van trong quá trình giảm tốc, dẫn đến lãng phí năng lượng nghiêm trọng và tổn thất tràn lớn. Để giải quyết vấn đề này, nhóm

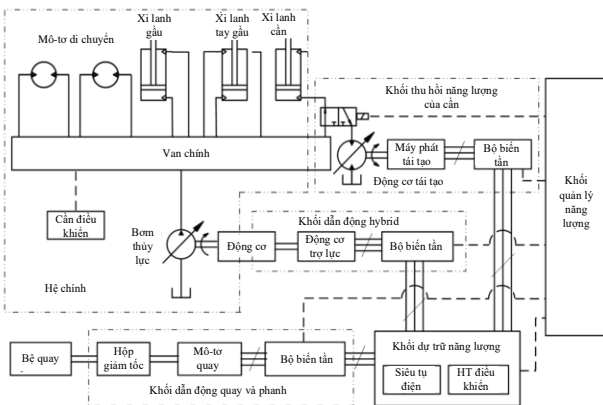


Hình 14. Hệ thống quay sàn sử dụng bơm/động cơ thủy lực [41]

X. Wang cùng cộng sự chứng minh rằng, trong quá trình hoạt động của cơ cấu quay sàn trên máy xúc do quá trình tăng tốc và giảm tốc diễn ra thường xuyên gây ra sự mất mát đáng kể năng lượng động. Hơn nữa, công suất của mô-tơ dẫn động quay thường được lựa chọn dựa trên tải tối đa, khiến nó thường xuyên hoạt động ở vùng hiệu suất thấp, làm gia tăng thêm tổn thất năng lượng. Để giải quyết những vấn đề này, nhóm tác giả đề xuất một hệ thống truyền động hybrid điện-thủy lực chủ động-bị động cho hệ thống quay của máy xúc Hình 14. Mục tiêu của hệ thống này là lưu trữ và sử dụng hiệu quả năng lượng động sinh ra từ hệ thống quay của máy xúc, giảm công suất lắp đặt của mô-tơ dẫn động hệ thống, và từ đó nâng cao hiệu suất năng lượng tổng thể. Để thu hồi năng lượng hiệu quả trong quá trình quay của hệ thống, trên hệ thống được bổ sung thêm một bơm/mô-tơ thủy lực và tích áp thủy lực. Bơm/mô-tơ này được nối với trực truyền động của mô-tơ quay toa và dùng để thu hồi năng lượng động trong quá trình hệ thống quay giảm tốc, cũng như hỗ trợ mô-tơ trong quá trình tăng tốc. Phương pháp này không chỉ cho phép lưu trữ năng lượng động một cách hiệu quả mà còn giảm đáng kể công suất lắp đặt của mô-tơ dẫn động [41].

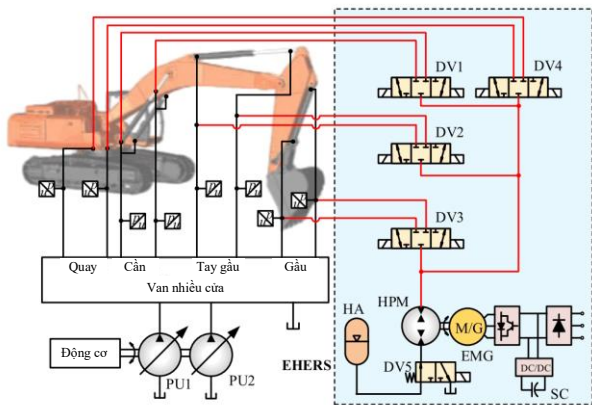
Nhóm tác giả nghiên cứu đã tiến hành các mô phỏng và thực nghiệm, từ các kết quả cho thấy, công suất lớn nhất và tiêu thụ năng lượng cung cấp cho hệ thống quay giảm lần lượt 29% và 48%. Với kết quả mô phỏng, công suất lớn nhất của mô-tơ dẫn động quay có thể giảm đến 300 kW, điều này giúp giảm 59,4% năng lượng tiêu thụ. Qua nghiên cứu cũng thấy thể tích và áp suất ban đầu của tích áp thủy lực ảnh hưởng không lớn đến công suất cực đại, nhưng áp suất ban đầu của bình tích áp đáng kể đến công suất cực đại cũng như năng lượng tiêu thụ của mô-tơ dẫn động cơ cấu quay.

L. Changsheng cùng cộng sự tập trung nghiên cứu việc thu hồi năng lượng với cơ cấu nâng hạ cần và cơ cấu quay sản phẩm Hình 15. Dựa theo chu kỳ làm việc tiêu chuẩn của máy xúc thủy lực, các tác giả đề xuất phương pháp điều khiển lập trình động (Dynamic Programming) cho máy xúc thủy lực hybrid để phục hồi thể năng của cần và động năng của cơ cấu quay [42].



Hình 15. Hệ thống thu hồi năng lượng với cơ cấu nâng hạ cần và cơ cấu quay [42]

Trong nghiên cứu này, các tác giả đã sử dụng siêu tụ điện để lưu trữ năng lượng. Khi sử dụng phần mềm Simulink, và thuật toán điều khiển lập trình động kết quả mô phỏng cho thấy, khi dùng hệ thống này có thể giảm tiêu thụ nhiên liệu khoảng 21,3% so với máy xúc thủy lực thông thường. Tuy nhiên, khi làm thực nghiệm phương án thu hồi năng lượng được đề xuất chỉ có thể giảm tiêu thụ nhiên liệu khoảng 18,88%.



Hình 16. Hệ thống thu hồi năng lượng điện-thủy lực song song [43]

T. Liang cùng cộng sự cho rằng, tổn thất cục bộ là nguyên nhân chính dẫn đến giảm hiệu suất sử dụng năng lượng của máy móc làm việc ở công trường. Để tiết kiệm

năng lượng, các tác giả đưa ra phương án sử dụng một hệ truyền động lai điện-thủy lực song song phương án này là sự kết hợp giữa hệ thống thu hồi năng lượng điện-thủy lực với hệ thống điều khiển bằng van Hình 16. Với hệ thống thu hồi năng lượng điện-thủy lực song song, cả năng lượng bị mất do mất cân bằng tải và tải vượt mức đều có thể được thu hồi và tái sử dụng. Để đạt hiệu suất hoạt động tốt nhất với mức tiêu thụ năng lượng nhỏ nhất, bài báo sử dụng phương pháp quản lý năng lượng dựa trên quy tắc để kiểm soát thời gian thực [43].

Kết quả mô phỏng cho thấy, tổn thất điều tiết và tiêu thụ năng lượng của hệ thống đề xuất giảm 60%-75% và 24%-27% so với hệ thống PFC. Hệ thống này có thể rút ngắn độ trễ phản hồi của bộ chấp hành đến 47% trong quá trình vận hành. Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, các đặc tính tiết kiệm năng lượng còn chịu ảnh hưởng bởi các áp suất ban đầu và thể tích khác nhau của bộ tích thủy lực.

Bảng 1. Bảng tóm tắt các kết quả nghiên cứu

Nghiên cứu	Công nghệ	Hiệu quả thu hồi năng lượng	Hiệu quả sử dụng nhiên liệu
[28]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Năng lượng tích lũy dưới dạng áp suất dầu tại tích áp thủy lực	Tăng 39% hiệu quả thu hồi năng lượng	
[29]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Sử dụng xi lanh thủy lực 3 khoang		Tăng 50,1% khi vận hành cần giảm công suất nguồn 64,9%
[30]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Sử dụng mô-tơ và tích áp thủy lực để giảm tổn thất ở van	Hiệu suất chuyển đổi năng lượng đạt tới 82,7%	Giảm 75% mức tiêu thụ nhiên liệu
[31]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Dùng van điều khiển lưu lượng	Hiệu suất tái tạo năng lượng từ 33,8% ÷ 57,4%	
[32]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Dùng xi lanh thủy lực và tích áp thủy lực	Thu hồi được 75,9%	Giảm công suất đầu ra của bơm 52%
[33]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Sử dụng hệ thống thủy lực biến thiên		Tiết kiệm từ 36,69% ÷ 45,16%
[34]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Tái sử dụng năng lượng ở quá trình nâng cần	Hiệu suất thu hồi đạt 44%	
[35]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Dùng bộ dẫn động kết hợp điện-thủy lực		Tiết kiệm 70% năng lượng vận hành cơ cấu dẫn động cần
[36]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Kết hợp giữa điện và thủy lực	Tỉ lệ thu hồi đạt 92%	Mômen xoắn trục động cơ giảm 66,7%
[37]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Sử dụng bộ dẫn động kép điện-thủy lực	Tái sử dụng 67,6% thể năng	Mức tiêu thụ năng lượng giảm 66,1%
[38]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần - Sử dụng mô-tơ và tích áp thủy lực	Hiệu quả thu hồi đạt 79,1%	Mức tiêu thụ giảm 54,6%

Nghiên cứu	Công nghệ	Hiệu quả thu hồi năng lượng	Hiệu quả sử dụng nhiên liệu
[39]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình phanh cơ cấu quay sàn - Sử dụng tích áp thủy lực	Thu hồi được từ 23%÷56%	
[40]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình phanh cơ cấu quay sàn - Sử dụng mô-tơ dẫn động hai nguồn		Giảm công suất của bơm chính
[41]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình phanh cơ cấu quay sàn - Sử dụng bơm/mô-tơ và tích áp thủy lực		Công suất lớn nhất giảm 29% Mức tiêu thụ nhiên liệu giảm 48%
[42]	- Thu hồi năng lượng từ cần và cơ cấu quay sàn - Sử dụng siêu tụ điện		Tiêu thụ nhiên liệu giảm 21,3%
[43]	- Thu hồi năng lượng từ quá trình hạ cần		Tiêu thụ năng lượng giảm 60%-75%

3. Công nghệ thu hồi năng lượng được sử dụng bởi các hãng máy hiện nay

Z. Quan cùng cộng sự trong nghiên cứu đã chỉ ra với nhu cầu ngày càng tăng đối với ngành xây dựng đô thị và khai thác, ngành máy xây dựng và khai thác toàn cầu đang tăng trưởng đều đặn. Ước tính rằng, vào năm 2025, quy mô thị trường máy xúc toàn cầu sẽ đạt 227 tỷ USD so với 151,46 USD vào năm 2017. Nhóm tác giả cũng chỉ ra những thách thức trong quá trình phát triển thiết bị phục vụ xây dựng và khai khoáng đó là những lo ngại về bảo vệ môi trường và tiêu thụ năng lượng, chẳng hạn như khí thải từ động cơ, chi phí nhiên liệu và nhu cầu năng lượng. Để giải quyết các vấn đề này, các hãng sản xuất máy xây dựng đã không ngừng nghiên cứu để có thể hoàn thiện thiết kế hệ thống dẫn động, hệ thống điều khiển cũng như nghiên cứu các giải pháp thu hồi và tái sử dụng năng lượng từ các cơ cấu dẫn động. Trong đó, giải pháp về sử dụng hệ thống hybrid đang được áp dụng phổ biến trên các máy xúc thủy lực [44].

Các tập đoàn lớn như Volvo, Komatsu, Caterpillar, Hitachi, v.v., đang tập trung phát triển mạnh các dòng máy xúc hạng nặng từ 20-30 tấn và trên 30 tấn. Một trong những dòng máy hybrid tiêu biểu của Volvo là máy xúc 30 tấn EC300E [45], nhà sản xuất đã ứng dụng hệ thống thu hồi năng lượng trong chuyển động hạ cần và tái sử dụng năng lượng này để điều khiển động cơ phụ trợ.

Komatsu đã giới thiệu máy xúc lai HB365LC-3 36 tấn [46], sử dụng hệ thống thu hồi năng lượng cho cơ cấu quay và phanh. Năng lượng trong các quá trình này được biến đổi và lưu trữ dưới dạng điện năng trong các bộ tích điện. Sau đó, được tái sử dụng trong các chu trình tiếp theo. Việc này sẽ đạt được cả hai mục tiêu là giảm chi phí nhiên liệu và giảm phát thải khí nhà kính.

Hitachi cũng đã thương mại hóa dòng máy hybrid 20-30 tấn [47], trong đó đáng chú ý là ZH210. Máy ZH210 áp dụng các công nghệ tiên tiến kết hợp giữa công nghệ hybrid và công nghệ tiết kiệm năng lượng (TRIAS-HX), giúp giảm tiêu thụ nhiên liệu và lượng khí thải nhà kính.

Bảng 2. Tóm tắt các sản phẩm máy xúc hybrid đã được thương mại hóa

Hãng	Mẫu máy	Công nghệ thu hồi năng lượng	Kết quả thu được
Volvo [45]	EC250E Hybrid EC300E Hybrid	Thu hồi năng lượng trong quá trình hạ cần bằng tích áp thủy lực. Tái sử dụng năng lượng tích lũy trong hỗ trợ mô-tơ quay sàn.	Giảm 15% phát thải khí CO ₂ Tăng 17% hiệu suất sử dụng nhiên liệu Giảm 15% lượng nhiên liệu tiêu thụ Tăng tuổi thọ các chi tiết, giảm chi phí bảo dưỡng, sửa chữa máy
Komatsu [46]	HB215LC HB365LC Hybrid	Sử dụng mô-tơ/máy phát kết nối giữa động cơ diesel với bơm thủy lực để tăng hiệu suất truyền động. Sử dụng mô-tơ/máy phát dẫn động điện để thu hồi và tái sử dụng năng lượng từ hệ thống quay sàn.	Giảm 17% lượng nhiên liệu tiêu thụ, so với máy PC300-8 M0 Giảm 13kg khí CO ₂ trong một giờ làm việc, so với mẫu PC300-8 M0 Giảm 25% lượng nhiên liệu tiêu thụ so với mẫu PC200-8.
Caterpillar [48]	336E H Hybrid	Hệ thống thu hồi năng lượng được áp dụng vào cơ cấu quay sàn thông qua bình tích năng để lưu trữ năng lượng. Năng lượng sau đó dùng để hỗ trợ lại mô-tơ quay.	Giảm 25% lượng nhiên liệu tiêu thụ so với mẫu 336E Giảm 33% lượng tiêu thụ so với mẫu máy 336D
Hitachi [47]	ZH210-5 Hybrid	Hệ thống thu hồi năng lượng được sử dụng trên cơ cấu quay sàn. Điện năng dự trữ trong các tụ điện, được sử dụng để hỗ trợ trong quá trình gia tốc mô-tơ	Giảm tiêu thụ nhiên liệu 31% so với mẫu ZX-3 ở chế độ PWR, và 36% ở chế độ ECO Giảm phát thải khí CO ₂
Kobelco [49]	SK210HLC Hybrid	Hệ thống quay được áp dụng công nghệ thu hồi năng lượng bằng mô-tơ/máy phát. Điện năng tích lũy bằng ác quy sau đó dùng hỗ trợ quá trình gia tốc mô-tơ Công nghệ thu hồi năng lượng trong quá trình hạ cần để hỗ trợ quá trình nâng cần	Giảm 40% phát thải khí CO ₂ ở chế độ ECO Tăng 24% hiệu quả sử dụng nhiên liệu ở chế độ S và 31% ở chế độ ECO so với mẫu SK210HLC-10

4. Xu hướng phát triển và hướng nghiên cứu trong tương lai

Trong những năm tới, xu hướng phát triển của hệ thống thu hồi năng lượng trên máy xúc thủy lực dự kiến sẽ tiếp tục tập trung vào giảm tiêu hao nhiên liệu. Nhiều công ty lớn đã tiến hành các nghiên cứu và phát triển các hệ thống tiên tiến nhằm thu hồi năng lượng hiệu quả và bền vững.

Một trong những xu hướng chủ đạo là tích hợp các hệ thống hybrid và truyền động điện-thủy lực. Đầu tiên là hãng Komatsu đã áp dụng công nghệ này với dòng máy xúc hybrid HB365LC/NLC-3 sử dụng hệ thống tái tạo năng lượng từ chuyển động quay của thân máy để tạo ra và tích trữ điện năng cho máy phát. Hệ thống này giúp giảm khoảng 20-25% mức tiêu thụ nhiên liệu so với các máy xúc diesel truyền thống.

Tương tự, Hitachi với dòng EX5600E-6 đã tích hợp hệ thống hybrid điện - thủy lực song song, có khả năng tái sử dụng năng lượng từ quá trình phanh và giảm tải động lên động cơ chính. Nhờ đó, hiệu suất năng lượng được cải thiện đáng kể trong các ứng dụng nặng như khai thác mỏ [50].

Các nghiên cứu gần đây cũng chỉ ra rằng, việc sử dụng siêu tụ điện có thể nâng cao hiệu suất lưu trữ và tái tạo năng lượng. Siêu tụ điện có khả năng nạp và xả năng lượng nhanh, phù hợp với các yêu cầu công suất đột biến của hệ thống thủy lực. Hãng Volvo đã áp dụng công nghệ này trong dòng máy xúc EC300E Hybrid [45], nơi năng lượng được thu hồi từ quá trình hạ cần và nén vào hệ thống thủy lực, sau đó giải phóng trong các chu kỳ nâng. Nhờ hệ thống này, lượng nhiên liệu tiêu thụ giảm tới 15%, và tuổi thọ của hệ thống được kéo dài do giảm tải lên các bộ phận cơ khí.

Một xu hướng lớn khác là tích hợp trí tuệ nhân tạo và IoT để tối ưu hóa việc thu hồi năng lượng và quản lý hệ thống. Caterpillar đã triển khai nền tảng CAT Connect [48], cho phép giám sát tình trạng máy móc theo thời gian thực và điều chỉnh chế độ vận hành phù hợp nhằm tối ưu hóa hiệu suất năng lượng. Các hệ thống thông minh này có khả năng tự động điều chỉnh lưu lượng và áp suất của các van thủy lực, từ đó tăng hiệu suất tái tạo và giảm tổn thất năng lượng trong quá trình hoạt động.

Ngoài các hệ thống hybrid và điện-thủy lực, các nhà nghiên cứu còn khám phá việc sử dụng hệ truyền động đa năng (multi-actuator systems) giúp thu hồi năng lượng từ nhiều loại chuyển động, không chỉ từ chuyển động của cần hay chuyển động quay sàn của máy. Hãng máy Liebherr [51] đã thử nghiệm các hệ thống truyền động điện-thủy lực tiên tiến trên dòng máy xúc R9200E, cho phép tái tạo năng lượng từ nhiều cơ cấu khác nhau của máy. Điều này giúp tăng cường khả năng thu hồi và tái sử dụng năng lượng trong mọi thao tác, từ đó giảm thiểu lãng phí và tăng hiệu suất toàn diện của hệ thống.

Trong tương lai, các hệ thống hybrid có thể kết hợp với nguồn năng lượng tái tạo, chẳng hạn như năng lượng mặt trời, giúp giảm phụ thuộc vào động cơ diesel, đặc biệt trong các khu vực vận hành liên tục và xa lưới điện. Ngoài ra, xu hướng sử dụng vật liệu có hiệu suất cao trong các hệ thống pin và siêu tụ điện nhằm tăng mật độ năng lượng và cải thiện tuổi thọ đang ngày càng phát triển và phổ biến. Hệ thống điều khiển năng lượng sử dụng AI có khả năng tiên đoán các điều kiện hoạt động và tối ưu hóa việc phân phối năng lượng giữa các thành phần thủy lực và điện. Các thuật toán học máy có thể được sử dụng để tự động nhận biết các chu kỳ hoạt động của máy, từ đó điều chỉnh hệ thống thu hồi năng lượng để đạt hiệu quả tối đa.

5. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp và phân tích các hệ thống thu hồi năng lượng được thiết lập trên máy xúc thủy lực, với việc tận dụng và lưu trữ năng lượng dư thừa từ hệ thống nâng hạ cần và cơ cấu quay sàn của máy. Các công nghệ thu hồi năng lượng đã chứng minh khả năng tăng cường hiệu suất tái tạo năng lượng và giảm tiêu hao nhiên liệu. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu mới được mô phỏng lý thuyết hoặc thử nghiệm trong phòng thí nghiệm. Do đó, để đánh giá chính xác hiệu quả của hệ thống khi hoạt động ở điều

kiện thực tế cần có các nghiên cứu chuyên sâu và thử nghiệm trên mô hình máy thực, đây là định hướng nghiên cứu của nhóm tác giả trong tương lai.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi các Trường: Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh (UEH); Trường Đại học Công nghệ GTVT (UTT) và Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Gajdzik, R. Wolniak, R. Nagaj, B. Żuromskaitė-Nagaj, and W. W. Grebski, "The Influence of the Global Energy Crisis on Energy Efficiency: A Comprehensive Analysis", *Energies*, vol. 17, no. 4, 2024, doi: 10.3390/en17040947.
- [2] A. P. Komissarov, Y. A. Lagunova, and O. A. Lukashuk, "Evaluation of Single-bucket Excavators Energy Consumption", *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1221-1226, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.239.
- [3] A. U. Khan and L. Huang, "Toward Zero Emission Construction: A Comparative Life Cycle Impact Assessment of Diesel, Hybrid, and Electric Excavators", *Energies*, vol. 16, no. 16, 2023, doi: 10.3390/en16166025.
- [4] G. L. Nugraha, M. Ajis, H. S. Adhi, and D. Zakaria, "Performance Improvement of Hydraulic Excavator Efficiency: A Literature Review", *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 27-44, 2024.
- [5] M. Ghanbari, A. M. Abbasi, and M. Ravanshadnia, "Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO₂ emissions", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 20, no. 2, pp. 810-822, 2017, doi: 10.1007/s10163-017-0640-2.
- [6] D. I. Lee, J. Park, M. Shin, J. Lee, and S. Park, "Characteristics of Real-World Gaseous Emissions from Construction Machinery", *Energies*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.3390/en15249543.
- [7] H. Jassim, W. Lu, and T. Olofsson, "Predicting Energy Consumption and CO₂ Emissions of Excavators in Earthwork Operations: An Artificial Neural Network Model", *Sustainability*, vol. 9, no. 7, 2017, doi: 10.3390/su9071257.
- [8] M. Vukovic, R. Leifeld, and H. Murrenhoff, "Reducing Fuel Consumption in Hydraulic Excavators - A Comprehensive Analysis", *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017, doi: 10.3390/en10050687.
- [9] M. A. Rawi, A. A. Yusof, and T. B. Tuan, "Indoor Air Quality Investigation Due to the usage of Mini Excavator in Enclosed Space", *Progress in Fluid Power, Mechanisations and Mechatronics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-9, 2018.
- [10] T. Lin, Q. Wang, B. Hu, and W. Gong, "Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators", *Automation in Construction*, vol. 19, no. 8, pp. 1016-1026, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2010.08.002.
- [11] G. K. Costa and N. Sepehri, "Hydraulic accumulators in energy efficient circuits", *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 9, 2023, doi: 10.3389/fmech.2023.1163293.
- [12] Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Energy Regeneration and Reuse of Excavator Swing System with Hydraulic Accumulator", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 859-873, 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00157-7.
- [13] A. Bedottia, F. Campanini, M. Pastoria, L. Riccòb, and P. Casolia, "Energy saving solutions for a hydraulic excavator", *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 1099-1106, 2017.
- [14] T. Lin, Q. Wang, B. Hu, and W. Gong, "Development of hybrid powered hydraulic construction machinery", *Automation in Construction*, vol. 19, no. 1, pp. 11-19, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.09.005.
- [15] M. Jůza and P. Heřmánek, "Influence of the excavator hydraulic system efficiency on the productivity", *Research in Agricultural Engineering*, vol. 69, no. 1, pp. 18-27, 2023, doi: 10.17221/77/2021-rae.
- [16] H. Inoue and H. Yoshida, "Development of Hybrid Hydraulic Excavators", *Int. J. Autom. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 516-520, 2012.
- [17] K. K. Ahn, "Trend of Development of Hybrid Powered Hydraulic

- Construction Machines", *Journal of Drive and Control*, vol. 7, no. 2, pp. 2-11, 2010.
- [18] J. G. D. Zhang, Y. Zhao, Ch. Liu, P. Hu, and Z. Tang, "Research on a new energy-recovery system for hybrid hydraulic excavators", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, South Africa, 2019, pp. 042003
- [19] A. Opgenoorth, S. Quabeck, R. W. D. Doncker, and K. Schmitz, "Challenges and possibilities of the Integration of Electric drives in Mobile machinery", in *International Fluid Power Conference*, Technische Universität, Dresden, 2020, pp. 471-480.
- [20] J. Leon-Quiroga, B. Newell, M. Krishnamurthy, A. Gonzalez-Mancera, and J. Garcia-Bravo, "Energy Efficiency Comparison of Hydraulic Accumulators and Ultracapacitors", *Energies*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/en13071632.
- [21] P. Ranjan, M. Bhola, G. Wrat, S. K. Mishra, and J. Das, "Performance enhancement of hybrid hydraulic excavator using multiple hydro-pneumatic accumulators", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 234, no. 10, pp. 1133-1149, 2020, doi: 10.1177/0959651820904274.
- [22] P. Casoli, F. Scolari, T. Minav, and M. Rundo, "Comparative Energy Analysis of a Load Sensing System and a Zonal Hydraulics for a 9-Tonne Excavator", *Actuators*, vol. 9, no. 2, 2020, doi: 10.3390/act9020039.
- [23] J. Lagarde, M. Green, A. Dole, J. Talvitie, and J. Toikka, "Danfoss Digital Displacement & Editron: An efficient electro-hydraulic system for mobile applications", in *International Fluid Power Conference*, Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, Germany, 2022, pp. 1045-1058.
- [24] H.-S. Yi and S. Cha, "Optimal Energy Management of the Electric Excavator Using Super Capacitor", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 151-164, 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00138-w.
- [25] T. Cao *et al.*, "Characterization of the emissions impacts of hybrid excavators with a portable emissions measurement system (PEMS)-based methodology", *Sci Total Environ*, vol. 635, pp. 112-119, Sep 1 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.011.
- [26] W. Zhang, J. Wang, S. Du, H. Ma, W. Zhao, and H. Li, "Energy Management Strategies for Hybrid Construction Machinery: Evolution, Classification, Comparison and Future Trends", *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019, doi: 10.3390/en12102024.
- [27] P. Casoli, F. Scolari, C. M. Vescovini, and M. Rundo, "Energy Comparison between a Load Sensing System and Electro-Hydraulic Solutions Applied to a 9-Ton Excavator", *Energies*, vol. 15, no. 7, 2022, doi: 10.3390/en15072583.
- [28] T. Lin, W. Huang, H. Ren, S. Fu, and Q. Liu, "New compound energy regeneration system and control strategy for hybrid hydraulic excavators", *Automation in Construction*, vol. 68, pp. 11-20, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.03.016.
- [29] L. Xia, L. Quan, L. Ge, and Y. Hao, "Energy efficiency analysis of integrated drive and energy recuperation system for hydraulic excavator boom", *Energy Conversion and Management*, vol. 156, pp. 680-687, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.11.074.
- [30] L. Ge, L. Quan, Y. Li, X. Zhang, and J. Yang, "A novel hydraulic excavator boom driving system with high efficiency and potential energy regeneration capability", *Energy Conversion and Management*, vol. 166, pp. 308-317, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.046.
- [31] Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Optimization of energy regeneration of hybrid hydraulic excavator boom system", *Energy Conversion and Management*, vol. 183, pp. 26-34, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.084.
- [32] L. Ge, Z. Dong, L. Quan, and Y. Li, "Potential energy regeneration method and its engineering applications in large-scale excavators", *Energy Conversion and Management*, vol. 195, pp. 1309-1318, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.079.
- [33] Y. Yu, T. C. Do, Y. Park, and K. K. Ahn, "Energy saving of hybrid hydraulic excavator with innovative powertrain", *Energy Conversion and Management*, vol. 244, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114447.
- [34] T. C. Do, D. G. Nguyen, T. D. Dang, and K. K. Ahn, "A Boom Energy Regeneration System of Hybrid Hydraulic Excavator Using Energy Conversion Components", *Actuators*, vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.3390/act10010001.
- [35] Z. Li, C. Wang, L. Quan, Y. Hao, L. Ge, and L. Xia, "Study on energy efficiency characteristics of the heavy-duty manipulator driven by electro-hydraulic hybrid active-passive system", *Automation in Construction*, vol. 125, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103646.
- [36] L. Li, T. Zhang, K. Wu, L. Lu, L. Lin, and H. Xu, "Design and Research on Electro-Hydraulic Drive and Energy Recovery System of the Electric Excavator Boom", *Energies*, vol. 15, no. 13, 2022, doi: 10.3390/en15134757.
- [37] Y. Hao, L. Quan, S. Qiao, L. Ge, Z. Li, and B. Zhao, "Energy and Operation Characteristics of Electric Excavator With Innovative Hydraulic-Electric Dual Power Drive Boom System", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 107265-107275, 2023, doi: 10.1109/access.2023.3314338.
- [38] J. Zhu, C. Shen, Q. He, S. Li, P. Dai, and X. Li, "Boom Potential Energy Regeneration Method for Hybrid Hydraulic Excavators", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 51450-51462, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3386741.
- [39] Y.-X. Yu and K. K. Ahn, "Improvement of Energy Regeneration for Hydraulic Excavator Swing System", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 53-67, 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00165-7.
- [40] W. Huang, X. Zhang, L. Ge, and L. Quan, "Dual Source Integrated Driving for Hydraulic Excavator Swing System", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120755-120764, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3108796.
- [41] X. Wang, L. Xia, L. Ge, L. Quan, J. Huang, and J. Cui, "Electro-Hydraulic Active-Passive Hybrid Drive Slewing System for Electric Shovel", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 55292-55301, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3387321.
- [42] L. Changsheng, H. Qinghua, T. Qijun, R. Kai, G. Jun, and Z. Daqing, "Novel control strategy for the energy recovery system of a hydraulic excavator", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 94-101, 2024, doi: 10.25165/j.ijabe.20241702.7774.
- [43] T. Liang, L. Quan, L. Ge, L. Xia, and C. Wang, "An Energy-Saving Scheme to Reduce Throttling Losses in Hydraulic Excavators Based on Electro-Hydraulic Energy Storage", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 125043-125056, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3453891.
- [44] Z. Quan, L. Ge, Z. Wei, Y. W. Li, and L. Quan, "A Survey of Powertrain Technologies for Energy-Efficient Heavy-Duty Machinery", *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 3, pp. 279-308, 2021, doi: 10.1109/jproc.2021.3051555.
- [45] Volvo. "Large Crawler Excavators", *volvo.com*, 2024. [Online]. Available: <https://www.volvo.com/europe/en/products/excavators/ec300e/> [Accessed November 19, 2024].
- [46] Komatsu. "Large excavator HB365LC-3", *komatsu.com*, 2024. [Online]. Available: <https://www.komatsu.com/en/products/excavators/large-excavators/hb365lc-3/> [Accessed November 19, 2024].
- [47] Hitachi. "The new Hitachi ZH210-6 Hybrid Hydraulic Excavator Unveiled", *hitachim.co.uk*, 2024. [Online]. Available: <https://www.hitachim.co.uk/news/the-new-hitachi-zh210-6-hybrid-hydraulic-excavator-unveiled/> [Accessed November 19, 2024].
- [48] Caterpillar. "Large Excavators 336E H Hybrid", *h-cpc.cat.com*, 2024. [Online]. Available: <https://h-cpc.cat.com/cmms/v2?&f=product&it=product&cid=406&lid=en&sc=US&gid=291&pid=18378156&nc=1> [Accessed November 19, 2024].
- [49] Kobelco. "Hydraulic Excavator SK210HLC", *kobelco-usa.com*, 2024. [Online]. Available: <https://kobelco-usa.com/excavators> [Accessed November 19, 2024].
- [50] M. Cheng *et al.*, "Opportunities and challenges of electrohydraulic control systems in the electrification era of non-road mobile machinery", *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 2024001-2024001, 2024, doi: 10.51393/j.jamst.2024001.
- [51] Liebherr. "Liebherr Mining Goes Electric", *www.liebherr.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.liebherr.com/en-int/n/liebherr-mining-goes-electric-25254-3935641> [Accessed November 19, 2024].