

## **ỨNG DỤNG SIÊU TỤ NÂNG CAO TÍNH ĐÁP ỨNG CỦA KIM PHUN NHIÊN LIỆU TRÊN ĐỘNG CƠ XĂNG**

APPLICATION OF SUPERCAPACITOR TO IMPROVE DEADTIME OF FUEL  
INJECTIONS ON GASOLINE ENGINES

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

### **TÓM TẮT**

*Bài báo trình bày về việc cải thiện độ trễ của kim phun xăng bằng một nguồn điện thứ cấp. Chúng ta biết rằng, độ nhạy của kim phun tỉ lệ thuận với cường độ dòng điện đi qua nó. Cho nên, với việc tăng điện áp đặt vào kim phun, cường độ dòng điện sẽ tăng lên và đồng thời độ trễ của kim sẽ giảm xuống. Tuy nhiên, vì kim phun nhiên liệu trên động cơ xăng có mức điện trở thấp, nên việc tăng điện áp của kim lên quá cao sẽ gây tổn hao nhiệt, giảm tuổi thọ hoặc thậm chí hỏng kim phun. Vì vậy, độ nhạy của kim phun được tiến hành thực nghiệm dựa trên một bộ nguồn gồm 10 siêu tụ 2.7V/350F được ghép nối tiếp, với mức điện áp tổng cộng là 27V. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ nhạy của kim phun tăng lên 2 lần khi tăng điện áp hoạt động của kim phun từ 12V lên 24V.*

**Từ khóa:** Thời gian trễ của kim phun; Siêu tụ; Độ nhạy kim phun; Nguồn thứ cấp.

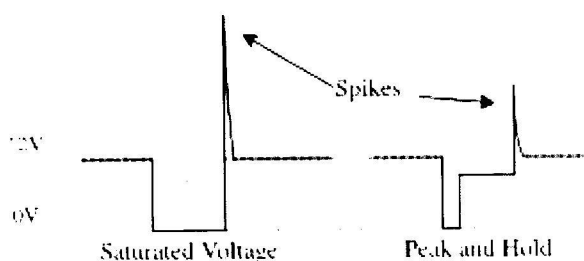
### **ABSTRACT**

*This paper will present the improvement of response time of fuel injector with a secondary power source. Specifically, the sensitivity of the fuel injector is proportional to the amperage of the electric current passing through it. So, when the voltage applied to the fuel injector increasing, that mean the amperage will increase and lead to cut down the fuel injector lift timing. However, the fuel injector on a gasoline engine is kind of a low resistance type, so increasing the voltage of the fuel injector too high will cause heat loss, reduce the lifespan or even burn the injector out. Therefore, the fuel injector sensitivity was experimentally carried out on a power supply consisting of 10 2.7V/350F supercapacitors in series, with a total voltage of 27V. Then, experimental results show that the sensitivity of the injector increases 2 times when increasing the operating voltage of the fuel injector from 12V to 24V.*

**Keywords:** Deadtime of injector; Supercapacitor; Sensitivity of fuel injector; Secondary source.

## 1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, siêu tụ điện đang từng bước được ứng dụng rộng rãi trong hầu hết các lĩnh vực công nghệ và ngành công nghiệp ô tô cũng không nằm ngoài xu hướng đó [1]. Trong những năm gần đây, các siêu tụ điện được ứng dụng trên nhiều phương tiện thân thiện với môi trường như xe điện, xe lai [2]. Không những thế, ngay cả trên những ô tô truyền thống sử dụng động cơ đốt trong, siêu tụ điện đã và đang được sử dụng như một nguồn lưu trữ năng lượng thứ hai nhằm đáp ứng những hệ thống hoạt động liên tục ở tần số cao nhờ đặc tính nạp-xả nhanh của tụ, điển hình như hệ thống phun nhiên liệu trên động cơ xăng. Hệ thống phun nhiên liệu (EFI) là một trong những hệ thống quan trọng bậc nhất trên động cơ xăng. Hiện nay, các kim phun nhiên liệu trong hệ thống EFI được điều khiển theo hai phương pháp phổ biến, đó là phương pháp điều khiển theo dòng hay còn gọi là phương pháp “nhắc và giữ” (Peak and Hold) và phương pháp điều khiển theo áp (Saturated Voltage). Trong quá trình chuyển mạch, cuộn cảm trong kim phun tạo ra một sức điện động ngược về phía nguồn cấp cho kim phun, điều này vẫn là một trong những nhược điểm cố hữu của các bộ chấp hành có cấu tạo từ cuộn cảm.



Hình 1. Điện áp ở hai chế độ điều khiển [4].

Về cơ bản, ở cả hai phương pháp trên đều cấp một nguồn điện áp đến kim phun để nhắc kim. Tuy nhiên, ở phương pháp điều khiển theo dòng, mạch điều khiển sẽ cấp dòng

điện có cường độ cao để mở kim phun, sau đó dòng điện sẽ được giảm xuống bằng cách hạ điện áp xuống đủ để duy trì sự mở của kim với mục đích làm giảm một phần sức điện động khi chuyển mạch (hình 1). Với cùng một điện áp cung cấp ở cả hai phương pháp, ở chế độ điều khiển theo dòng thì việc nhắc và giữ kim đòi hỏi kim phun phải có trở kháng tổng thấp hơn so với phương pháp điều khiển theo áp. Tuy nhiên, nếu xét về phương diện thu hồi năng lượng điện cảm từ kim phun, việc kim phun được điều khiển theo áp là có lợi hơn, vì sức điện động tự cảm ở chế độ điều khiển này sẽ lớn hơn so với chế độ điều khiển theo dòng. Những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu được đề xuất trong việc ứng dụng siêu tụ điện để thu hồi và sử dụng lại nguồn năng lượng điện cảm trên ô tô. Nhóm tác giả Martin Hadartz Martin Julander với công trình Battery-Supercapacitor Energy Storage [7] phân tích việc quản lý thông minh điện năng trên xe lai khi kết một siêu tụ điện 20F được kết hợp với ắc quy giúp cải thiện hiệu suất lưu trữ hệ thống lên đến 2,5%, và tỉ lệ giảm dòng điện tới trên ắc quy 32,5% theo chu trình thử nghiệm NEDC. Nhóm tác giả Đỗ Văn Dũng và cộng sự [3] đã xây dựng một mô hình thu hồi năng lượng và tích trữ lượng điện cảm trên ô tô bằng cuộn cảm và siêu tụ điện, sản phẩm nghiên cứu có khả năng tự động giám sát nguồn năng lượng trên ở các dải tốc độ động cơ từ 800 đến 4500 vòng/phút. Nguồn năng lượng được cấp cho các phụ tải điện gián đoạn có công suất từ 15W đến 60W. Tác giả Nguyễn Đỗ Minh Triết [6] đã thực hiện mô phỏng nguồn năng lượng thu được từ các xung tự cảm tạo ra từ các bobin, kim phun, van điện từ, role ở các tốc độ động cơ khác nhau. Đồng thời thực nghiệm thu hồi năng lượng thu được vào thiết bị lưu trữ siêu tụ điện, từ đó so sánh kết quả từ thực nghiệm và mô phỏng. Kết quả hiệu suất thu hồi năng lượng từ các xung suất điện động tự cảm đạt được 11,81÷15,6% trong mô phỏng và hiệu

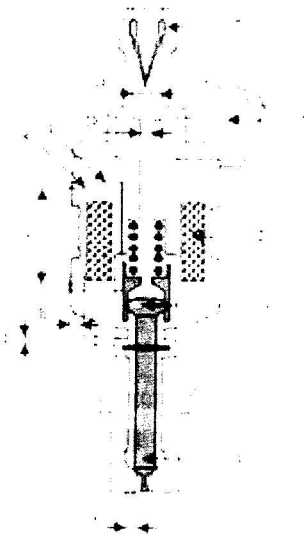
suất thu được từ thực nghiệm là  $10,42 \div 13,32 \%$ .

Trong bài báo này, tác giả tiến hành sử dụng nguồn điện áp từ siêu tụ để cung cấp cho kim phun thuộc kiểu điện trở cao ở chế độ điều khiển theo áp, qua đó phân tích khả năng đáp ứng của kim và so sánh thời gian trễ khi kim hoạt động ở mức điện áp tiêu chuẩn của ắc quy và ở mức điện áp cao của siêu tụ. Bố cục của bài báo được thể hiện ở các phần sau đây. Phần 2, trình bày về cơ sở lý thuyết và thiết kế mạch. Phần 3, đề cập về việc thiết lập thực nghiệm và các kết quả thực nghiệm. Cuối cùng, phần 4 sẽ kết luận lại các vấn đề được đặt ra và hướng phát triển của bài.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ THIẾT KẾ MẠCH

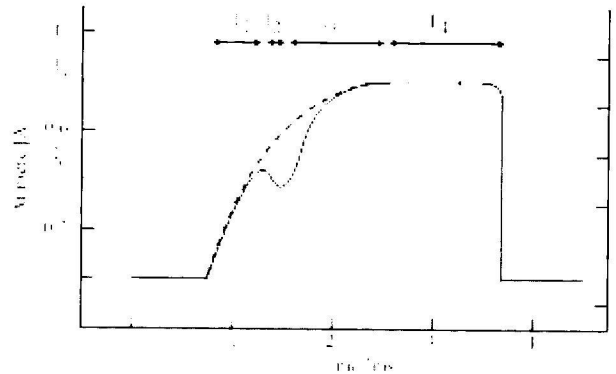
### 2.1. Phân tích quá trình hoạt động của kim phun

Cấu tạo của kim phun gồm một pít-tông di chuyển trong một ống hình trụ, phía trên đầu pít-tông được bố trí một lò xo hồi vị và được quấn quanh bởi các vòng dây (hình 2) [4].



Hình 2. Cấu tạo của kim phun [4]: 1 - Lõi sắt, 2 - Cuộn từ, 3 - Pít-tông, 4 - Ty kim, 5 - Ách giữ nam châm, 6 - Giắc ghim điện, 7 - Lọc.

Khi điện áp được đặt vào hai đầu của kim phun, dòng điện trong cuộn sẽ tăng dần do sự cản trở của dòng tự cảm, là dòng điện sinh ra có xu hướng chống lại nguyên nhân sinh ra nó, một đặc tính cơ bản của cuộn dây. Dòng điện tăng dần tương ứng với lực từ tác dụng lên pít-tông tăng dần, đến thời điểm nhất định, khi lực từ này lớn hơn lực đẩy của lò xo hồi vị và áp lực từ nhiên liệu trong kim, thì pít-tông sẽ dịch chuyển lên, nhiên liệu được phun ra.



Hình 3. Đường đặc tính cường độ dòng điện qua kim phun [4].

Trong hình 3, khi điện áp được cấp vào kim phun, cường độ dòng điện trong cuộn bắt đầu tăng từ 0A, đến khi lực điện từ lớn hơn áp lực tổng cộng đặt vào đầu kim, kim phun sẽ được nhắc lên. Lúc này, cường độ dòng điện qua kim phun sẽ có khoảng rơi nhỏ. Sau đó, cường độ dòng điện trong kim tiếp tục tăng cho đến khi đạt giá trị bão hòa, giá trị này tuân theo định luật Ohm dựa trên điện trở và hiệu điện thế của kim.

Mối quan hệ giữa các đường đặc tính điện áp, cường độ tuân theo (1) dưới đây.

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

Trong đó, U là điện áp cung cấp, R và L lần lượt là giá trị điện trở và độ tự cảm của kim phun.

Gọi thời gian  $T_1$  được tính từ lúc dòng điện tăng từ 0 đến  $I_{cr}$  (hình 3). Khi dòng điện cuộn dây tăng đến  $I_{cr}$ , lực điện từ lúc này lớn hơn sự chênh lệch lực tác dụng giữa lực nén của lò xo hồi vị và áp suất nhiên liệu, lúc này ty kim bắt đầu chuyển động lên, tương ứng với giai đoạn bắt đầu  $T_2$ , đến hết giai đoạn  $T_2$  là lúc ty kim được nhắc lên hoàn toàn khỏi bệ. Giai đoạn tiếp theo  $T_3$ , dòng điện trong kim phun vẫn tiếp tục tăng cho đến khi đạt giá trị bão hòa. Cuối cùng, ở giai đoạn  $T_4$ , dòng điện không tăng nữa, giữ ở mức bão hòa.

Có thể thấy được trong quá trình hoạt động của kim phun, khoảng thời gian  $T_1$ ,  $T_2$  và  $T_4$  là khoảng thời gian không thay đổi, còn  $T_3$  thay đổi phụ thuộc vào sự tính toán của vi điều khiển. Vì vậy, để đảm bảo độ chính xác về thời điểm phun cũng như thời gian phun, tác giả tiến hành cải thiện độ nhạy của kim bằng cách sử dụng một điện áp cao đặt vào kim nhằm giảm thời gian  $T_1$  và  $T_2$  thấp nhất có thể nhưng vẫn đảm bảo kim phun vẫn hoạt động ổn định.

$$i = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{const}}} \right) \quad (2)$$

Trong đó,  $t$  là tổng thời gian từ  $T_1$  đến  $T_4$ ,  $T_{const}$  là thời gian không đổi của cuộn dây, được tính bằng tỷ số giữa độ tự cảm và điện trở thuần của cuộn ( $T_{const} = R/L$ ).

Xét khoản thời gian  $T_1$ , lúc dòng điện trong cuộn cảm sẽ tăng từ 0 đến  $i = I_{cr}$ . Ta có:

$$T_1 = \frac{L}{R} \ln \left( \frac{I_{st}}{I_{st} - I_{cr}} \right) \quad (3)$$

Trong đó,  $I_{st}$  là cường độ dòng điện ở trạng thái ổn định, được xác định theo định luật Ohm,  $I_{st} = U/R$ .

Trong phạm vi bài báo này, tác giả tập trung phân tích  $T_1$  nhằm cải thiện tính đáp ứng của kim phun. Giả sử có 2 mức điện áp hoạt động của kim phun, gọi  $T_1'$  là thời gian đáp ứng của kim phun ở điện áp  $U'$  với  $U' > U$ .

$$T_1' = \frac{L}{R} \ln \left( \frac{I_{st}'}{I_{st}' - I_{cr}'} \right) \quad (4)$$

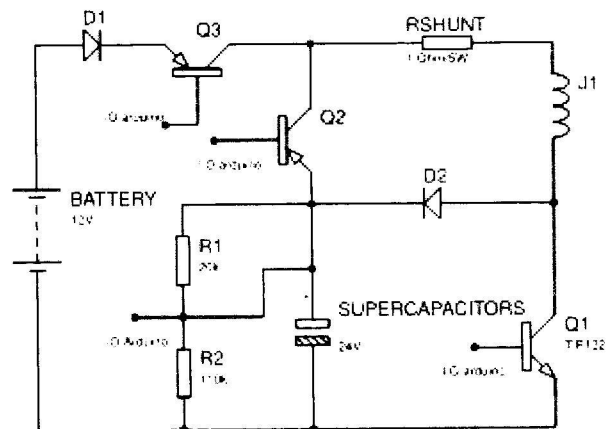
Tỷ số  $T_1'$  và  $T_1$  được biểu diễn trong (5).

$$\frac{T_1'}{T_1} = \log_{\frac{I_{st}'}{I_{st}' - I_{cr}'}} \left( \frac{I_{st}}{I_{st} - I_{cr}} \right) > 1 \quad (5)$$

Các tham số  $I_{st}$  và  $I_{st}'$  là những tham số đã biết dựa trên điện áp hoạt động và điện trở tổng cộng kim. Ngoài ra, tham số dòng điện rơi  $I_{cr}$  và  $I_{cr}'$  sẽ được xác định từ thực nghiệm để đánh giá tỷ số độ nhạy giữa hai mức điện áp hoạt động khác nhau của kim.

## 2.2. Thiết kế mạch công suất

Sơ đồ nguyên lý của mạch được biểu diễn ở hình 6 bên dưới.

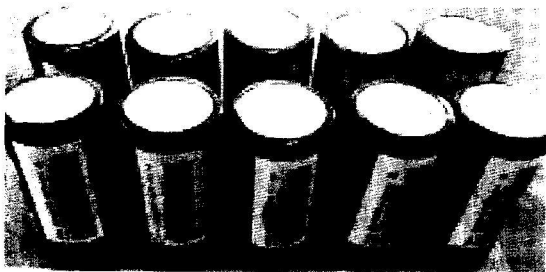


Hình 4. Sơ đồ nguyên lý hệ thống.

Khi siêu tụ được nạp đầy bởi sức điện động tự cảm, tín hiệu điện áp sẽ được báo về vi

điều khiển thông qua một cầu phân áp. Lúc này, vi điều khiển sẽ điều khiển transistor Q2 mở và Q3 đóng, lúc này siêu tụ sẽ cung cấp điện áp hoạt động cho kim phun thay cho ắc quy.

Hệ thống siêu tụ trong mô hình thực nghiệm gồm 10 siêu tụ Max-well BCAP0350 có giá trị 2.7V/350F ghép nối tiếp lại với nhau (hình 5), tạo ra mức điện áp danh định là 27V. Tuy nhiên, vì lý do an toàn, nên mạch công suất chọn hệ số an toàn cho tụ là 1.125. Tức là mức điện áp hoạt động của siêu tụ xấp xỉ 24V (khi đây).



Hình 5. Khối 10 siêu tụ mắc nối tiếp.

Năng lượng cực đại và công suất cực đại mà hệ siêu tụ có thể tích trữ lần lượt thể hiện ở (5) và (6) [8]:

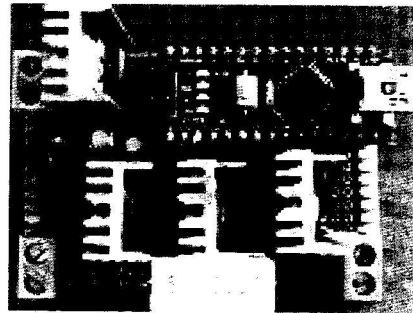
$$E_{\max} = \frac{CU^2}{2.3600.mass} = \frac{350}{10} \cdot 27^2 = \frac{2.3600 \cdot 3.2}{1000} = 1107.42(J) \quad (5)$$

$$P_{\max} = 0.06 \frac{U^2}{ESR_{DC}} = 0.06 \frac{27^2}{\frac{60}{1000}} = 729(W) \quad (6)$$

Một bộ nguồn năng lượng thứ cấp trên ô tô từ hệ siêu tụ có giá trị công suất cực đại đạt tới 0.7KW khi ở trạng thái được nạp đầy.

Nguồn năng lượng này làm điện áp cung cấp cho sự hoạt động của kim phun trong hệ thống EFI.

Để tiến hành thực nghiệm, một mạch công suất để điều khiển kim phun được xây dựng như hình 6 bên dưới.

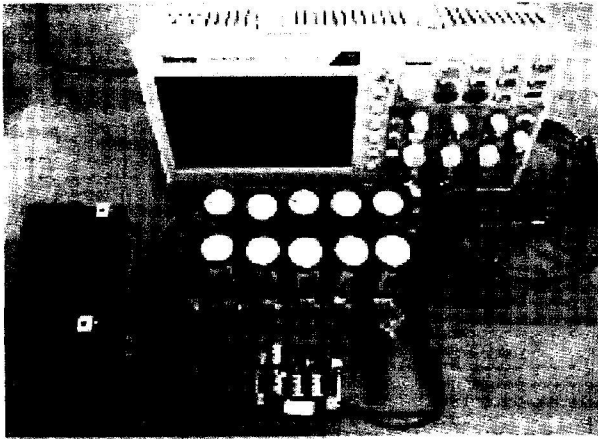


Hình 6. Mạch điều khiển kim phun.

Các phần chính của mạch công suất gồm: Nguồn điện 12V từ ắc quy được dùng làm nguồn cấp cho hệ thống, Arduino Nano được sử dụng làm bộ điều khiển trung tâm. Kim phun được điều khiển nhờ một transistor công suất TIP122. Một điện trở công suất có giá trị 1Ω/5W được mắc nối tiếp với kim phun nhằm xác định giá trị cường độ dòng điện.

### 3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

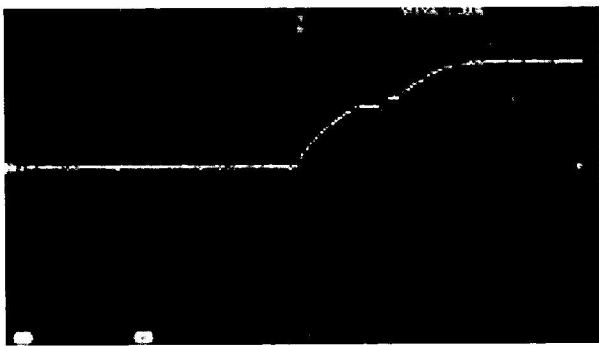
Trong phần thiết lập thực nghiệm này, máy đo sóng Tektronix MSO2000B được dùng để đo biên dạng của cường độ dòng điện và điện áp của kim phun. Hình 7, thể hiện đầy đủ một mô hình hệ thống thực nghiệm. Các thực nghiệm được tiến hành trong môi trường nhiệt độ phòng thí nghiệm tiêu chuẩn ở 25°C. Ngoài ra, kim phun hoạt động ở tần số không đổi xấp xỉ 50Hz, tương ứng với tốc độ động cơ 3.000 vòng/phút.



Hình 7. Mô hình hệ thống thực nghiệm.

Các thông số của kim phun gồm:  $R = 14.5\Omega$ ,  $L = 0.02H$ .

Hình 8 bên dưới biểu diễn đường đặc tính dòng điện và điện áp của kim phun ở mức điện áp 12V từ ắc quy. Đường số 1 là đường điện áp kích kim phun, đường số 2 là cường độ dòng điện của kim phun.

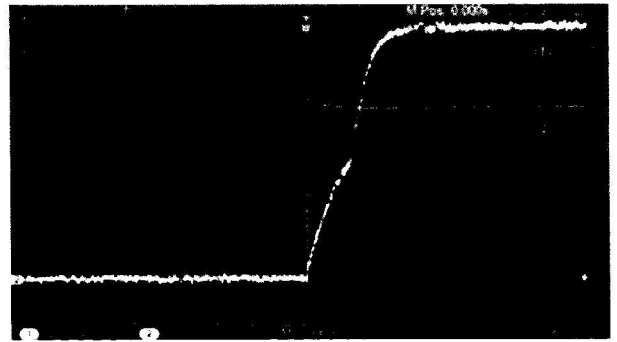


Hình 8. Đường đặc tính dòng điện và điện áp của kim phun ở mức 12V từ ắc quy.

Có thể thấy được, cường độ dòng điện của kim phun tăng dần từ lúc kim phun được cấp điện áp hoạt động, tại thời điểm  $T_1 = 1.6ms$  có sự sụt dòng trên kim phun, lúc này ty kim đã được nhấc lên khỏi bệ, dòng điện đạt giá trị không đổi ở mức 0.51A sau một khoảng thời gian 3ms từ lúc kim phun hoạt động. Từ (3), ta có:

$$T_1 = \frac{1}{14.5/0.02} \ln\left(\frac{0.51}{0.51-0.35}\right) \approx 1.59(ms)$$

Tiếp tục khảo sát đồ thị cường độ dòng điện ở mức điện áp 24V cấp cho kim (hình 9).



Hình 9. Đường đặc tính dòng điện và điện áp của kim phun ở mức 24V từ siêu tụ.

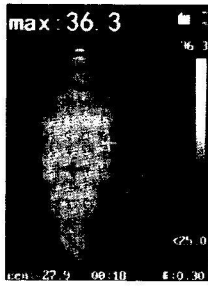
Có thể thấy được, ở mức điện áp 24V, đường đồ thị cường độ dòng điện tổng thể tăng vọt nhanh hơn so với điện áp hoạt động của kim ở mức 12V. Cụ thể, ty kim được nhấc khỏi bệ ở khoảng thời gian  $T_1' = 0.8ms$  và cường độ dòng điện ở trạng thái ổn định là 1.35A. Từ (4), ta có:

$$T_1' = \frac{1}{14.5/0.02} \ln\left(\frac{1.35}{1.35-0.6}\right) \approx 0.81(ms)$$

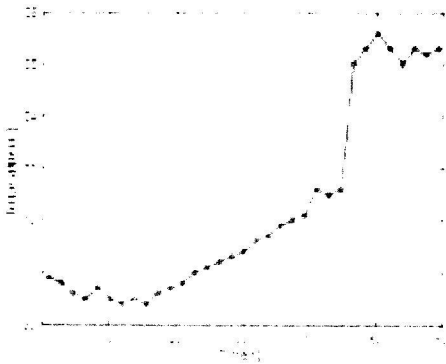
Từ hai đồ thị ở mức điện áp 12V và 24V, có thể thấy được khi tăng điện áp hoạt động của kim phun lên 2 lần thì tính đáp ứng của kim phun được tăng lên tương ứng 2 lần, hay nói cách khác là độ trễ của kim phun được giảm đi 2 lần.

$$\frac{T_1'}{T_1} = \log_{\frac{1.35}{1.35-0.6}} \left(\frac{0.51}{0.51-0.35}\right) \approx 2$$

Ngoài ra, nhiệt độ hoạt động của kim phun được giám sát bằng camera nhiệt Hikvision. Đồ thị phân bố nhiệt độ của kim phun được hiển thị ở hình 10 bên dưới.



Hình 10. Phân bố nhiệt độ của kim phun.



Hình 11. Đặc tuyến nhiệt độ được từ kim phun.

Kết quả đo kiểm cho thấy, kim phun hoạt động ở nhiệt độ tối đa xoay quanh 36 độ trong 60s tại tốc độ động cơ 3.000 vòng/phút ở mức điện áp cung cấp 24V. Dãy nhiệt độ này vẫn nằm trong vùng nhiệt độ hoạt động ổn định của kim phun [4].

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã tiến hành thực nghiệm tính đáp ứng của kim phun ở hai mức điện áp 12V từ ắc quy và 24V từ siêu tụ. Hai mức điện áp này được xem như là hai mức điện áp biên, có nghĩa là kim phun vẫn có thể hoạt động trong vùng điện áp từ 12V đến 24V mà vẫn đảm bảo được tính đáp ứng của kim phun được cải thiện so với mức điện áp từ ắc quy. Các kết quả thực nghiệm cho thấy độ nhạy của kim phun tỉ lệ tuyến tính với mức điện áp đặt vào kim. Cụ thể, thực nghiệm chỉ ra rằng, với mức điện áp 24V đặt vào kim phun, thì tính đáp ứng của kim

tăng lên gấp 2 lần, từ 1.6ms ở mức 12V giảm xuống còn 0.8ms ở mức 24V. Thực nghiệm chỉ ra hệ thống thu hồi năng lượng từ cảm từ kim phun và sử dụng ngược lại có thể được triển khai thực tế trên các xe sử dụng hệ thống EFI điều khiển theo dạng áp với kim phun điện trở cao. Đó cũng là hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu này.

Xét về bài toán tối ưu hóa cho vi điều khiển, thì việc cải thiện được độ trễ của kim phun giúp cho vi điều khiển có thể giảm bớt tải nguyên đáng kể trong việc tính toán thời gian phun nhiên liệu sớm. Ngoài ra, thu hồi năng lượng dạng điện năng từ các bộ chấp trên ô tô mang nhiều ý nghĩa khoa học trong việc phát triển và sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo.



Ngày nhận bài: 15/11/2020

Ngày phản biện: 30/12/2020

#### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pasquier A., Plitz I., và cộng sự, A Comparative Study of Li-Ion Battery, Supercapacitor and Nonaqueous Asymmetric Hybrid Devices for Automotive Applications, Journal of Power Sources, tập 115, tr. 171-178, 2003.
- [2]. Thounthong P., Rael S. and Davat B., Utilizing Fuel Cell and Supercapacitors for Automotive Hybrid Electrical System, Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005.
- [3]. Chen Liangliang, Zhang Zhendong, Study on the measurement of dynamic characteristics for automotive electronic fuel injector, International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering, (TMEE), Changchun, China, tr 511 - 514, 2011.
- [4]. Więclawski K., Mączak J., Szczyrowski K., Electric current as a source of information about control parameters of indirect injection fuel injector, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, tập 22, tr. 449-454, 2020.
- [5]. Phan Nguyễn Qui Tâm, Đỗ Văn Dũng, Đỗ Quốc Ấm, Nguyễn Bá Hải; Nghiên cứu, thi công hệ thống tích lũy năng lượng điện dạng cảm kháng trên ô tô, Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật, số 32, 2015.
- [6]. Nguyễn Đỗ Minh Triết; Mô phỏng, thử nghiệm và đánh giá thiết bị thu hồi năng lượng điện cảm trên hệ thống điện ô tô, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh, tr. 60-62, 2016.
- [7]. Martin Hadartz, Martin Julander, Battery-Supercapacitor Energy Storage, Chalmers University Of Technology Göteborg, Sweden, 2008.
- [8]. Maxwell BCAP0350 datasheet.