

PHÂN TÍCH GIẢI PHÁP TỐI ƯU HÓA CÔNG SUẤT CỦA BỘ THU HỒI NĂNG LƯỢNG PIEZOELECTRIC XẾP LỚP TÍCH HỢP TRÊN HỆ THỐNG TREO Ô TÔ

ANALYSIS OF OPTIMIZATION SOLUTIONS FOR THE POWER OUTPUT OF A LAYERED PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER INTEGRATED INTO AUTOMOBILE SUSPENSION SYSTEMS

Trần Văn Mạnh

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

Email: tvmanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu về phương pháp tối ưu hóa công suất thu được từ các bộ thu hồi năng lượng piezoelectric xếp lớp (Stacked Piezoelectric Energy Harvesters - SPEH) được tích hợp trong hệ thống treo của ô tô. Mục tiêu nhằm khai thác chuyển động dao động trong hệ thống treo để tạo ra năng lượng điện một cách hiệu quả. Mô hình điện cơ liên kết được phát triển để mô phỏng tương tác giữa thiết bị thu năng lượng và hệ thống treo. Các chiến lược tối ưu như điều chỉnh trở kháng tải, lực nén sơ bộ và cấu trúc hình học của thiết bị được phân tích nhằm tối đa hóa công suất đầu ra. Kết quả cho thấy các thiết bị SPEH có khả năng đóng góp một phần năng lượng đáng kể cho các hệ thống điện tử trên xe, đặc biệt trong các xe điện và xe lai.

Từ khóa: Thu hồi năng lượng; Xe điện; Mô hình điện cơ.

ABSTRACT

This paper presents a study on optimizing the power generation from stacked piezoelectric energy harvesters (SPEHs) integrated into automotive suspension systems. The objective is to efficiently harness vibrational motion within the suspension to generate electrical energy. A coupled electromechanical model is developed to simulate the interaction between the energy harvester and the suspension system. Optimization strategies such as load impedance matching, pre-compression force, and harvester geometry are analyzed to maximize power output. Results demonstrate the potential of SPEHs to contribute a significant portion of energy to onboard electronic systems, particularly in electric and hybrid vehicles.

Keywords: Energy harvesting; Electric vehicles; Electromechanical model.



1. GIỚI THIỆU

Trong những thập kỷ gần đây, việc thu năng lượng từ các nguồn sẵn có trong môi trường xung quanh như rung động, nhiệt, ánh sáng, bức xạ, gió và nước, và chuyển đổi chúng thành năng lượng điện để thay thế việc sử dụng nguồn điện từ lưới hoặc pin cho các thiết bị điện tử công suất thấp như cảm biến hay thiết bị đo lường trong xe cộ, thiết bị công trình hay các bộ phận sinh học nhân tạo đã và đang được quan tâm nghiên cứu rộng rãi. Một trong những nguồn năng lượng hao phí tiềm năng đó là rung động từ môi trường xung quanh. Xu hướng điện hóa và phát triển các giải pháp tiết kiệm năng lượng trong ngành công nghiệp ô tô đang thúc đẩy nhu cầu nghiên cứu các hệ thống thu hồi năng lượng [1]. Một trong những nguồn năng lượng tiềm năng là dao động sinh ra từ chuyển động của hệ thống treo xe trong quá trình vận hành. Vật liệu piezoelectric, với khả năng chuyển đổi năng lượng cơ học thành điện năng, là lựa chọn hấp dẫn do tính bền vững, mật độ năng lượng cao và không cần bảo trì.

Các thiết bị piezoelectric truyền thống dạng đơn lớp thường bị giới hạn về biên độ ứng suất và điện áp đầu ra [1, 2]. Do đó, cấu trúc xếp lớp (stacked configuration) được đề xuất để cải thiện mật độ công suất, đồng thời vẫn đảm bảo tính bền cơ học khi tích hợp vào hệ thống treo [3, 4]. Tuy nhiên, do tính chất phi tuyến và ảnh hưởng từ điều kiện vận hành thực tế, việc

tối ưu hóa SPEH là cần thiết để đạt hiệu suất cao nhất.

Năng lượng tiêu tán ở hệ thống treo trước thường cao hơn khoảng 35% so với hệ thống treo sau do độ cứng lò xo và hệ số giảm chấn của hệ thống treo trước lớn hơn [5]. Việc tăng khối lượng xe, tăng hệ số giảm chấn hay giảm độ cứng lò xo đều dẫn đến tăng năng lượng tiêu tán [6]. Mấp mô mặt đường cũng ảnh hưởng đáng kể đến năng lượng tiêu tán từ hệ thống treo [5, 6]. Theo Abdelkareem và cộng sự [7], ở tốc độ xe 20-50 km/h trên đường bằng phẳng, giảm chấn thông thường tiêu tán công suất từ 10-90W. Khi có mấp mô, công suất tiêu tán tăng lên 40-140W ở cùng tốc độ [7].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

2.1. Các nghiên cứu về trang thiết bị thu hồi năng lượng từ hệ thống treo

Hiện nay chưa có mẫu xe thương mại lắp đặt hệ thống thu hồi năng lượng từ hệ thống treo, tuy nhiên các nghiên cứu đã được tiến hành và thử nghiệm, mang lại tiềm năng lớn cho ứng dụng này trên các xe ô tô.

Dưới đây là bảng 1 giới thiệu các hệ thống giảm xóc điện từ thu hồi năng lượng từ các nghiên cứu [6, 8, 9, 10].

Bảng 1. Dự án nghiên cứu phát triển thu hồi năng lượng từ hệ thống treo

Tên dự án / Nghiên cứu	Tổ chức phát triển	Công nghệ chính	Công suất thu hồi (ước tính)	Ứng dụng thử nghiệm	Tình trạng thương mại hóa
GenShock	Levant Power + ZF Friedrichshafen	Điện từ + thủy lực, dùng máy phát + van điều khiển	3-6 kW (xe tải/ xe quân sự)	Xe quân sự Humvee, xe tải	Chưa thương mại hóa, dùng phát triển

Bose Suspension System	Tập đoàn Bose	Điện từ điều khiển chủ động, không ưu tiên thu năng lượng	Không công bố cụ thể	Xe thử nghiệm (Lexus, Audi)	Không thương mại hóa do chi phí cao
Đại học Tufts	Đại học Tufts (MIT liên quan)	Nam châm vĩnh cửu + cuộn dây, chuyển dao động thành điện năng	20-70% năng lượng dao động bị mất	Xe tải, xe quân sự (giai đoạn lab)	Đã cấp phép cho startup, chưa thương mại
Đại học Swinburne	Đại học Swinburne (Úc)	Động cơ điện DC làm phần tử giảm chấn, có điều chỉnh điện trở tải	Không công bố cụ thể	Mô hình thử nghiệm trong phòng lab	Chưa thương mại hóa
MIT (Hydraulic-electromagnetic)	Viện MIT	Piston thủy lực → tuabin quay máy phát điện	Tiết kiệm 1-2% nhiên liệu xe tải	Xe tải, xe quân sự	Mức nguyên mẫu, chưa thương mại hóa

2.2. Các lĩnh vực ứng dụng

Từ các đặc điểm phân tích ở trên, tiềm năng của giải pháp thu hồi năng lượng từ hệ thống treo được giới thiệu trên bảng 2.

Bảng 2. Tiềm năng các giải pháp thu hồi năng lượng từ hệ thống treo

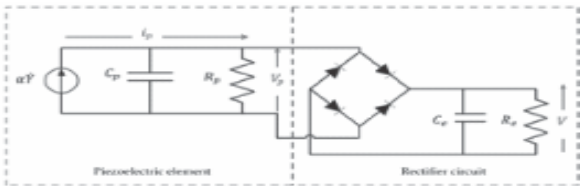
Phân khúc xe	Giải pháp tiềm năng	Lý do
Xe tải, xe quân sự	GenShock, MIT hydraulic-electromagnetic	Rung động lớn, đủ không gian lắp đặt, nhu cầu điện năng cao
Xe con cao cấp	Bose (nếu cần sự thoải mái, không ưu tiên thu năng lượng)	Chất lượng lái ưu tiên hơn hiệu suất năng lượng
Xe điện dân dụng	Tufts / Swinburne (đơn giản, nhẹ, dễ sản xuất)	Phù hợp mô hình thu hồi năng lượng nhẹ, hỗ trợ pin xe

3. MÔ HÌNH HỆ THỐNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Mô hình hệ thống

Một mô hình hệ thống treo kiểu một phần tư xe (quarter-car model) được sử dụng, trong đó bộ SPEH được gắn song song với giảm xóc [11, 12]. Thiết bị thu năng lượng được mô phỏng dựa trên phương trình liên kết giữa biến dạng cơ học và điện áp đầu ra của vật

liệu piezoelectric. Tác động từ mặt đường được mô phỏng bằng tín hiệu dao động đầu vào tại vị trí tiếp xúc bánh xe.



Hình 1. Sơ đồ mạch điện thu hồi năng lượng điện [13]

Các tham số chính thường được đưa vào phân tích gồm [5, 6, 13]:

- + Cấu hình xếp lớp: Số lớp, loại vật liệu.
- + Lực nén sơ bộ: Ảnh hưởng đến độ nhạy dao động.
- + Trở kháng tải: Nhằm đảm bảo ghép trở tối ưu với mạch điện.
- + Hình học khối piezo: Diện tích mặt cắt, chiều cao.

Giải thuật được áp dụng để tìm tập hợp thông số tối ưu, nhằm cực đại hóa công suất đầu ra đồng thời đảm bảo độ bền cơ học và giảm thiểu khối lượng bổ sung.

3.2. Kết quả và thảo luận

Các nghiên cứu thử nghiệm mô phỏng [14] và thực nghiệm trên nguyên mẫu thu nhỏ [15, 16] của các tác giả cho thấy:

- + Tối ưu trở kháng tải giúp tăng hiệu suất chuyển đổi năng lượng lên đến 25%.
- + Điều chỉnh lực nén sơ bộ có ảnh hưởng mạnh đến phổ tần số đáp ứng của SPEH, cho phép tối ưu hóa phù hợp với điều kiện mặt đường cụ thể.
- + Số lớp piezo tăng giúp tăng điện áp đầu ra tuyến tính, tuy nhiên hiện tượng bão hòa xuất hiện khi số lớp quá lớn do giới hạn cơ học.

Dưới điều kiện lái xe đô thị tiêu chuẩn, mỗi thiết bị SPEH có thể tạo ra công suất 120-150 mW, có thể nâng cấp theo số lượng thiết bị lắp trên mỗi bánh xe. Thiết bị hoạt động hiệu quả nhất khi xe đi qua các mặt đường định kỳ như gờ giảm tốc, đường đá dăm, nơi dao động có biên độ lớn và tần số rõ ràng [15].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu tổng quan về thu hồi năng lượng dao động trên ô tô cho thấy tiềm năng của các bộ thu hồi năng lượng piezoelectric xếp lớp trong việc tái sử dụng năng lượng dao động từ hệ thống treo ô tô. Thông qua các chiến lược tối ưu về hình học, lực nén và trở kháng tải, công suất đầu ra có thể được nâng cao đáng kể. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ tập trung vào việc xây dựng mô hình mô phỏng điều khiển thích nghi các tham số của thiết bị trong thời gian thực và tích hợp vào hệ thống quản lý năng lượng tổng thể của phương tiện để có thể đánh giá sâu hơn về giải pháp thu hồi năng lượng dao động này.

Ngày nhận bài: **28/4/2025**

Ngày phản biện: **08/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Abdelkareem MAA, Xu L, Ali MKA, Elagouz A, Mi J, Guo S, et al., “*Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review*”. Appl. Energy 2018;229:672-99. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030>.
- [2]. Howells CA, “*Piezoelectric energy harvesting*”. Energy Convers Manag 2009;50:1847-50. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2009.02.020>.
- [3]. Clementino MA, Reginatto R, Da Silva S, “*Modeling of piezoelectric energy harvesting considering the dependence of the rectifier circuit*”. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2014;36:283-92. <https://doi.org/10.1007/S40430-013-0070-6>.
- [4]. Al Ahmad M, Alshareef HN, “*Modeling the power output of piezoelectric energy harvesters*”. J Electron Mater 2011;40:1477-84. <https://doi.org/10.1007/S11664-011-1631-Z>.
- [5]. Wei C, Taghavifar H, “*A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension*

- system: *Half-vehicle model*". Energy 2017;134:279-88. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.06.034>.
- [6]. Jacota V-G, "Evaluation the Dissipated Energy by the Automobile Dampers". Global Journals of Research in Engineering 2016;16:5-11.
- [7]. Abdelkareem MAA, Xu L, Ahmed Ali MK, Hassan MA, Elagouz A, Zou J, "On-Field Measurements of the Dissipated Vibrational Power of an SUV Car Traditional Viscous Shock Absorber". Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference 2018;3. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85148>.
- [8]. "Design and Analysis of Shock Absorber: A Review". ScienceDirect n.d. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478531733033X> (accessed May 22, 2025).
- [9]. Singh WS, Srilatha N, "Design and Analysis of Shock Absorber: A Review". Mater Today Proc 2018;5:4832-7. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.058>.
- [10]. Anton SR, Sodano HA, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)". Smart Mater Struct 2007;16. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/3/R01>.
- [11]. Wang W, Yang T, Chen X, Yao X, "Vibration energy harvesting using a piezoelectric circular diaphragm array". IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 2012;59:2022-6. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2422>.
- [12]. Dynamic AA, Ali AK, Abdulwahhab Abdulrazzaq A, Mohsin AH, "A Dynamic Simulation of a Piezoelectric Energy-Harvesting System Integrated with a Closed-Loop Voltage Source Converter for Sustainable Power Generation". Processes 2024, Vol 12, Page 2198 2024;12:2198. <https://doi.org/10.3390/PR12102198>.
- [13]. Darabseh T, Al-Yafeai D, Mourad A-HI, "Energy harvesting from car suspension system: Mathematical approach for half car model". Journal of Mechanical Engineering and Sciences 2021;15:7695-714. <https://doi.org/10.15282/JMES.15.1.2021.07.0607>.
- [14]. Xu Y, Xian T, Chen C, Wang G, Wang M, Shi W, "Mathematical modeling and parameter optimization of a stacked piezoelectric energy harvester based on water pressure pulsation". Energy 2024;292:130530. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.130530>.
- [15]. Zhang B, Zhou H, Zhao X, Gao J, Zhou S, "Design and experimental analysis of a piezoelectric energy harvester based on stacked piezoceramic for nonharmonic excitations". Energy 2023;282:128948. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128948>.
- [16]. Zhang B, Liu H, Li D, Liang J, Gao J, "Analytical Modeling and Validation of a Preloaded Piezoceramic Current Output". Micromachines 2021, Vol 12, Page 353 2021;12:353. <https://doi.org/10.3390/M12040353>.