

PHÂN TÍCH NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CẢM TRONG HỆ THỐNG ĐÁNH LỬA

A STUDY OF SELF-INDUCTANCE ENERGY IN THE IGNITION SYSTEM

Phan Nguyễn Quý Tâm*, Đỗ Văn Dũng

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp xây mô hình phương trình cường độ dòng điện và phương trình sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp của biến áp đánh lửa. Trên cơ sở xây dựng mô hình vật lý để thấy được bản chất của sự hình thành sức điện động tự cảm và năng lượng điện cảm trong hệ thống đánh lửa. Từ đó, xây dựng phương trình năng lượng điện cảm trên hệ thống đánh lửa một cách chính xác. Các kết quả mô phỏng cho thấy sự thay đổi năng lượng điện cảm theo tốc độ động cơ và việc tận dụng được các nguồn năng lượng này là xu hướng mới trong việc ứng dụng nguồn năng lượng kép ắc quy - siêu tụ trên ô tô.

Từ khóa: Hệ thống đánh lửa, sức điện động tự cảm, năng lượng điện cảm.

ABSTRACT

This paper presents a method of modeling the electrical current and self-inductance energy equation in primary coil for ignition system. Base on building physical model to discover the nature of the back electromotive force (emf) and self-inductance energy in the ignition system. From here, building up the inductive energy equation exactly. The simulation results show that the change of inductive energy according to the engine speed and the point of these energy sources is a new trend in the application as the battery-supercapacitor dual energy sources in vehicles.

Keywords: Ignition system, self-inductance energy, energy storage.

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

*Email: tamnq@hcmute.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/12/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/02/2021

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống đánh lửa trên ô tô có vai trò chuyển đổi điện áp thấp (12V hoặc 24V) thành các xung điện áp cao (từ 15.000V đến 40.000V), các xung này được phân bố đến bugi trên các xy-lanh theo thứ tự làm việc vào đúng thời điểm để đốt cháy hỗn hợp hòa khí trong xy-lanh động cơ. Hệ thống đánh lửa có vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất làm việc, giảm tiêu hao nhiên liệu và ô nhiễm môi trường trên động cơ xăng.

Hệ thống đánh lửa điện cảm được sử dụng phổ biến nhất trên động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu xăng được phát minh bởi Kettering vào năm 1908, hiện nay có nhiều tên gọi khác nhau: hệ thống đánh lửa bán dẫn, hệ thống

đánh lửa theo chương trình, hệ thống đánh lửa trực tiếp. Phần lớn đều có ưu điểm: cấu trúc đơn giản, hoạt động ổn định, độ tin cậy cao, thời gian phóng xung điện cao áp dài và ổn định [1,2].

Để tạo ra xung điện cao áp hệ thống phải dùng bộ điều khiển đánh lửa (IC đánh lửa) và biến áp đánh lửa (bobin) có kết cấu chính gồm cuộn sơ cấp và thứ cấp.

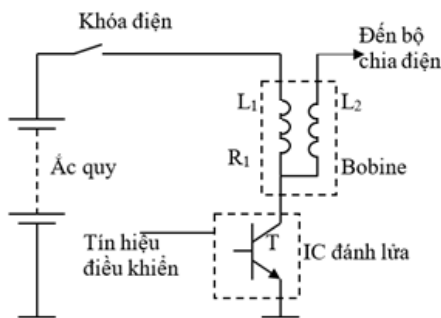
Năng lượng cần thiết cho quá trình đánh lửa được tích lũy dưới dạng năng lượng điện cảm thông qua quá trình tích lũy năng lượng và quá trình ngắt dòng ngắt dòng điện qua cuộn sơ cấp bobin. Năng lượng trên có vai trò quyết định chất lượng đánh lửa và cần đủ lớn để tạo ra xung cao áp vượt qua khe hở bugi và duy trì tia lửa [3,4].

Đã có nhiều công trình nghiên cứu về năng lượng điện cảm, sức điện động tự cảm trên ô tô nhằm cải thiện chất lượng của hệ thống đánh lửa như. Trong đó, các nhóm tác giả trong công trình [5] đã cụ thể hóa mô hình đánh lửa không bộ chia điện và phân tích dạng xung sóng điện áp trên cuộn sơ cấp và thứ cấp của bobin. Tác giả Lê Khánh Tân và các công tác viên đã công nghiên cứu, thiết kế, chế tạo thử nghiệm hệ thống đánh lửa kết hợp điện dung và điện cảm [6]. Sản phẩm được thử nghiệm thành công xe gắn máy Honda Wave RS tiết kiệm được 55g nhiên liệu cho mỗi 100km. Nồng độ CO và HC trong khí thải cũng giảm xuống một lượng tương ứng là 0,02%vol và 73ppmvol. Nhóm tác giả trong [7,8] đã công bố ảnh hưởng của các thông số R, L, C đến khả năng tích lũy năng lượng tự cảm trên hệ thống đánh lửa Hybrid. Kết quả nghiên cứu là các mô phỏng và thực nghiệm xác định sự ảnh hưởng của các thông số R, L, C đến năng lượng tích lũy, đồng thời là căn cứ để hiệu chỉnh phương trình sức điện động tự cảm và cường độ dòng sơ cấp đánh lửa.

Bài báo này trình bày bản chất của sự hình thành sức điện động tự cảm và năng lượng tự cảm một cách có hệ thống bằng phương pháp mô hình hóa trên cơ sở xây dựng mô hình vật lý, phát triển thành mô hình toán học để xây dựng phương trình cường độ dòng điện và phương trình sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp bobin. Từ đó xây dựng phương trình năng lượng điện cảm trên hệ thống đánh lửa. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc tiếp tục tác động những thông số cần thiết nhằm cải thiện năng lượng điện cảm nói chung và hệ thống đánh lửa nói riêng.

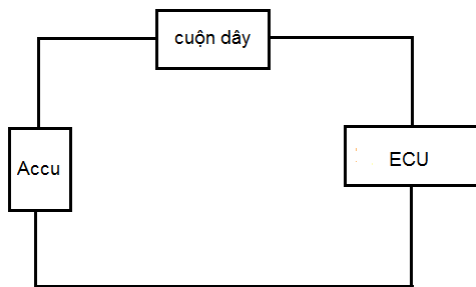
2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Trong phần này, nhóm tác giả tiến hành xây dựng mô hình toán học của hệ thống đánh lửa như mô tả trong hình 1 và 2.

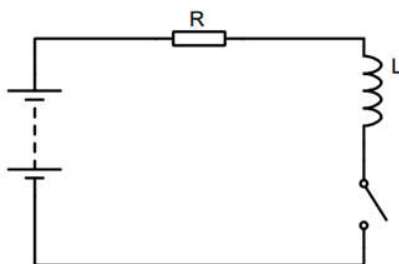


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống đánh lửa

Theo sơ đồ nguyên lý trên hình 1, khi Transistor T dẫn, dòng điện từ + ắc quy qua cuộn dây sơ cấp sẽ tăng trường đến giá trị nhất định. Khi Transistor T ngắt dòng điện sơ cấp và từ thông do nó sinh ra mất đi đột ngột, trên cuộn thứ cấp của biến áp đánh lửa sẽ sinh ra một hiệu điện thế vào khoảng 15.000V đến 40.000V, chuyển đến bộ chia điện và phân phối đến các bugi theo thứ tự công tác [9].



Hình 2. Mô hình vật lý điều khiển cuộn dây sơ cấp



Hình 3. Sơ đồ tương đương trong quá trình tích lũy năng lượng

Áp dụng định luật Kirchoff cho hình 3, một phương trình vi phân thiết lập:

$$iR + L \frac{di}{dt} = U$$

Nghiệm:

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \tag{1}$$

Trong đó:

i: dòng điện qua cuộn sơ cấp.

R: tổng trở mạch.

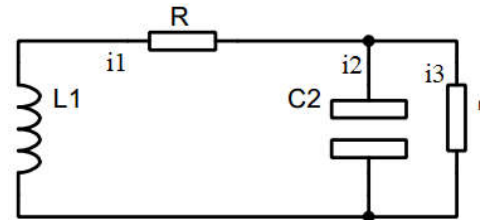
L: độ tự cảm của cuộn dây.

U: điện áp hoạt động thực tế: $U = U_a - \Delta U_T$

U_a : điện áp của ắc quy.

ΔU_T : độ sụt áp trên khóa K (hay transistor công suất ở trạng thái dẫn bão hòa).

Phương trình (1) là mô hình toán học của cường độ dòng điện qua cuộn sơ cấp trong quá trình tích lũy năng lượng.



Hình 4. Sơ đồ tương đương trong quá trình ngắt dòng sơ cấp

Áp dụng định luật Kirchoff cho hình 4, một hệ phương trình vi phân thiết lập:

$$\begin{cases} -L_1 \frac{di_1}{dt} = i_1(t)R + i_3(t)r \\ i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) \\ i_3(t) = \frac{1}{C_2} \int i_2(t) dt \end{cases} \tag{2}$$

Trong đó:

R: điện trở của cuộn cảm.

r: điện trở rò của tụ C_2 .

L_1 : độ tự cảm của cuộn cảm.

i_1 : dòng điện qua điện trở R.

i_2 : dòng điện qua tụ C_2 .

i_3 : dòng điện rò qua r.

Biến đổi Laplace (2) ta có:

$$\begin{cases} -L_1 [SI_{1s} - i(0_+)] = I_{1s}R + I_{3s}r \\ I_{1s} = I_{2s} + I_{3s} \\ I_{3s}r = \frac{1}{C_2S} [I_{2s} + q(0_+)] \end{cases} \tag{3}$$

$$\text{Điều kiện biên} \begin{cases} i(0_+) = I_0 \\ q(0_+) = 0 \end{cases}$$

I_0 là cường độ dòng điện của mạch ở cuối thời gian tích lũy năng lượng.

Hệ phương trình:

$$\begin{cases} -L_1 SI_{1s} + L_1 I_0 = I_{1s}R + I_{3s}r \\ I_{1s} = I_{2s} + I_{3s} \\ I_{3s}r = \frac{1}{C_2S} I_{2s} \end{cases} \tag{4}$$

Nghiệm:

$$I_{1s} = \frac{I_0 L_1}{L_{eq}S + R + \frac{r}{1+C_2Sr}}$$

$$\Leftrightarrow I_{1s} = \frac{I_0 L_1 (C_2Sr + 1)}{S^2 L_1 C_2r + L_1 S + SRC_2r + R + r}$$

$$\Leftrightarrow I_{1s} = \frac{I_0 L_1 C_2Sr + I_0 L_1}{S^2 L_1 C_2r + S(L_1 + RC_2r) + (R + r)}$$

$$\Leftrightarrow I_{1s} = \frac{I_0 S + \frac{I_0}{C_2 r}}{S^2 + S\left(\frac{L_1 + RC_2 r}{L_1 C_2 r}\right) + \frac{R+r}{L_1 C_2 r}}$$

Đặt:

$$\begin{cases} a = I_0 & c = \frac{L_1 + RC_2 r}{L_1 C_2 r} \\ b = \frac{I_0}{C_2 r} & d = \frac{R+r}{L_1 C_2 r} \end{cases}$$

Được:

$$I_{1s} = \frac{aS + b}{S^2 + cS + d} = \frac{aS + b}{S^2 + \frac{c}{2}S + \frac{c^2}{4} + d - \frac{c^2}{4}}$$

$$\Leftrightarrow I_{1s} = \frac{a\left(S + \frac{c}{2}\right) + b - \frac{ac}{2}}{\left(S + \frac{c}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}\right)^2}$$

$$\Leftrightarrow I_{1s} = \frac{a\left(S + \frac{c}{2}\right)}{\left(S + \frac{c}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}\right)^2} + \frac{b - \frac{ac}{2}}{\sqrt{d - \frac{c^2}{4}} \left[\left(S + \frac{c}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}\right)^2 \right]}$$

Biến đổi Laplace ngược:

$$i_1(t) = ae^{-\frac{c}{2}t} \cos\left(\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}t\right) + \frac{b - \frac{ac}{2}}{\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}} e^{-\frac{c}{2}t} \sin\left(\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}t\right)$$

Đặt:

$$\begin{cases} x = -\frac{c}{2} \\ y = \sqrt{d - \frac{c^2}{4}} \\ z = \frac{b - \frac{ac}{2}}{\sqrt{d - \frac{c^2}{4}}} \end{cases}$$

Kết quả ta được:

$$i_1(t) = ae^{xt} \cos(yt) + ze^{xt} \sin(yt) \tag{5}$$

Phương trình (5) mô tả cường độ dòng điện qua cuộn cảm trong quá trình ngắt dòng sơ cấp.

Trong đó: a, b, c và d là các hệ số được đặt theo mối quan hệ với R, r, L₁, i₁, i₂ và i₃.

2.1. Sức điện động tự cảm trong quá trình ngắt dòng sơ cấp

Để tính được sức điện động tự cảm trong quá trình ngắt dòng sơ cấp, ta tính sức điện động tự cảm như sau:

$$V_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} \tag{6}$$

Đạo hàm (6), được:

$$\frac{di_1}{dt} = ax \cdot e^{xt} \cos(yt) - ay \cdot e^{xt} \sin(yt) + xz \cdot e^{xt} \sin(yt) + zy \cdot e^{xt} \cos(yt)$$

$$\Leftrightarrow \frac{di_1}{dt} = (ax + zy)e^{xt} \cos(yt) + (xz - ay)e^{xt} \sin(yt) \tag{7}$$

Thay (7) vào (6), được phương trình (8) như sau:

$$V_1(t) = -L_1 \frac{di_1}{dt} = L_1 [(ax + zy)e^{xt} \cos(yt) + (xz - ay)e^{xt} \sin(yt)] \tag{8}$$

Phương trình (8) mô tả sức điện động tự cảm trong quá trình ngắt dòng sơ cấp.

2.2. Năng lượng điện cảm

Năng lượng tích lũy dưới dạng từ trường trong cuộn dây sơ cấp của bobin được tính như sau:

$$W_{dc} = \frac{1}{2} \times L_1 \times I_{ng}^2 \tag{9}$$

Trong đó:

W_{dc}: năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp (J).

I_{ng}: cường độ dòng điện qua cuộn sơ cấp lúc transistor công suất ngắt (A).

L₁: độ tự cảm cuộn sơ cấp bobin (H).

Năng lượng điện cảm trong quá trình tích lũy năng lượng:

$$W_{dc1}(t) = \frac{1}{2} \times L_1 \times (i(t))^2 = \frac{1}{2} \times L_1 \times \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1}t}\right)\right)^2 \tag{10}$$

Năng lượng điện cảm trong quá trình ngắt dòng sơ cấp

$$W_{dc2}(t) = \frac{1}{2} \times L_1 \times (i(t))^2 = \frac{1}{2} \times L_1 \times (ae^{xt} \cos(yt) + ze^{xt} \sin(yt))^2 \tag{11}$$

$$W_{dc}(t) = W_{dc1}(t) + W_{dc2}(t) = \frac{1}{2} \times L_1 \times \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1}t}\right)\right)^2 + \frac{1}{2} \times L_1 \times (ae^{xt} \cos(yt) + ze^{xt} \sin(yt))^2 \tag{12}$$

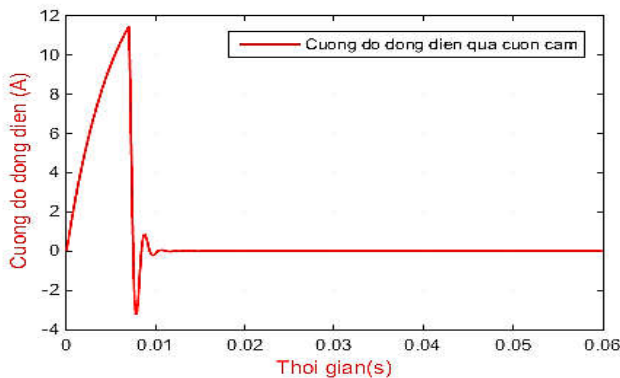
Trong đó, phương trình (11) là năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp trong quá trình đánh lửa với a, b, c và d là các hệ số được đặt theo mối quan hệ với R, r, L₁, i₁, i₂ và i₃ [9,10].

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

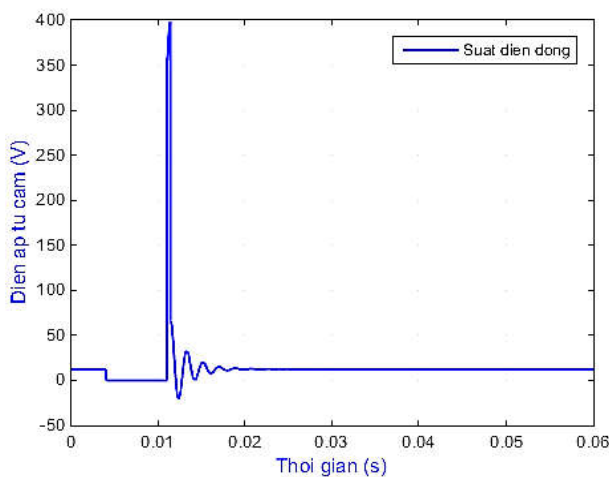
Để tiến hành kiểm chứng sự chính xác của mô hình hệ thống vừa xây dựng, nhóm tác giả thực hiện mô phỏng các phương trình (5), phương trình (8) và phương trình (11) trên phần mềm MATLAB/Simulink với các thông số được cho trong bảng 1 (thông số tương ứng trên các bộ phận đánh lửa của động cơ Toyota 1TR-FE).

Bảng 1. Thông số đầu vào của hệ thống

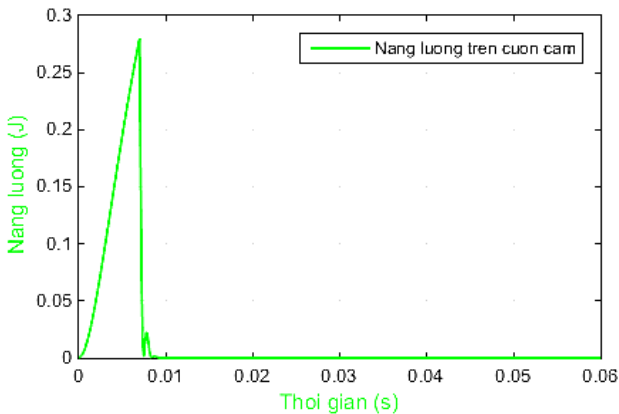
TT	Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Điện trở cuộn dây sơ cấp bobin	R	1,9	Ω
2	Độ tự cảm cuộn dây sơ cấp bobin	L	4,52.10 ⁻³	H
3	Điện áp của ắc quy	U	12,78	V
4	Giá trị tụ điện	C	0,33.10 ⁻⁶	F
5	Điện trở rò	r _{rò}	1.000.000	Ω
6	Thời gian khò sắt	t	7.10 ⁻³	s



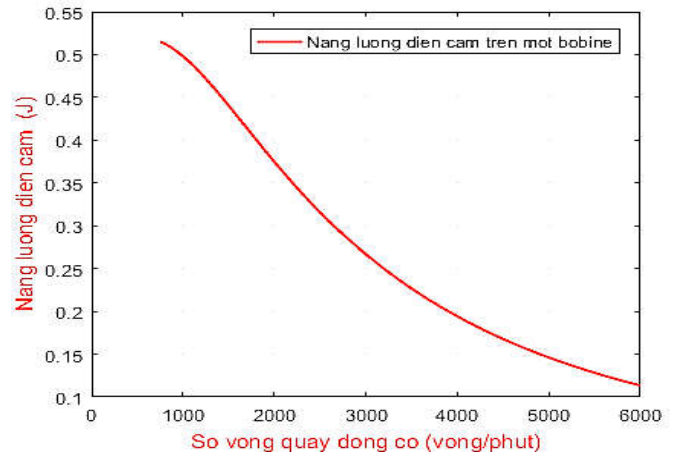
Hình 5. Đặc tuyến dòng điện qua cuộn sơ cấp



Hình 6. Đặc tuyến sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp



Hình 7. Đặc tuyến năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp



Hình 8. Đặc tuyến năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp theo tốc độ động cơ

Các kết quả mô phỏng được thể hiện như sau: Hình 5 thể hiện đặc tuyến cường độ dòng điện qua cuộn sơ cấp, Hình 6 cho thấy đặc tuyến sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp, Hình 7 thể hiện đặc tuyến năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp và Hình 8 là thông số của đặc tuyến năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp theo tốc độ động cơ.

Có thể nhận thấy ở hình 7, năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp bobin đạt cực đại tại thời điểm $t_d = 7ms$, tương ứng với thời điểm transistor ngắt, sau đó năng lượng giảm dần.

Giá trị năng lượng điện cảm trên cuộn sơ cấp phụ thuộc chủ yếu vào thời gian ngậm theo biểu thức:

$$W_{dc} = \frac{1}{2} \times L_1 \times \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_d}{\tau}} \right) \right)^2 \tag{13}$$

$$t_d = \gamma_d \times T$$

$$T = \frac{120}{n_e \times Z}$$

$$\tau = \frac{L_b}{R}$$

Trong đó:

t_d : thời gian ngậm điện (s).

γ_d : thời gian tích lũy năng lượng tương đối (s), xét hệ thống đánh lửa thông dụng $\gamma_d = 2/3$

T: chu kì đánh lửa (s).

τ : hằng số điện từ.

n_e : số vòng quay động cơ.

Z: số xylanh động cơ.

Tương ứng:

$$W_{dc1}(t) = \frac{1}{2} \times L_1 \times (i(t))^2 = \frac{1}{2} \times L_1 \times \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1} t \times \frac{120}{n_e \times Z}} \right) \right)^2$$

Khảo sát dải tốc độ động cơ 750 ÷ 6000(vòng/phút)

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích và xây dựng phương trình năng lượng điện cảm trên hệ thống đánh lửa dựa trên nguyên lý hoạt động và mô hình vật lý của hệ thống đánh lửa.

Qua phân tích, xác định rằng năng lượng điện cảm trong hệ thống đánh lửa phụ thuộc chủ yếu vào hai thông số: cường độ dòng điện qua cuộn sơ cấp và hệ số tự cảm của cuộn sơ cấp.

Năng lượng đánh lửa có xu hướng giảm dần khi tốc độ tăng do tần số đánh lửa cao, thời gian ngậm điện ngắn ảnh hưởng đến giá trị cực đại dòng điện qua cuộn sơ cấp. Đặc tuyến mô phỏng năng lượng điện cảm theo tốc độ góp phần định hướng các nghiên cứu có cơ sở lựa chọn vùng tốc độ tối ưu trong điều khiển đánh lửa hoặc thu hồi năng lượng điện cảm, tích lũy vào các siêu tụ điện và sẽ được dùng như một nguồn năng lượng điện cảm tái sinh theo xu hướng tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đỗ Văn Dũng, 2013. *Điện động cơ và điều khiển động cơ*. NXB Đại học Quốc gia TP.HCM.
- [2]. Tom Denton, 2018. *Automobile Electrical and Electronic Systems*. (5th Edition), Published by Elsevier.
- [3]. William B. Ribbens, 2017. *Understanding Automotive Electronics*. (8th Edition), Published by Elsevier.
- [4]. Michael Günther Marc Sens, 2016. *Ignition Systems for Gasoline Engines*. 3rd International Conference, November, 3-4, Berlin, Germany.
- [5]. Milan ŠEBŮK, Miroslav GUTTEN, Lubomir OSTRICA, Matej KUČERA, Marek Makyda, 2013. *Analysis of Distributorless Ignition Systems*. Przegład Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR.
- [6]. Lê Khánh Tân, 2014. *Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo thử nghiệm hệ thống đánh lửa kết hợp điện dung và điện cảm*. Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM.
- [7]. Do Van Dung, Do Quoc Am, Nguyen Tan Ngoc, 2017. *Effects of Resistance, Capacitance and Self-Inductance on Accumulated Energy in the Hybrid Ignition System*. Interational Conference on System Science and Engineering (ICSSE).
- [8]. Đỗ Quốc Ấm, 2020. *Nghiên cứu, tính toán, chế tạo hệ thống đánh lửa hỗn hợp điện dung - điện cảm sử dụng bo-bin đơn*. Chuyên đề NCS, 05/2020
- [9]. Lars Eriksson, Lars Nielsen, 2014. *Modeling and control of engines and drivelines*. (3th Edition), Published by John Wiley & Sons, Ltd.

AUTHORS INFORMATION

Phan Nguyen Qui Tam, Do Van Dung

HCMC University of Technology and Education