NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA SỐ VÒNG DÂY CUỘN CẢM ĐẾN CẢM ỨNG TỪ VÀ NĂNG LƯỢNG TỪ TRƯỜNG CÓ ÍCH CỦA VÒI PHUN ĐIỆN TỪ

STUDY THE EFFECT OF COIL TURN NUMBERS ON THE EFFECTIVE MAGNETIC ENERGY OF A SOLENOID INJECTOR

Trịnh Đắc Phong[1], Nguyễn Trung Kiên[1], Chu Đức Hùng[1], Nguyễn Thành Vinh[1], Nguyễn Xuân Khoa[1,*]

DOI: https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.253

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của số vòng dây của cuộn cảm đến cảm ứng từ và năng lượng điện từ có ích của vòi phun. Để đạt được mục tiêu này, một mô hình mô phỏng vòi phun điện từ được xây dựng dựa trên phần mềm Maxwell. Mô hình mô phỏng này cho phép các nhà nghiên cứu đánh giá được ảnh hưởng của các thông số đầu vào tới từ trường và năng lượng điện từ có ích của vòi phun. Các thông số đầu vào như: số vòng dây cuộn cảm, tiết diện mặt cắt ngang cuộn cảm, cường độ dòng điện và điện áp đầu vào. Trong khuôn khổ và giới hạn của nghiên cứu này thì sự ảnh hưởng của số vòng dây của cuộn cảm tới quá trình làm việc của vòi phun điện từ sẽ được trình bày và thảo luận một cách cụ thể và chi tiết. Kết quả nghiên cứu cho thấy, số vòng cuộn dây cảm ứng có ảnh hưởng lớn tới năng lượng điện từ có ích của vòi phun. Khi số vòng dây cuộn cảm tăng từ 40 đến 80 vòng thì cảm ứng từ tăng từ 0,167T lên 0,33T, tăng 50,6%. Trong khi đó năng lượng điện từ có ích tăng từ 4,86kJ/m^3 lên 19,6kJ/m^3, tăng 247,9%.

Từ khóa: *Vòi phun điện từ, phần mềm Maxwell, lực điện từ, phun xăng điện tử.*

ABSTRACT

This paper presents a study the effect of coil turn numbers on the magnetic and effective magnetic energy of a solenoid injector. To achieve this goal, a magnetic injector simulation model is setup based on the Maxwell software. From this simulation software, the researchers are able to investigate the effect of input parameters on the solenoid injector magnetic and effective magnetic energy. Those input parameters are: coil turn numbers, coil cross section area, input current and input voltage. In scope of this research, the effect of coil turn numbers on the injector performance will be completely discussed. The results of the research show that: the coil turn numbers have sensitive effect on solenoid injector magnetic and effective magnetic energy. When the coil turn numbers increase form 40 turn to 80 turn, the injector magnetic increases form 0.167T to 0.33T, improved 50.6%. The injector effective magnetic energy increases from 4.86kJ/m^3 to 19.6kJ/m^3, improved 247.9%.

Keywords: *Solenoid injector, Maxwell software, magnetic, effective magnetic energy.*

[1]Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

[*]Email: khoanx@haui.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/8/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/10/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2023

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống phun xăng điện tử là hệ thống cung cấp nhiên liệu được điều khiển bằng điện tử, cung cấp hỗn hợp hòa khí tốt ưu [1, 2]. Hệ thống phun xăng điện tử sử dụng các cảm biến khác nhau để phát hiện tình trạng làm việc của động cơ. ECU liên tục nhận thông tin từ các cảm biến, so sánh với dữ liệu đã được cài đặt trong bộ nhớ. Sau đó quyết định thời điểm và thời lượng phun xăng bằng cách cung cấp điện áp vào cuộn dây trong vòi phun. Vòi phun xăng có chức năng phun vào cửa nạp ở xupap hút một lượng xăng đã được định lượng chính xác theo tỉ lệ không khí đi vào buồng đốt . Mỗi xy lanh động cơ có riêng một vòi phun (ở hệ thống phun xăng đa điểm) [3]. Còn ở hệ thống phun xăng đơn điểm thì có một hoặc hai vòi phun cho tất cả các xy lanh [4, 5].

Khi ECU ngắt điện cuộn dây mất từ tính, lò xo đẩy van kim phun đóng kín lỗ phun, đây là trạng thái đóng của kim. Khi ECU gửi tín hiệu điện áp, làm cho cuộn dây được từ hóa giống như nam châm điện sẽ nhấc lõi từ và kim phun lên khoảng 0,1mm và xăng được phun vào đường nạp. Đầu của van kim có chuôi hình dáng đặc biệt giúp nhiên liệu được phun ra dưới dạng sương. Lượng xăng phun ra nhiều hay ít phụ thuộc vào thời gian mở van kim (thời lượng phun xăng). Thời gian mở và đóng kim phun xăng xảy ra trong khoảng khắc từ 1 đến 1,5 mili giây.

Đã có nhiều công bố về việc nghiên cứu ảnh hưởng các thông số đầu vào đến các đặc tính hoạt động của vòi phun điện từ. Vòi phun điện từ có thể sử dụng trong các loại vòi phun trên động cơ xăng, động cơ diesel, động cơ sử dụng nhiên liệu khí [6-9]. Bên cạnh đó một số kết quả nghiên cứu vòi phun điện từ trên động cơ diesel, ảnh hưởng của điện áp, đường kính cuộn dây đến hiệu suất của lực từ, đã cho thấy thời gian phản hồi của điện từ phụ thuộc vào đường kính dây [10, 11]. Trong nghiên cứu của Yin và Wu [12] đã tiến hành xây dựng mô hình toán học và sử dụng phần mềm Matlab-Simulink để xây dựng và mô phỏng hoạt động của vòi phun điện từ sử dụng cho hệ thống phun khí nén. Mô

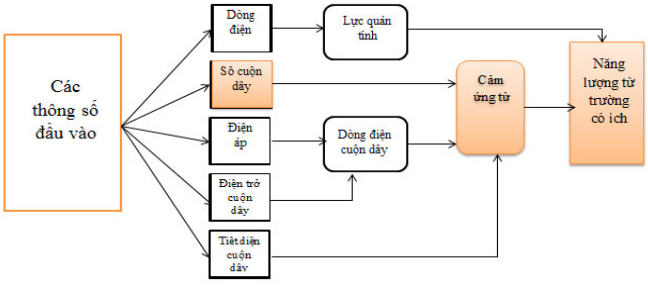
phỏng này cho thấy lực điện từ tăng khi số vòng dây tăng, điện áp thay đổi. Nhóm nghiên cứu của Nguyễn Bá Hưng [13, 14] và các cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số kết cấu: độ cứng lò xo, khối lượng pit tông, số vòng quay đến đặc tính vận hành của kim phun như dòng điện, lực điện từ và độ dịch chuyển của pít tông. Nhóm tác giả đã xây dựng 2 mô hình: mô hình điện và mô hình cơ khí. Kim phun được mô hình hóa mô phỏng bằng phần mềm ANSYS Maxwell và Simplorer dựa trên các thông số kỹ thuật thực tế của kim phun. Một số nghiên cứu tập trung tối ưu hóa khả năng các vòi phun điện từ dùng cho các động cơ diesel [15-18].

Với tính ưu việt của vòi phun điện từ nên nó còn được phát triển và ứng dụng trên các động cơ sử dụng nhiên liệu Hydro và khí tự nhiên giúp thân thiện với môi trường [19-23]. Vòi phun nhiên liệu khí gồm hai loại: loại phun đường ống nạp và loại phun trực tiếp vào xi lanh. Các vòi phun đặt trên đường ống nạp này không khác nhiều so với vòi phun xăng thông thường về nguyên lý hoạt động, nhưng khác về kết cấu chi tiết, vật liệu và áp suất phun. Áp suất phun của chúng thường từ 10 - 13bar [24], trong khi vòi phun xăng thông thường từ 3 - 5bar [25].

Các nghiên cứu trên chủ yếu tập trung vào các vòi phun điện từ trên các động cơ phun nhiên liệu áp suất cao, CNG, động cơ phun dầu điện tử. Tuy nhiên chưa có công trình nào nghiên cứu đến sự ảnh hưởng của số vòng dây cuộn cảm đến cảm ứng từ và năng lượng từ trường có ích của vòi phun xăng trên đường ông nạp. Trong khi đó đây là loại phun xăng trên các động cơ rất phổ biến tại Việt Nam hiện nay. Với sự cấp thiết và mức độ thực tế trên, nghiên cứu này sẽ tập trung đề xuất phương pháp nghiên cứu và xây dựng mô hình toán học và nghiên cứu sự ảnh hưởng của các thông số đầu vào tới quá trình làm việc của vòi phun điện từ.

Để thực hiện nội dung này, nhóm nghiên cứu ứng dụng phần mềm mô phỏng Maxwell để xây dựng mô hình mô phỏng vòi phun điện từ. Với việc sử dụng mô hình mô phỏng này thì sự ảnh hưởng của số vòng dây của cuộn cảm đến cảm ứng từ và năng lượng từ trường có ích của vòi phun điện từ sẽ được nghiên cứu một cách cụ thể. Các kết quả nghiên cứu bước đầu cho thấy khi thay đổi thông số đầu vào thì lực điện từ của vòi phun cũng tăng giảm theo các thông số đo. Các kết quả nghiên cứu này có thể được coi là cơ sở quan trọng và cần thiết cho các nghiên cứu tiếp theo về đặc tính của vòi phun điện từ, và là cơ sở để cải tiến các vòi phun đảm cho các động cơ đang lưu hành tại Việt Nam.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT



Hình 1. Mối quan hệ giữa các thông số với năng lượng từ trường có ích

Hình 1 mô tả sự ảnh hưởng các thông số đầu vào của vòi phun tới năng lượng từ trường có ích, ở đây thông số đầu vào được phân ra làm hai loại. Một loại là các thông số mềm: dòng điện, điện áp. Một loại là các thông số cứng như: Số cuộn dây, điện trở cuộn dây, tiết diện cuộn dây. Từ hình 1 ta thấy được sự ảnh hưởng của số cuộn dây đến năng lượng từ trường có ích do độ lớn cảm ứng từ thay đổi.

2.1. Mô hình toán học của kim phun điện từ

Khi cấp dòng điện cho vòi phun, xuất hiện từ trường trong ống dây, có độ lớn cảm ứng từ:

$$B = \mu\mu_0 .n.I = \mu\mu_0 .\frac{N}{l}I \quad (1)$$

Trong đó: N là số vòng cuộn dây, l là chiều dài ống dây.

μ là độ từ thẩm tương đối.

μ_0 là hằng số từ.

Khi đó một phần năng lượng chuyển hóa thành nhiệt năng và một phần năng lượng khác sinh ra đó là năng lượng điện trường:

$$W_m = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu\mu_0}.V \quad (2)$$

Trong đó: V = l.S là thể tích ống dây

Mối quan hệ giữa điện áp, dòng điện và điện từ được mô tả bằng phương trình sau:

$$v_0 = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

Trong đó:

v_0 là điện áp đầu vào

R là điện trở trong cuộn dây

i là dòng diện

λ là tổng từ thông trong toàn khối chứa cuộn dây tỉ lệ với từ thông cuộn dây φ, được biểu diễn bởi công thức sau:

$$\lambda = N.\varphi \quad (4)$$

Theo đó, công thức (1) có thể viết lại thành:

$$v_0 = Ri + N.\frac{d\varphi}{dt} \quad (5)$$

Thêm vào đó, mối quan hệ giữa từ thông và dòng điện được biểu diễn như một hàm của dòng điện :

$$\lambda = L(x).i \quad (6)$$

Trong đó: L(x) là độ tự cảm của cuộn dây

Kết hợp phương trình (1) và (3), mối quan hệ giữa điện áp và dòng điện được viết dưới dạng sau:

$$v_0 = Ri + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(x)}.\left[v_0 - Ri - i\frac{dL(x)}{dx}.\frac{dx}{dt}\right] \quad (8)$$

Kết hợp các phương trình trên ta được kết quả sau:

$$W_m^{'}(i,x) = \int_0^1 \lambda(i,x)di = \int_0^1 L(x)idi = \frac{1}{2}i^2.l(x) \quad (9)$$

Trong đó:

W_m' là một hàm của dòng điện trong cuộn dây và độ tự cảm của nó

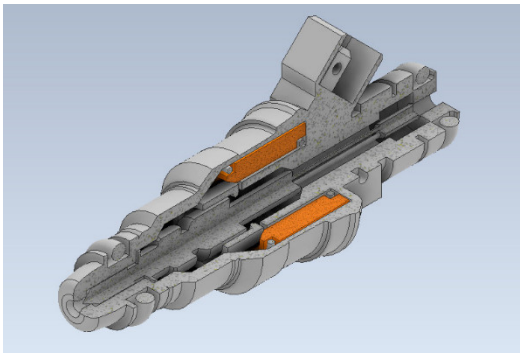
- Độ tự cảm L(x) của cuộn dây được tính như sau:

$$L(x) = \frac{N^2}{\sum_1^n \Re_i} \quad (10)$$

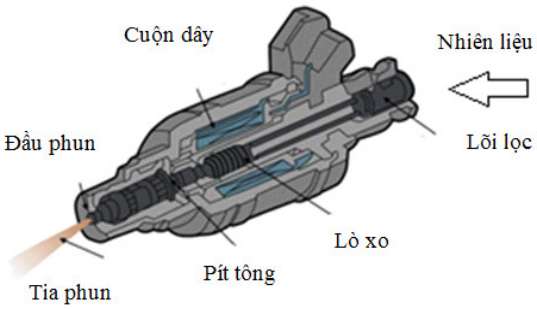
Trong đó, $\sum_1^n \Re_i$ là tổng từ trở của hệ thống

- Mối quan hệ giữa số vòng cuộn dây và cường độ điện trường, được thể hiện thông qua định luật Ampe:

$$\oint Hdl = N.i \quad (11)$$



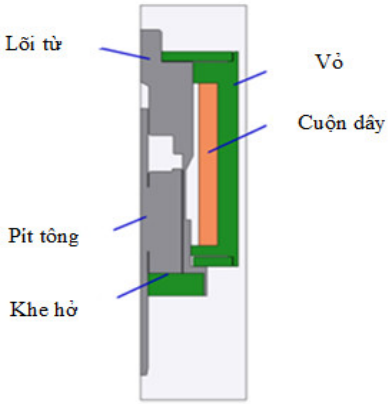
a) Mô phỏng 3D vòi phun



b) Mô phỏng 3D vòi phun

Hình 2. Vòi phun xăng trên đường ống nạp

2.2. Mô phỏng bằng phần mềm Maxwell



Hình 3. Mô hình của vòi phun điện từ trong Maxwell

Dựa trên mô hình của vòi phun điện từ thực tế trên hình 2, lập mô hình trong Maxwell. Bản vẽ hai chiều (2D) của kim phun điện từ được tạo trước trong phần mềm vẽ CAD trước khi nhập vào Maxwell để mô phỏng từ thông, từ trường và cảm ứng. Bước tiếp theo là tạo mô hình kim phun điện từ 2D trong Maxwell dựa trên các thông số kỹ thuật của một đầu phun điện từ thực, như thể hiện trong hình 3.

Thông số kỹ thuật và vật liệu: được thể hiện trong bảng 1 và 2.

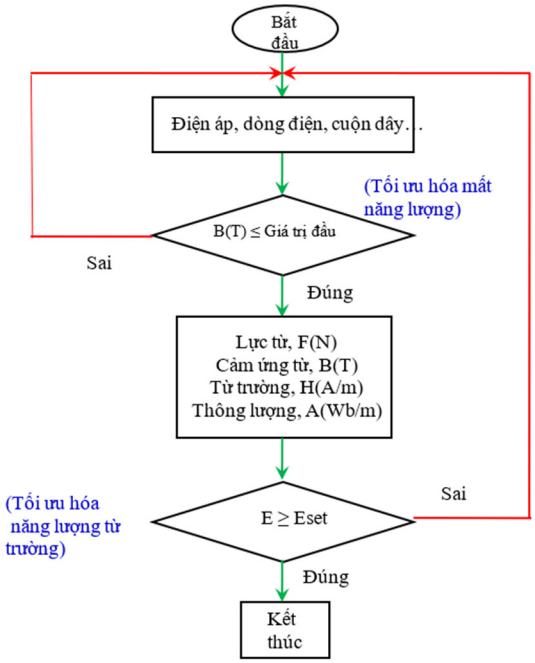
Bảng 1. Thông số kỹ thuật của vòi phun

TT	Thông số	Giá trị
1	Điện áp vào	12V
2	Điện trở cuộn dây	0,3Ω
3	Số vòng cuộn dây	40
4	Hành trình pít tông	0,1mm

Bảng 2. Thông số vật liệu

TT	Thành phần	Vật liệu
1	Pít tông	Thép không gỉ SCM440
2	Kim phun	Thép SKH51
3	Vỏ	Thép
4	Cuộn dây	Đồng
5	Lò xo	Thép không gỉ SWOSC-V

3. KẾT QUẢ



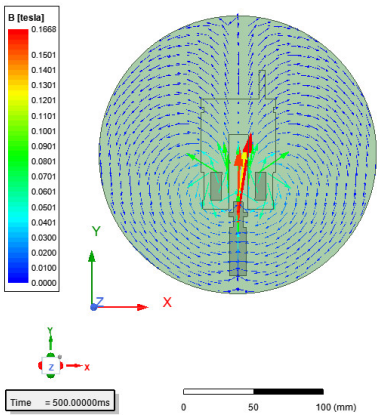
Hình 4. Thuật toán điều khiển

Để hiểu rõ hơn ảnh hưởng của các thông số đầu vào năng lượng từ trường có ích, cũng như tối ưu hóa được năng lượng từ trường này, lưu đồ thuật toán thể hiện trong hình 4 được xây dựng để mô tả quá trình đó. Thông số đầu vào được thay đổi: như điện áp, dòng điện, số vòng cuộn dây… Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu mô tả ảnh hưởng

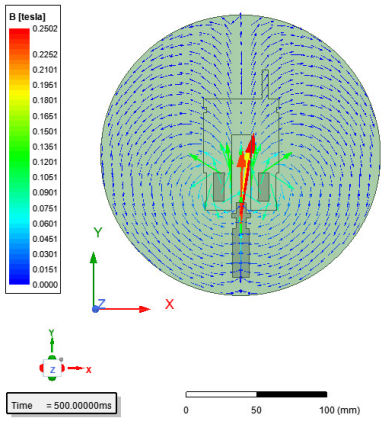
số vòng cuộn dây tới cảm ứng từ B. Kết quả nghiên cứu này sẽ được tối ưu hóa để cải tiến và phát triển các loại vòi phun điện từ có hiệu suất cao.

3.1. Ảnh hưởng của số vòng cuộn dây đến cảm ứng từ

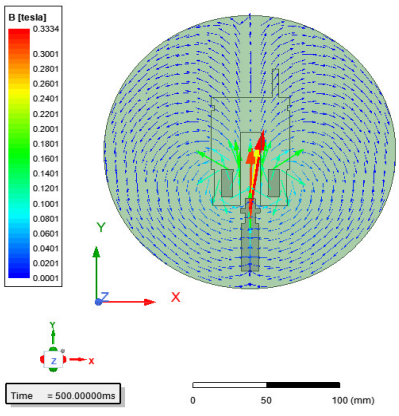
Trên hình 5 là mô hình vòi phun được mô phỏng trong Maxwell, khi cấp dòng điện vào cuộn dây, xuất hiện từ trường phân bố trong cuộn dây, véctơ cảm ứng từ xuất hiện vuông góc với véctơ lực từ. Khi tăng số vòng cuộn dây lần lượt từ 40, 60, 80 vòng, cảm ứng từ B tăng từ 0,167T lên 0,23T và 0,33T. Theo công thức số (1) do số vòng cuộn dây tăng lên, do vậy độ lớn cảm ứng từ tỉ lệ thuận với số vòng cuộn dây.



40 vòng



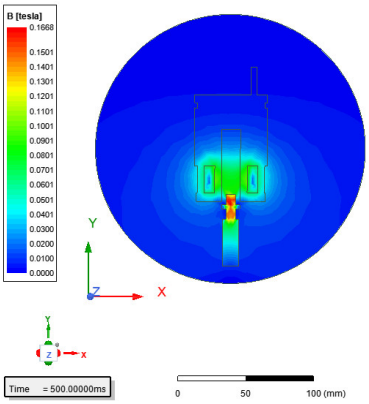
60 vòng



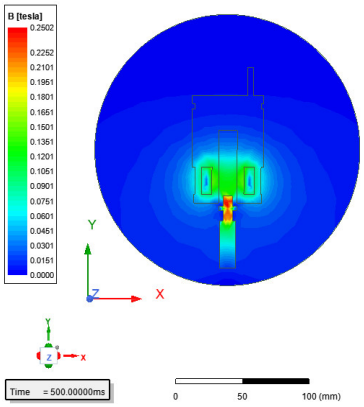
80 vòng

Hình 5. Sự ảnh hưởng của số vòng dây đến vector cảm ứng từ

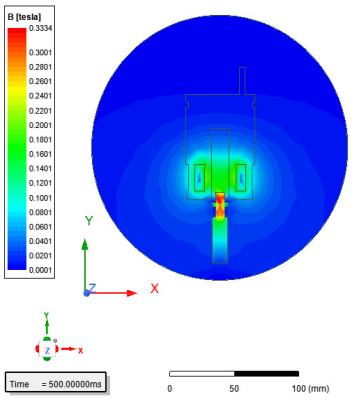
Trên hình 6 cho thấy sự phân bố từ trường trong vòi phun điện từ, cảm ứng từ cực đại nằm trên pit tông và khe hở không khí giữa các cuộn dây.



40 vòng



60 vòng



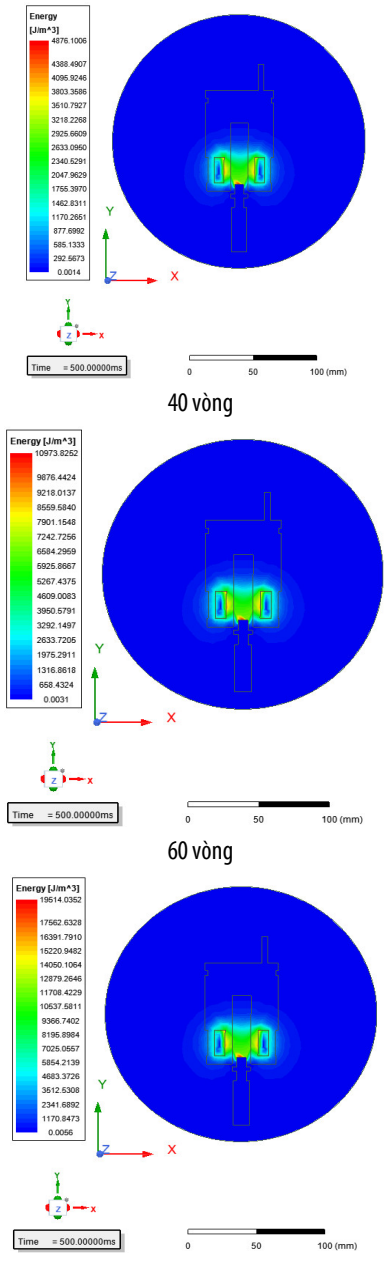
80 vòng

Hình 6. Sự ảnh hưởng của số vòng dây đến cảm ứng từ

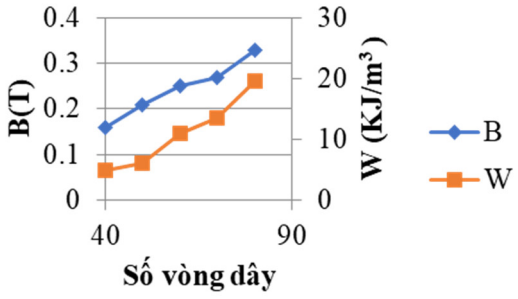
3.2. Ảnh hưởng của số vòng cuộn dây đến năng lượng điện từ có ích

Trên hình 7 thể hiện sự phân bố năng lượng từ trường có ích trong vòi phun điện từ, năng lượng từ trường có ích lớn nhất tập trung tại khe hở không khí giữa các cuộn dây. Khi tăng số vòng cuộn dây từ 40 đến 80 vòng, thì từ trường tăng theo dẫn đến năng lượng từ trường tăng từ 4,86kJ/m^3 lên 19,6kJ/m^3. Điều này được giải thích theo công thức số (2), năng lượng từ trường sinh ra phụ thuộc vào độ lớn của

cảm ứng từ, do vậy năng lượng từ trường cũng tỉ lệ thuận với số vòng cuộn dây.



Hình 7. Sự ảnh hưởng của số vòng dây đến năng lượng từ trường có ích



Hình 8. Kết quả sự gia tăng của cảm ứng từ và năng lượng từ trường

Hình 8 cho thấy kết quả của cảm ứng từ và năng lượng từ trường thay đổi khi tăng số vòng quay cuộn dây. Cụ thể sự biến đổi của số vòng cuộn dây tăng từ 40 đến 80 vòng thì độ lớn của cảm ứng từ tỉ lệ thuận với sự thay đổi đó. Do đó năng lượng từ trường tăng như thể hiện trong hình 8. Với kết quả này cho thấy sự hiệu quả tin cậy của phương pháp nghiên cứu, là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về lực điện từ của vòi phun.

4. KẾT LUẬN

Đặc tính của vòi phun điện từ đã được mô hình hóa và mô phỏng bằng phần mềm Maxwell. Các thông số ảnh hưởng đến lực điện từ của vòi phun: điện áp, dòng điện, số vòng cuộn dây…đã được tính toán và khảo sát. Những thay đổi về số vòng cuộn dây của vòi phun điện từ ảnh hưởng đáng kể đến cảm ứng từ và năng lượng từ trường có ích. Đặc biệt khi số vòng dây tăng từ 40 đến 80 vòng thì cảm ứng từ tăng từ 0,167T lên 0,33T, tăng 50,6%. Trong khi đó năng lượng điện từ có ích tăng từ 4.86 KJ/m^3 lên 19,6kJ/m^3, tăng 247,9%.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng để giúp tối ưu hóa hiệu suất của vòi phun điện tử, góp phần vào nghiên cứu cải tiến và chế tạo các loại vòi phun điện từ hiệu suất cao trên động cơ hiện hành. Ngoài ra kết quả là bước đầu để đánh giá ảnh hưởng các thông số đầu vào đến lực điện từ của vòi phun tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nguyen Oanh, 2008. *O to the he moi: Phun xang dien tu EFI*. Ho Chi Minh City General Publishing House.

[2]. Do Van Dzung, 2013. *Dien dong co va dieu khien dong co.* Vietnam National University, Ho Chi Minh City Press.

[3]. Tu sach Nhat Nghe Tinh, 2018. *Chuyen nganh ky thuat O to va xe may hien dai.* Tre Publishing House, Ho Chi Minh.

[4]. Hoang Xuan Quoc, 1996. *He thong phun xang dien tu dung tren xe du lich*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.

[5]. Haluska P., Guzzella L, 1998. *Control Oriented Modeling of Mixture Formation Phenomena in Multi-port Injection SI-Gasoline Engines*. SAE paper 980628

[6]. Ferrari A, Paolicelli F, Pizzo P, 2015. *The new-generation of solenoid injectors equipped with pressure-balanced pilot valves for energy saving and dynamic response improvement*. Appl Energ 2015; 151: 367–376

[7]. Olesky LM, Lavoie GA, Assanis DN, et al., 2014. *The effects of diluent composition on the rates of HCCI and spark assisted compression ignition combustion*. Appl Energ 2014; 124: 186–198

[8]. Zang S, Zhao Z, Zhao C, et al., 2016. *Experimental study of hydraulic electronic unit injector in a hydraulic free pis-ton engine*. Appl Energ 2016; 179: 888–898.

[9]. Xu S, Wang Y, Zhang X, et al., 2012. *Development of a novel common-rail type dimethyl ether (DME) injector*. Appl Energ 2012; 94: 1–12.

[10]. Cvetkovic D, Cosic I, Subic A, 2008. *Improved perfor-mance of the electromagnetic fuel injector solenoid actuator using a modeling approach*. Int J Appl Electrom 2008; 27: 251–273.

[11]. De X., Hong-Zi F., Peng L., Wei Z., Yun F. L, 2015. *Electromagnetic force on high-speed solenoid valve based on correlation analysis*. Int. J. Smart Sensing and Intelligent Systems 8,4, 2267-2285

[12]. Yin L., Wu C., 2016. *The characteristic analysis of the electromagnetic valve in opening and closing process for the gas injection system*. J. Electromagnetic Analysis and Applications 8, 8, 152-159.

[13]. Hung N. B., Lim O., Yoon S., 2017. *Effects of structural parameters on operating characteristics of a solenoid injector*. Energy Procedia, 105, 1771-1775.

[14]. Hung NB, Lim OT, 2019. *Improvement of electromagnetic force and dynamic esponse of a solenoid injector based on the effects of key parameters*. International Journal of Automotive Technology. Vol.20, No.5,pp.949-960 (2019)

[15]. Yang Q, Zhang H, Huang G, Zhang Y, Chen C, 2000. *A Study on the Fast Response Solenoid Valve in the Electronic Control of Diesel Engine*. FISITA World Automotive Congress, Korea, 2000.

[16]. Subic A., 2008. *Virtual design and development of compact fast-acting fuel injector solenoid actuator.* International Journal of Vehicle Design 46:309-327.

[17]. Zhang J, Ouyang G, 2009. *Optimization design of the electronically controlled injector*. International Conference on Mechatronics and Automation.

[18]. Tsai H.H, Tseng C.Y, 2010. *Detecting Solenoid Valve Deterioration in In-Use Electronic Diesel Fuel Injection Control Systems*. Sensors 10:7157-7169.

[19]. McTaggart-Cowan GP, Jones HL, Rogak SN, et al., 2006. *The effects of high-pressure injection on a compression-ignition, direct injection of natural gas engine*. J Eng Gas Turb Power 129: 579–588.

[20]. Chitsaz I, Saidi MH, Mozafari AA, et al., 2013. *Experimental and numerical investigation on the jet characteristics of spark ignition direct injection gaseous injector*. Appl Energ 105: 8–16.

[21]. Jang C, Lee J, 2005. *Experimental investigation of the effects of various factors on the emission characteristics of low-emission natural gas vehicles*. Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering 219: 825–831.

[22]. Allenby S, Chang WC, Megaritis A, et al., 2001. *Hydrogen enrichment: a way to maintain combustion stability in a natural gas fuelled engine with exhaust gas recirculation, the potential of fuel reforming*. Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering 215: 405–418.

[23]. Liu YF, Liu B, Zeng K, et al., 2012. *Performance and emission characteristics of a hydrogen-enriched compressed natural-gas direct-injection spark ignition engine diluted with exhaust gas recirculation.* Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering 226: 123–132.

[24]. Hall J, Hibberd B, Streng S, et al., 2017. *Compressed-natural-gas optimized downsized demonstrator engine.* Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering 232: 75–89.

[25]. Fiengo G, Gaete A, Palladino A, et al, 2013. *Common rail system for GDI engines: modelling, identification, and control*. London: Springer.

AUTHORS INFORMATION

Trinh Dac Phong, Nguyen Trung Kien, Chu Duc Hung, Nguyen Thanh Vinh, Nguyen Xuan Khoa

Hanoi University of Industry, Vietnam