

# THIẾT KẾ HỆ THỐNG THU HỒI NĂNG LƯỢNG CHO MÁY XÚC THỦY LỰC KẾT HỢP GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN MỜ

## DESIGN OF AN ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR A HYDRAULIC EXCAVATOR COMBINING FUZZY CONTROL ALGORITHM

Đỗ Hữu Tuấn<sup>1</sup>, Bùi Văn Trâm<sup>1</sup>, Đặng Trí Dũng<sup>2</sup>, Đỗ Trí Cường<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

<sup>2</sup>Viện Công nghệ Thông minh và Tương tác, Trường Công nghệ và Thiết kế, Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh

\*Email: cuongdt298@ueh.edu.vn

### TÓM TẮT

*Thu hồi và tái sử dụng năng lượng từ hệ thống nâng hạ cần của máy đào truyền động thủy lực giúp tiết kiệm năng lượng cũng như giảm phát thải khí độc hại từ quá trình làm việc của máy. Để quá trình làm việc của hệ thống đạt được hiệu suất cao cần có hệ thống điều khiển thông minh. Trong bài báo này, hệ thống thu hồi và tái sử dụng năng lượng được mô phỏng bằng phần mềm Amesim, bộ điều khiển mờ (Fuzzy Logic Control) được sử dụng để điều khiển phối hợp năng lượng giữa bơm và máy phát điện. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất thu hồi năng lượng đạt xấp xỉ 57,1%, trong khi năng lượng yêu cầu để dẫn động bơm chính giảm khoảng 43,3%.*

**Từ khóa:** *Thu hồi năng lượng; Hệ thống điều khiển thông minh; Điều khiển logic mờ; Máy xúc lai.*

### ABSTRACT

*Energy recovery and reuse from the boom lifting system of hydraulic excavators contribute to energy savings and a reduction in harmful emissions during machine operation. To achieve high system efficiency, an intelligent control strategy is required. In this study, the energy recovery and reuse system is modeled and simulated using the Amesim software, while a Fuzzy Logic Controller (FLC) is employed to coordinate energy management between the hydraulic pump and the electric generator. Simulation results indicate that the energy recovery efficiency reaches approximately 57.1%, whereas the energy demand required to drive the main pump is reduced by about 43.3%.*

**Keywords:** *Energy Recovery; Intelligent Control System; Fuzzy Logic Control; Hybrid Excavator.*



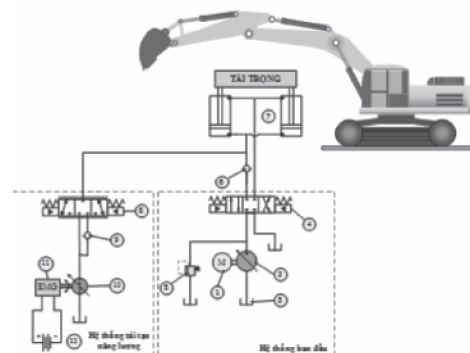
## 1. GIỚI THIỆU

Máy đào truyền động thủy lực thuộc nhóm máy chủ đạo trong công tác đất và khai khoáng. Trọng lượng và công suất lớn nên mức tiêu thụ nhiên liệu của máy cũng cao tương ứng. Trong quá trình máy hoạt động, thể năng của bộ công tác trong quá trình đi xuống có thể thu hồi, biến đổi và tái sử dụng trong quá trình nâng cần. Nguồn năng lượng tái tạo này sẽ giúp giảm năng lượng tiêu thụ của bơm chính trong mạch truyền thống [1]. Lin và cộng sự đề xuất hệ thống gồm bình tích áp và siêu tụ điện để thu hồi và tái sử dụng năng lượng [2]. Xia cùng cộng sự đề xuất sử dụng xy lanh có cấu tạo 3 khoang để thu hồi thể năng từ chuyển động đi xuống của bộ công tác [3]; Ge và Zhu cùng sử dụng bình tích áp để thu hồi và biến đổi thể năng của bộ công tác [4, 5]. Siêu tụ điện cũng được Y.-X. Yu cùng cộng sự sử dụng để thu hồi năng lượng, từ đó nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng của bơm chính [6]. Ấc quy điện được Do cùng cộng sự sử dụng để mô phỏng hệ thống thu hồi năng lượng của cần máy đào [7, 8]. Li cùng cộng sự đã sử dụng ắc quy kết hợp với bình tích áp để dẫn động mô tơ thủy lực, nhằm tối ưu hóa năng lượng trong quá trình làm việc của bộ công tác [9]. Mặc dù các nghiên cứu trước đã đề xuất các hệ thống thu hồi và tái tạo năng lượng, tuy nhiên chưa nghiên cứu đến việc phối hợp hiệu quả các nguồn năng lượng nhất là trong hệ thống điện, trạng thái nạp của ắc quy (SOC) thay đổi trong quá trình làm việc. Ngoài ra, SOC cũng quyết định đến công suất của máy phát điện. Để khắc phục điểm hạn chế này, bài báo đề xuất hệ thống dẫn động cần sử dụng tái tạo năng lượng dạng điện. Trong đó, bộ điều khiển Fuzzy được sử dụng để phối hợp hoạt động giữa máy phát điện và bơm chính theo sự biến đổi của SOC và tải trọng tác dụng lên hệ thống cần.

## 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG THU HỒI VÀ TÁI TẠO NĂNG LƯỢNG

### 2.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Sơ đồ hệ thống dẫn động cần có tích hợp thu hồi và tái sử dụng năng lượng được thể hiện ở Hình 1, gồm hai hệ: hệ ban đầu của máy; hệ tái tạo năng lượng thể hiện nguyên lý thu hồi và tái sử dụng năng lượng. Ở hệ thống ban đầu, van chính sẽ phân phối dòng dầu từ bơm đến hệ xy lanh dẫn động cần. Trong khi hệ thống tái tạo năng lượng biến đổi giữa áp năng và điện năng với thông số thể hiện trong Bảng 1. Trong suốt quá trình hạ cần, thể năng của bộ công tác được biến đổi thành áp năng. Dầu áp suất cao từ khoang piston được thu hồi về hệ thống tái tạo năng lượng, thay vì đi về hệ thống ban đầu so với nguyên lý làm việc truyền thống. Ở hệ thống tái tạo năng lượng, áp năng được biến đổi thành điện năng bằng máy phát, sau đó năng lượng này được tích trữ ở ắc quy điện. Trong quá trình nâng cần, năng lượng điện được tái sử dụng cùng với năng lượng được cấp từ bơm chính của hệ thống ban đầu. Như vậy, trong quá trình nâng cần, năng lượng do hai hệ thống cung cấp. Chính vì vậy cần có thuật toán điều khiển sự phối hợp hai nguồn năng lượng này để toàn bộ hệ thống đảm bảo ổn định với hiệu suất cao.



Hình 1. Hệ thống đề xuất có thu hồi và tái sử dụng năng lượng:

- 1 - Động cơ chính; 2 - Bơm thủy lực; 3 - Thùng dầu; 4 - Van chính; 5 - Van an toàn; 6 - Van một chiều;  
 7 - Hệ xylanh cần; 8 - Van tái tạo năng lượng; 9 - Van một chiều; 10 - Bơm/Mô tơ thủy lực;  
 11 - Mô tơ/Máy phát điện; 12 - Ấc quy.

Bảng 1. Tham số mô phỏng của hệ thống.

Phần tử	Tham số	Giá trị	Đơn vị
Dầu thủy lực	Loại dầu	Cơ bản	-
	Nhiệt độ dầu	40	°C
	Khối lượng riêng	850	kg/m <sup>3</sup>
	Mô đun đàn hồi	17000	bar
Bơm thủy lực	Lưu lượng riêng	75	cc/vòng
	Tốc độ	2000	vòng/phút
Xylanh cần	Đường kính xylanh	100	mm
	Đường kính cần	80	mm
	Hành trình di chuyển	0.7	m
Van an toàn	Áp suất mở van	250	bar
Van phân phối	Dòng điện điều khiển van	40	mA
	Lưu lượng mở lớn nhất	250	Lít/phút

2.2. Các công thức toán học mô tả hệ thống

Phương trình động lực học của hệ xylanh nâng/hạ cần:

$$m \times \ddot{y} + c \times \dot{y} = P_A \times A_A - P_B \times A_B - m \times g - F_f \quad (1.1)$$

Trong đó, m là khối lượng tương đương của cần, c là hệ số cản nhớt của dầu. Lưu lượng dầu khoang piston của xylanh xác định theo công thức:

$$Q_A = v \times A_A + \frac{1}{\beta} \times V_A \times \frac{dP_A}{dt} \quad (1.2)$$

Trong đó, v là vận tốc di chuyển của cần, P<sub>A</sub> và P<sub>B</sub> là áp suất dầu khoang piston và khoang cần.

Năng lượng có thể thu hồi khi hạ cần xác định theo công thức:

$$E_h = \int_0^t (P_A \times Q_A).dt \quad (1.3)$$

Trong đó, A<sub>A</sub> và A<sub>B</sub> là diện tích lớn và nhỏ của piston. Năng lượng thu hồi và tích trữ ở ắc quy tính theo công thức:

$$E_e = \int_0^t (u \times i).dt \quad (1.4)$$

Hiệu suất thu hồi năng lượng được xác định theo công thức:

$$\eta = \frac{E_e}{E_h} \quad (1.5)$$

Năng lượng cần thiết trong quá trình nâng cần được xác định theo công thức:

$$E_{req} = E_p + E_{ge} \quad (1.6)$$

Công suất của bơm chính xác định theo công thức:

$$E_p = p_p \times Q_b \quad (1.7)$$

Trong đó,  $P_b$  và  $Q_b$  là áp suất đầu và lưu lượng đầu ra của bơm. Công suất yêu cầu xác định theo công thức:

$$E_{req} = F \times v \quad (1.8)$$

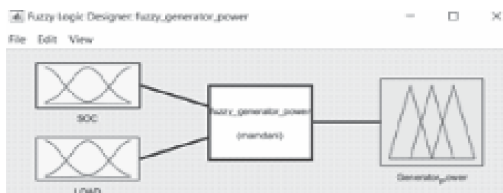
Từ công thức (1.6) đến (1.8) có thể tính được công suất của máy phát:

$$E_{gc} = F \times v - p_p \times Q_b \quad (1.9)$$

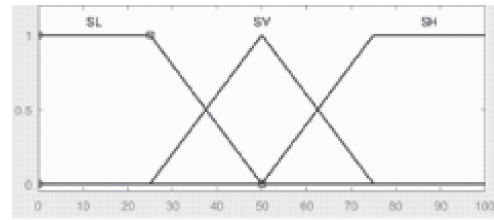
Trong đó,  $F$  là lực tác dụng lên hệ xylanh cần.

### 3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN LOGIC MỜ

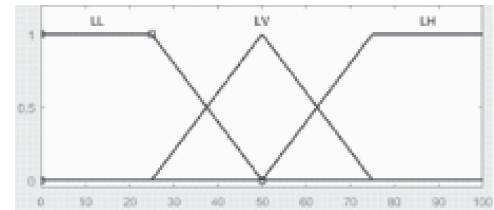
Dựa trên nguyên lý suy luận mờ, hệ điều khiển Fuzzy xác định công suất máy phát điện theo trạng thái sạc pin (SOC) và mức tải (LOAD), trong đó công suất phát tăng dần khi SOC cao hoặc tải lớn, và giảm khi SOC thấp và tải nhỏ. Cụ thể, với SOC thấp hoặc trung bình kết hợp tải nhỏ, máy phát làm việc ở công suất thấp; khi SOC trung bình và tải trung bình hoặc nặng, công suất được điều chỉnh từ trung bình đến lớn; trong khi đó, với SOC cao, máy phát chủ yếu hoạt động ở công suất lớn, ngoại trừ trường hợp tải nặng thì công suất được duy trì ở mức trung bình nhằm đảm bảo hiệu quả và ổn định hệ thống. Các hàm thuộc của SOC (SL, SV, SH), LOAD (LL, LV, LH) và POWER (PL, PV, PH) được minh họa chi tiết trong Hình 2.



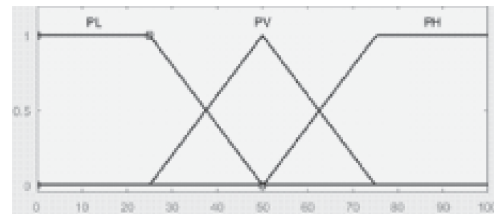
Giao diện bộ điều khiển Fuzzy



Trạng thái nạp - SOC



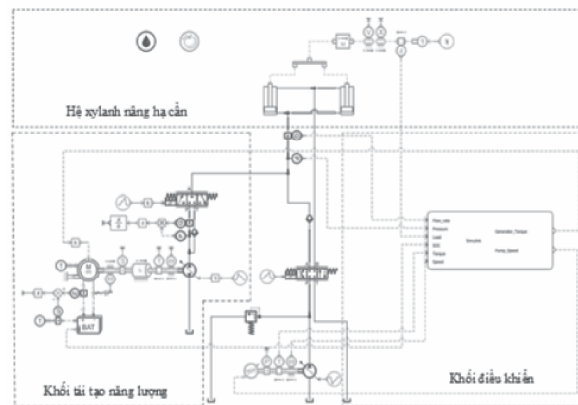
Tải trọng - LOAD



Công suất máy phát - Power

Hình 2. Bộ điều khiển Fuzzy.

### 4. MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

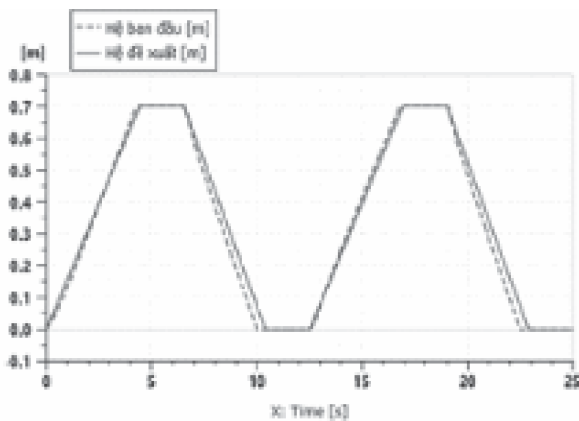


Hình 3. Mô hình hệ thống xây dựng bằng Amesim.

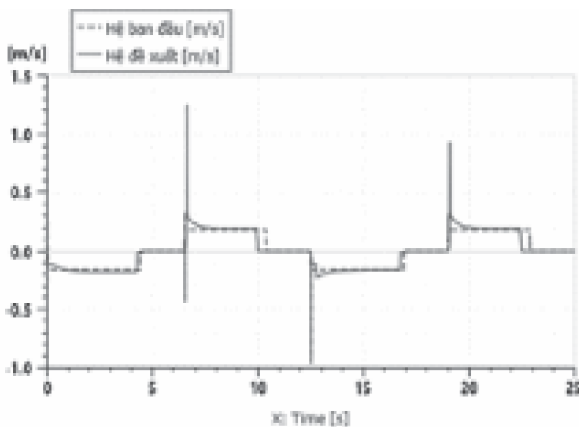
Sơ đồ mô phỏng kết hợp giữa phần mềm Amesim và phần mềm Matlab được thể hiện ở Hình 3. Từ kết quả mô phỏng ở Hình 4

có thể thấy đặc trưng động lực học của hai hệ thống là tương đương nhau. Hành trình tối đa của xy lanh nâng là cần là 0,7 m; tốc độ nâng/hạ cần đặt xấp xỉ 0,2 m/s.

Trạng thái làm việc củaẮc quy điện được thể hiện qua thông số SOC ở Hình 5. Từ đồ thị có thể thấy, giá trị ban đầu của SOC là 70, đồ thị SOC đi xuống ở hành trình nâng cần, tương ứng với quá trình xả năng lượng; ngược lại đồ thị SOC đi lên ở hành trình hạ cần tương ứng với quá trình thu hồi năng lượng.

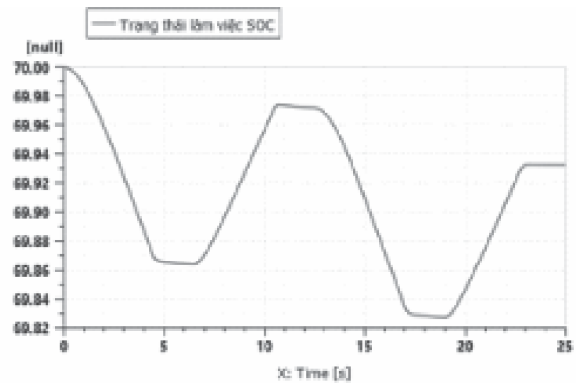


a)

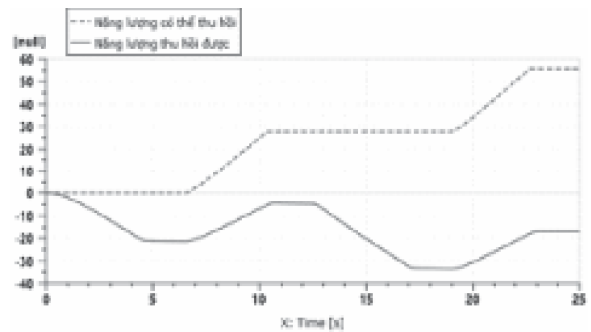


b)

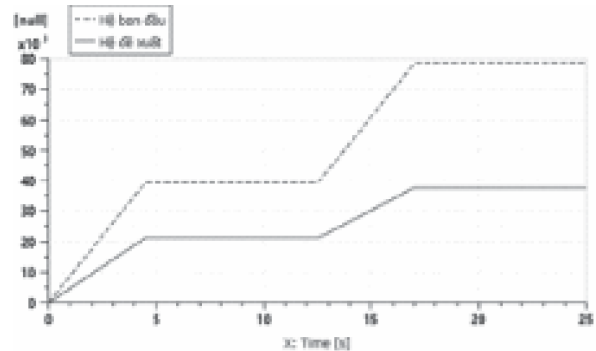
Hình 4. Đồ thị phân tích động học của hệ xy lanh nâng/hạ cần: a) Chuyển vị, b) Vận tốc.



Hình 5. Trạng thái nạp củaẮc quy điện.



a)



b)

Hình 6. Hiệu suất năng lượng: a) Thu hồi năng lượng, b) Tiêu thụ năng lượng.

Hiệu suất thu hồi năng lượng của hệ thống được thể hiện ở Hình 6a. Trong đó, năng lượng của khoang piston là năng lượng có thể thu hồi và năng lượng tích trữ ởẮc quy điện là năng lượng thu hồi. Từ đồ thị có thể thấy, năng lượng thu hồi được nhỏ hơn so với năng

lượng có thể hồi. Nguyên nhân là do tổn thất năng lượng trên hệ thống và hiệu suất làm việc của máy phát. Máy phát trong hệ thống này làm việc với hiệu suất khoảng 70%. Cũng từ giá trị của đồ thị có thể thấy hiệu suất thu hồi năng lượng của hệ thống đạt xấp xỉ 57,1%.

Năng lượng tiêu thụ của bơm chính được thể hiện ở Hình 6b, trong đó có thể thấy năng lượng ở mạch đề xuất giảm đáng kể so với năng lượng cần thiết ở hệ ban đầu. Năng lượng tiêu thụ của bơm chính giảm do có phần năng lượng được bù vào từ hệ thống tái tạo năng lượng. Năng lượng này được thu hồi từ quá trình hạ cần. Tỷ lệ giảm năng lượng đạt khoảng xấp xỉ 43,3%.

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất hệ thống dẫn động cần của máy đào có tích hợp khối thu hồi và tái tạo năng lượng. Năng lượng từ quá trình đi xuống của cần được biến đổi thành điện năng và được tái sử dụng trong hành trình nâng cần. Hiệu suất thu hồi năng lượng của hệ thống đạt khoảng 57,1%. Ngoài ra, năng lượng tiêu thụ của bơm chính ở hệ thống đề xuất giảm khoảng 43,3% so với năng lượng ở hệ ban đầu. Hiệu quả này đạt được nhờ tích hợp hệ thống điều khiển Fuzzy trong khối quản lý năng lượng của hệ thống.

### Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ của Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh (UEH). Nghiên cứu này được sự hỗ trợ về tài chính của Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh – UEH. Bài báo này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu khoa học công nghệ cấp trường có mã số CTD-CS-2025-03 được tài trợ bởi Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh. ❖

Ngày nhận bài: 16/01/2026

Ngày phản biện: 26/01/2026

### Tài liệu tham khảo:

- [1]. J. G. Daqing Zhang, Yuming Zhao, Changsheng Liu, Peng Hu, and Z. Tang, "Research on a new energy-recovery system for hybrid hydraulic excavators". Presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Cape Town, South Africa, 2019.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. 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.