

PHÂN TÍCH QUÁ TRÌNH ĐÁNH LỬA ĐIỆN DUNG TRÊN HỆ THỐNG ĐÁNH LỬA LAI HỖN HỢP ĐIỆN DUNG – ĐIỆN CẢM

ANALYZING THE CAPACITOR IGNITION PROCESS IN THE HYBRID IGNITION SYSTEM

Đỗ Văn Dũng, Đỗ Quốc Âm, Nguyễn Tấn Ngọc
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 17/02/2020, ngày phản biện đánh giá 03/03/2020, ngày chấp nhận đăng 12/3/2020.

TÓM TẮT

Bài báo phân tích quá trình đánh lửa điện dung trên hệ thống đánh lửa lai hỗn hợp điện cảm - điện dung (hybrid). Các vấn đề được trình bày bao gồm diễn biến quá trình đánh lửa điện dung, phương trình của cường độ dòng điện, sức điện động tự cảm trong quá trình đánh lửa điện dung trên hệ thống đánh lửa lai hỗn hợp điện dung – điện cảm. Các thông số được xem xét trong bài báo thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab là cường độ dòng sơ cấp $i(t)$, sức điện động tự cảm của hệ thống $e(t)$ và ảnh hưởng của tổng trở (R), hệ số tự cảm cuộn sơ cấp bo-bin (L) đến $i(t)$ và $e(t)$. Các kết quả phân tích và mô phỏng giúp đưa ra biểu thức tính toán cường độ dòng điện và sức điện động của cuộn sơ cấp của bo-bin trong giai đoạn đánh lửa điện dung phù hợp với diễn biến thực tế trong mạch đánh lửa điện dung.

Từ khóa: hệ thống đánh lửa; hybrid; đánh lửa điện dung; hệ thống đánh lửa lai hỗn hợp điện dung - điện cảm; cường độ dòng điện; sức điện động tự cảm.

ABSTRACT

This paper analyzed the capacitor-discharged process in the hybrid ignition system. The analyzed factor is the primary current and self-induced emf in the capacitor-discharged stage of the hybrid ignition system. Matlab was used to simulate the primary current and self-induced emf. The analyzed and simulation results help conclude the equation of the primary current and self-induced emf suitable with the actual process in the hybrid ignition system.

Keywords: ignition system; hybrid; capacitor-discharged stage; primary current; self-induced emf.

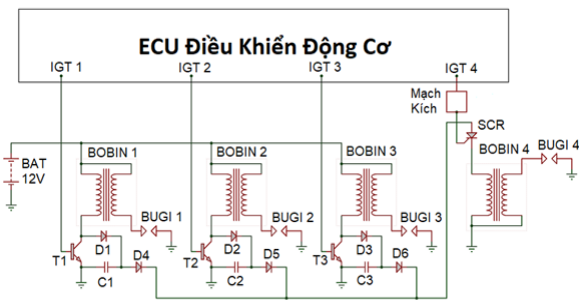
1. HỆ THỐNG ĐÁNH LỬA HYBRID

Hệ thống đánh lửa trên động cơ đốt trong sử dụng nhiên liệu xăng, có nhiệm vụ biến điện áp từ accu có giá trị 12V hay 24V, thành các xung điện cao thế có giá trị có thể đạt đến 45kV, đồng thời phân phối các đến các bu-gi theo đúng thời điểm và đúng thứ tự yêu cầu của động cơ [1, 2, 3, 4, 5].

Khi hệ thống làm việc, kết thúc quá trình tích lũy năng lượng, trên cuộn sơ cấp của biến áp đánh lửa (bo-bin) sẽ xuất hiện sức điện động tự cảm có giá trị (từ 100-300V) [1, 2, 3, 4, 5]. Điện áp tự cảm này khi phóng qua thiết bị đóng ngắt, sẽ làm kéo dài quá trình ngắt dòng sơ cấp. Qua đó, làm giảm điện thế

thứ cấp, làm hỏng thiết bị đóng ngắt và gây nhiễu đến các thiết bị điện trên ô tô [1, 2, 3].

Các nghiên cứu về hệ thống đánh lửa lai (hệ thống đánh lửa hỗn hợp điện cảm - điện dung) trước đây, tập trung vào việc kéo dài thời gian xuất hiện tia lửa trên bu-gi bằng cách kết hợp hai kiểu đánh lửa điện dung và điện cảm [6, 7, 8, 9]. Ở hệ thống đánh lửa lai do tác giả đề xuất, ở các lần đánh lửa điện cảm năng lượng tự cảm “thừa” sẽ được tích lũy vào tụ điện và sử dụng lại năng lượng này cho lần đánh lửa điện dung. Với ý tưởng này, các tác động tiêu cực nêu trên sẽ được khắc phục và còn có thể tiết kiệm được năng lượng sử dụng trên hệ thống [10, 11, 12, 13].



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống đánh lửa hybrid trên động cơ bốn xy lanh

Nguyên lý làm việc của hệ thống đánh lửa hỗn hợp điện cảm - điện dung (sử dụng cho động cơ 4 xy-lanh)

Hệ thống bao gồm hai chế độ làm việc: chế độ đánh lửa điện cảm và chế độ đánh lửa điện dung. Ở chế độ đánh lửa điện cảm, ECU điều khiển động cơ (electronic control unit) sẽ điều khiển quá trình đánh lửa của các tổ máy 1, 2, 3 (đánh lửa điện cảm), thông qua các tín hiệu IGT₁, IGT₂, IGT₃. Năng lượng tự cảm “thừa” trên các bo-bin 1, bo-bin 2, bo-bin 3,... sẽ được tích lũy vào các tụ C₁, C₂, C₃. Ở chế độ đánh lửa điện dung, tương ứng với thời điểm làm việc của tổ máy 4, tín hiệu IGT₄ sẽ điều khiển SCR mở. Năng lượng tích lũy trên các tụ C₁, C₂, C₃ sẽ được giải phóng đến cuộn dây sơ cấp của bo-bin 4.

Dựa trên sơ đồ nguyên lý hệ thống đánh lửa Hybrid (hình 1), với cách mắc ba tụ song song, có thể thay thế bằng một tụ điện C có điện dung tương đương của ba tụ C₁, C₂, C₃. Quá trình giải phóng năng lượng tích lũy trên tụ đến cuộn sơ cấp của bo-bin 4, có tính chất tương đương với quá trình tụ điện phóng trên mạch RLC.

Vì vậy, trong tính toán có thể sử dụng mô hình mạch RLC (hình 2) trong đó:

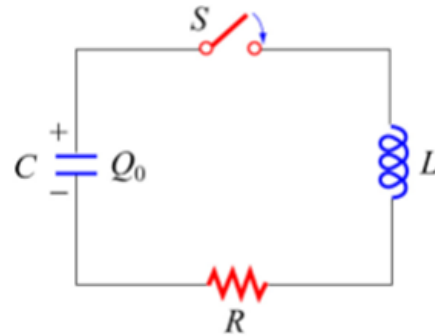
C: Tụ điện có điện dung tương đương của ba tụ C₁, C₂, C₃.

S: Công tắc đóng/mở thể hiện hai trạng thái đóng/ngắt của SCR.

L: Hệ số tự cảm của cuộn sơ cấp của bo-bin 4.

R: Tổng trở của mạch sơ cấp đánh lửa điện dung, bao gồm: điện trở của các linh

kiện, điện trở cuộn sơ cấp bo-bin 4, điện trở của các mối nối,...



Hình 2. Mô hình tính toán mạch đánh lửa điện dung

2. TÍNH TOÁN MẠCH ĐÁNH LỬA ĐIỆN DUNG

2.1 Xây dựng phương trình tổng quát cường độ dòng điện trên cuộn sơ cấp của bo-bin khi tụ điện phóng

Mô hình tính toán mạch đánh lửa điện dung dựa vào hình 2.

Tổng năng lượng trên mạch:

$$W = W_C + W_L = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2 \quad (1)$$

Năng lượng tiêu hao trên điện trở R được biểu diễn bởi công thức:

$$\frac{dW}{dt} = -i^2 R \quad (2)$$

Thay (1) vào (2), ta có phương trình vi phân như sau:

$$\frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + Li \frac{di}{dt} = -i^2 R \quad (3)$$

Tỉ lệ giữa cường độ dòng điện và điện tích trên hai bản tụ của tụ điện được thể hiện như sau: $i = -\frac{dQ}{dt}$. Chia cả hai vế (3) cho i , ta có:

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0 \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow Q'' + \frac{R}{L} Q' + \frac{1}{LC} Q = 0 \quad (5)$$

Đặt:

$$\gamma = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

Nghiệm tổng quát của phương trình (5) là:

$$Q(t) = Q_0 e^{-\gamma t} \cdot \cos(\omega' t + \Phi) \quad (6)$$

Tại thời điểm ban đầu $t=0$, $Q(t=0) = Q_0$, $\Phi=0$, với Q_0 là điện tích cực đại ban đầu của tụ. Viết lại phương trình $Q(t)$ ta có:

$$Q(t) = Q_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega' t) \quad (7)$$

Ta có:

$$i(t) = -\frac{dQ}{dt} = Q_0 \omega' e^{-\gamma t} \left[\sin \omega' t + \left(\frac{\gamma}{\omega'} \right) \cos(\omega' t) \right] \quad (8)$$

2.2 Xây dựng phương trình tổng quát sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp của bo-bin khi tụ điện phóng

Sức điện động tự cảm được viết dưới dạng

$$Ta\ có: e_L(t) = -L \frac{di(t)}{dt} \quad (9)$$

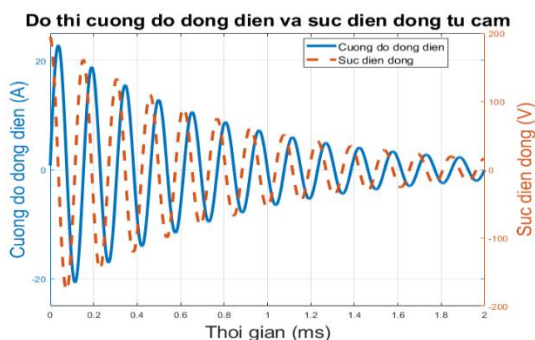
Tiến hành đạo hàm phương trình (8) ta được:

$$\frac{di(t)}{dt} = Q_0 \omega' e^{-\gamma t} \left[\left(\omega' - \frac{\gamma^2}{\omega'} \right) \cdot \cos \omega' t - 2\gamma \sin \omega' t \right] \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow e(t) = L Q_0 \omega' e^{-\gamma t} \left[\left(\omega' - \frac{\gamma^2}{\omega'} \right) \cdot \cos \omega' t - 2\gamma \sin \omega' t \right] \quad (11)$$

Sử dụng phần mềm Matlab để xây dựng đồ thị cường độ dòng điện $i(t)$ và sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp $e(t)$. Các giá trị đưa vào tính toán:

$R = 0.5\Omega$, $L = 0.2mH$, $C = 3\mu F$ (3 tụ điện $1\mu F$ mắc song song), V_{max} tụ điện = 195V, số vòng quay động cơ 700 vòng/phút.

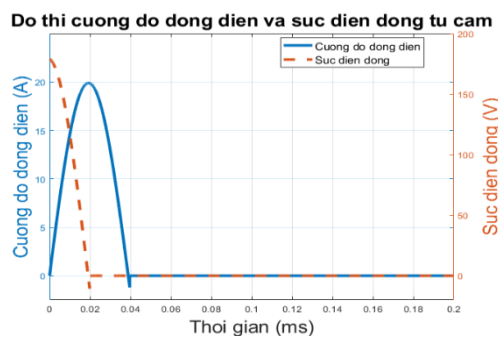


Hình 3. Đồ thị cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp theo thời gian khi tụ điện phóng.

Cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp (khi tụ điện phóng) dao động tắt dần dạng sin, chúng lệch pha nhau một góc $\frac{\pi}{2}$. Khi cường độ dòng điện đạt giá trị cực đại cũng chính là lúc sức điện động tự cảm bằng 0.

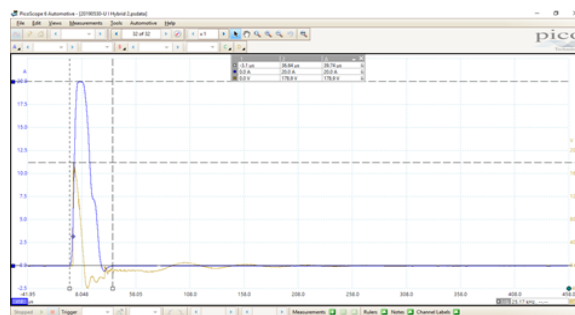
2.3 Cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm trong mạch sơ cấp trong hệ thống CDI

Trên thực tế, có diode mắc ở đầu ra của các tụ điện một diode. Vì vậy, toàn bộ phần âm của dao động cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp đều bị lược bỏ.



Hình 4. Đồ thị cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp theo thời gian trong hệ thống CDI.

Sử dụng thiết bị Pico Automotive Oscilloscopes 4425, đo cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm của cuộn dây sơ cấp trên mạch đánh lửa điện dung hybrid thực tế được lắp trên động cơ Toyota 1NZ-FE. Các thông số của điện trở (R) Hệ số tự cảm cuộn dây (L), dung lượng của tụ điện (C) như trong các mô phỏng trên, động cơ hoạt động ở số vòng quay 700 vòng/phút.



Hình 5. Đồ thị cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp theo thời gian trên thực tế.

Từ kết quả thu được, ta nhận thấy quy luật tăng trưởng và biên dạng của cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp của bo-bin giữa mô phỏng và thực tế là giống nhau. Tuy nhiên, giá trị biên độ và chu kỳ có sự sai lệch, điều này có thể do sai số trên các linh kiện sử dụng và các sai lệch của các phép đo, nên cần thêm các giá trị hiệu chỉnh.

Phương trình sau hiệu chỉnh

$$i(t) = 0,88 \cdot Q_0 \cdot \omega' \cdot e^{-\gamma t} \left[\sin(1,94\omega' t) + \left(\frac{\gamma}{\omega'} \right) \cos(1,94\omega' t) - \left(\frac{\gamma}{\omega'} \right) \right] \quad (12)$$

$$E_L(t) = 0,92 \cdot L \cdot Q_0 \omega' \cdot e^{-\gamma t} \left[\left(\omega' - \frac{\gamma^2}{\omega'} \right) \cdot \cos(1,94\omega' t) - 2\gamma \sin(1,94\omega' t) \right] \quad (13)$$

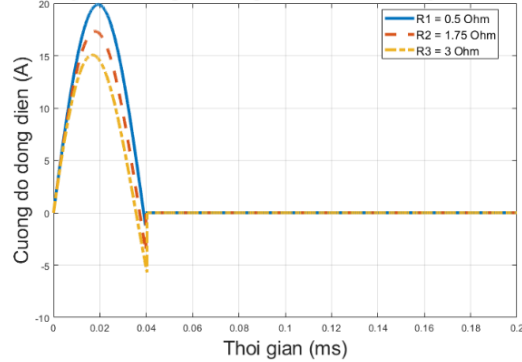
2.4 Đánh giá ảnh hưởng điện trở R và hệ số tự cảm L của cuộn dây sơ cấp đến cường độ và sức điện động trên mạch đánh lửa điện dung

Trên thực tế, với sự thay đổi độ tự cảm L của cuộn dây có thể sẽ kéo theo sự thay đổi điện trở bản thân của cuộn dây, đồng nghĩa với việc sẽ làm thay đổi tổng trở R của mạch. Ngoài ra độ tự cảm L phụ thuộc vào rất nhiều các thông số như: số vòng dây quấn, chiều dài cuộn dây, bán kính cuộn dây, độ từ thẩm [14, 15],.... Vì vậy, để đơn giản trong quá trình đánh giá, ta xem xét độc lập của một trong hai thông số.

Đánh giá ảnh hưởng của điện trở R đến cường độ dòng điện và sức điện động trên mạch đánh lửa điện dung

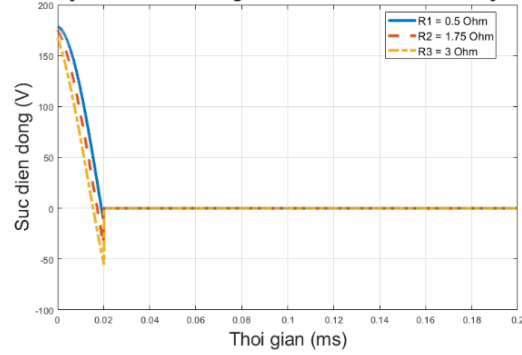
Sử dụng phần mềm Matlab để xây dựng đồ thị cường độ dòng điện và sức điện động của cuộn sơ cấp với ba giá trị R khác nhau. Các các giá trị đưa vào hàm tính toán: $R_1 = 0.5\Omega$, $R_2 = 1.75\Omega$, $R_3 = 3\Omega$, $L = 0.2\text{mH}$, $C = 3\mu\text{F}$ (3 tụ điện $1\mu\text{F}$ mắc song song), V_{max} tụ điện = 195V và mô phỏng tại số vòng quay 700 vòng/phút.

Su thay đổi cường độ dòng điện cực đại trong mạch theo R



Hình 6. Đồ thị cường độ dòng điện đi qua cuộn sơ cấp theo thời gian trong hệ thống CDI khi R thay đổi.

Su thay đổi sức điện động tự cảm cực đại của cuộn dây theo R



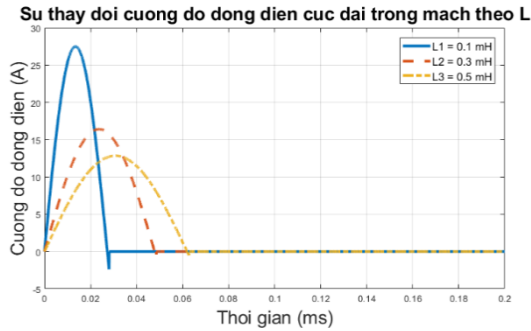
Hình 7. Đồ thị sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp theo thời gian trong hệ thống CDI khi R thay đổi.

Dựa trên đồ thị ta thấy, nếu tổng trở R càng lớn thì càng làm giảm giá trị cực đại của cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm có thể đạt được trên cuộn sơ cấp. Chu kỳ dao động: $T = \frac{2\pi}{1,94 \cdot \omega'} = \frac{2\pi}{1,94 \cdot \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}}$, tổng trở R

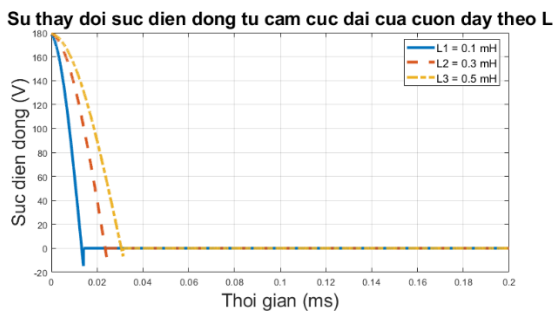
tăng sẽ làm cho hệ số tắt dần $\gamma = \frac{R}{2L}$ tăng lên, điều này dẫn đến việc kéo dài thời gian chu kỳ T. Tuy nhiên, do γ quá nhỏ so với ω_0 nên sự thay đổi này là không đáng kể.

Đánh giá ảnh hưởng của hệ số tự cảm L đến cường độ dòng điện và sức điện động trên mạch đánh lửa điện dung

Các giá trị đưa vào tính toán: $L_1 = 0.1\text{mH}$, $L_2 = 0,3\text{mH}$, $L_3 = 0,5\text{mH}$, $R = 0.5\Omega$, $C = 3\mu\text{F}$ (3 tụ điện $1\mu\text{F}$ mắc song song), V_{max} tụ điện = 195V và mô phỏng tại số vòng quay 700 vòng/phút.



Hình 8. Đồ thị cường độ dòng điện đi qua cuộn sơ cấp theo thời gian trong hệ thống CDI khi L thay đổi.



Hình 9. Đồ thị sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp theo thời gian trong hệ thống CDI khi L thay đổi.

Với sự thay đổi L, không ảnh hưởng tới cực đại của sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp nhưng lại tác động rất lớn đến cường độ dòng điện và thời gian của chu kỳ T. Từ phương trình (12), ta thấy, cực đại của cường độ dòng điện $I_{max} = 0,88 \cdot Q_0 \cdot \omega'$. Như vậy, khi L tăng lên, làm cho ω' giảm đi nên I_{max} cũng giảm theo. Ngược lại, với sự sụt giảm

của I_{max} thì chu kỳ T lại được tăng lên, kéo dài thời duy trì sự tồn tại sức điện động tự cảm của cuộn sơ cấp.

3 KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích và mô phỏng được quá trình đánh lửa điện dung trên hệ thống đánh lửa hybrid.

Các kết quả đạt được:

Đưa ra biểu thức tính toán cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm trên cuộn sơ cấp của bo-bin trên mạch đánh lửa lai hỗn hợp điện cảm – điện dung trong giai đoạn đánh lửa điện dung các mô phỏng phù hợp với diễn biến thực tế trong mạch đánh lửa điện dung.

Khảo sát được sự thay đổi của cường độ dòng điện và sức điện động tự cảm khi thay đổi các thông số của hệ thống như tổng trở (R), hệ số tự cảm của cuộn sơ cấp bo-bin (L).

Qua khảo sát ta thấy, khi tăng giá trị tổng trở của mạch (R), tổn thất năng lượng tăng làm giảm giá trị cực đại của cường độ dòng điện và sức điện động. Khi thay đổi hệ số tự cảm (L), không làm ảnh hưởng đến giá trị cực đại của sức điện động tự cảm. Tuy nhiên, giá trị cực đại của cường độ dòng điện và thời gian chu kỳ T lại có sự thay đổi rất lớn theo L. Càng tăng L, chu kỳ T càng tăng, giá trị cực đại của cường độ dòng điện càng giảm và ngược lại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Trạng, *Động cơ đốt trong 1*, 2005.
- [2] Robert Bosch GmbH, *Automotive Electric/Electronic System*, Dipl.Ing (FH) Horst Bauer, 1995.
- [3] Tom Denton, *Automobile Mechanical and Electrical Systems*, Elsevier Ltd, 2011.
- [4] John B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, 1998.
- [5] Konrad Reif Ed, *Gasoline Engine Management*, Springer Vieweg, 2015.
- [6] Martin E.Gerry, Inductive-capacitive cyclic charge-discharge ignition system, US Patent No 4288723, 1981.
- [7] Michael J French và Matthew Joseph Edwards, Hybrid ignition circuit for an internal combustion engine, US Patent 5806504, 1998.

- [8] Joseph M. Lepley, Capacitive discharge ignition system with extended duration spark, US Patent No 6701904B2, 2004.
- [9] Audris Simakaukas, Hybrid Ignition system with variable spark duration for spark ignition engine, The 8th International conference, Vilnius, Lithuania, 2013.
- [10] ThS Đỗ Quốc Âm, PGS.TS Đỗ Văn Dũng, KS Lê Khánh Tân, *Nghiên cứu mô hình đánh lửa Hybrid*, Hội nghị Khoa học và Công nghệ toàn quốc về Cơ khí lần thứ IV, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM, 2015, pp. 411-418.
- [11] ThS Đỗ Quốc Âm, PGS.TS Đỗ Văn Dũng, ThS Phan Nguyễn Quý Tâm, KS Lê Khánh Tân, *Tính toán sức điện động tự cảm trên hệ thống đánh lửa lai*, tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật, số 32, 2015, pp. 8-12.
- [12] Do Van Dung, Do Quoc Am, Nguyen Tan Ngoc, Effects of resistance, capacitance and self-inductance on accumulated energy in the hybrid ignition system, ICSSE 2017, 2017, pp. 349-354
- [13] Do Quoc Am, Do Van Dung, Nguyen Tan Ngoc, *Effects Of Capacitor On The Hybrid Ignition System*, Applied Mechanics and Materials, Vol 889, 03/2019, Pages: 388-395.
- [14] Inductance and Magnetic Energy. Internet: http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide1_1.pdf 26/12/2019
- [15] I.P Gierebxop, Các mạch điện và từ, Nhà xuất bản Mir matxcova, 1986.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Đỗ Quốc Âm

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

Email: amdq@hcmute.edu.vn