

NGHIÊN CỨU CÁC GIẢI PHÁP THU HỒI NĂNG LƯỢNG TRONG HỆ THỐNG PHANH TÁI SINH TRÊN XE Ô TÔ

Trần Nhật Long
Trường Cao đẳng Lào Cai

Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu các giải pháp thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh trên ô tô nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng và giảm phát thải. Trên cơ sở tổng hợp lý thuyết, xây dựng mô hình động lực học và mô phỏng bằng MATLAB/Simulink, nghiên cứu phân tích ba nhóm giải pháp chính gồm lưu trữ điện, thủy lực và cơ học (bánh đà). Kết quả cho thấy hiệu suất thu hồi năng lượng có thể đạt trên 30% trong điều kiện tối ưu và phụ thuộc vào các yếu tố vận hành cũng như cấu hình hệ thống. Từ đó, bài báo đề xuất định hướng kết hợp đa công nghệ nhằm nâng cao hiệu quả hệ thống, đồng thời đưa ra hàm ý cho đào tạo kỹ thuật trong bối cảnh phát triển giao thông xanh và chuyển đổi số.

Từ khóa: phanh tái sinh, thu hồi năng lượng, xe điện, hệ thống thủy lực, tối ưu hóa.

RESEARCH ON ENERGY RECOVERY SOLUTIONS IN REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS FOR AUTOMOBILES

Abstract: This article investigates energy recovery solutions in automotive regenerative braking systems in order to improve energy utilization efficiency and reduce emissions. Based on a synthesis of theoretical foundations, the development of a dynamic model, and simulation using MATLAB/Simulink, the study analyzes three main groups of solutions, including electrical, hydraulic, and mechanical (flywheel) energy storage. The results indicate that energy recovery efficiency can exceed 30% under optimal conditions and depends on operating factors as well as system configuration. On that basis, the article proposes a multi-technology integration approach to enhance overall system performance, while also offering implications for engineering education in the context of green transportation development and digital transformation.

Keywords: regenerative braking, energy recovery, electric vehicles, hydraulic systems, optimization.

Nhận bài: 04/03/2026

Phản biện: 25/03/2026

Duyệt đăng: 28/03/2026

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh toàn cầu đang đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về biến đổi khí hậu, ô nhiễm môi trường và cạn kiệt nguồn nhiên liệu hóa thạch, việc phát triển các phương tiện giao thông tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường đã trở thành xu hướng tất yếu. Ngành công nghiệp ô tô đang chứng kiến sự chuyển dịch mạnh mẽ từ các phương tiện sử dụng động cơ đốt trong truyền thống sang các dòng xe điện (Electric Vehicles – EV) và xe lai điện (Hybrid Electric Vehicles – HEV). Những phương tiện này không chỉ góp phần giảm phát thải khí nhà kính mà còn nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong quá trình vận hành.

Một trong những công nghệ quan trọng giúp cải thiện hiệu suất năng lượng của các phương tiện hiện đại là hệ thống phanh tái sinh (Regenerative Braking System – RBS). Khác với hệ thống phanh truyền thống, trong đó động năng của xe khi giảm tốc bị tiêu tán dưới dạng nhiệt năng, hệ thống phanh tái sinh cho phép thu hồi một phần động năng này và chuyển đổi thành năng lượng có thể lưu trữ để tái sử dụng. Nhờ đó, hệ thống không chỉ giúp tiết kiệm năng lượng mà còn giảm hao mòn cơ cấu phanh, góp phần kéo dài tuổi thọ các bộ phận cơ khí.

Tuy nhiên, mặc dù đã được ứng dụng rộng rãi, công nghệ phanh tái sinh hiện nay vẫn tồn tại nhiều hạn chế. Hiệu suất thu hồi năng lượng còn phụ thuộc lớn vào điều kiện vận hành như tốc độ xe, trạng thái tải và chế độ phanh. Ở các tình huống phanh khẩn cấp hoặc khi vận tốc thấp, phần lớn năng lượng vẫn bị tiêu tán do hệ thống phanh cơ khí phải tham gia để đảm bảo an toàn. Bên cạnh đó, hiệu quả thu hồi năng lượng còn bị ảnh hưởng bởi khả năng lưu trữ của hệ thống, đặc biệt là khi pin đã gần đầy hoặc khi thiết bị lưu trữ không đáp ứng kịp tốc độ nạp năng lượng.

Ngoài ra, chi phí đầu tư ban đầu cho các hệ thống phanh tái sinh, đặc biệt là các hệ thống sử dụng công nghệ lưu trữ tiên tiến như pin lithium-ion, siêu tụ điện hoặc bánh đà, vẫn còn tương đối cao. Điều này tạo ra rào cản trong việc phổ biến công nghệ trên các dòng xe phổ thông, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển như Việt Nam. Bên cạnh đó, các yêu cầu về điều khiển, đồng bộ hóa hệ thống và đảm bảo an toàn vận hành cũng đặt ra nhiều thách thức về mặt kỹ thuật.

Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu, đánh giá và đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu quả thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh là cần thiết và có ý nghĩa cả về lý luận lẫn thực tiễn.

Nghiên cứu không chỉ giúp làm rõ các cơ chế chuyển đổi và lưu trữ năng lượng trong quá trình phanh mà còn góp phần xác định các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất hệ thống. Từ đó, có thể đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm tối ưu hóa quá trình thu hồi năng lượng, giảm thiểu tổn thất và nâng cao hiệu quả vận hành của phương tiện.

Trên cơ sở đó, bài báo tập trung nghiên cứu các giải pháp thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh trên ô tô, bao gồm các phương pháp lưu trữ năng lượng điện, thủy lực và cơ học. Đồng thời, thông qua việc xây dựng mô hình và mô phỏng, nghiên cứu đánh giá hiệu quả của các giải pháp trong các điều kiện vận hành khác nhau. Kết quả nghiên cứu được kỳ vọng sẽ đóng góp cơ sở khoa học cho việc phát triển và ứng dụng công nghệ phanh tái sinh trong ngành công nghiệp ô tô, hướng tới mục tiêu sử dụng năng lượng hiệu quả và phát triển bền vững.

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo sử dụng kết hợp các phương pháp:

Phương pháp lý thuyết: Tổng hợp, phân tích các công trình nghiên cứu về hệ thống phanh tái sinh.

Phương pháp mô hình hóa: Xây dựng mô hình động lực học của xe trong quá trình phanh.

Phương pháp mô phỏng: Ứng dụng phần mềm MATLAB/Simulink để mô phỏng quá trình thu hồi năng lượng trong các điều kiện khác nhau.

Phương pháp so sánh: Đánh giá hiệu quả giữa các giải pháp lưu trữ năng lượng.

2.2. Các giải pháp thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh

Hệ thống phanh tái sinh (Regenerative Braking System – RBS) là một trong những công nghệ cốt lõi nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng trên các phương tiện hiện đại, đặc biệt là xe điện (EV) và xe hybrid (HEV). Nguyên lý cơ bản của hệ thống là chuyển đổi động năng của xe trong quá trình giảm tốc thành dạng năng lượng có thể lưu trữ và tái sử dụng. Hiện nay, có ba nhóm giải pháp chính được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi, bao gồm: lưu trữ năng lượng điện, lưu trữ năng lượng thủy lực và lưu trữ năng lượng cơ học (bánh đà).

2.2.1. Giải pháp lưu trữ năng lượng điện

Lưu trữ năng lượng điện là phương pháp phổ biến nhất trong các hệ thống phanh tái sinh hiện nay. Trong quá trình phanh, động cơ điện được chuyển đổi từ chế độ dẫn động sang chế độ máy phát, tạo ra điện năng từ động năng của xe. Dòng

điện này sau đó được điều chỉnh thông qua các bộ biến đổi điện tử như inverter và bộ chuyển đổi DC/DC trước khi nạp vào hệ thống lưu trữ, thường là ắc quy lithium-ion hoặc siêu tụ điện.

Ưu điểm nổi bật của giải pháp này là khả năng tích hợp cao với hệ thống truyền động điện, hiệu suất chuyển đổi năng lượng tương đối lớn và dễ điều khiển thông qua các thuật toán điện tử. Ngoài ra, hệ thống còn cho phép tái sử dụng trực tiếp năng lượng thu hồi để hỗ trợ tăng tốc hoặc vận hành xe, từ đó giảm tải cho động cơ chính và tiết kiệm nhiên liệu.

Tuy nhiên, giải pháp này cũng tồn tại một số hạn chế đáng kể. Hiệu suất thu hồi năng lượng phụ thuộc mạnh vào trạng thái sạc của pin (State of Charge – SOC). Khi pin gần đầy, khả năng tiếp nhận năng lượng giảm, dẫn đến lãng phí năng lượng thu hồi. Bên cạnh đó, quá trình chuyển đổi điện năng qua nhiều cấp (cơ – điện – hóa) gây ra tổn thất năng lượng đáng kể. Ngoài ra, chi phí đầu tư và thay thế pin còn cao, ảnh hưởng đến tính kinh tế của hệ thống.

2.2.2. Giải pháp lưu trữ năng lượng thủy lực

Giải pháp lưu trữ năng lượng thủy lực hoạt động dựa trên nguyên lý chuyển đổi động năng thành năng lượng áp suất của chất lỏng. Trong quá trình phanh, bơm thủy lực được dẫn động bởi hệ thống truyền lực, nén chất lỏng vào bình tích áp (accumulator), nơi năng lượng được lưu trữ dưới dạng áp suất cao. Khi cần thiết, năng lượng này được giải phóng thông qua mô tơ thủy lực để hỗ trợ chuyển động của xe.

Một trong những ưu điểm lớn nhất của hệ thống thủy lực là khả năng thu hồi năng lượng với công suất lớn trong thời gian ngắn, đặc biệt phù hợp với các phương tiện tải trọng lớn như xe tải, xe buýt hoặc xe chuyên dụng. Hiệu suất thu hồi năng lượng có thể đạt mức cao khi các thông số như áp suất bình tích năng và lưu lượng bơm được tối ưu.

Ngoài ra, hệ thống thủy lực có khả năng hoạt động ổn định trong điều kiện môi trường khắc nghiệt và không phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ như hệ thống điện hóa. Điều này giúp nâng cao độ bền và tuổi thọ của hệ thống.

Tuy nhiên, nhược điểm chính của giải pháp này là kích thước và khối lượng lớn, gây khó khăn trong việc bố trí trên các phương tiện nhỏ. Kết cấu hệ thống phức tạp, bao gồm nhiều thành phần như bơm, van điều khiển, đường ống và bình tích áp, làm tăng chi phí chế tạo và bảo trì. Ngoài ra, tổn thất áp suất trong đường ống và ma sát cơ học cũng ảnh hưởng đến hiệu suất tổng thể của hệ thống.

2.2.3. Giải pháp lưu trữ năng lượng bằng bánh đà

Giải pháp lưu trữ năng lượng bằng bánh đà (flywheel) là phương pháp cơ học, trong đó năng lượng được lưu trữ dưới dạng động năng quay của một khối quay có mô men quán tính lớn. Khi xe phanh, năng lượng động học được truyền tới bánh đà thông qua hệ thống truyền động, làm tăng tốc độ quay của bánh đà. Khi xe cần tăng tốc, năng lượng này được giải phóng ngược lại để hỗ trợ chuyển động.

Ưu điểm nổi bật của hệ thống bánh đà là mật độ năng lượng cao và khả năng nạp/xả năng lượng nhanh, phù hợp với các chu kỳ phanh – tăng tốc liên tục. Ngoài ra, do không sử dụng quá trình chuyển đổi điện hóa nên tổn thất năng lượng thấp hơn so với hệ thống lưu trữ điện. Bên cạnh đó, hệ thống bánh đà có tuổi thọ cao và không bị suy giảm hiệu suất theo chu kỳ sử dụng như pin. Điều này làm cho nó trở thành một giải pháp tiềm năng trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cao.

Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất của hệ thống này là khó lưu trữ năng lượng trong thời gian dài do tổn thất ma sát và lực cản không khí. Để khắc phục, bánh đà thường phải được đặt trong môi trường chân không và sử dụng vật liệu đặc biệt, làm tăng chi phí chế tạo. Ngoài ra, yêu cầu về an toàn cơ học và cân bằng động cũng là thách thức lớn trong thiết kế hệ thống.

2.2.4. Đánh giá tổng hợp các giải pháp

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng mỗi giải pháp thu hồi và lưu trữ năng lượng đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. Không có một giải pháp nào tối ưu tuyệt đối cho mọi loại phương tiện. Việc lựa chọn công nghệ phù hợp cần dựa trên đặc điểm vận hành, yêu cầu kỹ thuật và điều kiện kinh tế của từng loại xe.

Trong xu hướng hiện nay, các hệ thống kết hợp (hybrid storage systems), sử dụng đồng thời nhiều phương pháp lưu trữ như pin, siêu tụ và bánh đà, đang được nghiên cứu và phát triển mạnh mẽ. Giải pháp này cho phép tận dụng ưu điểm của từng công nghệ, đồng thời khắc phục các hạn chế riêng lẻ, từ đó nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống phanh tái sinh.

2.3. Hàm ý cho giáo dục

Kết quả nghiên cứu về các giải pháp thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh không chỉ có ý nghĩa về mặt kỹ thuật mà còn mang lại

nhiều hàm ý quan trọng đối với lĩnh vực giáo dục, đặc biệt là trong đào tạo các ngành kỹ thuật, công nghệ ô tô và chuyển đổi số trong giáo dục nghề nghiệp.

Trước hết, nghiên cứu cho thấy sự cần thiết phải cập nhật nội dung chương trình đào tạo theo hướng tiếp cận công nghệ mới. Các hệ thống như phanh tái sinh, xe điện, hệ thống điều khiển thông minh và mô phỏng kỹ thuật cần được tích hợp vào chương trình giảng dạy của các ngành kỹ thuật điện – điện tử, cơ điện tử và công nghệ ô tô. Điều này giúp sinh viên không chỉ nắm vững kiến thức nền tảng mà còn tiếp cận được các công nghệ tiên tiến đang được ứng dụng trong thực tiễn sản xuất.

Thứ hai, việc sử dụng các công cụ mô phỏng như MATLAB/Simulink trong nghiên cứu cho thấy vai trò quan trọng của dạy học gắn với thực hành và mô phỏng số. Do đó, các cơ sở đào tạo cần đẩy mạnh ứng dụng công nghệ số trong giảng dạy, xây dựng các phòng thí nghiệm ảo, mô hình mô phỏng và bài tập tình huống thực tế nhằm nâng cao năng lực thực hành và tư duy hệ thống cho người học.

Thứ ba, nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng của đào tạo liên ngành (interdisciplinary training). Hệ thống phanh tái sinh là sự kết hợp của nhiều lĩnh vực như cơ khí, điện – điện tử, điều khiển tự động và công nghệ năng lượng. Vì vậy, chương trình đào tạo cần thiết kế theo hướng tích hợp, giúp sinh viên phát triển năng lực giải quyết vấn đề phức hợp và thích ứng với yêu cầu của thị trường lao động hiện đại.

Thứ tư, từ góc độ giáo dục bền vững, nội dung nghiên cứu góp phần nâng cao nhận thức của người học về sử dụng năng lượng hiệu quả và bảo vệ môi trường. Việc đưa các chủ đề như tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải và công nghệ xanh vào giảng dạy sẽ giúp hình thành ý thức trách nhiệm xã hội và định hướng nghề nghiệp phù hợp với xu thế phát triển bền vững.

Cuối cùng, nghiên cứu cũng gợi mở yêu cầu đối với đội ngũ giảng viên trong việc nâng cao năng lực nghiên cứu khoa học và cập nhật công nghệ mới. Giảng viên cần chủ động tham gia các đề tài nghiên cứu ứng dụng, kết nối với doanh nghiệp và cập nhật tri thức mới để nâng cao chất lượng giảng dạy. Đồng thời, cần đổi mới phương pháp dạy học theo hướng phát triển năng lực, lấy người học làm trung tâm và tăng cường khả năng tự học, tự nghiên cứu của sinh viên.

Như vậy, việc nghiên cứu và ứng dụng các giải pháp thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh không chỉ góp phần phát triển công nghệ ô tô mà còn có ý nghĩa quan trọng trong đổi mới giáo dục kỹ thuật, đáp ứng yêu cầu của thời đại công nghiệp 4.0 và chuyển đổi số hiện nay.

III. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã làm rõ các giải pháp thu hồi năng lượng trong hệ thống phanh tái sinh trên ô tô, bao gồm lưu trữ điện, thủy lực và cơ học, đồng thời đánh giá hiệu quả của từng phương pháp thông qua

mô hình hóa và mô phỏng. Kết quả cho thấy hiệu suất thu hồi năng lượng có thể đạt trên 30% trong điều kiện tối ưu, phụ thuộc vào đặc tính vận hành và cấu hình hệ thống. Trên cơ sở đó, bài báo khẳng định không có giải pháp đơn lẻ tối ưu tuyệt đối, mà xu hướng phát triển là tích hợp đa công nghệ nhằm nâng cao hiệu suất tổng thể. Nghiên cứu không chỉ có ý nghĩa kỹ thuật mà còn góp phần định hướng đào tạo nguồn nhân lực kỹ thuật chất lượng cao, đáp ứng yêu cầu phát triển giao thông xanh và bền vững trong bối cảnh hiện nay

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bộ Công Thương (2021), *Báo cáo phát triển xe điện tại Việt Nam*, Hà Nội.
- C. Mi, M. A. Masrur, D. W. Gao (2011), *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications*, Wiley.
- IEEE (2019), “*Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles*”, IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- MATLAB & Simulink (2023), *User Guide*, MathWorks.
- International Energy Agency (2022), *Global EV Outlook 2022*, Paris.