

Bài báo nghiên cứu

**ỨNG DỤNG VI ĐIỀU KHIỂN ARDUINO VÀ CẢM BIẾN LỰC
ĐỂ CHẾ TẠO BỘ THÍ NGHIỆM KHẢO SÁT LỰC TỪ
TÁC DỤNG LÊN ĐOẠN DÂY DẪN THẲNG CÓ DÒNG ĐIỆN***Nguyễn Thành Phúc, Lê Lâm Anh Phi, Ngô Minh Nhựt,**Nguyễn Hoàng Long, Nguyễn Tấn Phát*, Nguyễn Lâm Duy**Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam***Tác giả liên hệ: Nguyễn Tấn Phát – Email: phatnt@hcmue.edu.vn**Ngày nhận bài: 12-12-2019; ngày nhận bài sửa: 07-01-2020; ngày duyệt đăng: 20-8-2020***TÓM TẮT**

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu nhằm chế tạo một bộ thí nghiệm cho phép khảo sát lực do từ trường của một nam châm điện chữ U tác dụng lên dòng điện chạy trong các đoạn dây của một cạnh khung dây hình chữ nhật bằng cách sử dụng cảm biến lực và vi điều khiển Arduino. Bộ thí nghiệm có khả năng đo đặc giá trị lực tương tác từ tự động, liên tục với độ sai biệt giữa giá trị tính theo lý thuyết và giá trị đo thực nghiệm nhỏ hơn 10%. Vi điều khiển Arduino được lập trình để thay đổi góc hợp bởi từ trường và dòng điện một cách tự động. Tuy nhiên, sai số của phép đo còn lớn khi giá trị lực từ nhỏ hơn 2,5mN và việc ghi nhận số liệu thực nghiệm chưa được hoàn toàn tự động hoá. Nếu khắc phục được hạn chế này, bộ thí nghiệm có thể được sử dụng để giúp giáo viên phát triển năng lực vật lý cho học sinh về phần lực từ trong môn Vật lý 12 thuộc Chương trình giáo dục phổ thông 2018.

Từ khóa: tương tác từ; dòng điện thẳng; Arduino; cảm biến lực; thiết bị thí nghiệm

1. Giới thiệu

Vật lý học là một bộ môn khoa học thực nghiệm, do đó các thí nghiệm đóng vai trò rất quan trọng trong việc giảng dạy và học tập môn Vật lý. Không những giúp người học hiểu sâu hơn về các kiến thức lý thuyết, các thí nghiệm còn góp phần làm tăng thêm tính hấp dẫn của môn học, rèn luyện và phát triển năng lực vật lý và tư duy nhạy bén với các hiện tượng vật lý cho học sinh. Trong Chương trình giáo dục phổ thông 2018, các kiến thức về từ trường và lực từ trong môn Vật lý lớp 12 chiếm thời lượng đáng kể (khoảng 18 tiết) (Ministry of Education and Training, 2018). Tuy nhiên, các kiến thức này lại tương đối trừu tượng, khó hiểu đối với học sinh, đòi hỏi giáo viên cần phải sử dụng thí nghiệm để mô tả và giải thích cho học sinh.

Hiện nay, bộ thí nghiệm khảo sát lực từ và cảm ứng từ PTVL2038 [Book and Educational Equipment Joint Stock Company of Ho Chi Minh City, 2019] được trang bị ở nhiều trường trung học phổ thông trên địa bàn Thành phố Hồ Chí Minh. Mặc dù bộ thí

Cite this article as: Nguyen Thanh Phuc, Le Lam Anh Phi, Ngo Minh Nhut, Nguyen Hoang Long, Nguyen Tan Phat, & Nguyen Lam Duy (2020). The application of arduino microcontroller and force sensor in fabricating an apparatus examining magnetic force acting on a current-carrying straight wire. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 17(8), 1327-1335.

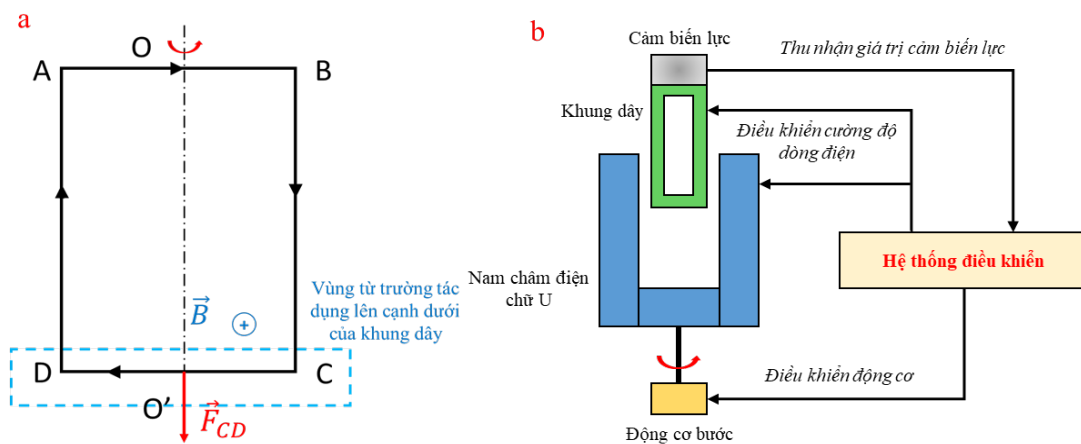
nghiệm này có thể khảo sát sự phụ thuộc của lực từ theo góc hợp bởi từ trường và dòng điện nhưng việc hiệu chỉnh cân đòn đến vị trí cân bằng đòi hỏi thao tác rất cẩn thận của người làm thí nghiệm, lực kế có độ chính xác không cao là những hạn chế của bộ thí nghiệm này. Ngoài ra, trên thị trường còn có bộ thí nghiệm EX-9933 (Pasco, 2019) kết hợp sử dụng các dụng cụ đo hiện số do Công ty thiết bị giáo dục Pasco sản xuất. Giáo viên và học sinh có thể sử dụng bộ thí nghiệm này ngay trên lớp học nhờ ưu điểm nhỏ gọn và kết quả đo đạc có độ chính xác cao. Tuy nhiên, bộ thí nghiệm này chưa được trang bị rộng rãi do giá thành cao, không phù hợp với thực tế của hầu hết các trường phổ thông.

Ngày nay, việc ứng dụng khoa học, công nghệ vào giảng dạy đang là một xu thế tất yếu trong việc đổi mới phương pháp dạy học Vật lí. Nhiều nghiên cứu trong nước (Nguyen et al., 2018, p.92-97; Ngo et al., 2018, p.113-122; Nguyen et al., 2019, 81-89) đã ứng dụng các cảm biến, vi điều khiển để chế tạo các bộ thí nghiệm giúp cho việc đo đạc, xử lí số liệu được thuận lợi và dễ dàng hơn.

Do đó, với mục đích chế tạo một bộ thí nghiệm có khả năng ứng dụng được vào quá trình dạy học phát triển năng lực trong môn Vật lí lớp 12, bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu và chế tạo bộ thí nghiệm khảo sát lực do từ trường tác dụng lên dòng điện chạy qua dây dẫn thẳng có sử dụng vi điều khiển Arduino, cảm biến lực và các linh kiện điện tử hiện có trên thị trường Việt Nam để có thể khảo sát tự động lực từ với độ chính xác cao, hỗ trợ người dùng trong việc thao tác, các vấn đề xử lí số liệu, vẽ đồ thị để so sánh với các kết quả từ lí thuyết.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở lí thuyết và mô hình bộ thí nghiệm



Hình 1. (a) Cơ sở lí thuyết và (b) mô hình của bộ thí nghiệm

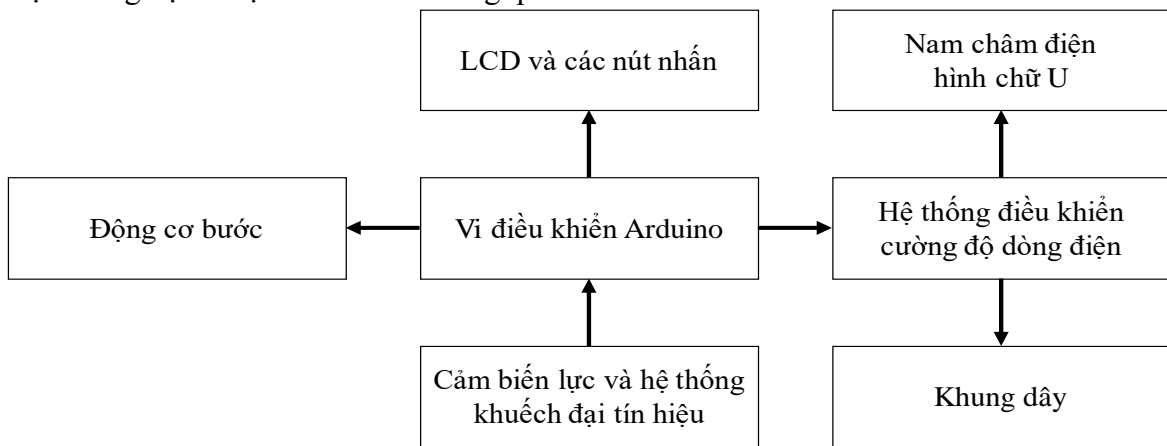
Mô hình bộ thí nghiệm được mô tả trong Hình 1 gồm một nam châm điện chữ U được gắn chặt vào động cơ bước và có thể xoay quanh trục OO' (Hình 1a); khung dây có một đầu gắn cố định vào cảm biến lực, đầu còn lại đặt trong vùng từ trường tạo ra bởi nam châm. Khi có dòng điện chạy qua, nam châm điện tạo ra một từ trường có cảm ứng từ B , tác dụng lực từ F lên đoạn dây dẫn thẳng có dòng điện cường độ I chạy qua đặt trong vùng từ trường đó. Theo định luật Ampere, lực từ F được xác định bởi:

$$F = IBl \sin \alpha \tag{2.1}$$

trong đó, l và α lần lượt là chiều dài của đoạn dây và góc hợp bởi phương của từ trường và dòng điện. Trong mô hình này, góc α thay đổi liên tục khi động cơ bước quay khung dây ABCD theo trục OO' , cảm ứng từ B và cường độ dòng điện I chạy qua dây dẫn được điều khiển bởi hệ thống điều khiển trung tâm. Do tính chất đối xứng, lực từ tác dụng lên cạnh AD và BC cân bằng nhau, do đó giá trị mà cảm biến lực đo đạc được chính là lực từ tác dụng lên cạnh dưới CD của khung dây. Mô hình này có thể nghiên cứu mối liên hệ giữa lực tương tác từ F và góc α cũng như so sánh mối liên hệ này với biểu thức lí thuyết (2.1) của Định luật Ampere.

2.2. Hệ thống điều khiển trung tâm

Hình 2 mô tả hệ thống điều khiển trung tâm, trong đó vi điều khiển Arduino có nhiệm vụ ghi nhận giá trị của cảm biến lực sau khi đã được khuếch đại tín hiệu; điều khiển cường độ dòng điện qua nam châm điện và khung dây thông qua hệ thống điều khiển cường độ dòng điện. Đồng thời, vi điều khiển Arduino điều khiển động cơ bước để làm quay nam châm. Các kết quả thí nghiệm được hiển thị trên màn hình LCD và các thông số khi thực hiện thí nghiệm được điều chỉnh thông qua các nút nhấn.

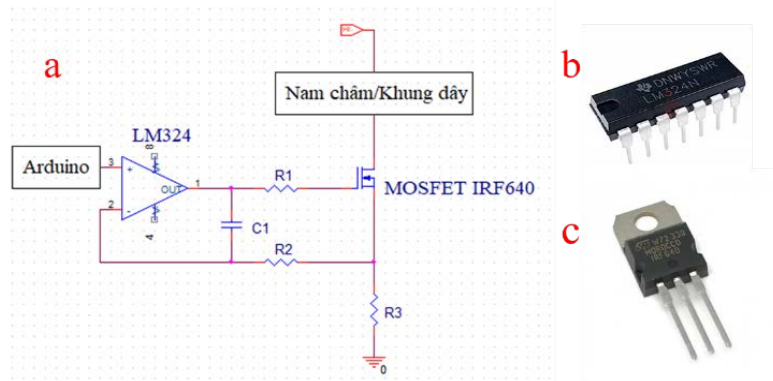


Hình 2. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển trung tâm

2.3. Hệ thống điều khiển cường độ dòng điện

Hệ thống điều khiển cường độ dòng điện (Hình 3) sử dụng một vi mạch khuếch đại thuật toán OpAmp (Operational Amplifier) LM324 và một transistor hiệu ứng trường MOSFET N-Chanel. Khi Mosfet chuyển từ trạng thái ngắt sang trạng thái dẫn bằng tín hiệu điều khiển từ Arduino là V_c đã được khuếch đại bởi OpAmp LM324, dòng điện từ nguồn điện thế sẽ đi qua điện trở R_3 và nam châm hoặc khung dây (Hình 3a). Vì dòng điện qua hai điện trở R_1 và R_2 rất nhỏ nên cường độ dòng điện qua nam châm hoặc khung dây bằng với dòng điện qua điện trở R_3 , và được xác định bởi công thức:

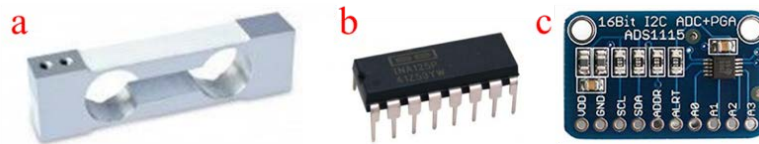
$$I = \frac{V_c}{R_3} \tag{2.2}$$



Hình 3. (a) Sơ đồ hệ thống điều khiển cường độ dòng điện sử dụng (b) OpAmp khuếch đại LM324 và (c) Mosfet N-Chanel IRF640

2.4. Cảm biến lực và hệ thống khuếch đại tín hiệu

Cảm biến lực là thiết bị dùng để chuyển đổi lực hoặc trọng lượng thành tín hiệu điện. Trong nghiên cứu này, cảm biến lực Wägezellen 104 0,3kg (Hình 4a) được sử dụng vì có độ bền cao, độ nhạy 0,9mV/V phù hợp với mô hình thí nghiệm. Tín hiệu ngõ ra của cảm biến lực được khuếch đại bằng vi mạch khuếch đại vi sai INA125P (Hình 4b) và được chuyển đổi từ dạng tín hiệu tương tự (analog) sang tín hiệu số (digital) bằng bộ chuyển đổi ADC ADS1115 (Hình 4c) trước khi đưa vào vi điều khiển Arduino. Hệ thống khuếch đại tín hiệu hoạt động ổn định, ít tiêu hao năng lượng, có khả năng khuếch đại lên tới 10.000 lần và cho sai số của giá trị lực đo đạc được là 0,2mN.

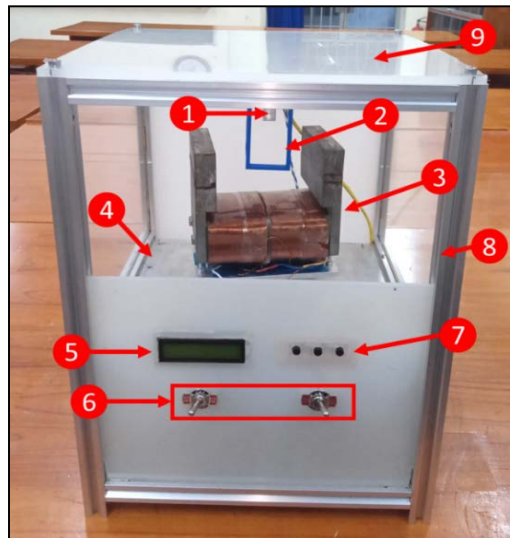


Hình 4. (a) Cảm biến lực Wägezellen 104 0,3kg và hệ thống khuếch đại tín hiệu sử dụng (b) IC khuếch đại vi sai INA125P và (c) bộ chuyển đổi ADC ADS1115

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Bộ thí nghiệm hoàn chỉnh

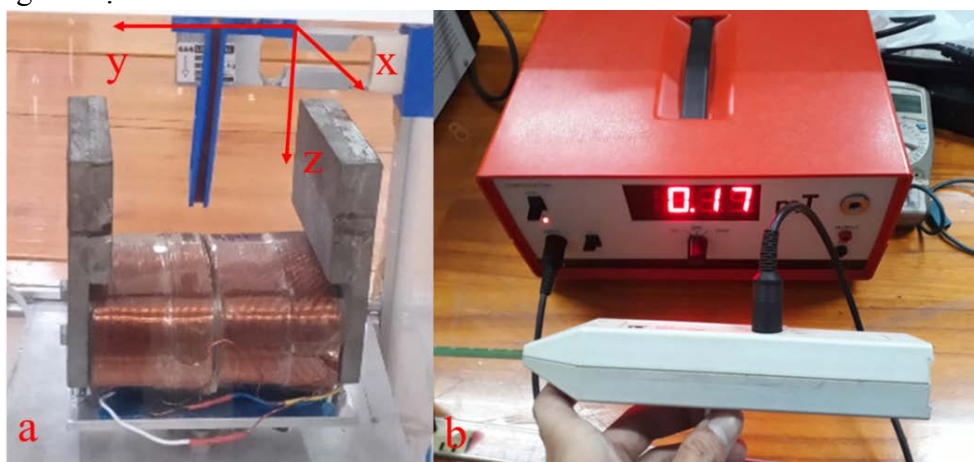
Bộ thí nghiệm hoàn chỉnh được mô tả như Hình 5. Để đảm bảo sự bền vững, ít rung động có thể ảnh hưởng đến kết quả đo, khung nhôm (8) được nghiên cứu thiết kế và chế tạo để chứa toàn bộ hệ thống thí nghiệm. Cảm biến lực (1) được gắn cố định vào khung nhôm. Khung dây (2) gồm 10 vòng dây, kích thước 4cm x 9cm với cạnh trên được gắn cố định vào cảm biến lực và cạnh dưới nằm trong vùng từ trường đều do nam châm chữ U (3) tạo ra. Tấm nhôm (4) cố định với khung nhôm với mục đích làm bệ đỡ cho nam châm điện chữ U và bảo vệ hệ thống điều khiển. Hệ thống điều khiển nhận tín hiệu từ cảm biến lực và điều chỉnh dòng điện đi qua khung dây và nam châm điện thông qua hệ thống dây dẫn. Các tấm mica (9) được ốp vào khung nhôm góp phần làm chắc chắn bộ thí nghiệm, hạn chế những tác động ngoại vi tác dụng vào cảm biến lực trong quá trình đo, giúp việc đo đạc được chính xác hơn. Hai công tắc (6) đảo chiều dòng điện đi qua nam châm điện hình chữ U và khung dây. Màn hình LCD 16x2 (5) và các nút nhấn (7) hiển thị kết quả đo và thay đổi các thông số trong quá trình làm thí nghiệm.



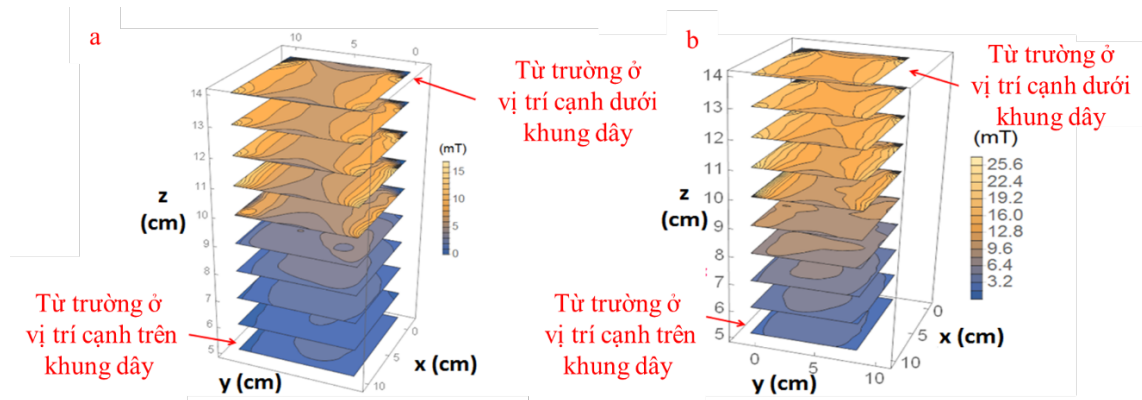
Hình 5. Bộ thí nghiệm hoàn chỉnh bao gồm: (1) cảm biến lực; (2) khung dây $4\text{cm} \times 9\text{cm}$; (3) nam châm điện; (4) giá đỡ; (5) màn hình LCD 16×2 ; (6) công tắc đảo chiều; (7) các nút nhấn; (8) hệ thống khung nhôm và (9) các tấm mica

3.2. Khảo sát từ trường tạo ra bởi nam châm điện

Theo lí thuyết đã xây dựng ở phần 2.1, từ trường giữa hai bản kim loại của nam châm điện chữ U là từ trường đều. Tuy nhiên trong thực tế, từ trường này không đều. Ngoài ra, vẫn có lực từ tác dụng lên cạnh trên của khung dây nên ảnh hưởng tới kết quả đo của cảm biến lực. Do đó, việc khảo sát từ trường do nam châm điện chữ U tạo ra là cần thiết. Tiến hành khảo sát từ trường trong vùng không gian có kích thước $12\text{cm} \times 10\text{cm} \times 9\text{cm}$ với hệ toạ độ được biểu diễn như Hình 6a khi cường độ dòng điện qua nam châm có giá trị lần lượt là $0,5\text{A}$ và $1,0\text{A}$. Giá trị cảm ứng từ được đo đạc bằng đầu dò từ trường do hãng Leybold sản xuất (Hình 6b) với độ chính xác là $0,01\text{mT}$ và giới hạn đo là 20T . Kết quả đo đạc được biểu diễn trong đồ thị Hình 7.



Hình 6. Khảo sát từ trường do nam châm điện hình chữ U tạo ra với hệ toạ độ được mô tả trong hình (a) bằng thiết bị đo cảm ứng từ (b)



Hình 7. Đồ thị biểu diễn giá trị cảm ứng từ do nam châm điện chữ U gây ra khi cường độ dòng điện qua nam châm điện là 0,5A (a) và 1,0A (b)

Có thể thấy rằng, từ trường do nam châm điện chữ U tạo ra là không đều và có sự chênh lệch tương đối lớn giữa mặt phẳng chứa cạnh trên và cạnh dưới của khung dây. Tuy nhiên, giá trị cảm ứng từ trong mỗi mặt phẳng tương đối đồng đều, do đó giá trị lực từ tác dụng lên khung dây có thể được xác định bằng cách tính trung bình các giá trị cảm ứng từ trong mặt phẳng chứa cạnh trên và cạnh dưới. Các giá trị này được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị cảm ứng từ trung bình trong mặt phẳng chứa cạnh trên và cạnh dưới của khung dây ở các giá trị cường độ dòng điện qua nam châm khác nhau

Cường độ dòng điện đi qua nam châm (A)	Cảm ứng từ trung bình ở cạnh dưới \bar{B}_d (mT)	Cảm ứng từ trung bình ở cạnh trên \bar{B}_t (mT)	Tỉ số $\frac{\bar{B}_d}{\bar{B}_t}$
I = 0,5	6,72	1,61	4,17
I = 1,0	13,26	3,12	4,10
I = 1,5	19,01	4,72	4,03
I = 2,0	25,40	6,14	4,13

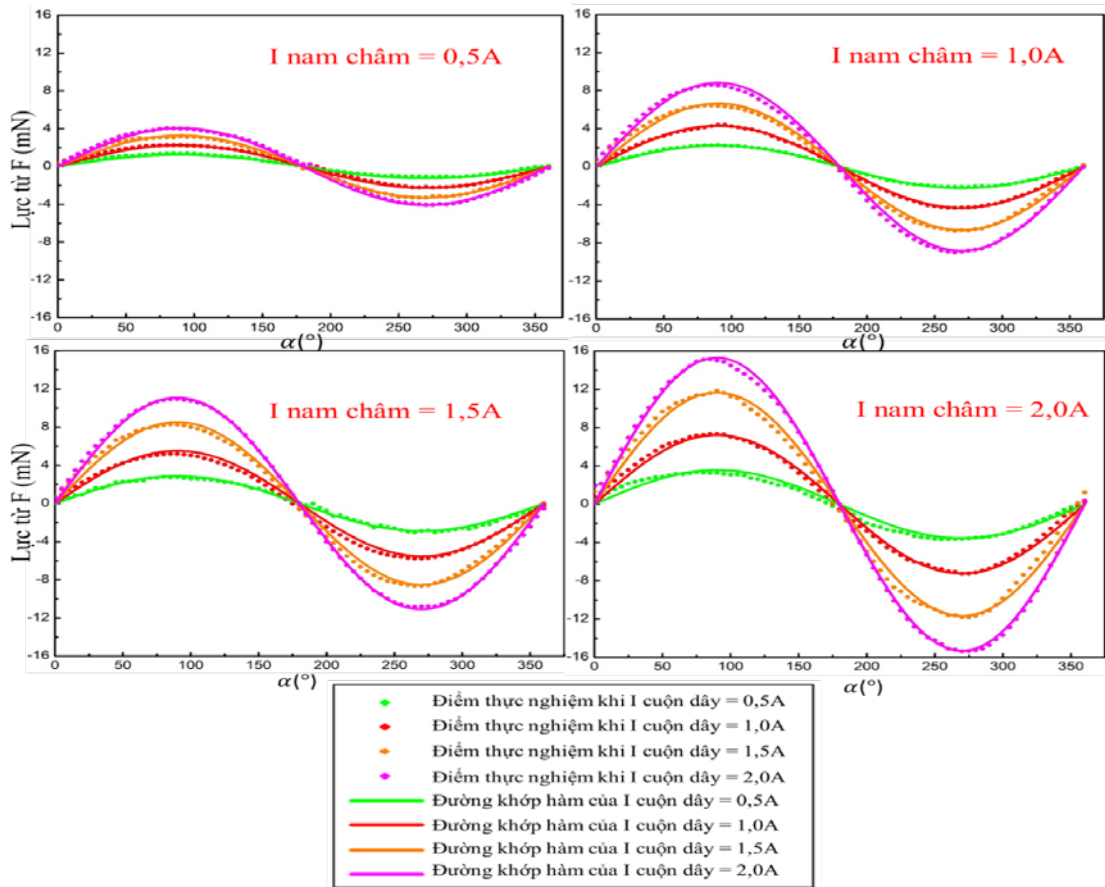
Từ Bảng 1, giá trị trung bình của cảm ứng từ trong mặt phẳng chứa cạnh trên và cạnh dưới của khung dây tỉ lệ thuận với cường độ dòng điện đi qua nam châm. Quan trọng hơn, tỉ số giữa giá trị cảm ứng từ trung bình trong mặt phẳng chứa cạnh dưới và cạnh trên gần như là hằng số khi cường độ dòng điện qua nam châm thay đổi, do đó các giá trị này có thể được sử dụng khi tính toán giá trị lực từ tác dụng lên khung dây.

3.3. Thí nghiệm khảo sát lực từ tác dụng lên khung dây đặt trong từ trường

Thực hiện thí nghiệm khảo sát lực từ tác dụng lên khung dây đặt trong từ trường ở các giá trị cường độ dòng điện qua nam châm và khung dây khác nhau để đánh giá sự ổn định và chính xác của bộ thí nghiệm. Vì khung dây gồm N vòng dây và lực từ tác dụng lên cả cạnh trên và cạnh dưới của khung dây nên công thức (2.1) được viết lại thành:

$$F = NI(\bar{B}_d - \bar{B}_t)l \sin \alpha \tag{3.1}$$

trong đó, \bar{B}_t và \bar{B}_d lần lượt là cảm ứng từ trung bình trong mặt phẳng chứa cạnh trên và cạnh dưới của khung dây được liệt kê trong Bảng 1. Động cơ bước được điều khiển để làm quay nam châm quanh trục với bước quay 5^0 và đo lực từ ở từng vị trí tương ứng. Tiến hành thí nghiệm với cường độ dòng điện qua nam châm và khung dây tăng dần từ 0,5A đến 2,0A. Các kết quả thu đo đạc được thể hiện trong các đồ thị Hình 8.



Hình 8. Các điểm thực nghiệm và đường khớp hàm biểu diễn sự phụ thuộc của lực từ tác dụng lên khung dây khi cường độ dòng điện qua nam châm tăng dần từ 0,5A đến 2,0A

Khớp các điểm thực nghiệm đo đạc được theo hàm:

$$Y = A \sin X \tag{3.2}$$

trong đó A là một hằng số và Y, X lần lượt là lực tương tác từ và góc α hợp giữa phương từ trường và dòng điện. So sánh công thức (3.1) và (3.2) thì:

$$A = NI (\overline{B_d} - \overline{B_t}) l \tag{3.3}$$

chính là độ lớn của lực từ cực đại tác dụng lên khung dây. Các kết quả thực nghiệm được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm khảo sát giá trị lực từ cực đại tác dụng lên khung dây

$N = 10$ vòng dây; $l = 0,04$ m						
$I_{\text{nam châm}}$ (A)	$\overline{B_d} - \overline{B_t}$ (mT)	$I_{\text{khung dây}}$ (A)	F_{max} lí thuyết (mN)	F_{max} thực nghiệm (mN)	Hệ số tương quan (%)	Độ sai biệt δ (%)
0,5	5,11	0,5	1,0	1,2	98,3	20
		1,0	2,0	2,3	98,9	15
		1,5	3,1	3,3	99,4	6,5
		2,0	4,0	4,1	99,2	2,5
1,0	10,14	0,5	2,0	2,2	99,7	10

		1,0	4,1	4,3	99,9	4,9
		1,5	6,1	6,7	99,4	9,8
		2,0	8,0	8,8	99,6	10
1,5	14,29	0,5	2,9	2,8	99,7	3,4
		1,0	5,7	5,5	99,9	3,5
		1,5	8,6	8,5	99,4	1,2
		2,0	11,4	11,1	99,6	2,6
2,0	19,26	0,5	3,9	3,6	99,7	7,7
		1,0	7,7	7,2	98,7	6,5
		1,5	11,6	11,7	99,5	1,0
		2,0	15,4	15,3	99,2	1,0

Từ Bảng 2, hệ số tương quan giữa các dữ liệu thực nghiệm và các đường khớp hàm rất cao, giá trị thấp nhất là 98,3%, chứng tỏ mối quan hệ giữa lực tương tác từ F và góc α hợp giữa phương từ trường và dòng điện theo qui luật hàm sin, phù hợp với công thức lí thuyết (2.1) và (3.1) đã được xây dựng. Điều này khẳng định các giá trị thu được từ cảm biến lực có độ chính xác cao và đáng tin cậy.

Ngoài ra, độ sai biệt δ giữa lực từ cực đại F_{\max} theo lí thuyết và thực nghiệm đều nhỏ hơn 10%, chỉ có hai trường hợp đầu tiên trong Bảng 2, chứng tỏ cảm biến lực chưa đủ độ nhạy để có thể đo đạc chính xác các lực có giá trị nhỏ hơn 2,5mN. Đây là một điều cần cải tiến trong bộ thí nghiệm này.

4. Kết luận

Từ các kết quả thu được, có thể thấy rằng bộ thí nghiệm hoạt động ổn định, sai số tương đối không quá 10%. Ngoài ra, bộ thí nghiệm này còn cho phép ta kiểm chứng được bằng thực nghiệm về mối quan hệ giữa lực từ tác dụng lên dây dẫn mang dòng điện với các đại lượng vật lí khác được suy ra từ tính toán lí thuyết, thông qua hệ số tương quan thu được không dưới 98,3%. Tuy nhiên, bộ thí nghiệm còn tồn tại một số hạn chế như cảm biến lực vẫn chưa thể đo đạc chính xác các giá trị quá nhỏ hơn 2,5mN và bộ thí nghiệm vẫn chưa thể hoàn toàn tự động cập nhật các giá trị lên máy vi tính. Nếu cải tiến được các hạn chế này, bộ thí nghiệm có thể được sử dụng vào quá trình dạy học phát triển năng lực vật lí cho học sinh về từ trường trong chương trình Vật lí 12.

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Chúng tôi xin gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện nghiên cứu thông qua Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường mã số CS.2018.19.52.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Book and Educational Equipment Joint Stock Company of Ho Chi Minh City (9/12/2019). An apparatus about magnetic force and electromagnetic induction [Bo thi nghiem luc tu va cam ung dien tu]. Retrieved from: <https://www.stb.com.vn/vi/thia-t-ba-thpt/vat-li-thpt/bo-tn-luc-tu-va-cam-ung-dien-tu.html>
- Pasco (9/12/2019). Magnetic Forces on Wires Experiment. Retrieved from: https://www.pasco.com/prodCatalog/EX/EX-9933_magnetic-forces-on-wires-experiment/index.cfm
- Ministry of Education and Training (2018). *Chương trình giáo dục phổ thông môn Vật lý [Physics General Education Curriculum]*. Hanoi.
- Ngo, M. N., & Nguyen, L. D. (2018). Ung dung cong nghe Bluetooth va cam bien anh sang de thiet ke he thong ve cuong do van giao thoa, nhieu xa [Applying Bluetooth wireless technology and light intensity sensor to fabricate a light interfering drawing system]. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 15(12), 113-122.
- Nguyen, T. P., Phan, N. H., Tran, T. P., Ngo, M. N., & Nguyen, L. D. (2018). Che tao bo thi nghiem do dac tu dong dac tuyen Volt-Ampere mot so linh kien dien tu nham phuc vu giang day Vat li 11 trung hoc pho thong [Fabricating an experimental system to automatically measure I-V curves of some devices for teaching in high school (Grade 11)]. *Journal of Science The University of Danang – University of Science and Education*, 298(3), 92-97.
- Nguyen, T. P., Quach, U. L., Ngo, M. N., & Nguyen, L. D. (2019). Ung dung cam bien luc va vi dieu khien Arduino de thiet ke bo thi nghiem khao sat he so ma sát [The application of force sensor and Arduino microcontroller in designing an apparatus examining the frictional coefficient]. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 16(4), 81-89.

**THE APPLICATION OF ARDUINO MICROCONTROLLER
AND FORCE SENSOR IN FABRICATING AN APPARATUS EXAMINING
MAGNETIC FORCE ACTING ON A CURRENT-CARRYING STRAIGHT WIRE**

Nguyễn Thành Phúc, Lê Lam Anh Phi, Ngô Minh Nhut,

Nguyễn Hoàng Long, Nguyễn Tân Phát, Nguyễn Lâm Duy*

Physics Department, Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam

**Corresponding author: Nguyễn Tân Phát – Email: phatnt@hcmue.edu.vn*

Received: December 12, 2019; Revised: January 07, 2020; Accepted: August 20, 2020

ABSTRACT

An apparatus, which is fabricated by using Arduino microcontroller and force sensor, is used to examine the magnetic force on the current-carrying rectangular wire frame caused by the magnetic field generated by a U-shaped electromagnet. This apparatus can measure the magnetic force automatically and continuously with less than 10% error between theory and experiment. The Arduino microcontroller is programmed to rotate the electromagnet around a fix axis, i.e. changing the angle formed by the direction of the magnetic field and the electric current. However, the force sensor has not been optimal in below 2,5mN force regime and the data acquisition has not been fully automated. Once these limits are overcome, high-school teachers can use this apparatus to develop students' competencies in Physics grade 12 of General Education Program 2018.

Keywords: magnetic field; current-carrying wire; Arduino; force sensor; experimental apparatus