

Study on Simulation and Calculation of the Regenerative Braking System on Plug-in Hybrid Vehicles

Quang Thanh Ngo*, Tuan Tung Duong

Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. Email: thanhnq@hcmute.edu.com

ARTICLE INFO

Received: 22/01/2025
Revised: 14/07/2025
Accepted: 19/08/2025
Published: 28/11/2025

KEYWORDS

Regenerative Braking System;
Plug-in Hybrid Electric Vehicle;
Hybrid Electric Vehicle;
Kinetic Energy Recovery System;
Braking Force Distribution.

ABSTRACT

The regenerative braking system is designed to convert kinetic energy into electrical energy, which is then reused within the vehicle. In this study, the author develops a mathematical model and designs a regenerative braking system through simulation on a Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) to evaluate its impact on fuel consumption. The simulation is carried out based on the specifications of the Honda CR-V model, utilizing MATLAB Simulink software to perform analysis under various driving conditions, including urban, mixed, and highway driving cycles. The obtained results, including traction power, operating time, generated energy, recovered energy, and energy consumption of both the electric motor and internal combustion engine, indicate that the P-HEV equipped with a regenerative braking system achieves recovered energy levels of 0.72 kWh, 0.33 kWh, and 0.23 kWh in the FPT75, NEDC, and US06 driving cycles respectively. These values demonstrate that the P-HEV is more energy-efficient compared to HEVs and conventional internal combustion engine vehicles, depending on the specific standard driving cycle.

Nghiên cứu tính toán mô phỏng hệ thống phanh tái sinh trên xe Plug-in Hybrid

Ngô Quang Thành*, Dương Tuấn Tùng

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: thanhnq@hcmute.edu.com

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 22/01/2025
Ngày hoàn thiện: 14/07/2025
Ngày chấp nhận đăng: 19/08/2025
Ngày đăng: 28/11/2025

TỪ KHÓA

Hệ thống phanh tái sinh;
Xe điện lai sạc ngoài;
Xe điện lai;
Hệ thống thu hồi năng lượng động học;
Hệ thống phân phối lực phanh.

TÓM TẮT

Hệ thống phanh tái sinh được thiết kế để chuyển đổi năng lượng động học thành điện năng, từ đó được tái sử dụng trên xe. Trong nghiên cứu này, tác giả tiến hành xây dựng một mô hình toán học và phát triển một hệ thống phanh tái sinh thông qua mô phỏng trên xe Plug-in Hybrid nhằm đánh giá tác động của nó đến mức tiêu thụ nhiên liệu. Quá trình mô phỏng được thực hiện dựa trên các thông số của mẫu xe Honda CRV, sử dụng phần mềm MATLAB Simulink để phân tích dưới nhiều điều kiện lái khác nhau như đường nội thành, đường hỗn hợp và đường ngoại thành. Các kết quả thu được như công suất kéo, thời gian làm việc, năng lượng sinh ra, năng lượng thu hồi, năng lượng tiêu tốn của động cơ điện và động cơ đốt trong cho thấy xe P-HEV với hệ thống phanh tái sinh đạt mức năng lượng thu hồi trong từng chu trình FPT75, NEDC và US60 lần lượt là 0.72 (kWh); 0.33 (kWh); 0.23 (kWh) và tiết kiệm hơn so với xe HEV và xe sử dụng động cơ đốt trong truyền thống, tùy theo từng chu kỳ lái xe tiêu chuẩn.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2025.1824>

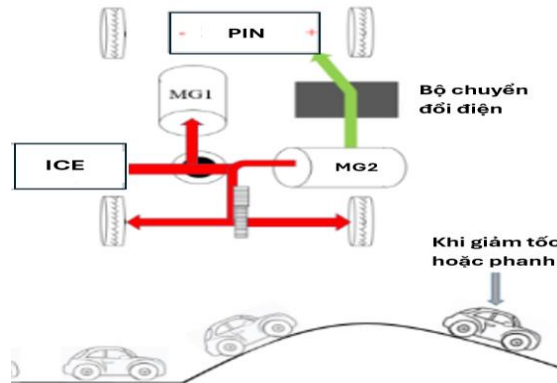
Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Hiện nay, việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch ngày càng tăng, làm gia tăng lượng khí thải carbon toàn cầu và tăng nhiệt độ của trái đất. Theo khảo sát của Cơ quan bảo vệ môi trường Đài Loan, lượng khí thải CO₂ của ngành năng lượng chiếm khoảng 10,5% tổng lượng khí thải từ quá trình đốt nhiên liệu, trong đó công nghiệp chiếm 47,8%, giao thông vận tải chiếm khoảng 14,6%, dịch vụ chiếm 13,4%, dân

dụng chiếm 12,6% và nông nghiệp chiếm 1,1% [1]. Do đó, khí thải từ phương tiện là nguồn lớn thứ hai, vì vậy các nhà sản xuất ô tô trên thế giới hiện đang cam kết phát triển năng lượng mới để thay thế nhiên liệu truyền thống như năng lượng điện, năng lượng mặt trời, năng lượng tái sinh cho phương tiện giao thông đường bộ. Với mục tiêu giảm mức tiêu thụ nhiên liệu và lượng khí thải thấp, xe hybrid (HEV) và Plug-in Hybrid (P-HEV) đã được nghiên cứu và phát triển trong những năm gần đây.

Việc áp dụng xe điện chạy bằng pin (BEV) và xe hybrid với công nghệ hệ thống phanh tái sinh (RBS) là một trong những giải pháp quan trọng nhằm giảm tiêu thụ nhiên liệu và khí thải. Đặc biệt, xe P-HEV không chỉ tận dụng hệ thống phanh tái sinh mà còn có khả năng sạc từ nguồn điện bên ngoài, giúp giảm lượng khí thải và hạn chế thời gian sử dụng nhiên liệu hóa thạch so với xe HEV [2].



Hình 1. Năng lượng thu hồi khi phanh hoặc giảm tốc

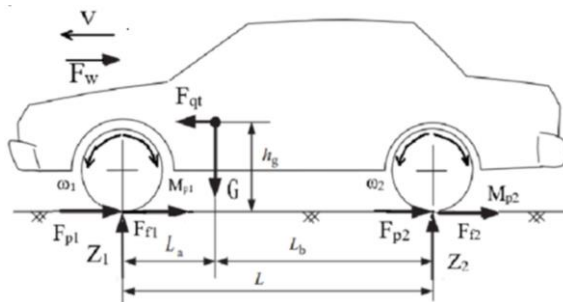
Khi xe giảm tốc, năng lượng quán tính được truyền tới bánh dẫn động, làm quay rôto máy phát để chuyển đổi thành điện năng sạc cho ắc quy, đồng thời tạo lực phanh điện từ hỗ trợ giảm tốc. Nghiên cứu định lượng vai trò phanh tái sinh trong giảm tiêu thụ nhiên liệu của P-HEV bằng mô phỏng dựa trên thông số kỹ thuật xe Plug-in Hybrid [3].

Đối với xe P-HEV, một cổng sạc ngoài được tích hợp nhằm giảm mức sử dụng nhiên liệu hóa thạch so với các dòng xe HEV và xe động cơ đốt trong truyền thống. Các cấp được phân loại như sau:

Bảng 1. Các chế độ sạc của xe P-HEV [4]

CÁC CHẾ ĐỘ SẠC P-HEV				
Cấp độ	Chế độ	Nguồn điện	Dòng sạc (A)	Thời gian (Giờ)
1	Sạc chậm	AC	10	8
2	Sạc nhanh	AC	32	2,5
3	Sạc cấp tốc	DC	100	0,5

2. Tính toán và mô hình mô phỏng



Hình 2. Sơ đồ lực tác dụng khi phanh

Đánh giá động lực học tổng quát của xe khi di chuyển trên đường, nghiên cứu này tập trung vào mô hình phanh $\frac{1}{2}$, trong đó xe được trang bị hệ thống thu hồi năng lượng phanh kết hợp với hệ thống phanh thủy lực. Từ đó, các hệ phương trình được xây dựng nhằm mô phỏng hoạt động của hệ thống phanh

thủy lực thông thường, hệ thống thu hồi năng lượng cũng như quá trình điều khiển dựa trên thuật toán. Các lực tác dụng lên xe được minh họa chi tiết trong hình 2 [5].

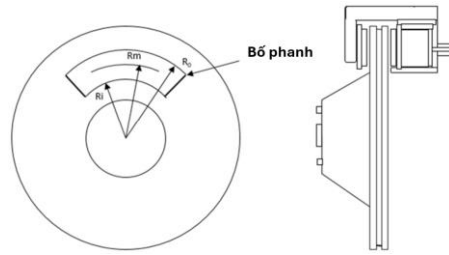
Trong đó: Lực F_{x1} và F_{x2} : Là lực dọc; F_{p1} và F_{p2} là lực phanh; F_{f1} và F_{f2} là lực cản lăn; Lực pháp tuyến Z_1 và Z_2 : là các phản lực từ mặt đường lên các bánh xe cầu trước và sau; Lực cản gió F_w ; ω_1 và ω_2 là vận tốc góc của bánh trước và sau; V là vận tốc của Ô tô; F_{qt} là lực quán tính của xe khi phanh.

M_{p1} và M_{p2} là mô men phanh bánh trước và sau. Với $M_{p1} = M_{th} + M_{ck1}$ [5]

M_{th} là lực phanh của hệ thống tái sinh; M_{ck1} là lực phanh của hệ thống phanh thủy lực trên bánh trước.

2.1. Mô hình phanh

2.1.1. Mô hình phanh thủy lực



Hình 3. Tính năng của hệ thống phanh thủy lực

Moment phanh:

$$M = \mu \cdot P \cdot \pi B a^2 \cdot R_m \cdot N_{pads} / 4 [Nm] \quad (1)$$

Với M là mô men của cơ cấu phanh thủy lực; μ hệ số ma sát giữa đĩa và má phanh; P áp suất phanh; Ba hệ số cơ cấu truyền động phanh; R_m bán kính trung bình giữa trục phanh và má phanh: $R_m = R_i + R_0 [m]$; R_i là bán kính trong của má phanh; R_0 là bán kính ngoài của má phanh; N_{pads} số lượng má phanh trên cụm phanh.

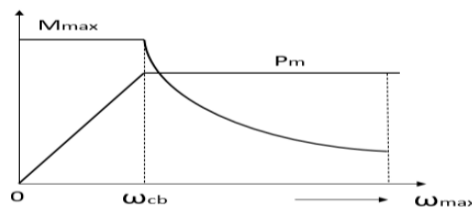
2.1.2. Mô hình phanh tái sinh

Mô men phanh của hệ thống thu hồi:

$$M_{th} = M_{dc} \cdot K_v \cdot K_{soc} \quad (2)$$

Trong đó: M_{th} mô men được thu hồi; M_{dc} mô men hãm của động cơ điện; K_v hệ số vận tốc; K_{soc} là hệ số % khả năng nạp của pin. $M_{dc} = M_{max}$ nếu $\omega_{dc} < \omega_{cb}$ và $M_{dc} = P_m / \omega_{dc}$ nếu $\omega_{dc} > \omega_{cb}$.

M_{max} là mô men cực đại; P_m công suất cực đại của động cơ điện.



Hình 4. Đường đặc tính của động cơ điện

- Hệ số K_v

Vì đặc tính của động cơ điện, có công suất thu hồi thấp nên hiệu quả thu hồi không cao khi ở tốc độ thấp [6]. Nên hệ thống thu hồi không làm việc khi xe di chuyển với tốc độ $V < 2.2 \text{ Km/h}$.

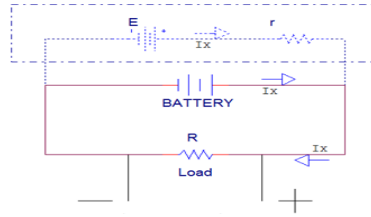
$K_v = 0$ nếu $V < 2,2 \text{ Km/h}$, $K_v = 1$ nếu $V > 4,5 \text{ Km/h}$.

- Hệ số K_{soc}

Nhằm đảm bảo Pin không nạp quá mức và pin đầy sẽ ngưng nạp thì khi đó % SOC = 100% hệ thống thu hồi ngưng hoạt động.

Mối quan hệ giữa % SOC và K_{soc} : $K_{soc} = 1$ nếu % SOC < 70% và $K_{soc} = 0$ nếu % SOC = 100%.

2.2. Tính toán mô hình PIN



Hình 5. Mô hình Pin [9]

Công suất sạc Acqui [9]:

$$P_{batt} = -V_{batt} \cdot I_{batt} \quad (3)$$

Với P_{batt} là công suất sạc; V_{batt} điện áp tổng acqui; I_{batt} dòng điện mỗi môđun.

Khi đó V_{batt} và I_{batt} được xác định:

$$V_{batt} = \frac{V_{out}}{\tau s + 1} \text{ [V]} \quad I_{batt} = \frac{I_{in}}{N_p} \text{ [Ah]}$$

I_{in} : dòng sạc [Ah]; N_p : số cặp cực được mắc song song; τ : hằng số chuyển đổi theo thời gian [s]

Trạng thái sạc của acqui được chuyển đổi:

$$SOC = \frac{1}{Cap_{batt}} \int_0^t I_{batt} dt \quad (4)$$

Cap_{batt} : dung lượng của pin ban đầu [Ah]

Nhằm hạn chế hư hỏng gây ra cho acqui, acqui phải được giới hạn công suất sạc. $P_{battmax}$ được tính toán theo công thức (5) khi dòng điện sạc đạt ngưỡng cực đại I_{inmax} :

$$P_{battmax} = I_{inmax} \cdot V_{batt} - I_{inmax} \cdot E_m \quad (5)$$

E_m : điện áp mở mạch acqui [V]

2.3. Tính toán năng lượng thu hồi

Khi quá trình phanh diễn ra, năng lượng động học của xe được chuyển hóa thành điện năng và dùng để sạc cho Pin. Mức công suất thu hồi từ máy phát được xác định thông qua công thức:

$$P_{th} = M_{th} \cdot \omega \cdot i \quad (6)$$

P_{th} công suất thu hồi. [W]; M_{th} mô men máy phát thu hồi. [Nm]; ω tốc độ góc bánh xe trước. [rad/s]; i là tỉ số truyền của hệ thống truyền lực.

Công thức công thu hồi của quá trình thu hồi năng lượng được tính:

$$A_{th} = P_{th} \cdot t \quad (7)$$

A_{th} là công thu hồi của quá trình thu hồi [J]; t là thời gian thu hồi. [s]

Động năng của xe:

$$E_k = \frac{1}{2} M_v (V_2^2 - V_1^2) \quad (8)$$

Xét sự cân bằng của công suất động cơ điện [7]:

$$P_{Mech} = \tau\omega = (I\alpha)\left(\frac{U}{\alpha}\right) = P_e \quad (9)$$

Công suất hiệu dụng do động cơ tạo ra phụ thuộc vào hiệu suất của máy phát điện. Do đó:

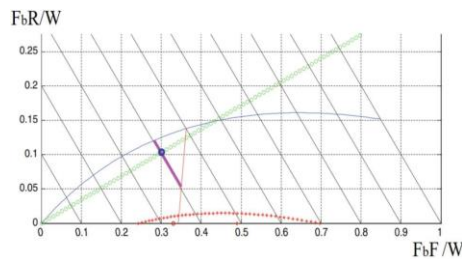
$$P_{e,actual} = \eta_{gen} P_e$$

Khi $\tau = I\alpha$; $\omega = \frac{U}{\alpha}$; η_{gen} là hiệu suất của máy phát điện; M_v : Khối lượng của xe

2.4. Phương pháp điều khiển phân phối lực phanh tái sinh và phanh cơ khí

Khi phanh gấp, momen phanh cần thiết lớn hơn so với momen phanh điện thì hệ thống phanh cơ khí phải cùng hoạt động để đảm bảo an toàn. Để hiệu suất thu hồi cao, việc điều khiển phân phối giữa lực phanh tái sinh và lực phanh cơ khí là hết sức quan trọng. Sự phân phối lực phanh tối ưu được mô tả bằng đồ thị parapol (đường cong màu xanh trong hình 6). Nếu sự phân phối lực phanh thực ở dưới đường cong phân phối lực phanh lý tưởng thì các bánh xe trước sẽ bị phanh sớm hơn các bánh xe sau dẫn đến trạng thái ổn định [11].

$$\frac{F_{bf}}{W_f} \geq \frac{F_{br}}{W_r} \quad (10)$$



Hình 6. Đặc tính phân phối lực phanh

Trong đó F_{bf} và F_{br} là lực phanh trên cầu trước và cầu sau (N); W_f và W_r là trọng lượng xe trên trục trước và trục sau (N).

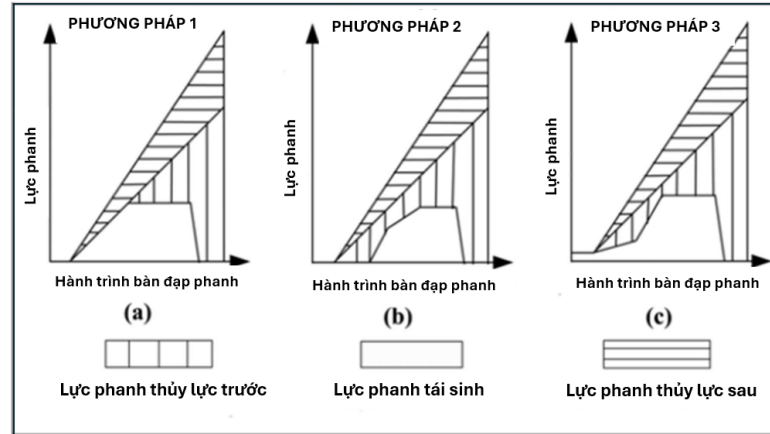
Khi điểm làm việc ở dưới đường cong phân phối lực phanh lý tưởng, phần lớn lực phanh sẽ được chuyển đến bánh xe trước và một lượng rất nhỏ lực phanh đến các bánh sau và làm giảm sự khả năng bám đường của bánh xe sau. Để tránh tình trạng này, một số điều kiện phanh được thêm vào nhằm đạt được lực phanh tối đa trên các bánh xe trước được giới hạn bởi sự điều chỉnh bởi liên minh châu Âu ECE (đường cong màu đỏ hình 6). Theo sự điều chỉnh này, để giá trị nằm trong khoảng 0.2 và 0.8 sự phân phối lực phanh phải thỏa mãn điều kiện [12]:

$$z \geq 0.1 + 0.85(\mu_{ROAD} - 0.2) \quad (11)$$

Trong đó Z là tỉ lệ phanh của xe và μ_{ROAD} là độ bám của đường. Khi đó, vùng cho phép của sự phân phối lực phanh nằm giữa hai đường cong ở hình 6. Đối với xe truyền thống, hệ thống phanh ma sát được định nghĩa bằng độ dốc của đường thẳng chấm trong hình 6. Mối quan hệ của lực phanh ở các bánh xe trước và sau khi bánh trước bị bó cứng và tính đến độ bám đường của lớp μ_{ROAD} [12].

$$F_{bR} = \frac{wb - \mu_{ROAD} \cdot h}{\mu_{ROAD} \cdot h} \cdot F_{bF} - \frac{W \cdot L_b}{h} \quad (12)$$

Để tìm được hiệu suất tốt nhất của sự phân phối lực phanh giữa phanh tái sinh và phanh cơ khí, có ba phương pháp điều khiển phanh đang được nghiên cứu và ứng dụng. Trong tất cả các phương pháp này, có một quy tắc chung để tìm sự phân phối lực phanh [12].



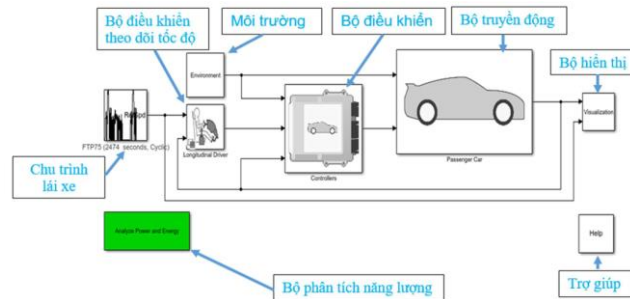
Hình 7. Biểu đồ các phương pháp điều khiển phanh tái sinh

Có 3 phương pháp điều khiển, ở mỗi phương pháp có các ưu nhược điểm khác nhau, sao cho hiệu quả thu hồi năng lượng tốt nhất nhưng phải đảm bảo yêu cầu khi phanh nhằm mục đích an toàn.

Ở phương pháp 1 (Hình 7a), khi có hiện tượng phanh hoặc giảm tốc xảy ra phanh tái sinh và phanh cơ khí hoạt động vừa giảm tốc và vừa thu hồi năng lượng. Ở phương pháp 2 (Hình 7b), khi có hiện tượng phanh hoặc giảm tốc xảy ra phanh cơ khí hoạt động trước để giảm tốc, sau đó phanh tái sinh hoạt động để thu hồi. Nhưng ở phương pháp này năng lượng thu hồi sẽ không cao. Ở phương pháp 3 (Hình 7c), khi có hiện tượng phanh hoặc giảm tốc xảy ra phanh tái sinh hoạt động để thu hồi năng lượng trước, sau đó phanh cơ khí sẽ hoạt động phối hợp nhằm đạt được lực phanh yêu cầu.

2.5. Mô hình mô phỏng

Đối tượng nghiên cứu P-HEV được xây dựng trên Matlab/Simulink với động cơ đốt trong, hộp số, Pin, động cơ điện, máy phát điện, bánh xe, phanh và các thuật toán điều khiển truyền động liên quan.



Hình 8. Mô hình tổng quát

Mô hình sử dụng thuật toán điều khiển vòng lặp kín với đầu vào gồm tốc độ chu trình, tốc độ thực tế và thông số môi trường. Tốc độ chu trình được so sánh với tốc độ xe trong khối chế độ lái để phát sinh tín hiệu ga hoặc phanh, từ đó điều khiển động cơ, hệ thống phanh, máy phát và động cơ điện. Kết quả mô hình cung cấp tốc độ thực tế cùng các thông số vận hành, phục vụ phân tích và nghiên cứu.

Bảng 2. Thông số cơ bản của xe Honda CRV P-HEV [4]

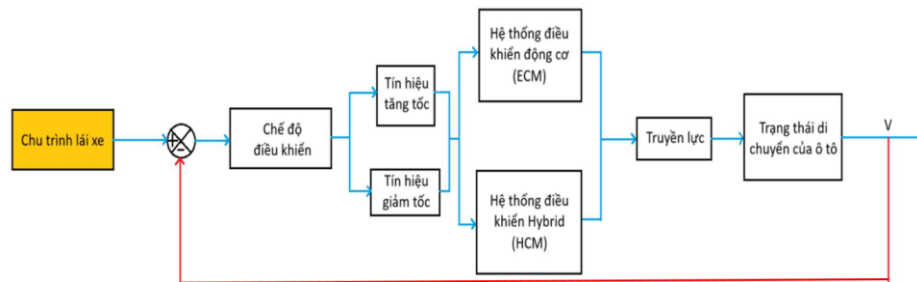
Các thông số cơ bản		Giá trị
Khối lượng thân xe [Kg]		2430
Chiều dài cơ sở [mm]		2701
Động cơ đốt trong	Dung tích xy lanh [cc]	1993
	Công suất cực đại [kW]	109 tại 6100 rpm
	Momen xoắn cực đại [Nm]	183 tại 4500 rpm
Máy phát điện [MG1]	Công suất cực đại [kW]	120 tại 19000 rpm

	Momen xoắn cực đại [Nm]	295
Máy phát điện [MG2]	Công suất cực đại [kW]	135 tại 5000 – 8000 rpm
	Momen xoắn cực đại [Nm]	335 tại 0 – 2000 rpm
PIN Lithium Ion	Số lượng Mô đun	96
	Năng lượng acqui [kWh]	17,7
	Điện ápẮc qui [V]	300
	Tỷ số truyền động cơ	0,708
	Tỷ số truyền mô tơ điện	2,231
	Tỷ số truyền vi sai	4,438

Bảng 3. Tham số mô phỏng

Tham số mô phỏng	Giá trị
Bán kính bán xe RWheel [m]	0,3622
Trạng thái sạc tối thiểu SOCmin	50
Trạng thái sạc hoạt động SOCtager	80
Tốc độ không tải của động cơ Engidle [Rad/s]	78,5
Tốc độ xe giới hạn ở chế độ điện EVSpdLmt [m/s]	16

Dựa trên thông số kỹ thuật, dữ liệu động lực học, điều kiện môi trường và đặc tính hệ thống phanh, mô hình điều khiển phanh được xây dựng nhằm tối ưu quá trình giảm tốc. Lực phanh tái sinh và lực phanh cơ khí được phân tích, phân bổ để đáp ứng yêu cầu từ người lái. Khi tăng tốc, tín hiệu mô men từ bàn đạp ga được truyền qua bộ điều khiển động cơ và bộ điều khiển trung tâm để điều chỉnh công suất, đảm bảo tăng tốc mượt mà và hiệu quả. Khi giảm tốc, hệ thống phân phối lực phanh tự động xác định và chia tỷ lệ giữa phanh tái sinh và phanh cơ khí, dựa trên tổng mô men cần thiết, nhằm duy trì an toàn và ổn định. Hiệu quả thu hồi năng lượng cũng như độ ổn định của xe phụ thuộc trực tiếp vào chiến lược phân phối lực phanh, qua đó tối ưu hóa khả năng tái sinh mà vẫn đảm bảo yêu cầu an toàn vận hành.



Hình 9. Thuật toán điều khiển mô phỏng

Nghiên cứu mô phỏng hệ thống phanh tái sinh trên xe P-HEV theo ba chu kỳ lái chuẩn FTP75, NEDC và US06 nhằm đánh giá hiệu quả ở các điều kiện vận hành khác nhau, tập trung đo lường năng lượng thu hồi và xác định mức đóng góp vào giảm tiêu thụ nhiên liệu.

Quy trình mô phỏng gồm bốn giai đoạn chính. (1) Nhận tín hiệu: hệ thống tiếp nhận tốc độ từ chu trình lái tiêu chuẩn và tốc độ thực tế để so sánh, xác định tín hiệu điều khiển tăng/giảm tốc. (2) Điều khiển động cơ và chế độ vận hành: tín hiệu điều khiển được truyền đến hệ thống động cơ để điều chỉnh mô men xoắn và lựa chọn chế độ P-HEV, HEV hoặc EV. (3) Phân phối lực phanh: thuật toán chia tỷ lệ mô men giữa phanh tái sinh và phanh thủy lực. (4) Thu hồi năng lượng: MG2 chuyển động năng thành điện năng sạc pin, lặp lại theo từng chu kỳ.

Đối với xe HEV, năng lượng sử dụng chủ yếu đến từ hai nguồn: điện và nhiên liệu xăng. Do đó, để tính toán mức tiêu thụ nhiên liệu một cách chính xác, cần chuyển đổi lượng điện tiêu thụ khi động cơ

điện hoạt động sang giá trị tương đương với năng lượng từ xăng. Theo tiêu chuẩn của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ [8], 1 gallon xăng tương đương với 33,7 kWh năng lượng.

Công suất đầu ra của pin sẽ được chuyển đổi thành thể tích nhiên liệu:

$$\frac{P_{batt}}{33.7*3600} [gal / s] = \frac{P_{batt}}{33.7*3600} * \frac{1}{264,172} [m^3 / s] = \frac{P_{batt}}{33.7*3600} * \frac{1}{264,172} * 739 [kg / s] \quad (13)$$

Tổng lưu lượng nhiên liệu được sử dụng trên toàn bộ chu trình trên xe PHEV

$$m_{f_hev} = Q_{fuel} D = \int_0^t \left(\frac{P_{batt} * 739}{33.7 * 3600 * 264,172} + m_{fuel} \right) dt \quad [m^3] \quad (14)$$

Mức tiêu thụ nhiên liệu trên 100 km: $\frac{m_{f_hev} * 100}{s.0.739} [l / 100km]$

Trong đó: P_{batt} : Công suất đầu ra của pin [kW]; Q_{fuel} : Lưu lượng nhiên liệu động cơ đốt trong sử dụng [m^3/s]; Q_{f_phev} : Tổng lưu lượng nhiên liệu được sử dụng [m^3]; s : Quãng đường xe di chuyển [km].

Ta tính được tổng nhiên liệu tiết kiệm được ở các chu trình:

$$\frac{P_{th}}{33,7 * 3600} * \frac{1}{264,172} [m^3 / s] \quad (15)$$

Tổng lưu lượng nhiên liệu tiết kiệm được nhờ hệ thống thu hồi trên xe PHEV:

$$Q_{fuel_th} = \int_{t_0}^{t_h} \frac{P_{th}}{33,7 * 3600 * 264,172} dt = \frac{E_{th}}{33,7 * 3600 * 264,172} [m^3] \quad (16)$$

Tổng nhiên liệu tiết kiệm được nhờ hệ thống RBS trên 100km:

$$\frac{Q_{fuel_th} * 1000 * 100}{s} = \frac{E_{th} * 100000}{33,7 * 3600 * 264,172 * s} [lit / 100km] \quad (17)$$

Trong đó: P_{th} : Công suất thu hồi [kW]; E_{th} : Năng lượng thu hồi được từ hệ thống phanh tái sinh (kJ); Q_{fuel_th} : Tổng nhiên liệu tiết kiệm được nhờ hệ thống thu hồi trên xe P-HEV theo đơn vị m^3 .

Tính toán các giá trị năng lượng, theo định luật bảo toàn năng lượng ta có:

Năng lượng motor kéo sinh ra:

$$E_{motor} = P_{TB,motor} * t_{motor} \quad (18)$$

Năng lượng động cơ đốt trong sinh ra:

$$E_{ICE} = P_{TB,ICE} * t_{ICE} \quad (19)$$

Tổng năng lượng được sử dụng:

$$E_{total} = E_{motor} + E_{ICE} \quad (20)$$

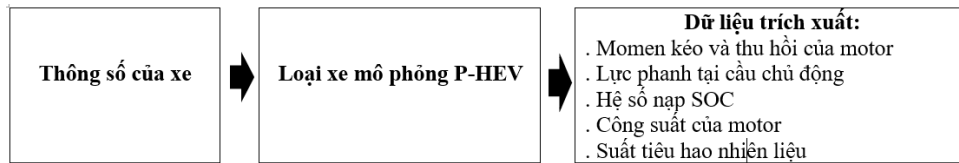
Qua phân tích kết quả, thấy rằng chỉ số SOC của pin giảm dần theo thời gian. Đến cuối mỗi chu trình lái, pin được nạp lại bằng nguồn điện xoay chiều (AC) cấp độ 1 với công suất 2,3 kW. Quá trình sạc đầy, từ mức pin 0% đến đạt 100%, mất khoảng 8 giờ.

Năng lượng sạc lại cho pin: $E_{recharge} = 2,3 * 8 * \% \text{ pin cần sạc lại} \quad (21)$

Trong đó: E_{motor} : Năng lượng motor kéo (kWh); $P_{tb,motor}$: Công suất kéo TB của motor (kW); t_{motor} : Thời gian motor kéo hoạt động (giờ); E_{ICE} : Năng lượng động cơ đốt trong sinh ra (kWh); $P_{tb,ICE}$: Công suất TB của động cơ đốt trong (kW); t_{ICE} : Thời gian động cơ đốt trong hoạt động (giờ).

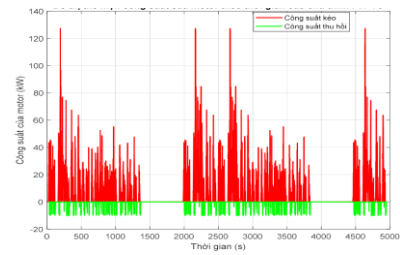
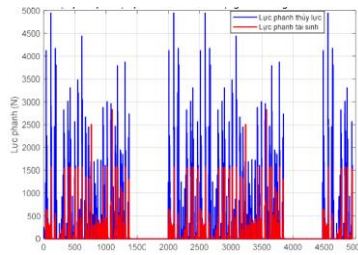
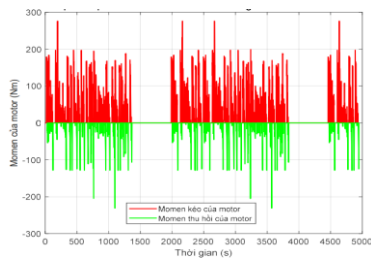
3. Kết quả

Dùng ba chu kỳ lái US06, NEDC, FTP 75, để mô phỏng nhằm đánh giá năng lượng thu hồi từ hệ thống phanh tái sinh trên xe.



Hình 10. Sơ đồ mô phỏng

- Momen kéo/ thu hồi và công suất của motor, lực phanh tại cầu chủ động chu trình FPT75



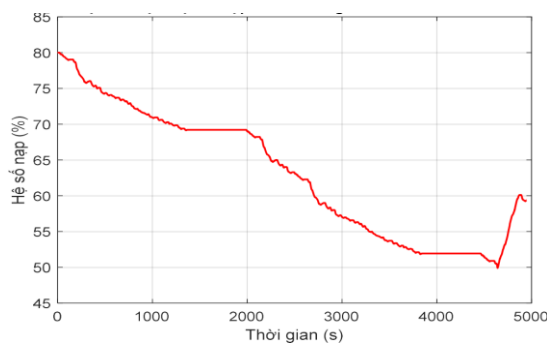
Hình 11. Momen kéo và thu hồi MG2 **Hình 12. Lực phanh tại cầu chủ động** **Hình 13. Công suất motor**

Động cơ đạt momen kéo cực đại 275,91 Nm và trung bình 35,56 Nm, phản ánh khả năng tạo lực kéo lớn nhưng ổn định. Về tái sinh năng lượng, momen thu hồi cực đại 231,02 Nm và trung bình 19,47 Nm, cho thấy hiệu suất thu hồi ổn định. Biểu đồ phân bố momen thể hiện sự dao động đặc trưng của giao thông đô thị, khẳng định hệ thống phanh tái sinh hoạt động hiệu quả.

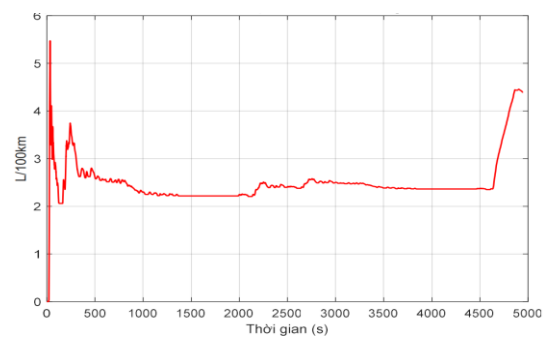
Lực phanh tại cầu chủ động, với tốc độ trung bình 34,1 km/h hệ thống phanh hoạt động liên tục do dừng xe thường xuyên. Lực phanh tối đa của hệ thống phanh thủy lực đạt 4952,38 N, hệ thống phanh tái sinh đạt mức tối đa là 2830,726 N. Hai hệ thống phanh này được phối hợp một cách linh hoạt, vừa thu hồi năng lượng hiệu quả vừa đảm bảo hiệu quả phanh tối ưu để đảm bảo an toàn.

Công suất kéo cực đại 127,133 kW và trung bình 12,455 kW trong 1112,7 giây. Ngược lại, công suất thu hồi chỉ đạt cực đại 10 kW và trung bình 7,497 kW trong 344 giây.

- Hệ số nạp SOC và suất tiêu hao nhiên liệu của chu trình FPT75



Hình 14. Đồ thị thể hiện hệ số nạp SOC



Hình 15. Đồ thị suất tiêu hao nhiên liệu

Ban đầu, hệ số nạp SOC được thiết lập ở mức 80%, với giá trị tối đa đạt 80% và giá trị tối thiểu giảm xuống còn 50%. Sau khi hoàn thành chu trình thử nghiệm, SOC giảm còn khoảng 59,35%. Sự sục và xả liên tục của ắc quy trong quá trình lái xe đã giúp duy trì mức SOC ổn định.

Mức tiêu thụ nhiên liệu lớn nhất là 5,472 l/100km tại 33,07 giây, trung bình toàn chu trình lái là 2,42 l/100km. Các mô hình tính toán tương tự cũng được áp dụng cho các chu trình lái khác như NEDC và US06, với kết quả chi tiết được tổng hợp và trình bày trong Bảng 4. Từ công thức số (14), (15), (16), (17) ta có thể tính được nhiên liệu tiết kiệm được ở các chu trình, theo bảng 5.

Bảng 4. Năng lượng thu hồi từ các chu trình

Chu trình mô phỏng	FPT75	NEDC	US06
Quãng đường (Km)	17,77	10,93	12,8
T/g toàn chu trình (s)	2474	1180	600
Tốc độ TB (Km/h)	34,1	33,35	77,9
T/g RBS hoạt động (s)	344	166,5	96,5
Tỉ lệ T/g thu hồi (%)	13,9	14,1	16,05
Công suất thu hồi TB (kW)	7,497	7,2	8,62
Tổng NL thu hồi (kJ)	2578,9	1198,8	831,9

Bảng 5. Nhiên liệu tiết kiệm từ các chu trình

Chu trình mô phỏng	FPT75	NEDC	US06
Tổng NL thu hồi (kJ)	2578,96	1198,8	831,9
Quãng đường mô phỏng (Km)	17,77	10,93	12,8
Tổng NL tiêu thụ (Lít/100Km)	2,46	1,784	5,61
NL tiết kiệm nhờ RBS (Lít/100Km)	0,45	0,34	0,2

Từ công thức (18), (19), (20), (21), chúng ta có thể tính toán các giá trị năng lượng và so sánh với các dòng xe HEV hay động cơ đốt trong truyền thống, theo bảng 6,7 và 8.

Bảng 6. Tính toán giá trị năng lượng của motor kéo và động cơ đốt trong

Chu trình mô phỏng	C/S kéo TB (kW)	T/g motor kéo (giờ)	NL motor kéo sinh ra (kWh)	C/S kéo TB ICE (kW)	T/g ICE hoạt động (giờ)	NL ICE sinh ra (kWh)
FPT75	12,455	0,309	3,85	7,986	0,015	0,12
NEDC	12,13	0,18	2,2	10,09	0,01	0,1
US06	36,071	0,13	4,65	10,248	0,03	0,32

Bảng 7. Kết quả tính toán các giá trị năng lượng

Chu trình mô phỏng	FPT75	NEDC	US06
NL sạc (kWh)	3,07	1,84	4,416
NL thu hồi (kWh)	0,72	0,33	0,23
NL tiêu tốn (kWh)	3,97	2,3	4,97

Bảng 8. Bảng so sánh suất tiêu hao nhiên liệu

Điều kiện	Mức tiêu hao nhiên liệu (Lít/100Km)		
	P-HEV	HEV	ICE
Đường nội thành	2,46	3,4	9,67
Đường hỗn hợp	1,784	5,2	7,77
Đường ngoại thành	5,61	6,3	6,64

Kết quả cho thấy xe P-HEV có hiệu quả nhiên liệu vượt trội trong điều kiện đường hỗn hợp, với mức tiêu thụ giảm 65,69% so với HEV và 77,04% so với ICE nhờ nguồn điện sạc ngoài. Hệ thống phanh tái sinh và sự kết hợp điện và xăng giúp tối ưu hóa năng lượng, nâng cao hiệu quả vận hành.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình toán kết hợp mô phỏng xe P-HEV dựa trên dữ liệu ba chu trình lái thực tế, nhằm phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất thu hồi năng lượng và đánh giá mức tiết kiệm nhiên liệu. Kết quả cho thấy, nhờ sự phối hợp giữa phanh tái sinh và sạc ngoài, mức tiêu hao nhiên liệu giảm đáng kể, dao động từ 1,784 đến 5,61 lít/100 km tùy loại cung đường. Điều này

khẳng định vai trò then chốt của công nghệ thu hồi năng lượng trong cải thiện hiệu quả nhiên liệu. Đồng thời, kết quả nghiên cứu tạo nền tảng cho các hướng tiếp theo về tối ưu hóa chiến lược điều khiển.

Lời cảm ơn

Chúng tôi gửi lời cảm ơn chân thành đến Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh với các chính sách khuyến khích nghiên cứu khoa học và tạo điều kiện thuận lợi để tác giả tiến hành nghiên cứu này. Nhờ những chính sách này, chúng tôi đã có cơ hội tiếp cận và sử dụng tài nguyên cần thiết để thực hiện đề tài mô phỏng này. Đồng thời, tôi muốn bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Khoa Cơ khí Động lực đã tạo môi trường thuận lợi, cung cấp các điều kiện và nguồn lực hỗ trợ để tác giả có thể thực hiện hoạt động nghiên cứu một cách hiệu quả. Sự đồng cảm và ủng hộ của quý vị là nguồn động viên lớn lao, giúp chúng tôi vượt qua những khó khăn và đạt được thành công trong dự án này.

Xung đột lợi ích

Tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Y. Hwang and J. S. Chen, "Optimized fuel economy control of power-split hybrid electric vehicle with particle swarm optimization," *Energies*, vol. 13, no. 9, art. no. 2278, May 2020.
- [2] K. Hamza, K. P. Laberteaux, and K. C. Chu, "On inferred real-world fuel consumption of past decade plug-in hybrid electric vehicles in the US," *Environmental Research Letters*, vol. 17, no. 10, p. 104053, Oct. 2022.
- [3] "Honda CR-V e:PHEV 2024 owner's manual," [Online]. Available: <https://www.manual.nz/honda/cr-v-ephev-2024/manual>. [Accessed: Aug. 20, 2022].
- [4] Honda Motor Co., Ltd., *2024 CR-V PHEV WDHAC (KE/KG) – 323B66020 Combined (Compressed)*. Honda UK, 2023. [Online]. Available: <https://www.honda.co.uk/cars/new/cr-v-hybrid-suv/overview.html>.
- [5] Y. Aoki, K. Suzuki, H. Nakano, K. Akamine, T. Shirase, and K. Sakai, "Development of hydraulic servo brake system for cooperative control with regenerative brake," *SAE Technical Paper 2007-01-0868*, Apr. 16, 2007.
- [6] H. Gao, Y. Gao, and M. Ehsani, "A neural network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV," in *Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf.*, Cambridge, MA, USA, Jun. 17–20, 2001, pp. 571–575.
- [7] B. H. Kim, O. J. Kwon, J. S. Song, S. H. Cheon, and B. S. Oh, "The characteristics of regenerative energy for PEMFC hybrid system with additional generator," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 10208–10215, 2014.
- [8] J. M. Donev, "Miles per gallon gasoline equivalent," *Energy Education*, revision as of Apr. 14, 2018. [Online]. Available: https://energyeducation.ca/wiki/index.php?title=Miles_per_gallon_gasoline_equivalent. [Accessed: Aug. 20, 2022].
- [9] C. M. Jefferson and M. Ackerman, "A flywheel variator energy storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 37, pp. 1481–1491, 1996.
- [10] T. R. Hsu, "On a flywheel-based regenerative braking system for regenerative energy recovery," in *Proc. Green Energy and Systems Conf.*, Long Beach, CA, USA, Nov. 2013.
- [11] M. Grandone, M. Naddeo, D. Marra, and G. Rizzo, "Development of a regenerative braking control strategy for hybridized solar vehicle," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 11, pp. 497–504, 2016.
- [12] P. Clarke, T. Muneer, and K. Cullinane, "Cutting vehicle emissions with regenerative braking," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 15, no. 3, pp. 160–167, May 2010.

Quang Thanh Ngo is a lecturer of HCMC University of Technology And Education, Vietnam. has received his B.E and M.E degree in Automotive Engineering from HCMC University of Technology and Education (HCMUTE) in 2005 and 2023. His research interest includes powertrain system, automotive control system and regenerative braking system:

Email: thanhnq@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2701-8909>

Tuan Tung Duong has received his B.E, M.E, and Ph.D degree in Automotive Engineering from HCMC University of Technology and Education (HCMUTE) in 2005, 2010 and 2020. He currently works at Faculty of International Education, HCMUTE. His research interest includes powertrain system, automotive control system and regenerative braking system.

Email: tungdt@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4479-3359>