

THIẾT KẾ MẠCH QUẢN LÝ NGUỒN NĂNG LƯỢNG TỰ CẢM KIM PHUN TRÊN Ô TÔ

DESIGN OF INDUCTANCE ENERGY MANAGING CIRCUIT OF FUEL INJECTORS IN AUTOMOBILE

Phan Nguyễn Quý Tâm, Đỗ Văn Dũng, Đinh Cao Trí
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 6/10/2020, ngày phản biện đánh giá 20/10/2020, ngày chấp nhận đăng 28/10/2020.

TÓM TẮT

Khi các kim phun trong hệ thống phun nhiên liệu hoạt động sẽ tạo ra các xung tự cảm có biên độ rất cao và xuất hiện trong khoảng thời gian ngắn sau mỗi lần chuyển trạng thái đóng mở. Các xung ngược này là nguyên nhân gây tổn hao nhiệt, lãng phí năng lượng và gây ảnh hưởng đến các thiết bị điện tử. Việc chế tạo một bộ quản lý nguồn năng lượng điện cảm này và phân phối ngược lại các kim phun là giải pháp tiềm năng để hạn chế các tác hại do các xung phản điện động này gây ra. Bài báo trình bày việc thiết kế một hệ thống thu hồi năng lượng điện cảm từ cuộn dây kim phun với mục đích đóng vai trò như một nguồn cung cấp điện áp thứ hai cho kim phun nhằm giảm tiêu hao nhiên liệu. Thực nghiệm được tiến hành trên mô hình phun xăng đánh lửa để đánh giá khả năng thu hồi năng lượng của mạch.

Từ khóa: thu hồi năng lượng; sức điện động tự cảm; năng lượng điện cảm; kim phun; mạch quản lý năng lượng.

ABSTRACT

When the injectors in the fuel injection system are working, there is a back electromotive force (emf) appeared with a high amplitude in a short time after each switch state. These reverse pulses are the main cause of heat loss energy wastage damage to electronic devices. Building the inductance energy source manager and redistributing to injectors is a potential solution to limit the damage caused by these back-emf pulses. Particularly, this paper performs the design of a model that recovers inductance energy from coils with the purpose of acting as a second voltage supply to the injector in order to reduce fuel consumption. Then, experiments were carried out on the ignition and fuel injection model to evaluate the effectiveness of suggestion.

Keywords: energy recovery; back electromotive force; inductance energy; fuel injector; energy managing circuit.

1. GIỚI THIỆU

Để nâng cao tính kinh tế nhiên liệu và giảm ô nhiễm môi trường, các hãng sản xuất ô tô không ngừng tìm kiếm các giải pháp, trong đó có giải pháp thu hồi năng lượng mất mát vô ích trên ô tô. Một số các nghiên cứu về việc thu hồi năng lượng đã được thương mại hóa trên như công nghệ thu hồi năng lượng phanh i-ELoop (Intelligent Energy Loop) của hãng ô tô Mazda [1]. Công nghệ này giúp giảm 10% sức tiêu hao nhiên liệu của động cơ. Hay công nghệ Start/Stop Engine được áp

dụng lần đầu trên các xe Hybrid của Toyota [2]. Ngoài ra, hãng xe Audi đã và đang thiết kế hệ thống thu hồi năng lượng từ hệ thống treo dựa trên nguyên lý biến dao động của hệ thống treo dưới dạng cơ năng thành năng lượng điện thu được vào bộ tích trữ [3].

Các nguồn năng lượng khác nhau được thu hồi dưới dạng điện năng giúp ô tô đóng vai trò như một nguồn trữ năng lượng riêng để cung cấp cho một số hệ thống trên xe. Tùy thuộc vào thời gian thu hồi và mật độ năng lượng tích trữ được, năng lượng sẽ được

dùng để cung cấp cho các bộ chấp hành tương ứng. Trong bài báo này, hệ thống thu hồi năng lượng từ quá trình đóng mở các kim phun sẽ được cung cấp ngược lại cho chính các kim phun.

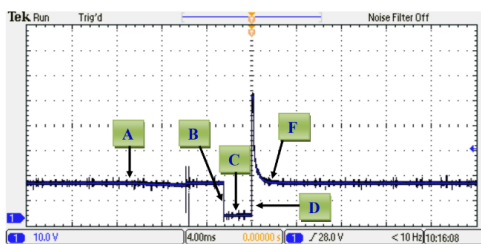
Thời điểm phun nhiên liệu là một trong những thông số vận hành quan trọng nhất ảnh hưởng đến quá trình cháy, quyết định hiệu suất và chất lượng sản phẩm cháy của động cơ xăng. Tuy nhiên, do đặc tính của cuộn cảm trong kim phun nên quá trình phun nhiên liệu bị kéo dài hơn [4]. Ngoài ra, khi dòng điện qua cuộn dây kim phun bị ngắt đột ngột, một sức điện động tự cảm khoảng 300V đến 400V đi ngược lại trong cuộn dây. Sức điện động tự cảm này ảnh hưởng rất lớn đến tuổi thọ các linh kiện điện tử, sinh nhiệt và lãng phí năng lượng một cách vô ích. Do đó, việc thu hồi năng lượng cảm ứng để nạp điện cho tụ điện và sau đó sử dụng điện áp cao này để cải thiện tính năng hoạt động kim phun là cần thiết.

2. PHÂN TÍCH MÔ HÌNH TOÁN CỦA KIM PHUN

2.1. Nguồn năng lượng cảm kháng trên kim phun

Khi dòng điện đi qua cuộn dây của kim phun sẽ tạo một lực từ đủ mạnh để thắng sức căng của lò xo, thắng lực trọng trường của ty kim và thắng áp lực của nhiên liệu đè lên kim, kim sẽ được nhích khỏi bệ khoảng 0.1mm nên nhiên liệu được phun ra khỏi kim. Khi ngắt dòng điện từ trường cũng sẽ biến mất, lúc này lực lò xo sẽ tác động làm cho ty kim đi xuống và kết thúc quá trình phun [5].

Hình 1 bên dưới biểu diễn một chu kỳ xung điện của kim phun.

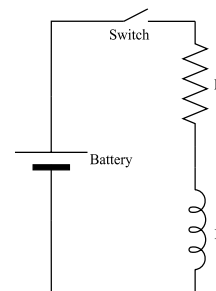


Hình 1. Xung điện áp của kim phun

Trong hình 1, chúng ta có thể thấy một chu kỳ hoạt động của kim phun cơ bản được

chia làm 5 giai đoạn. Ở đoạn A đầu tiên, điện áp được cấp đến kim phun. Tại thời điểm transistor công suất trong bộ điều khiển đánh lửa nối mass làm kín mạch, dòng điện chạy qua kim phun (đoạn B). Ở đoạn C tiếp theo, thời gian transistor công suất dẫn dòng điện qua kim phun và đạt đến giá trị cực đại, van kim rời khỏi bệ và được giữ ở điểm mở lớn nhất. Thời điểm ngưng cấp dòng cho kim phun (đoạn D), xuất hiện một sức điện động tự cảm tạo ra do từ trường bị ngắt đột ngột. Cuối cùng ở giai đoạn E, khi transistor công suất ngưng dẫn, mạch hở, kết thúc một chu kỳ hoạt động của kim phun.

Để có cái nhìn khái quát hơn, kim phun được mô hình hóa thành một mạch RL gồm 2 thành phần chính là cuộn cảm và điện trở, được biểu diễn ở hình 2 phía dưới. Trong đó: R là tổng điện trở của cuộn dây, L là độ tự cảm của cuộn dây.



Hình 2. Mạch RL của kim phun

Khi đặt vào cuộn dây một hiệu điện thế thì phương trình cân bằng điện áp trong quá trình dòng điện tăng được biểu thị bằng (1) [6]:

$$L \frac{di}{dt} + iR = U \quad (1)$$

Khi một điện áp được áp dụng cho điện từ, một phần năng lượng này được lưu trữ dưới dạng từ trường và một phần bị mất do tỏa nhiệt Ri^2 [7].

Tổng năng lượng đầu vào là:

$$\begin{aligned} E &= \int Uidt \\ &= \int (L \frac{di}{dt} + iR)idt \\ &= \frac{1}{2} Li^2 + \int Ri^2 dt \\ &= E_L + E_R \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó, E_L và E_R lần lượt là năng lượng tích lũy và năng lượng tiêu tán do tổn hao nhiệt gây ra.

$$E_L = \frac{1}{2}L \left[\frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right]^2 \quad (3)$$

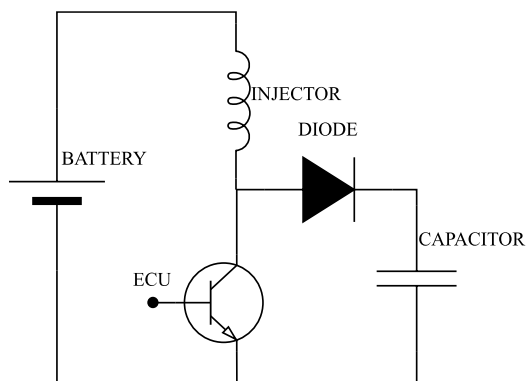
$$\begin{aligned} E_R &= \int Ri^2 dt \\ &= R \int \left(\frac{U}{R} \right)^2 \left[(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right]^2 dt \\ &= \left(\frac{U}{R} \right)^2 \left(t - \frac{2}{R} e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{1}{-2\frac{R}{L}} e^{-2\frac{R}{L}t} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Gọi N là số lần phun của kim phun sao cho năng lượng tích lũy bằng với năng lượng tổng cộng của một lần phun. Có nghĩa là, cứ mỗi N lần chu kỳ phun thì tạo ra được một nguồn năng lượng đủ để cung cấp cho một lần phun tiếp theo.

$$N = \frac{E}{E_L} \quad (5)$$

2.2. Nguyên lý thu hồi năng lượng cảm kháng trên kim phun

Năng lượng tích lũy dưới dạng điện áp cao của kim phun sau mỗi chu kỳ hoạt động sẽ được thu hồi về bởi một tụ điện.



Hình 3. Sơ đồ mạch thu hồi năng lượng điện cảm

Khi ECU chưa xuất tín hiệu điều khiển thì transistor ngắt, hở mạch nên kim phun không hoạt động. Lúc này ắc quy sẽ tích điện cho tụ điện với hiệu điện thế bằng điện áp nguồn.

Khi ECU điều khiển transistor dẫn điện, mạch kim phun trở thành mạch kín làm cho kim phun hoạt động.

Tại thời điểm transistor công suất ngắt, năng lượng từ trường tích lũy trong cuộn dây được chuyển thành năng lượng tích trữ trong tụ điện C.

$$\frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}CU^2 \quad (6)$$

Khi transistor công suất mở, một nguồn năng lượng cảm kháng được sinh ra từ cuộn dây có xu hướng chống lại sự gia tăng của dòng điện trong cuộn [8].

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t U(t) dt \quad (7)$$

Trong đó: U là điện áp của ắc quy, L là điện cảm của cuộn dây.

Mặc khác, sức phản điện động trong quá trình chuyển mạch của khóa công suất về mặt lý thuyết là tương tự như (7).

$$\xi = L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

Có thể thấy được tụ điện được nạp bởi hai nguồn năng lượng khác nhau. Thứ nhất, ở trạng thái hở mạch, tụ điện được nạp bằng nguồn điện xấp xỉ 14.2V từ ắc quy trên xe trong quá trình hoạt động. Thứ hai, tụ được nạp từ điện áp ngược của cuộn cảm trên kim phun (hình 3). Tuy quá trình nạp tụ từ sức phản điện động của cuộn cảm có biên độ lớn, khoảng từ 100V đến 400V, nhưng thời gian rất ngắn chỉ khoảng 10us. Công thức (9) mô tả tương đối lượng điện áp nạp vào tụ từ sức phản điện động cảm kháng.

$$u_{c(c)} = \xi \left(1 - e^{-\frac{t}{(R_L + R_C)C}} \right) \quad (9)$$

Với $u_{c(c)}$ là giá trị điện áp được nạp vào tụ từ xung phản điện động ξ sau mỗi lần chuyển mạch. Ngoài ra, R_L và R_C lần lượt đại diện cho trở kháng nội của cuộn cảm và điện trở nội của tụ điện.

Điện áp tổng cộng nạp vào tụ điện được tính bằng tổng của điện áp từ nguồn ắc quy và n lần sức phản điện động trong mỗi lần chuyển mạch của cuộn cảm:

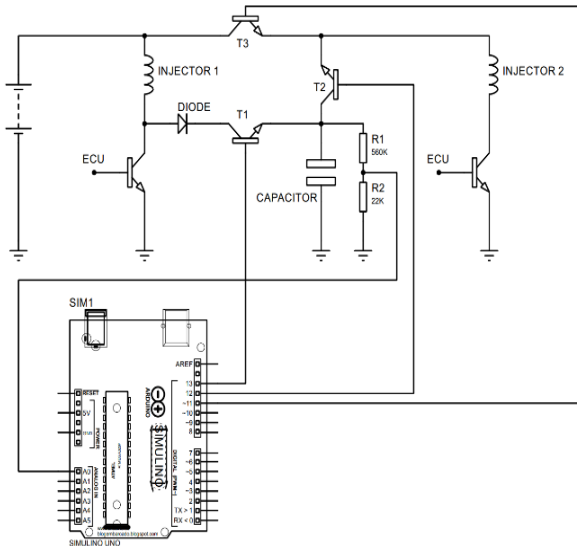
$$\begin{aligned} u_{c(total)} &= u_{c(bat)} + u_{c(\xi)}n \\ &= 14 + \xi \left(1 - e^{-\frac{t}{(R_L + R_C)C}} \right) n \end{aligned} \quad (10)$$

3. THIẾT KẾ MẠCH VÀ THIẾT LẬP THỬ NGHIỆM

3.1. Thiết kế mạch

Một mạch mẫu được thiết kế để thử nghiệm quá trình thu hồi năng lượng cảm kháng tích hợp điều khiển kim phun.

Để đơn giản bài toán, trong phạm vi nghiên cứu chỉ điều khiển đơn lẻ một kim phun. Mục đích chính của việc thiết kế là muốn đánh giá khả năng hoạt động của mạch trong hệ thống và so sánh một số kết quả đo kiểm từ quá trình thực nghiệm với các công thức được đề cập phía trên.

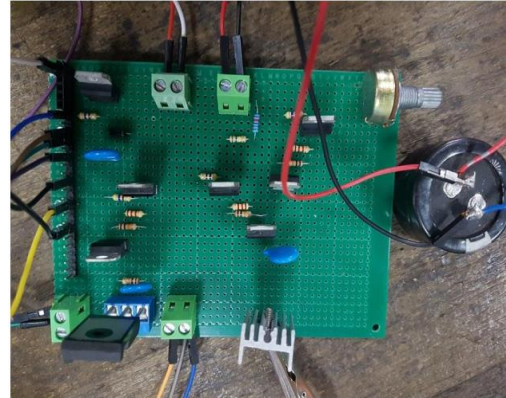


Hình 4. Sơ đồ mạch hệ thống

Như được trình bày ở hình 4 phía trên, mạch sử dụng Arduino làm bộ điều khiển chính. Ở trạng thái ban đầu, Arduino điều khiển khóa T1, T3 dẫn và T2 đóng, lúc này tụ sẽ được nạp điện bởi điện áp của ắc quy và điện áp sau mỗi lần chuyển mạch của kim phun số 1. Mặt khác, một cầu phân áp được đặt vào giữa 2 chân của tụ để điều tra điện áp.

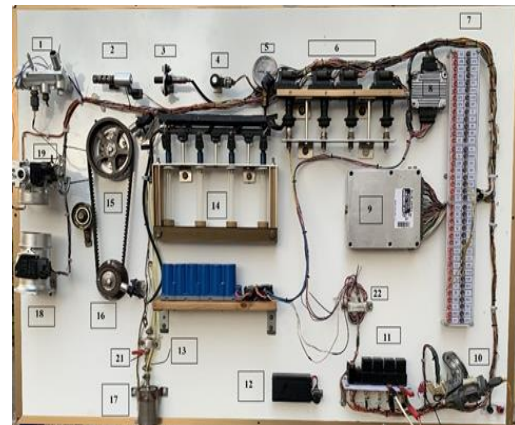
Khi tụ đầy, Arduino sẽ điều khiển khóa T1 và T3 đóng, khóa T2 được mở, điện áp của tụ sẽ được cung cấp cho kim phun số 2 để thực hiện việc phun nhiên liệu.

Từ sơ đồ nguyên lý trên, một mạch nguyên mẫu được xây dựng và lắp đặt như hình 5 bên dưới. Tụ điện được sử dụng trong mạch có dung lượng 220uF và điện áp làm việc là 450V.



Hình 5. Mạch thu hồi năng lượng và điều khiển kim phun

Thực nghiệm được tiến hành trên mô hình hệ thống điện điều khiển động cơ Toyota 1TR-FE với đầy đủ các bộ phận: đồng hồ trung tâm, cảm biến nhiệt độ động cơ, cảm biến Ne, cảm biến G, họng ga, cảm biến gió dây nhiệt, cảm biến oxi, cảm biến kích nổ thùng xăng + bơm xăng, cụm hiệu chỉnh tốc độ động cơ, công tắc nguồn + các role, đồng hồ đo, ECU, cụm IC, cụm bobine đánh lửa, cụm kim phun xăng, van VVT-I, giắc chẩn đoán OBD2, được thi công trên một khung gỗ kích thước: 800 x 1700 (mm).



Hình 6. Mô hình thực nghiệm điện điều khiển động cơ 1TR-FE

3.2. Thiết lập thử nghiệm

Trong thử nghiệm này, số vòng quay của động cơ được cài đặt ở tốc độ cầm chừng khoảng 1000 RPM, tương ứng với số xung của kim phun 500 xung trên một phút.

Thông số của kim phun cũng được đo từ thực nghiệm. Cụ thể, giá trị điện trở tổng cộng của kim phun là 15.6Ω , độ tự cảm là $0.03H$.

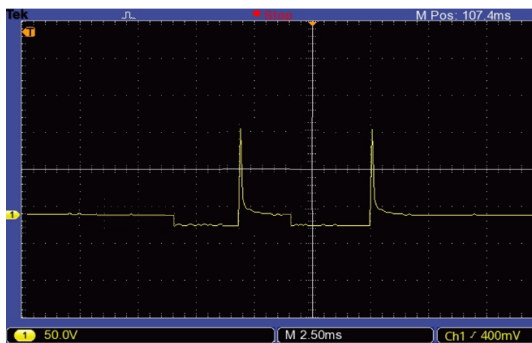
Thay các thông số trên vào (2-4), năng lượng tiêu thụ trên một kim phun sau mỗi lần chuyển mạch là:

$$E = E_R + E_L = 0.0093 + 0.0527 = 0.062(J)$$

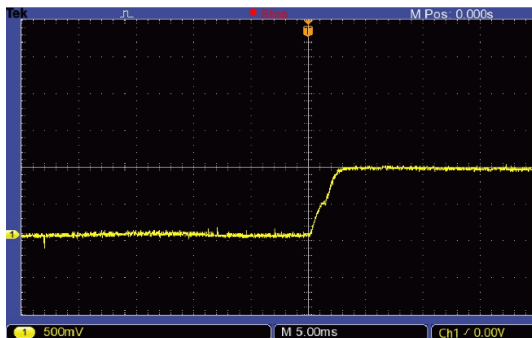
Như vậy, cứ mỗi 6 xung phun thì tạo ra được một nguồn năng lượng tương đương cho một lần phun. Với số lượng xung lớn thì mức năng lượng tích lũy do kim phun tạo ra cũng không hề nhỏ.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

Các kết quả thực nghiệm được trình bày ở các hình 7, 8, 9 được đo bằng máy dao động ký. Mục đích là kiểm tra đánh giá hoạt động của kim phun.



Hình 7. Xung sức điện động tự cảm



Hình 8. Cường độ dòng điện qua kim phun ở mức điện áp 14V

Có thể thấy được sức phản điện động ngược trên kim phun ở khoảng 120V trong khoảng thời gian 0.025ms. Điện áp nạp cho tụ dựa trên (9) là:

$$u_c = 120 \left(1 - e^{-\frac{0.025 \cdot 10^{-3}}{(14+0.9) \cdot 220 \cdot 10^{-6}}} \right) = 0.9(V)$$

Tụ được nạp đầy khi và chỉ khi điện áp của tụ bằng với điện áp tụ được nạp. Ban đầu tụ điện được nạp 14V bởi điện áp ắc quy, vì vậy số xung cần thiết để tụ được nạp đầy khoảng 120 xung.

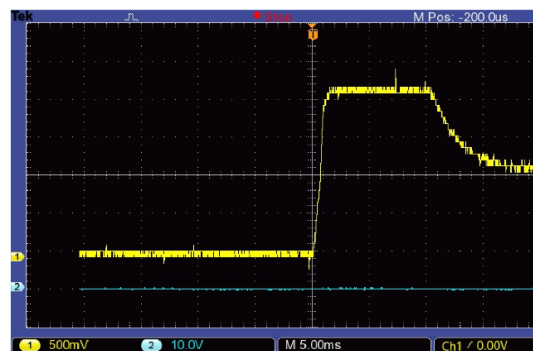
Cường độ dòng điện để nhấc kim phun ở mức xấp xỉ 1A và khoảng thời gian từ khi có tín hiệu phun đến khi nhấc ty kim là khoảng 1.7ms. Vì vậy, ứng với kim phun có giá trị $R = 14\Omega$ và $L = 0.019H$ thì cường độ dòng điện I_0 đạt giá trị để ty kim nhấc lên tại thời điểm $t = 0.0017s$ là:

$$I = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = 0.69(A)$$

Để cải thiện thời gian từ khi có tín hiệu phun đến khi đạt giá trị $I = 0.69(A)$, ta sử dụng tụ điện để tăng U , giả sử một nguồn điện có điện áp là 30V đặt vào kim phun.

$$t = \frac{L}{R} \ln \left(\frac{I}{I - \frac{IR}{U}} \right) = 0.56(ms)$$

Hình 9 phía dưới biểu diễn cường độ dòng điện đi qua kim phun ở mức điện áp 30V.

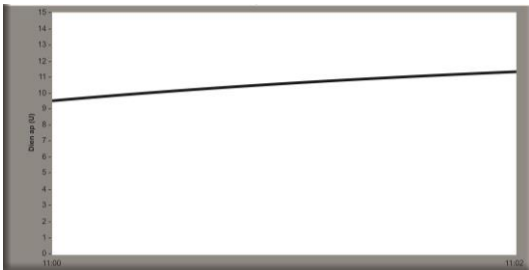


Hình 9. Cường độ dòng điện qua kim phun ở mức điện áp 30V

Các hình 10, 11, 12 là kết quả thực nghiệm đo được trên mô hình phun xăng đánh lửa. Thiết bị đo sử dụng card giao tiếp NI-6009 trên phần mềm LabVIEW.



Hình 10. Đồ thị biểu diễn quá trình nạp của tụ ở mức điện áp thấp (<math><9V</math>)



Hình 11. Đồ thị biểu diễn quá trình nạp của tụ ở mức áp cao (>math>>9V</math>)



Hình 12. Đồ thị biểu diễn quá trình xả tụ cấp điện cho kim phun

Quá trình nạp tụ diễn ra nhanh hơn ở mức điện áp thấp (<math><9V</math>) và chậm dần về mức điện áp cao (>math>>9V</math>). Mất khoảng 30s để có thể nạp điện cho tụ từ 0V đến 12V và lâu hơn để đến được mức 14V ở tốc độ 1000 RPM.

Khi điện áp ở mức 14V, tiến hành xả tụ cho kim phun thứ 2. Điện áp sau khi xả tụ cấp điện cho kim phun thứ 2 còn lại 11V. Sau đó, ngưng quá trình xả tụ, tiếp tục nạp lại cho tụ từ kim phun số 1.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày về nghiên cứu thu hồi sức điện động tự cảm của kim phun dưới dạng điện năng, phân tích quá trình nạp, xả tụ giữa các lần chuyển mạch. Một số thực nghiệm đã được tiến hành để thử nghiệm độ nhạy của kim phun dựa trên các mức điện áp khác nhau, đồng thời xác định tính khả thi của việc thu hồi năng lượng điện cảm và sử dụng nguồn năng lượng này để cấp điện lại cho kim phun ở chu kỳ tiếp theo.

Về cơ bản, kết quả nghiên cứu đã thiết kế thành công mô hình hệ thống quản lý nguồn năng lượng điện cảm từ kim phun. Tính toán và thực nghiệm cho thấy, năng lượng tích trữ từ kim phun có thể sử dụng để cung cấp ngược lại cho kim phun. Việc quản lý và tận dụng nguồn năng lượng điện cảm góp phần mở ra các xu hướng nghiên cứu mới liên quan đến vấn đề năng lượng tái sinh và phân phối các dòng năng lượng điện trên ô tô.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Idaho National Laboratory, *Advanced Vehicle Testing Activity*, 2015.
- [2] Cieřlik W., Pielecha I., and Borowski P., Effects of Start–Stop System on The Operation of Drive System in Urban Traffic Conditions, *Journal of Mechanical and Transport Engineering*, Vol. 67, No. 2, 2015.
- [3] Xueying L., Yanju J. và cộng sự, Research Review of a Vehicle Energy-Regenerative Suspension System, *Energies*, tr. 441, 2020.
- [4] SEBOK M., JURCIK J. và cộng sự, Diagnostics and Measurement of the Gasoline Engines Injection System, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015.
- [5] Đỗ Văn Dũng, *Hệ thống điện thân xe*, NXB ĐH Quốc Gia TP.HCM, 2004.

- [6] Đỗ Văn Dũng, *Điện động cơ và điều khiển động cơ*, NXB ĐH Quốc Gia TP.HCM, 2013.
- [7] Więclawski K, Mączak J, Szczurowski K. Diagnostyka, Electric Current Characteristics of the Injector Generating Fuel Does, *Diagnostyka*, Vol. 19, No. 4, 2018.
- [8] Więclawski, Krzysztof & Mączak, Jędrzej & Szczurowski, Krzysztof, Electric Current Waveform of the Injector as a Source of Diagnostic Information, *Sensors*. 20. 4151. 10.3390/s20154151, 2020.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Phan Nguyễn Quý Tâm

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh.

Email: tampnq@hcmute.edu.vn