

MÔ PHỎNG ĐẶC TÍNH TÍNH CỦA VẬT LIỆU TỪ BẰNG MÔ HÌNH CHEMICAL

A SIMULATION OF MAGNETIC MATERIALS' STATIC CHARACTERISTIC UTILIZING CHEMICAL MODEL

Nguyễn Tiến Dũng¹, Bùi Anh Tuấn²

¹Đại học Điện lực, ²Đại học Công nghiệp Dệt May Hà Nội

Ngày nhận bài: 18/08/2021, Ngày chấp nhận đăng: 17/06/2022, Phản biện: PGS. TS. Phạm Văn Bình

Tóm tắt:

Ngày nay, các phần mềm được hỗ trợ của máy tính là một giải pháp hữu hiệu, hỗ trợ nhà sản xuất các sản phẩm công nghệ rút ngắn thời gian thực hiện ở một số công đoạn của quá trình thiết kế, giảm chi phí tạo mẫu thử nghiệm nhưng vẫn đáp ứng các tiêu chí về hiệu suất và chất lượng. Trong khuôn khổ bài báo này, tác giả giới thiệu ngắn gọn các hiện tượng vật lý của vật liệu từ dưới tác động của cường độ từ trường ở tần số thấp. Một mô hình mô phỏng hiện tượng này dựa vào sự thay đổi các thông số chính của vật liệu được đề xuất. Chất lượng của mô hình mô phỏng sẽ được so sánh với các số liệu thực nghiệm trên mẫu vật liệu từ FeSi theo các chỉ tiêu đánh giá khác nhau. Mô hình này sẽ áp dụng để nghiên cứu mối quan hệ cơ – điện – từ trong các thiết bị điện – điện tử.

Từ khóa:

Vật liệu từ; Đường cong từ trễ; Tổn thất sắt từ; Vật liệu sắt từ; Mô hình mô phỏng từ trễ

Abstract:

Currently, computer-aided software is an effective solution, helping manufacturers of technology products shorten the lead time at some stages of the design process, reduce the cost of creating prototypes while still meeting performance and quality criteria. In this paper, the author briefly introduces the physical phenomena of magnetic materials under the influence of magnetic field strength at low frequency. A model to simulate this phenomenon based on the change of key parameters of the material is proposed. The quality of the simulation model will be compared with experimental data on material samples from FeSi according to different evaluation criteria. This model will be used to research the mechanical-electrical-magnetical relationship in electrical-electronic equipment.

Keywords:

Magnetic materials; Hysteresis loops; Ferro-magnetic loss; Ferro-magnetic; Hysteresis model.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Vật liệu từ ngày càng được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực công nghiệp cũng như trong cuộc sống hàng ngày như trong các động cơ điện, máy biến áp, đèn chiếu sáng,... Có thể nói, các mạch từ xuất hiện trong các hệ thống này chính là “trái tim” của quá trình trao đổi năng lượng và cần được nghiên cứu, cải tiến hoặc thay thế để

đạt được hiệu quả trao đổi năng lượng cao nhất. Bên cạnh đó, các hệ thống điện - điện tử ngày càng được đưa vào hoạt động ở nhiều môi trường “khắc nghiệt” như tần số cao hay nhiệt độ cao [1], [2]. Chính vì thế, để đánh giá được độ chính xác, phạm vi làm việc của các hệ thống này thì cần phải nghiên cứu sự tác động qua lại giữa các yếu tố như cơ - nhiệt,

nhiệt – từ, điện – từ [3], [4]... Hình 1 là một ví dụ để nghiên cứu hiệu suất làm việc, độ chính xác của một số thiết bị điện như: động cơ điện, máy biến dòng, máy biến áp,... dưới tác động qua lại giữa nhiệt độ và tổn thất công suất của vật liệu từ.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu sự tác động qua lại từ – nhiệt

Mặt khác, trong hoạt động nghiên cứu, sản xuất, để rút ngắn thời gian thiết kế, thử nghiệm cũng như đưa ra các kết quả dự báo, điều mà khó có thể thực hiện ngoài thực tế, thì việc xây dựng mô hình mô phỏng là rất cần thiết. Đối với việc nghiên cứu tính chất, hiệu quả truyền tải năng lượng, độ chính xác của các loại vật liệu từ dưới tác động của các yếu tố bên ngoài cũng rất cần các mô hình toán học [5], [6].

Trong khuôn khổ bài báo, tác giả sẽ trình bày các đặc tính cơ bản cũng như mô hình mô phỏng đặc tính từ trễ của các loại vật liệu từ. Qua đó, bạn đọc sẽ hiểu rõ hơn lý do tác giả cần phải xây dựng mô hình mô phỏng đặc tính tĩnh của vật liệu. Dựa trên cấu trúc mạng tinh thể cùng với các cơ chế “phản ứng hóa học” bên trong vật liệu sắt từ khi có tác động từ các yếu tố bên ngoài, mô hình toán học được đề xuất để mô phỏng hiện tượng này ở chế độ ổn định tĩnh của vật liệu, gọi tắt là mô hình Chemical. Các tham số của mô hình được xác định thông qua việc so sánh với kết quả thực nghiệm. Trong phần tiếp theo của bài báo, các kết quả thực nghiệm

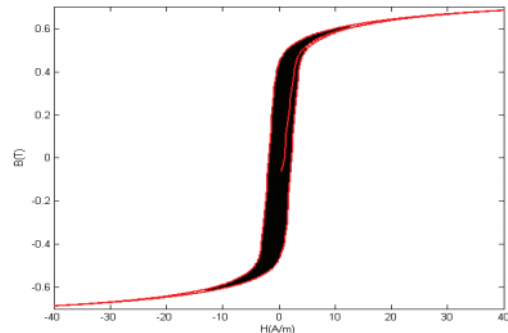
trên mẫu vật liệu FeSi ở những giá trị cường độ từ trường khác nhau với cùng một tần số sẽ được giới thiệu. Đây là các dữ liệu để làm cơ sở đánh giá hiệu quả của mô hình mô phỏng đề xuất.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC MÔ PHỎNG CÁC ĐẶC TÍNH CỦA VẬT LIỆU TỪ

2.1. Đặc tính của vật liệu từ

Dưới tác động của nguồn điện có các tần số kích thích khác nhau lên vật liệu từ, rất nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, vật liệu từ có hai đặc tính cơ bản là đặc tính tĩnh và đặc tính động [7].

2.1.1. Đặc tính tĩnh

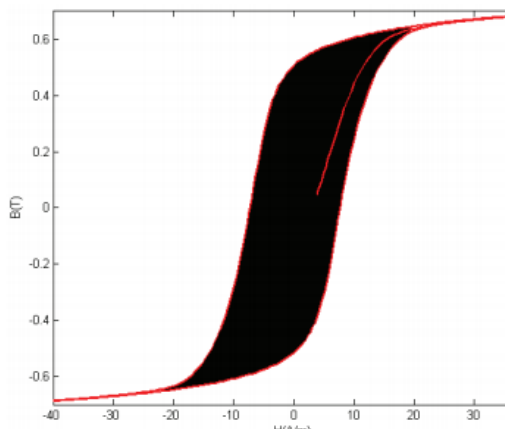


Hình 2. Đường cong từ trễ ở chế độ ổn định tĩnh của vật liệu ($f = 0,5\text{Hz}$)

Ở dải tần số thấp ($f \leq 1\text{Hz}$), dưới tác động của cùng một cường độ từ trường bên ngoài H , hình dạng đường cong từ trễ của vật liệu từ hầu như không thay đổi, trong trường hợp này, người ta gọi vật liệu ở trong tình trạng ổn định tĩnh và đường cong từ trễ tương ứng gọi là đường cong từ trễ ở chế độ ổn định tĩnh (Hình 2).

2.1.2. Đặc tính động

Khi tăng tần số kích thích với cùng một cường độ từ trường, bề rộng đường cong từ trễ sẽ tăng lên so với chế độ ổn định tĩnh (Hình 3) và người ta gọi là đặc tính động của vật liệu. Ở trạng thái này, tổn thất công suất trong vật liệu tăng lên do ngoài tác nhân gây ra bởi sự chuyển dịch của các thành Bloch còn có tổn thất do hiệu ứng bề mặt (skin effects) [7].



Hình 3. Đường cong từ trễ ở chế độ ổn định động của vật liệu ($f = 50\text{Hz}$)

2.2. Mô hình toán học mô phỏng đặc tính của vật liệu từ

Ở trạng thái làm việc bình thường, hầu hết các mạch từ trong các thiết bị điện – điện tử đều hoạt động ở tần số từ vài chục Hz đến vài trăm MHz. Theo phân tích ở trên, ở chế độ ổn định động, dòng điện cảm ứng chạy trong mạch từ gồm hai thành phần, một thành phần do chuyển dịch của các thành Bloch được tạo ra ngay ở chế độ ổn định tĩnh của vật liệu và một thành phần do hiệu ứng bề mặt tạo ra. Theo định luật Ampere, dòng điện cảm ứng chạy trong mạch từ khép kín được viết bởi phương trình [8]:

$$H_{app} = H_{stat}(B) + \lambda \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

trong đó:

- H_{app} là cường độ từ tác động lên vật liệu;
- B là độ từ cảm của vật liệu;
- $H_{stat}(B)$ là thành phần biểu diễn đặc tính của vật liệu ở chế độ ổn định tĩnh (do chuyển dịch của các thành Bloch);
- $\lambda(dB/dt)$ là thành phần được tạo ra do hiệu ứng bề mặt của vật liệu.

Hệ số λ biểu thị độ rộng của đường cong từ trễ, hệ số này phụ thuộc vào loại vật liệu. Giá trị λ được tính gần đúng bởi công thức [6]:

$$\lambda \approx \frac{\delta \cdot d^2}{12} \quad (2)$$

với δ là độ dẫn từ của vật liệu; d là độ dày của vật liệu.

Công thức (1) cho thấy, mô hình toán học mô phỏng đường cong từ trễ chỉ chứa duy nhất một hệ số λ nên có thể dễ dàng xác định được hệ số này bằng việc so sánh với đường cong thực nghiệm ở chế độ ổn định động.

Như vậy, để mô phỏng được đặc tính động của vật liệu cần phải xác định được hàm $H_{stat}(B)$ thông qua các mô hình toán học mô phỏng đường cong từ trễ ở chế độ ổn định tĩnh. Trên thực tế, có rất nhiều mô hình toán học cho phép mô phỏng đường cong từ trễ của vật liệu từ ở chế độ ổn định tĩnh như: mô hình Frölich, mô hình Rayleigh, mô hình Jiles – Atherton,... Mỗi mô hình có ưu, nhược điểm riêng. Mô hình Rayleigh có ưu điểm chứa ít tham số nhưng chỉ phù hợp để mô phỏng ở cường độ từ trường thấp. Mô hình Frölich cũng giống như mô hình Rayleigh, mô hình này chứa ít tham số nên thời gian xác định nhanh nhưng lại không mô phỏng được quá trình từ hóa của vật liệu. Mô hình Jiles – Atherton có ưu điểm là các tham số mô hình gắn liền với các thông số vật lý của vật liệu nên dễ dàng xác định nhưng mô hình này cũng không mô tả được quá trình từ hóa của vật liệu [7].

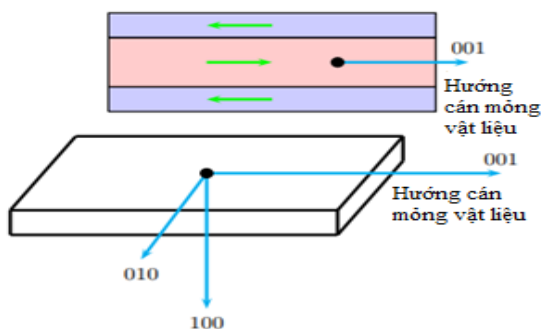
3. MÔ HÌNH CHEMICAL MÔ PHỎNG ĐƯỜNG CONG TỪ TRỄ Ở CHẾ ĐỘ ỔN ĐỊNH TĨNH

3.1 Mô hình toán học [9]

Mô hình mô phỏng Chemical được thiết lập dựa trên sự phân tích chuyển dịch của các mô men nguyên tử trong vật liệu từ, sự chuyển dịch này chính là nguồn gốc của sự từ hóa vật liệu từ. Đứng về mặt cấu trúc nguyên tử, dưới tác động của một từ trường bên ngoài có cường độ là H , bên trong vật liệu từ sẽ có hai cơ chế

phản ứng chuyển dịch chính: Chuyển dịch **thuận nghịch**, kéo theo sự dịch chuyển của các thành Bloch và chuyển dịch **quay** của các mô men nguyên tử, kéo theo sự thay đổi hướng của mô men từ hóa vật liệu. Dựa vào cơ chế phản ứng này, ta có thể xây dựng được dạng đường cong từ trễ của vật liệu và mô hình này gọi tắt là mô hình Chemical.

Hình 4 biểu diễn sự chuyển dịch thuận nghịch các mô men nguyên tử của vật liệu sắt từ FeSi. Từ Hình 3, ta thấy các mô men nguyên tử trong vật liệu sắt từ luôn song song và chuyển dịch theo hai chiều ngược nhau (+) và (-). Khi vật liệu sắt từ được kích thích bởi từ trường H theo hướng tinh thể (001), sự từ hóa vật liệu sẽ xảy ra, các mô men nguyên tử ngược chiều với cường độ từ trường H sẽ quay 180° . Những sự dịch chuyển này sẽ kéo theo sự chuyển động của các thành Bloch cho đến khi đạt đến trạng thái bão hòa từ, khi đó sẽ không còn một thành Bloch tồn tại, tất cả sẽ tạo thành một miền đồng nhất.



Hình 4. Chuyển dịch thuận nghịch của các mô men nguyên tử trong vật liệu từ FeSi

Sự chuyển dịch của các thành Bloch liên quan đến cấu trúc trật tự các mô men từ bên trong của vật liệu và được mô tả giống như một phản ứng hóa học của vật liệu khi có một từ trường bên ngoài tác động lên. Chuyển dịch thuận nghịch của các mô men nguyên tử biểu diễn bởi phương trình sau:

* Trường hợp cường độ từ trường H tăng:

$$J'(H) = J_0' \tanh \left[\left(\frac{\beta}{2\gamma} \right) \ln(e^{H\gamma} + b) - \frac{\beta H_c}{2} \right] \quad (3)$$

* Trường hợp cường độ từ trường H giảm:

$$J'(H) = J_0' \tanh \left[\left(\frac{\beta}{2\gamma} \right) \ln(e^{-H\gamma} + b) - \frac{\beta H_c}{2} \right] \quad (4)$$

trong đó:

- J_0' là độ phân cực từ cực đại chuyển dịch thuận nghịch của các thành Bloch;

- β là hệ số biểu thị độ dốc trên đoạn tuyến tính của đường cong từ trễ;

- H_c là lực kháng từ;

- b, γ là hai tham số liên quan đến trạng thái của vật liệu từ (được xác định sau mỗi lần chiều cường độ từ trường H thay đổi).

Các tham số b và γ được xác định bởi:

$$b = (c_0 - 1) \cdot e^{\pm \alpha H_i} \quad (5)$$

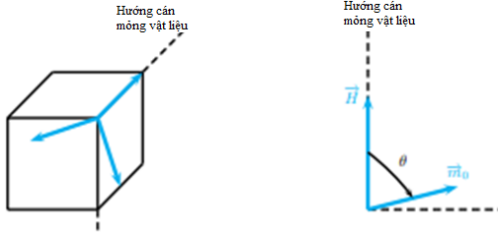
$$\gamma = \frac{\beta \ln(c_0)}{\ln(K)} \quad (6)$$

với c_0 là hằng số tương ứng với độ rộng của đường cong từ trễ; Dấu (+) ứng với trường hợp H tăng; dấu (-) ứng với trường hợp H giảm.

K là hằng số được xác định bởi:

$$K = e^{\beta H_c} \quad (7)$$

Ngoài ra, trong vùng bão hòa từ, độ từ cảm B sẽ tăng chậm khi cường độ từ trường H tiếp tục tăng. Sự tăng chậm của độ cảm ứng từ B ở đoạn bão hòa chính là do chuyển động quay của các mô men nguyên tử theo hướng dễ từ hóa (hướng 001 và 100 trên Hình 4). Chuyển dịch quay của các mô men từ được biểu diễn trên Hình 5.



Hình 5. Chuyển dịch quay của các mô men nguyên tử trong vật liệu FeSi

Phương trình mô tả sự từ hóa vật liệu do chuyển dịch quay của các mô men từ:

$$J''(H) = J_0'' \cdot \cos\theta \quad (8)$$

với: - J_0'' là độ phân cực từ cực đại chuyển dịch quay của các mô men;

- θ là góc hợp bởi chiều chuyển dịch của mô men và chiều của cường độ từ trường H.

Góc θ được xác định từ phương trình:

$$k_1 \cdot \sinh(k_2(\theta - \frac{\pi}{2})) + h \cdot \sin\theta - p_1 \quad (9)$$

trong đó:

- k_1 là hằng số hiệu chỉnh độ dốc của đường cong từ trễ;
- k_2 là hằng số hiệu chỉnh độ dốc của đường cong từ trễ ở đoạn gần bão hòa từ;
- p_1 là tham số tương ứng với tổn thất công suất ở đoạn gần bão hòa từ;
- h' là cường độ từ trường bên trong vật liệu, được tính gần đúng bởi:

$$h' = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln(b_1 + e^{\pm\alpha H}) \quad (10)$$

với b_1 , α là các tham số liên quan đến trạng thái của vật liệu từ được xác định sau mỗi lần H thay đổi chiều.

$$b_1 = (c_1 - 1) \cdot e^{\pm\alpha H_i} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\ln(c_1)}{\ln(A_{rot} \cdot e^{\pm H_i})} \quad (12)$$

với c_1 làm tham số liên quan đến các đường cong từ trễ thành phần.

Khi H tăng thì:

$$A_{rot} = \frac{e^{\alpha-D}}{\sin(\theta)}$$

$$D = k_1 \cdot \sinh(k_2(\theta - \frac{\pi}{2})) \quad (13)$$

Khi H giảm thì:

$$A_{rot} = \frac{e^{\alpha-D}}{\sin(\pi - \theta)}$$

$$D = k_1 \cdot \sinh(k_2(-\theta + \frac{\pi}{2})) \quad (14)$$

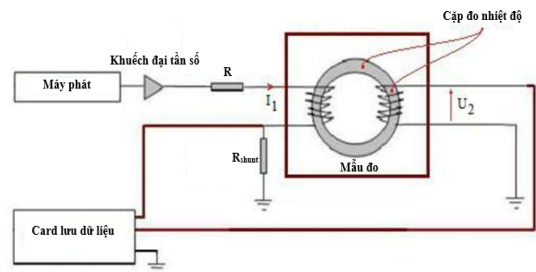
Như vậy, độ cảm ứng từ của vật liệu từ chính là tổng độ cảm ứng của chuyển dịch thuận nghịch và chuyển dịch quay của các mô men:

$$B(H) = J'(H) + J''(H) \quad (15)$$

Từ các phương trình (3) đến (14), ta thấy, mô hình mô phỏng Chemical chứa 9 tham số cần phải xác định, trong đó: 4 tham số liên quan đến quá trình chuyển dịch thuận nghịch (J_0' , H_C , β và c_0) và 5 tham số liên quan đến chuyển dịch quay (J_0'' , c_1 , k_1 , k_2 và p_1) của các mô men từ.

3.2. Xác định các tham số của mô hình Chemical

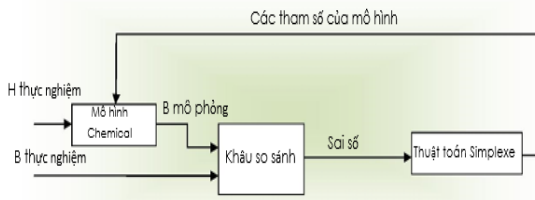
Dựa vào việc so sánh giữa đường cong từ trễ mô phỏng với đường cong từ trễ thực nghiệm, ta sẽ xác định được các tham số của mô hình Chemical. Hình 6 giới thiệu sơ đồ khối hệ thống đo lường đường cong từ trễ. Các kết quả đo giá trị (H_i , B_i) được lưu trong “Card lưu dữ liệu” dưới dạng Excel.



Hình 6. Sơ đồ hệ thống đo đường cong từ trễ

Để rút ngắn thời gian tính toán, các tham số của mô hình mô phỏng sẽ được xác

định bằng một trong các thuật toán tối ưu như: Thuật toán Simplexe của Nelder-Mead, thuật toán bầy đàn (PSO), thuật toán lai PSO+Nelder-Mead,... Với mô hình mô phỏng Chemical, chín tham số của mô hình được xác định bằng thuật toán Simplexe [10].



Hình 7. Xác định các tham số mô hình mô phỏng bằng thuật toán Simplexe

Đây là thuật toán được áp dụng cho các bài toán phi tuyến, được áp dụng rất phổ biến vì tính hội tụ nhanh. Lưu đồ xác định các tham số của mô hình mô phỏng bằng thuật toán Simplexe được trình bày như Hình 7.

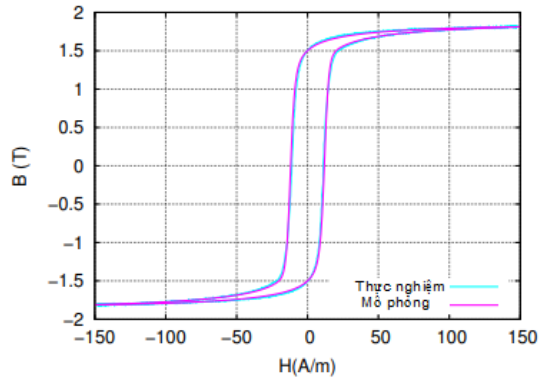
Khâu so sánh để xác định các tham số của mô hình mô phỏng (Hình 7) được sử dụng ở đây là sai số độ lệch bình phương giữa độ cảm ứng từ thực nghiệm và độ cảm ứng từ mô phỏng với cùng một cường độ từ trường H:

$$\varepsilon_1^2\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_{tn}(i) - B_{mp}(i)}{\max(B_{tn})} \right)^2 \cdot 100 \quad (16)$$

với: - B_{tn} và B_{mp} lần lượt là giá trị cảm ứng từ thực nghiệm và độ cảm ứng từ mô phỏng;

- n là số điểm lấy mẫu.

Các tham số của mô hình Chemical được xác định bởi đường cong từ trễ thực nghiệm ứng với $H = 150A/m$, $f = 0,2Hz$ (Hình 8) với sai số cho phép $\varepsilon_1^2 \leq 5\%$.



Hình 8. Đường cong từ trễ thực nghiệm và mô phỏng bằng mô hình Chimique ở $H = 150A/m$; $f = 0,2Hz$

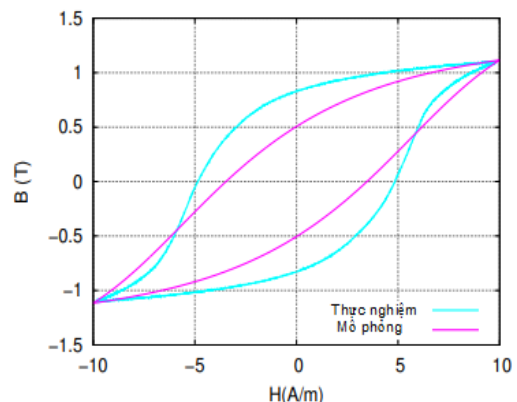
Giá trị các tham số của mô hình Chemical được xác định như trong Bảng 1.

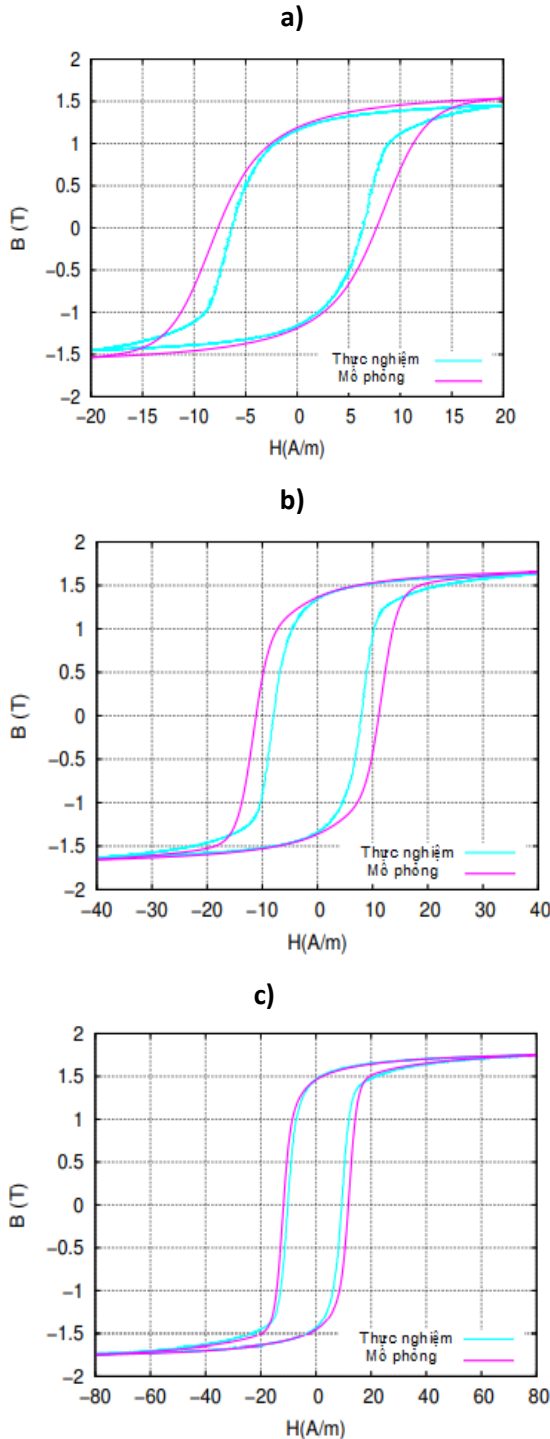
Bảng 1. Giá trị tham số của mô hình Chemical

Các tham số của chuyển động thuận nghịch				
$J_0'(T)$	$\beta(A/m)$	$H_c(A/m)$	$c_0(A/m)$	
1,217	0,725	12,12	11,8	
Các tham số của chuyển động quay				
$J_0''(T)$	$c_1(A/m)$	$p_1(A/m)$	k_1	k_2
0,713	2,71	9,663	4,37	3,561

4. ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA MÔ HÌNH MÔ PHỎNG CHEMICAL

Sau khi xác định các tham số của mô hình Chemical ở $H = 150A/m$. Các tham số này tiếp tục được sử dụng để mô phỏng và so sánh với các đường cong từ trễ thực nghiệm ở những giá trị cường độ từ trường khác nhau với cùng một tần số ($f = 0,2Hz$) trên mẫu vật liệu FeSi (Hình 9 a - d).





Hình 9. Đường cong từ trễ thực nghiệm và mô phỏng bằng mô hình Chemical ($f = 0,2\text{Hz}$)
a) $H = 10\text{A/m}$; b) $H = 20\text{A/m}$;
c) $H = 40\text{A/m}$; d) $H = 80\text{A/m}$

Ngoài sai số theo độ lệch bình phương như công thức (16), chất lượng

của mô hình mô phỏng Chemical còn được đánh giá thêm bởi hai tiêu chí:

* Sai số tương đối giữa tổn thất công suất sắt từ (diện tích đường cong từ trễ) thực nghiệm và mô phỏng:

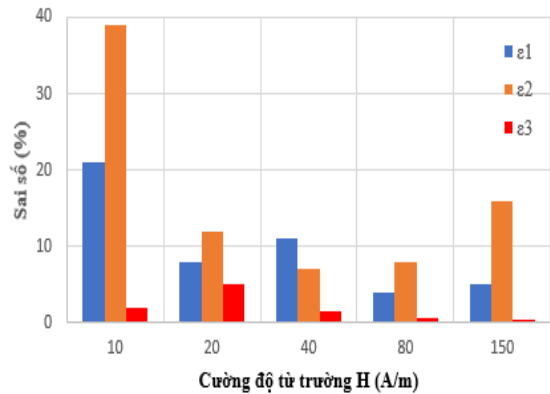
$$\varepsilon_2 \% = \frac{F(H_{tn}, B_{tn}) - F(H_{mp}, B_{mp})}{F(H_{tn}, B_{tn})} \cdot 100 \quad (17)$$

với $F(H_{tn}, B_{tn})$ và $F(H_{mp}, B_{mp})$ lần lượt là diện tích đường cong từ trễ thực nghiệm và mô phỏng.

* Sai số tương đối giữa độ cảm ứng từ cực đại thực nghiệm và mô phỏng với cùng một cường độ từ trường tác động H_{max} :

$$\varepsilon_3 \% = \frac{\max(B_{tn}) - \max(B_{mp})}{\max(B_{tn})} \cdot 10 \quad (18)$$

Chất lượng của mô hình mô phỏng Chemical ứng với các giá trị cường độ từ trường tác động khác nhau được thể hiện như trên Hình 10.



Hình 10. Biểu đồ các giá trị sai số của mô hình mô phỏng Chemical ứng với các giá trị của cường độ từ trường H

Từ Hình 10, ta thấy ở cường độ từ trường $H = 10\text{A/m}$, sai số ε_1 và ε_2 còn tương đối cao. Điều này chúng ta cũng có thể nhận thấy từ Hình 9a. Tuy nhiên từ giá trị $H = 20\text{A/m}$ trở lên, sai số ε_1 và ε_2 giảm mạnh ($\varepsilon_1 \leq 12\%$ và $\varepsilon_2 \leq 18\%$), còn sai số ε_3 luôn ở mức thấp (dưới 5%) trong tất cả các dải thử nghiệm của cường độ từ trường H. Những kết quả này cho thấy

hiệu quả của mô hình Chemical mô phỏng đặc tính tĩnh đối với mẫu vật liệu FeSi đáp ứng tốt trong một dải tương đối rộng của cường độ từ trường H.

5. KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu được giới thiệu trong bài báo giúp bạn đọc hiểu rõ hơn về sự thay đổi cơ, lý của vật liệu từ dưới những tác động của từ trường và tần số. Các kết quả thực nghiệm trên mẫu vật liệu FeSi đã cho thấy rõ sự thay đổi tính chất của vật liệu từ khi có các tác nhân bên ngoài tác động.

Dựa vào các quy luật “phản ứng” của vật liệu từ dưới tác động của các yếu tố bên ngoài, tác giả đã sử dụng mô hình toán học Chemical để mô phỏng đường cong từ trễ ở chế độ ổn định tĩnh. Đây là một khâu rất quan trọng trong việc mô hình hóa các thiết bị điện, điện tử nhằm rút ngắn thời gian thiết kế mẫu, giảm chi phí thử nghiệm, nâng cao khả năng dự báo, cảnh báo về độ chính xác, hiệu suất làm việc của thiết bị.

Các kết quả mô phỏng đã được so sánh với các kết quả thử nghiệm được thực hiện trên mẫu vật liệu FeSi. Dựa trên các tiêu chí so sánh, đánh giá được đưa ra, mô hình mô phỏng Chemical phù hợp với việc mô phỏng đặc tính tĩnh đối với vật liệu FeSi trong dải từ trường từ (10-150) A/m. Hiệu quả của mô hình này sẽ được tiếp tục đánh giá trên các mẫu vật liệu từ khác như: FeCo, FeNi, Amorphous, Nanocrystallin.

Mặc dù, thời gian tính toán của mô hình chậm hơn so với các mô hình khác (do chứa 9 tham số) như mô hình Frölich (chứa 2 tham số) hay mô hình Jiles – Atherton (chứa 5 tham số) nhưng mô hình Chemical mô tả được đầy đủ quá trình từ hóa của vật liệu từ và đặc biệt là độ chính xác mô phỏng cao hơn hai mô hình trên.

Mô hình Chemical có thể kết hợp với một số mô hình mô phỏng chế độ ổn định động của vật liệu từ như mô hình Flux tubes, DSHM hay mô hình DWM,... để tạo ra một mô hình mô phỏng từ trễ. Mô hình từ trễ kết hợp với một số mô hình khác để nghiên cứu các mối quan hệ qua lại giữa cơ – điện – từ trong các thiết bị điện – điện tử khi làm việc ở những chế độ khác nhau. Bên cạnh đó, việc nghiên cứu để tìm ra quy luật thay đổi của các tham số trong mô hình Chemical theo các điều kiện ràng buộc như tần số, nhiệt độ,... là hết sức cần thiết vì khi đó mô hình cho phép xác định được sự thay đổi các tính chất bên trong vật liệu ở điều kiện nhất định nào đó mà trên thực tế rất khó có thể thực hiện được. Đây là vấn đề đang còn bỏ ngỏ và cần được tiếp tục phân tích và nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bijan Kumar Gangopadhyay, “Understanding Ferromagnetic Hysteresis: A Theoretical Approach”, API Conference Proceedings, 2018.
- [2] Norio Takahashi, Masayuki Morishita, Daisuke Miyagi, Masanori Nakano, “Examination of magnetic properties of magnetic materials at high temperature using a ring specimen”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, pp. 548-551, 2010.
- [3] D.C.Jiles, “Introduction to magnetism and magnetic materials”, Springer, 1990.

- [4] Zhou, B., Zhao, Q., Liu, Z. et al, "High - temperature, ferromagnetic semiconductor with a field-tunable green fluorescent effect", NPG Asia Mater 12, Vol. 69, pp.2-6, 2020.
- [5] Giorgio Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials", IEEE Transactions on Magnetics, Vol .24, pp. 621-630, 1988.
- [6] P.Wilson, J.N.Ross, A.Brown, "Simulation of magnetic component models in electric circuits including dynamic thermal effects", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, pp. 55-65, 2002.
- [7] Sina Valadkhan, Kirsten Morris, Amir Khajepour, "Review and Comparison of Hysteresis Models for Magnetostrictive Materials", SAGE Journals, Vol. 20, Issue 2, pp. 131-142, 2009.
- [8] T.Chailoux, M.A.Raulet, C.Martin, C.Joubert, F.Sixdenier, L.Morel, "Homogenized magnetic diffusion: dependence of static hysteresis", EJEE, Vol.15, Issue 2-3, pp. 225-239, 2012.
- [9] A.Nouridine, G.Meunier, A.Lebouc. "A new hysteresis model generation – Application to the transverse axis of GO SiFe sheet", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, Issue 5, pp. 3340-3344, 2001.
- [10] Jeffrey C. Lagarias, James A.Reeds, Margaret H.Wright and Paul E.Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions", SIAM Journal of Optimization, Vol. 9, pp. 112–147, 1998.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Nguyễn Tiên Dũng** tốt nghiệp Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; nhận bằng Thạc sĩ ngành điều khiển và tự động hóa tại Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2014

Lĩnh vực nghiên cứu: Điều khiển hệ thống bù để nâng cao chất lượng điện năng, tự động hóa trong các nhà máy, khu công nghiệp.



Tác giả **Bùi Anh Tuấn** tốt nghiệp Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2001, chuyên ngành Hệ thống điện. Bảo vệ thành công luận án Tiến sĩ kỹ thuật điện tại trường Đại học Claude Bernard – Lyon1, Cộng hòa Pháp năm 2011.

Lĩnh vực nghiên cứu chính: vật liệu điện tử, bù công suất phản kháng, chất lượng điện năng và năng lượng mới, công nghiệp 4.0.