

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
KHOA VẬT LÝ**

LÊ LÂM ANH PHI

**ỨNG DỤNG VI ĐIỀU KHIỂN ARDUINO
VÀ CẢM BIẾN LỰC CHẾ TẠO BỘ THÍ
NGHIỆM KHẢO SÁT LỰC TỪ
TÁC DỤNG LÊN DÒNG ĐIỆN THẲNG
PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VẬT LÝ 11**

LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP

TP. HỒ CHÍ MINH – 2019

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
KHOA VẬT LÝ

LÊ LÂM ANH PHI

ỨNG DỤNG VI ĐIỀU KHIỂN ARDUINO
VÀ CẢM BIẾN LỰC CHẾ TẠO BỘ THÍ
NGHIỆM KHẢO SÁT LỰC TỪ
TÁC DỤNG LÊN DÒNG ĐIỆN THẲNG
PHỤC VỤ GIẢNG DẠY VẬT LÝ 11

Ngành: SƯ PHẠM VẬT LÝ

Mã số: 105

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC
ThS. NGUYỄN TẤN PHÁT

TP. HỒ CHÍ MINH – 2019

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	3
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....	6
2.1. Lực từ tác dụng lên dòng điện thẳng đặt trong từ trường.....	6
2.1.1. Công thức	6
2.1.2. Đồ thị	7
2.1.3. Các đại lượng cần kiểm chứng, đo đạc	8
2.2. Vi điều khiển Arduino Nano	9
2.2.1. Lịch sử hình thành	9
2.2.2. Cấu tạo vi điều khiển Arduino Nano CH340	9
2.2.3. Chức năng mạch Arduino Nano CH340 trong mô hình	9
2.3. Cảm biến lực (Loadcell)	12
2.4. IC khuếch đại đo lường INA125P	13
2.5. Một số linh kiện khác	13
2.5.1. Động cơ điện một chiều	13
2.5.2. Mạch tạo dao động sử dụng IC555	14
2.5.3. Hệ truyền động bánh răng	16
2.5.4. Relay	17
2.5.5. Encoder	17
2.5.6. LCD 16x02 – I2C	18
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	20
3.1. Mô hình thí nghiệm	20
3.1.1. Hệ cơ học	20
3.1.2. Nam châm điện	20
3.1.3. Hệ thống truyền động	21
3.1.4. Hệ đồng hồ và biến trở điều chỉnh dòng điện	22
3.2. Mạch điện tử	23
3.2.1. Nguyên lý hoạt động của mạch điện tử	23
3.2.2. Chức năng của từng bộ phận trong hệ thống	23
3.3. Mạch điện tử hoàn chỉnh	24

3.3.1. Cách sử dụng mạch điện tử	25
3.4. Kết quả đo đạc	26
3.4.1. Khảo sát từ trường bên trong nam châm chữ U	26
3.4.2. Khảo sát lực từ tác lên dòng điện thẳng	32
CHƯƠNG 4. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN.....	39
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	40
PHỤ LỤC	42

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Bộ thí nghiệm đo lực từ, cảm ứng từ do Công ty Cổ phần Sách và Thiết bị trường học TP. Hồ Chí Minh (a) [1], Công ty TNHH Ngày Chủ Nhật (SUNDAY) (b) [2] và Công ty Pasco (Mỹ) (c, d) sản xuất [3]	3
Hình 1.2. Bộ thí nghiệm đo lực từ bằng hệ thống cân điện tử của nhóm sinh viên Trần Trọng Tân và Nguyễn Khánh – Khoa Vật Lý, trường Đại học Sư phạm TP. Hồ Chí Minh [4].....	4
Hình 2.1. Sơ đồ thể hiện lực từ tác dụng lên một đoạn dây dẫn thẳng có dòng điện chạy qua	7
Hình 2.2. Đồ thị biểu diễn mối liên hệ giữa lực từ \vec{F} theo góc α (a) hoặc theo $\sin\alpha$ (b) theo lý thuyết	7
Hình 2.3. Vi điều khiển Arduino Nano CH340 (a) và sơ đồ chân (b) [6]	9
Hình 2.4. Sơ đồ nguyên lý mạch cầu Wheatstone của loadcell (a) [8] và hình ảnh mô phỏng cấu tạo cảm biến lực – loadcell (b) [9]	12
Hình 2.5. IC khuếch đại đo lường INA125P (a) và sơ đồ chân (b).....	13
Hình 2.6. Mô hình nguyên lý hoạt động của động cơ DC.....	14
Hình 2.7. IC NE555 (a) và sơ đồ chân (b).....	14
Hình 2.8. Sơ đồ mạch nguyên lý mạch dao động đa hài [11].....	15
Hình 2.9. Đồ thị sóng vuông cấp cho động cơ DC hoạt động [11]	16
Hình 2.10. Nam châm điện và bánh răng trực chính (a), hệ thống ba bánh răng truyền động của động cơ DC (b)	16
Hình 2.11. Relay (a) và sơ đồ chân (b) [13]	17
Hình 2.12. Mô hình nguyên lý hoạt động của encoder [15].....	18
Hình 2.13. Màn hình LCD 16x02 (a) và module I2C (b).....	18
Hình 3.1. Hệ cơ học và các thông số kích thước	20
Hình 3.2. Nam châm chữ U được tích hợp cổ góp (a) và hệ thống chổi than kết nối với nguồn vào (b).....	21
Hình 3.3. Hệ động cơ và truyền động của bộ thí nghiệm.....	22

Hình 3.4. Hệ đồng hồ đo và điều chỉnh chiều, cường độ dòng điện qua nam châm (số 1) và khung dây (số 2).....	22
Hình 3.5. Sơ đồ nguyên lý của hệ điện tử trong mô hình.....	23
Hình 3.6. Mạch điện tử sau khi hàn linh kiện.....	24
Hình 3.7. Vùng từ trường khảo sát bên trong nam châm điện.....	27
Hình 3.8. Đầu dò đo cảm ứng từ trước (a) và sau khi reset (b)	28
Hình 3.9. Hệ đo cảm ứng từ đã được lắp đặt và tiến hành đo bằng cách di chuyển hệ theo ba trục x, y, z	29
Hình 3.10. Đồ thị ba chiều biểu diễn độ lớn cảm ứng từ giữa hai bản kim loại của nam châm khi dòng điện qua nam châm có cường độ là 0.5A (a) và 1.0A (b).....	30
Hình 3.11. Bố trí hệ đo lực từ	32
Hình 3.12. LCD hiển thị chuyển sang mode 2 và ghi nhận kết quả đo	33
Hình 3.13. LCD chuyển sang mode 3 và hiển thị các giá trị đã ghi nhận	34
Hình 3.14. Đồ thị sự phụ thuộc giá trị lực từ \vec{F} vào góc quay α (a) và đồ thị sự phụ thuộc của lực từ theo $\sin\alpha$ (b) khi $I_{\text{nam châm}} = 0.5\text{A}$	34
Hình 3.15. Đồ thị sự phụ thuộc giá trị lực từ \vec{F} vào góc quay α (a) và đồ thị sự phụ thuộc của lực từ theo $\sin\alpha$ (b) khi $I_{\text{nam châm}} = 1.0\text{A}$	35

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật nổi bật của Arduino Nano CH340	10
Bảng 2. Bảng thống kê các linh kiện trong mạch điện tử	24
Bảng 3. Độ lớn cảm ứng từ trung bình ở cạnh trên ($z = 5\text{cm}$) và cạnh dưới ($z = 14\text{cm}$) của khung dây	31
Bảng 4. Hệ số góc của các đồ thị ứng với từng mức cường độ dòng điện	36
Bảng 5. Kiểm chứng giá trị độ lớn cảm ứng từ từ thực nghiệm đo đạc và tính toán.....	37

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất đến Thầy Nguyễn Tấn Phát, người đã dìu dắt, hướng dẫn tôi trong suốt quá trình thực hiện khóa luận này. Thầy đã hết mình hỗ trợ, hướng dẫn tôi mọi thứ và động viên tinh thần những lúc tôi gặp khó khăn, để giúp tôi hoàn thành tốt khóa luận.

Tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Thầy Nguyễn Lâm Duy, người đã thường xuyên quan tâm, nhắc nhở, hỗ trợ ý tưởng và kỹ thuật để tôi cải tiến mô hình của mình hoạt động thật tốt.

Bên cạnh đó tôi cũng xin gửi lời tri ân đến Thầy Nguyễn Hoàng Long và Thầy Ngô Minh Nhựt đã hỗ trợ về mặt cơ khí, điện tử ngay từ những ngày đầu tôi bắt tay vào xây dựng mô hình.

Sẽ là thiếu sót nếu thiếu lời tri ân từ đáy lòng đến các Thầy, Cô giảng viên Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh nói chung và Thầy, Cô khoa Vật Lý nói riêng – những người đã giúp tôi trang bị kiến thức tốt, đặt nền tảng vững chắc để tôi có thể hoàn thành khóa luận.

Cuối cùng tôi xin gửi lời cảm ơn đến gia đình và bạn bè – những người luôn ở bên cạnh, quan tâm san sẻ và tạo động lực giúp tôi thực hiện khóa luận.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 11 tháng 4 năm 2019

Sinh viên

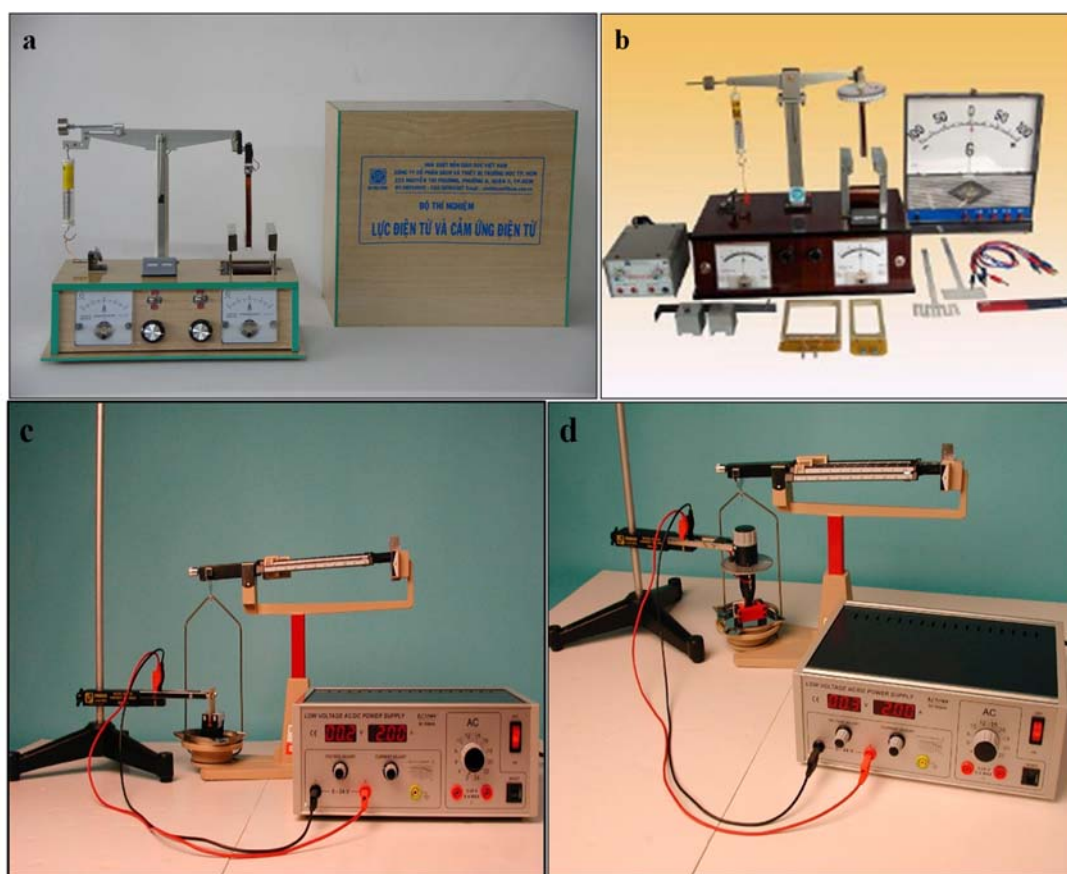
Lê Lâm Anh Phi

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan tất cả các số liệu, hình ảnh và kết quả thu được trong khoá luận này đều là do tôi thực hiện. Khoá luận tốt nghiệp này là sản phẩm của đề tài Nghiên cứu khoa học cấp cơ sở mã số CS.2018.19.52 do TS. Nguyễn Lâm Duy chủ trì.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

Vật Lý là một bộ môn khoa học thực nghiệm, do đó việc tăng cường các hoạt động thực nghiệm cho học sinh là một trong những giải pháp hiệu quả nhằm nâng cao chất lượng dạy và học. Trong chương trình Vật Lý 11 Trung học Phổ thông (THPT), từ trường chiếm tỉ trọng nội dung kiến thức lớn. Tuy nhiên, các kiến thức này lại tương đối trừu tượng, khó hiểu, do đó đòi hỏi phải có các bộ thí nghiệm để mô tả và giảng giải cho học sinh. Hiện nay, đã có nhiều bộ thí nghiệm từ đơn giản đến hiện đại được sản xuất ở cả trong và ngoài nước nhằm phục vụ cho quá trình giảng dạy nội dung này ở trường Trung học phổ thông.



Hình 1.1. Bộ thí nghiệm đo lực từ, cảm ứng từ do Công ty Cổ phần Sách và Thiết bị trường học TP. Hồ Chí Minh (a) [1], Công ty TNHH Ngày Chủ Nhật (SUNDAY) (b) [2] và Công ty Pasco (Mỹ) (c, d) sản xuất [3].

Cụ thể ở phần Từ trường, nhiều trường THPT được trang bị bộ thí nghiệm khảo sát lực từ và cảm ứng từ do Công ty Cổ phần Sách và Thiết bị trường học TP. Hồ Chí Minh (hình 1.1a) và công ty TNHH Ngày Chủ Nhật (SUNDAY, hình 1.1b) sản xuất để giảng dạy các kiến thức về từ trường trong chương trình Vật Lý 11. Ngoài ra, có thể kể đến bộ thí nghiệm tương tự kết hợp sử dụng các dụng cụ đo hiện số của Công ty Pasco (Mỹ) sản xuất (hình 1.1c, d). Với các bộ thí nghiệm này, giáo viên và học sinh có thể thực hiện thí nghiệm khảo sát lực từ tác dụng lên dòng điện thẳng tại lớp học nhờ ưu điểm nhỏ gọn và dễ sử dụng. Tuy nhiên, các thí nghiệm phải thực hiện thủ công nên đòi hỏi thao tác tỉ mỉ và cẩn thận, việc xử lý số liệu và vẽ đồ thị biểu diễn cũng tốn nhiều thời gian.



Hình 1.2. Bộ thí nghiệm đo lực từ bằng hệ thống cân điện tử của nhóm sinh viên Trần Trọng Tân và Nguyễn Khánh – Khoa Vật Lý, trường Đại học Sư phạm TP.Hồ Chí Minh [4].

Bên cạnh đó, đề tài nghiên cứu khoa học “Bộ thí nghiệm đo lực từ bằng hệ thống cân điện tử” của nhóm sinh viên Trần Trọng Tân – Nguyễn Khánh được

thực hiện năm 2016 tại trường Đại học Sư Phạm TP. Hồ Chí Minh (hình 1.2) cũng đã khảo sát lực từ tác dụng lên dòng điện thẳng đặt trong từ trường theo cường độ dòng điện qua dây dẫn thẳng, theo góc lệch giữa cường độ dòng điện và cảm ứng từ cho kết quả đáng tin cậy. Tuy nhiên, bộ thí nghiệm này chưa thể tự động hoá việc thay đổi góc lệch giữa cường độ dòng điện và cảm ứng từ, việc kết nối với máy vi tính, hiển thị số liệu, đồ thị và khả năng tương tác với người sử dụng vẫn còn là khuyết điểm cần được cải tiến ở thiết bị này.

Nhằm mục đích chế tạo một bộ thí nghiệm vừa có thể thao tác thí nghiệm thủ công, vừa khảo sát tự động và chính xác tương tác từ trên dòng điện thẳng và cập nhật các giá trị lực từ lên máy tính để dễ dàng xử lý, vẽ đồ thị kiểm chứng với lý thuyết, tôi chọn thực hiện đề tài “Ứng dụng vi điều khiển Arduino và cảm biến lực chế tạo bộ thí nghiệm khảo sát lực từ tác dụng lên dòng điện thẳng phục vụ giảng dạy Vật Lý 11 THPT” làm khoá luận tốt nghiệp của mình.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Nhằm mục đích đo đặc lực tương tác từ giữa nam châm điện và dòng điện thẳng, đồng thời khảo sát sự phụ thuộc của lực tương tác này theo góc lệch giữa cảm ứng từ và dòng điện thẳng một cách tự động, tôi sử dụng vi điều khiển, kết hợp cảm biến lực (Loadcell) và một số vi mạch điện tử khác để chế tạo mô hình thí nghiệm. Nội dung của chương này đề cập đến các bộ phận được sử dụng trong mô hình như vi điều khiển $F = NBIL\sin\alpha$ Arduino Nano, cảm biến lực, IC khuếch đại đo lường INA125P, động cơ DC tích hợp bộ giảm tốc và encoder, IC tạo dao động 555, relay và hệ thống bánh răng truyền chuyển động.

2.1. Lực từ tác dụng lên dòng điện thẳng đặt trong từ trường

2.1.1. Công thức

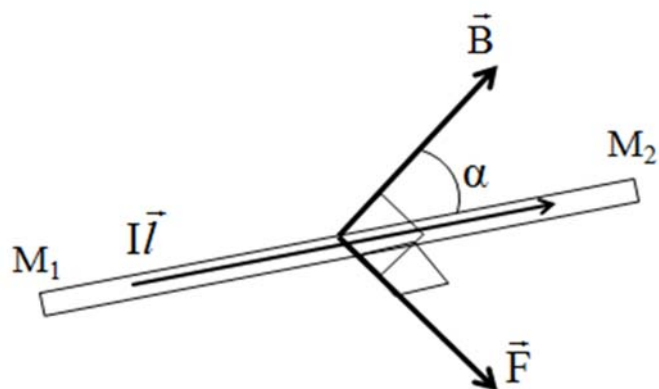
Khi một dây dẫn thẳng có chiều dài l , mang dòng điện \vec{I} đặt trong từ trường đều \vec{B} , thì phần tử dòng điện $\vec{I}\vec{l}$ sẽ chịu tác dụng của lực từ \vec{F} tác dụng lên dây dẫn mang dòng điện. Lực từ \vec{F} có điểm đặt tại trung điểm M_1M_2 , có phương vuông góc với \vec{l} và \vec{B} , có chiều tuân theo quy tắc bàn tay trái và có độ lớn được xác định bởi:

$$\mathbf{F} = BIl\sin\alpha \quad (1)$$

trong đó α là góc tạo bởi \vec{B} và \vec{l} .

Nếu lực từ \vec{F} tác dụng lên N phần tử dòng điện $\vec{I}\vec{l}$ thì độ lớn của \vec{F} được xác định theo công thức:

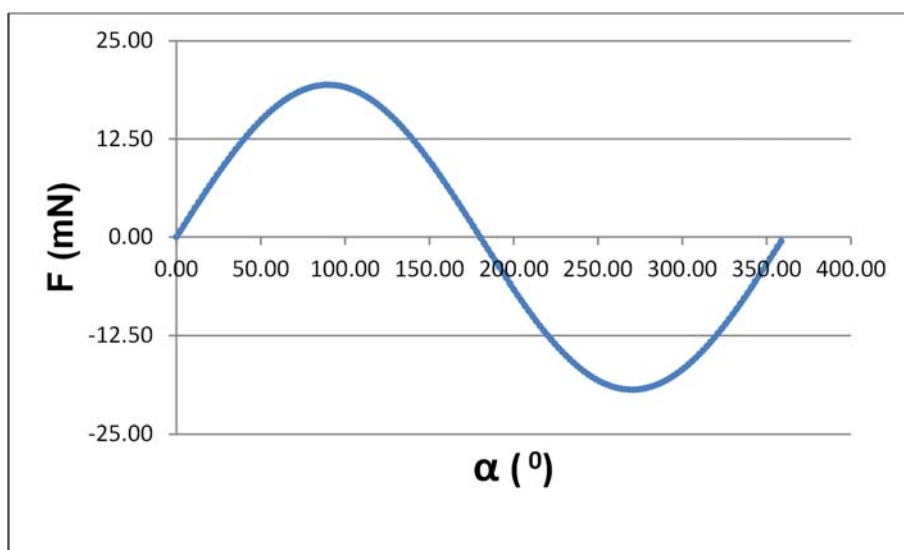
$$\mathbf{F} = NBIl\sin\alpha \quad (2)$$



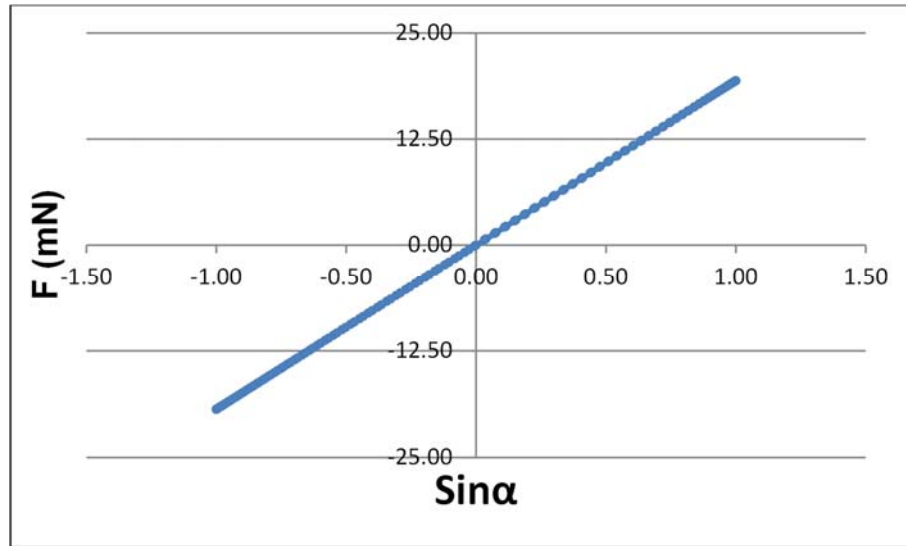
Hình 2.1. Sơ đồ thể hiện lực từ tác dụng lên một đoạn dây dẫn thẳng có dòng điện chạy qua.

2.1.2. Đồ thị

Theo công thức (1) ta thấy rằng, khi cảm ứng từ \vec{B} và chiều dài đoạn dây dẫn là cố định thì đồ thị biểu diễn mối liên hệ giữa lực từ \vec{F} và góc α có dạng hình sin như hình 2.2a. Nếu ta biểu diễn mối liên hệ giữa lực từ và $\sin\alpha$ thì đồ thị có dạng một đường thẳng đi qua gốc tọa độ như hình 2.2b.



(a)



(b)

Hình 2.2. Đồ thị biểu diễn mối liên hệ giữa lực từ \vec{F} theo góc α (a) hoặc theo $\sin \alpha$ (b) theo lý thuyết.

2.1.3. Các đại lượng cần kiểm chứng, đo đạc

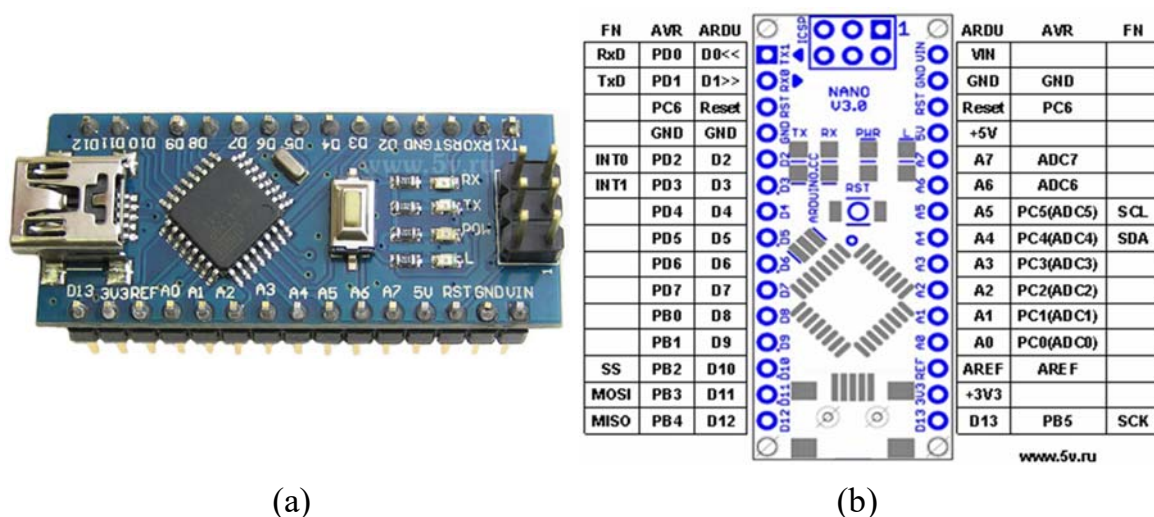
Mô hình thí nghiệm được thiết kế nhằm kiểm chứng công thức (2) bằng cách đo giá trị lực tương tác từ \vec{F} giữa từ trường có cảm ứng từ \vec{B} và N đoạn dây dẫn thẳng theo các giá trị cường độ dòng điện I chạy qua dây dẫn và góc α khác nhau. Cảm ứng từ \vec{B} được xác định bằng cách sử dụng một đầu dò từ trường để xác định độ lớn cảm ứng từ tạo ra bởi một nam châm điện chữ U. Lực từ \vec{F} được xác định thông qua một cảm biến lực (Loadcell). Giá trị cường độ dòng điện I và góc α được xác định lần lượt bởi ampe kế và encoder. Góc α tạo bởi phương cảm ứng từ \vec{B} và phương dòng điện I được thay đổi tự động bằng cách xoay nam châm điện quanh một trục thẳng đứng. Tất cả các thiết bị, linh kiện điện tử nhằm xác định các thông số trên được trình bày bên dưới. Ngoài ra, bộ thí nghiệm còn cho phép người dùng thay đổi cường độ dòng điện qua khung dây dẫn nhằm khảo sát đồ thị với những giá trị I khác nhau.

2.2. Vi điều khiển Arduino Nano

2.2.1. Lịch sử hình thành

Arduino ra đời tại thị trấn Ivrea, Italia và được giới thiệu chính thức vào năm 2005, đóng vai trò như một công cụ cho sinh viên học tập của Giáo sư Massimo Banzi, một trong những người phát triển Arduino tại trường Interaction Design Institute Ivrea (Viện thiết kế tương tác – IDII). Cái tên Arduino cũng xuất phát từ tên của quán Bar di Re Arduino, nơi mà ông và các cộng sự hay lui tới trong quá trình làm ra vi điều khiển này.

2.2.2. Cấu tạo vi điều khiển Arduino Nano CH340



Hình 2.3. Vi điều khiển Arduino Nano CH340 (a) và sơ đồ chân (b) [5].

Arduino Nano CH340 là một trong những phiên bản nhỏ gọn nhất của dòng vi điều khiển Arduino, có kích thước 18,54 x 43,18mm, sử dụng dòng vi xử lý 8bit ATmega328 – AU. Nó có 14 chân Digital (từ chân D0 đến chân D13), 8 chân Analog (từ chân A0 đến A7) với độ phân giải 10bit. Đặc biệt, Arduino Nano CH340 có 2 chân A4 (SDA) và A5 (SCL) hỗ trợ giao tiếp I2C/TWI với các thiết bị khác [6].

2.2.3. Chức năng mạch Arduino Nano CH340 trong mô hình

Đặc điểm nổi bật của Arduino là KIT phát triển trên nền tảng chip AVR, hỗ trợ đa chức năng, trên Arduino có sẵn các chân cắm, tích hợp mạch nạp, có các

cổng giao tiếp,...[6] So với các dòng vi điều khiển khác như PIC, AVR, STM, Arduino được hỗ trợ hệ thống thư viện mở, phong phú và có khả năng kết nối linh hoạt với nhiều loại cảm biến và module hỗ trợ. Ngoài ra, ngôn ngữ lập trình của Arduino được xây dựng dựa trên ngôn ngữ lập trình phổ biến nhất hiện nay là C/C++ nên thuận tiện cho người dùng trong quá trình lập trình. Bên cạnh đó, Arduino còn là một nền tảng đã được chuẩn hóa, do đó nó không đòi hỏi người dùng phải có kiến thức chuyên sâu về điện tử mà vẫn có thể dễ dàng sử dụng.

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật nổi bật của Arduino Nano CH340.

ĐẶC TÍNH	THÔNG SỐ KỸ THUẬT
Vi xử lý	ATmega328P – AU họ 8 – bit
IC nạp và giao tiếp UART	CH340
Điện áp hoạt động	5V-DC
Tần số hoạt động	16 MHz
Mức điện áp giao tiếp GPIO	TTL 5V-DC
Dòng tối đa mỗi chân I/O	40mA
Số chân Digital	14 chân, trong đó có 6 chân PWM
Số chân Analog	8 chân (độ phân giải 10 bit)
Dòng ra tối đa (5V)	500mA
Dòng ra tối đa (3.3V)	50mA
Bộ nhớ	Bộ nhớ Flash là 32KB Bộ nhớ SRAM là 2KB Bộ nhớ EEPROM là 1KB
Chức năng các chân Digital	Có 14 chân Digital (từ D0 đến D13) được sử dụng làm chân nhập xuất tín hiệu số, trong đó: + 6 chân D3, D5, D6, D9, D11 có chức năng cấp xung PWM (8 bit). + 4 chân giao tiếp SPI: D10 (SS), D11 (MOSI), D12 (MISO), D13 (SCK).

	+ ATmega328P cho phép truyền dữ liệu thông qua 2 chân D0 (RX) và D1 (TX).
Chức năng các chân Analog	Có 8 chân Analog (từ A0 đến A7), với độ phân giải mỗi chân là 10 bit (0 – 1023), các chân này dùng để đọc tín hiệu điện áp 0 – 5V (mặc định). 2 chân A4 (SDA) và A5 (SCL) hỗ trợ giao tiếp I2C/TWI với các thiết bị khác [7].

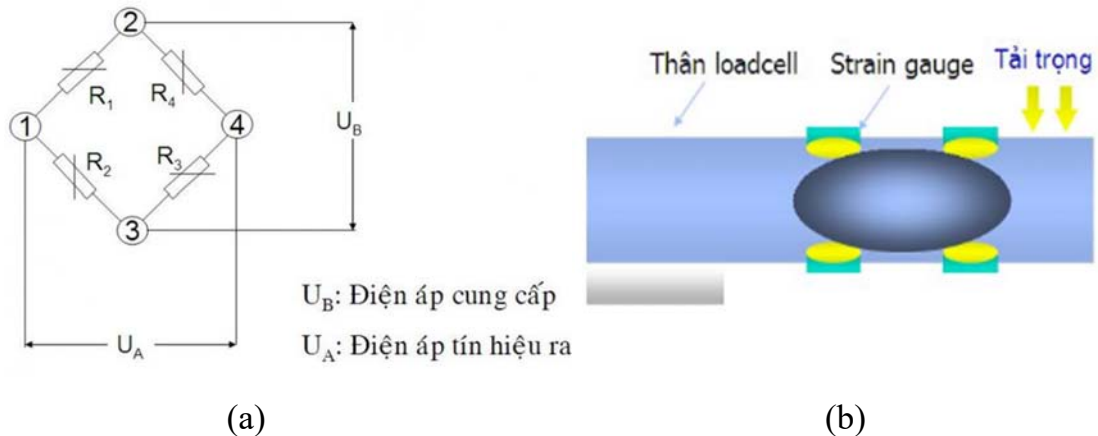
Trong đề tài khóa luận này, dòng vi điều khiển Arduino Nano CH340 được sử dụng vì chức năng của nó tương tự Arduino Uno R3 – dòng Arduino thông dụng nhất hiện nay, nhưng có ưu điểm nhỏ gọn hơn và dễ tích hợp vào bảng mạch điều khiển. Cụ thể Arduino Nano CH340 thực hiện các chức năng sau:

- + Chân Analog A0 đọc tín hiệu điện áp từ ngõ ra của IC khuếch đại đo lường INA125P; thông qua một hàm biến đổi, tín hiệu điện áp này sẽ được biến đổi thành giá trị của lực tác dụng lên cảm biến.
- + Chân A4 và A5 giao tiếp với màn hình LCD1602 – I2C.
- + Chân D2 đọc tín hiệu xung từ encoder để xác định góc quay của nam châm điện.
- + Chân D3 đọc tín hiệu đóng/ngắt của công tắc hành trình để xác định vị trí chọn làm mốc của góc α .
- + Chân D6 nhận tín hiệu từ nút nhấn TARE – mặc định giá trị lực từ tại thời điểm nhấn nút có giá trị bằng 0.
- + Chân D9 và D10 nhận tín hiệu từ nút nhấn UP và DOWN để chuyển đổi các danh mục hiển thị trên màn hình LCD.
- + Chân D11 nhận tín hiệu từ nút nhấn START – khởi động quá trình đo.

- + Chân D12 nhận tín hiệu từ nút nhấn OFFSET – điều khiển nam châm quay về vị trí gốc tọa độ được chọn.
- + Chân D8 xuất tín hiệu điều khiển relay đóng/ngắt nhằm kiểm soát quá trình quay của nam châm điện.

2.3. Cảm biến lực (Loadcell)

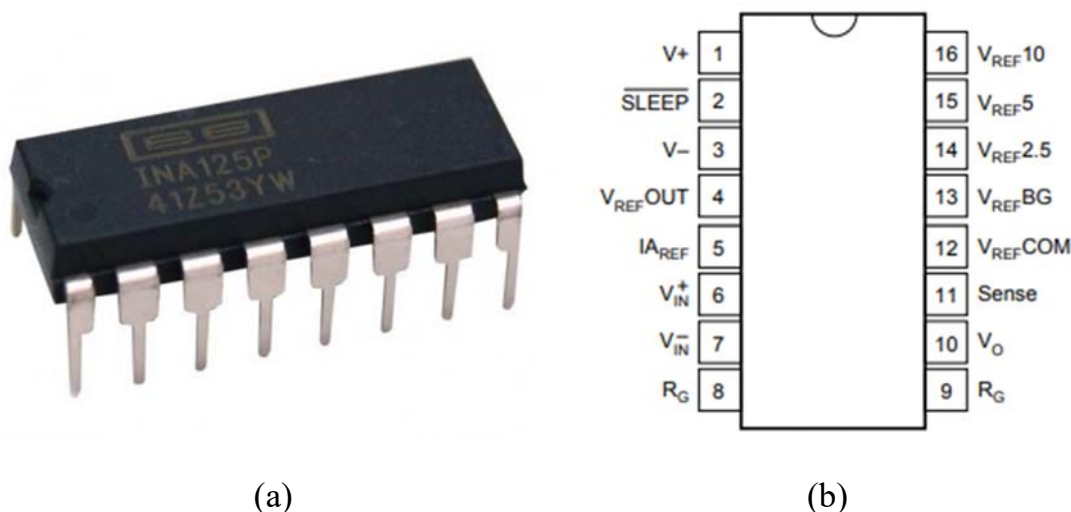
Cảm biến lực là một linh kiện điện tử được cấu tạo bởi hai thành phần là các điện trở đặc biệt có kích thước rất nhỏ được gọi là “strain gauge” và một thanh kim loại chịu tải – “Load”. Các strain gauge R_1, R_2, R_3, R_4 được mắc thành mạch cầu Wheatstone và được dán vào bề mặt của thân cảm biến lực. Một điện áp kích được cấp cho ngõ vào loadcell ở vị trí (1) và (4); tín hiệu điện áp ra được đo giữa hai vị trí (2) và (3). Khi đặt một vật nặng lên cảm biến, thanh kim loại sẽ bị uốn cong do trọng lực của vật nặng. Khi đó các điện trở strain gauge sẽ bị kéo dãn, làm cho giá trị các điện trở bị thay đổi, dẫn đến tín hiệu điện áp đầu ra thay đổi. Thông qua IC khuếch đại đo lường INA125P và vi điều khiển Arduino Nano CH340, giá trị của lực tác dụng lên cảm biến được ghi nhận thông qua các sự thay đổi tín hiệu điện áp này.



Hình 2.4. Sơ đồ nguyên lý mạch cầu Wheatstone của Loadcell (a) [7] và hình ảnh mô phỏng cấu tạo cảm biến lực – loadcell (b) [8].

2.4. IC khuếch đại đo lường INA125P

IC khuếch đại đo lường INA125P là linh kiện dùng để khuếch đại tín hiệu với điện áp tham chiếu chính xác. Do tín hiệu ngõ ra của cảm biến lực rất bé nên phải khuếch đại trước khi đưa vào Arduino xử lý. Có hai cách thông dụng để khuếch đại tín hiệu ngõ ra của cảm biến lực là sử dụng IC khuếch đại đo lường INA125P hoặc module chuyển đổi ADC 24bit HX711. Module chuyển đổi ADC 24 bit HX711 hoạt động dựa trên nguyên tắc chuyển đổi giá trị analog từ cảm biến lực về digital (giá trị số) rồi mới đưa về Arduino xử lý, điều này làm chậm tốc độ cập nhật dữ liệu. IC khuếch đại đo lường INA125P được chọn sử dụng vì ghi nhận trực tiếp tín hiệu analog từ cảm biến, sau đó khuếch đại tín hiệu và đưa về Arduino mà không cần thông qua quá trình chuyển đổi thành tín hiệu digital, do đó tốc độ ghi được cải thiện đáng kể.



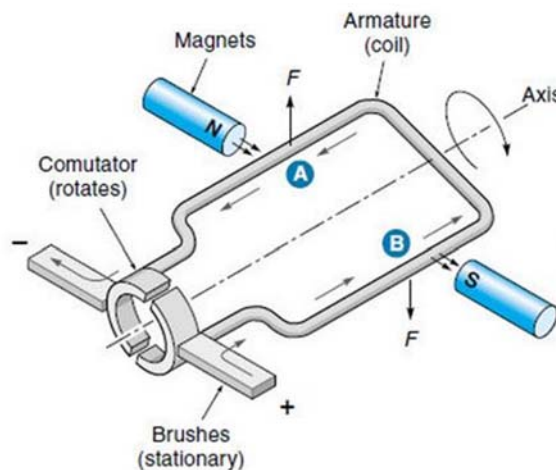
Hình 2.5. IC khuếch đại đo lường INA125P (a) và sơ đồ chân (b).

2.5. Một số linh kiện khác

2.5.1. Động cơ điện một chiều

Động cơ điện một chiều (direct – current motor) là loại động cơ điện hoạt động với dòng điện một chiều, biến đổi năng lượng điện thành năng lượng cơ học [9]. Cấu tạo của động cơ gồm stator là các cặp nam châm vĩnh cửu hoặc nam châm điện và rotor là các cuộn dây được kết nối với nguồn điện một chiều.

Rotor trong động cơ DC quay liên tục theo một chiều xác định nhờ vào một bộ chỉnh lưu gồm cổ góp và chổi than tiếp xúc với cổ góp có nhiệm vụ đổi chiều dòng điện qua cuộn dây của rotor sau mỗi nửa chu kỳ, dẫn đến từ trường của các cuộn dây cũng bị đảo cực liên tục, khi đó từ trường của cuộn dây sẽ có cùng cực với cực của stator nên gây ra một moment đẩy rotor quay liên tục. Trong mô hình này, động cơ DC tích hợp với bộ giảm tốc bên trong nhằm làm giảm tốc độ quay và tăng lực kéo của động cơ.



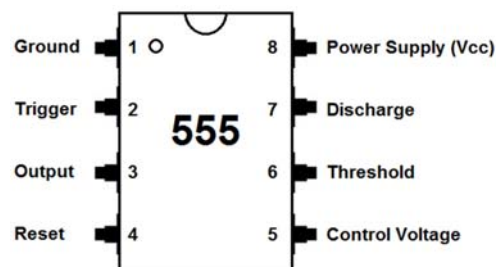
Hình 2.6. Mô hình nguyên lí hoạt động của động cơ DC.

2.5.2. Mạch tạo dao động sử dụng IC555

IC NE555 là một linh kiện dùng để tạo xung vuông. Nó hoạt động như một máy phát xung có thể thay đổi tần số tùy ý, điều chế độ rộng xung (PWM) và vị trí xung (PPM).



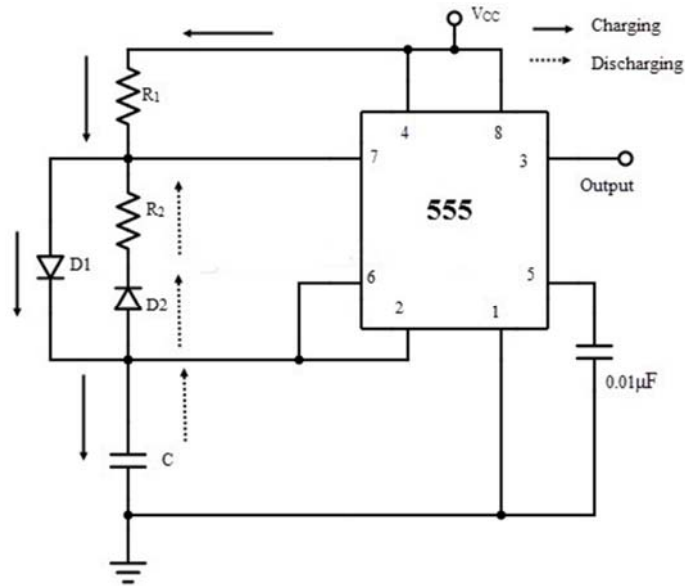
(a)



(b)

Hình 2.7. IC NE555 (a) và sơ đồ chân (b).

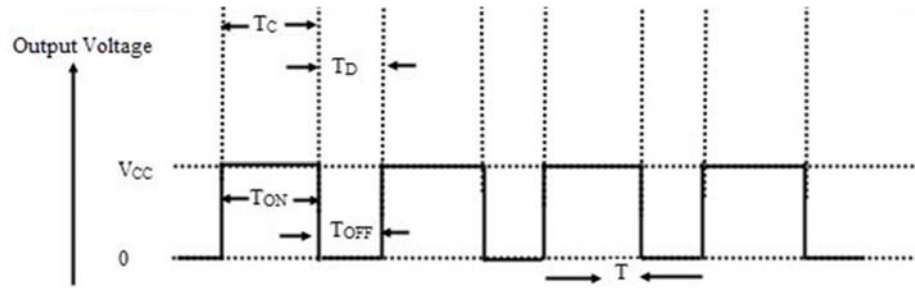
Mạch dao động đa hài là mạch điện tử được sử dụng để thực hiện các chức năng có hai trạng thái đơn giản như dao động thẳng giáng [10]. Mạch này không có trạng thái ổn định mà có sự chuyển đổi liên tục giữa hai trạng thái mà không cần dùng xung kích thích bên ngoài. Mạch dao động đa hài gồm một IC tạo dao động 555, hai điện trở R, hai diode và một tụ điện C với mục đích tạo xung vuông điều khiển tốc độ quay của nam châm điện thông qua điều khiển động cơ DC.



Hình 2.8. Sơ đồ mạch nguyên lý mạch dao động đa hài [10].

Động cơ DC hoạt động được cấp một điện áp không đổi. Để điều khiển được tốc độ quay của động cơ ta phải kiểm soát được điện áp cấp cho động cơ. Cụ thể là ta điều chỉnh thời gian cấp áp T_{on} và thời gian nghỉ T_{off} trong một chu kỳ dao động của sóng vuông bằng việc điều chỉnh các giá trị của điện trở R_1 , R_2 và điện dung C của tụ theo công thức:

$$T = T_{on} + T_{off} = \ln 2 C (R_1 + R_2) \quad (3)$$



Hình 2.9. Đồ thị sóng vuông cấp cho động cơ DC hoạt động [10].

2.5.3. Hệ truyền động bánh răng

Ngoài việc sử dụng IC 555 để điều khiển tốc độ quay của nam châm điện, ở mô hình này tôi còn sử dụng hệ thống truyền động bằng bánh răng nhằm mục đích truyền động giữa trục động cơ DC và trục nam châm điện cũng như thay đổi tỉ số truyền.



Hình 2.10. Nam châm điện và bánh răng trục chính (a), hệ thống ba bánh răng truyền động của động cơ DC (b).

Trong mô hình này, yêu cầu đặt ra là thay đổi tỉ số truyền của bánh răng của động cơ DC với bánh răng của trục nam châm điện nhằm giảm tốc độ quay của nam châm điện mà không đòi hỏi chiều chuyển động của nam châm, do đó chỉ cần xét bài toán như sau:

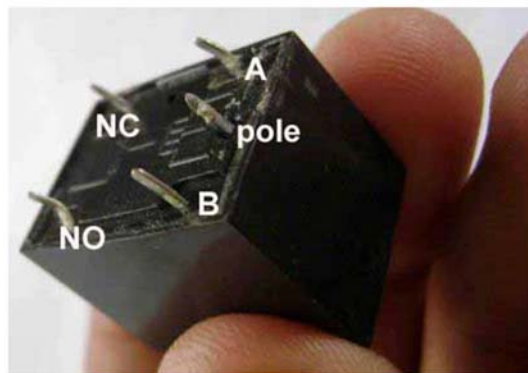
$$\text{Tỉ số truyền} = \frac{\text{Số răng thứ cấp}}{\text{Số răng sơ cấp}} \quad [11] \quad (4)$$

trong đó, số răng của trục sơ cấp là số răng của bánh răng gắn với động cơ DC, có 22 răng. Số răng của trục thứ cấp là số răng của bánh răng gắn với trục nam châm điện, có 51 răng. Từ đây ta sẽ có tỉ số truyền như sau:

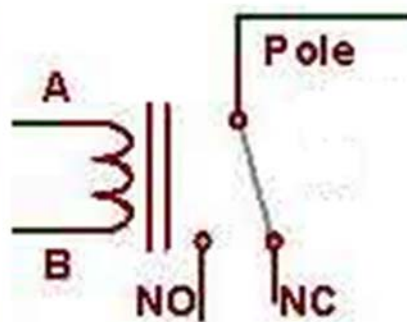
$$\text{Tỉ số truyền} = \frac{51}{22} = 2.32 \quad (5)$$

Giá trị trên có ý nghĩa là nam châm điện sẽ quay được một vòng khi động cơ DC quay được 2.32 vòng. Từ đây, ta thấy tốc độ quay của nam châm điện giảm so với tốc độ quay của động cơ DC.

2.5.4. Relay



(a)



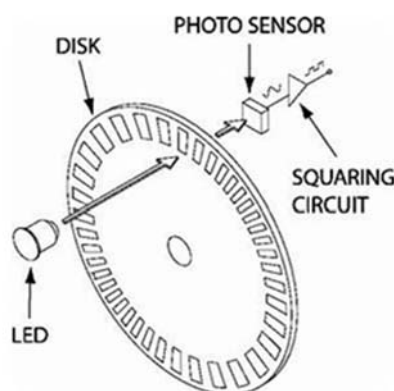
(b)

Hình 2.11. Relay (a) và sơ đồ chân (b) [12].

Khi dòng điện chạy qua cuộn dây của relay tạo ra từ trường hút lõi sắt non làm thay đổi công tắc chuyển mạch [12]. Do đó relay được sử dụng trong bộ thí nghiệm với vai trò là một thiết bị đóng/ngắt mạch điện thụ động để điều khiển hoạt động của động cơ DC.

2.5.5. Encoder

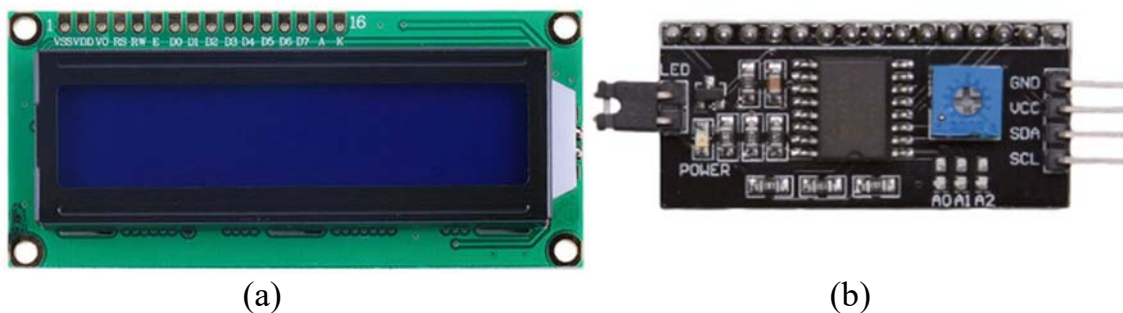
Encoder là một bộ mã hóa vòng quay với cấu tạo gồm một cặp diode thu phát tín hiệu quang học từ một đĩa tròn có đục lỗ hoặc sơn tạo các điểm có khoảng cách đều [13].



Hình 2.12. Mô hình nguyên lý hoạt động của encoder [14].

Nguyên lý hoạt động của encoder là khi đĩa tròn quay, diode thu sẽ không nhận được tín hiệu ở các vị trí bị che khuất tín hiệu phát sáng từ diode phát và ngược lại, tạo ra một chuỗi tín hiệu sáng/tắt báo về bộ phận xử lý. Từ nguyên tắc này, encoder được ứng dụng để đọc giá trị góc quay, vòng quay của đĩa quay, động cơ hoặc một thiết bị bất kì đòi hỏi xác định chính xác vị trí góc, vòng quay.

2.5.6. LCD 16x02 – I2C



Hình 2.13. Màn hình LCD 16x02 (a) và module I2C (b).

LCD 16x02 là một màn hình tinh thể lỏng nhỏ dùng để hiển thị các ký tự và chữ số, thường được ứng dụng để hiển thị các thông số cập nhật từ cảm biến trong các dự án Arduino. Màn hình LCD được chia thành các ô nhỏ và mỗi ô chỉ hiển thị duy nhất một ký tự của bảng mã ASCII [15]. Thông thường khi sử dụng LCD 16x02 thường cần tối thiểu sáu chân của LCD kết nối với các chân RS, EN, D7, D6, D5, D4 để có thể giao tiếp với LCD. Nhưng với module I2C thì ta chỉ cần hai chân SDA, SCL của LCD kết nối với hai chân SDA, SCL của module thì đã

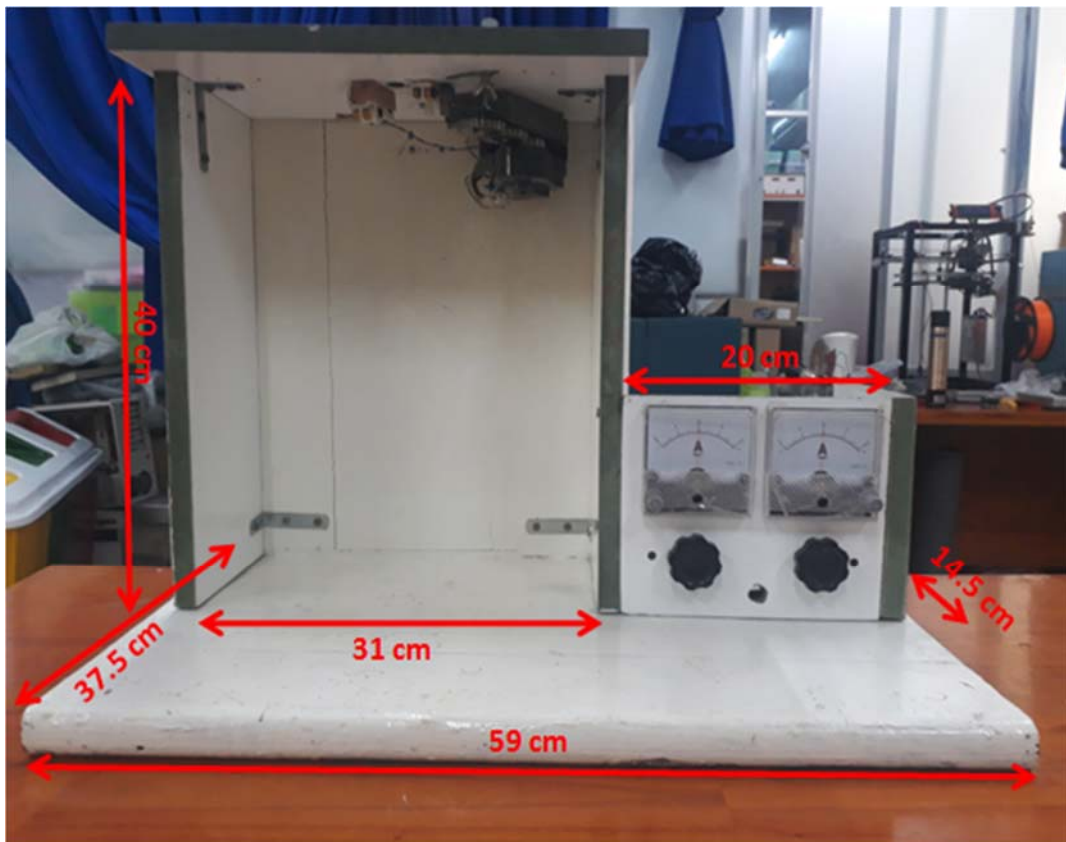
có thể hiển thị thông tin lên màn hình [16]. Bên cạnh đó, trên module còn có nút vận điều chỉnh độ tương phản của màn hình hiển thị cho người dùng tùy chỉnh.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Mô hình thí nghiệm

3.1.1. Hệ cơ học

Hệ cơ học trong mô hình này được đóng ráp bằng vật liệu gỗ vì ưu điểm giá thành rẻ, dễ tìm kiếm và đảm bảo tính vững chắc, độ bền cũng như giảm thiểu sự rung lắc dẫn đến sai lệch kết quả đo trong quá trình vận hành.

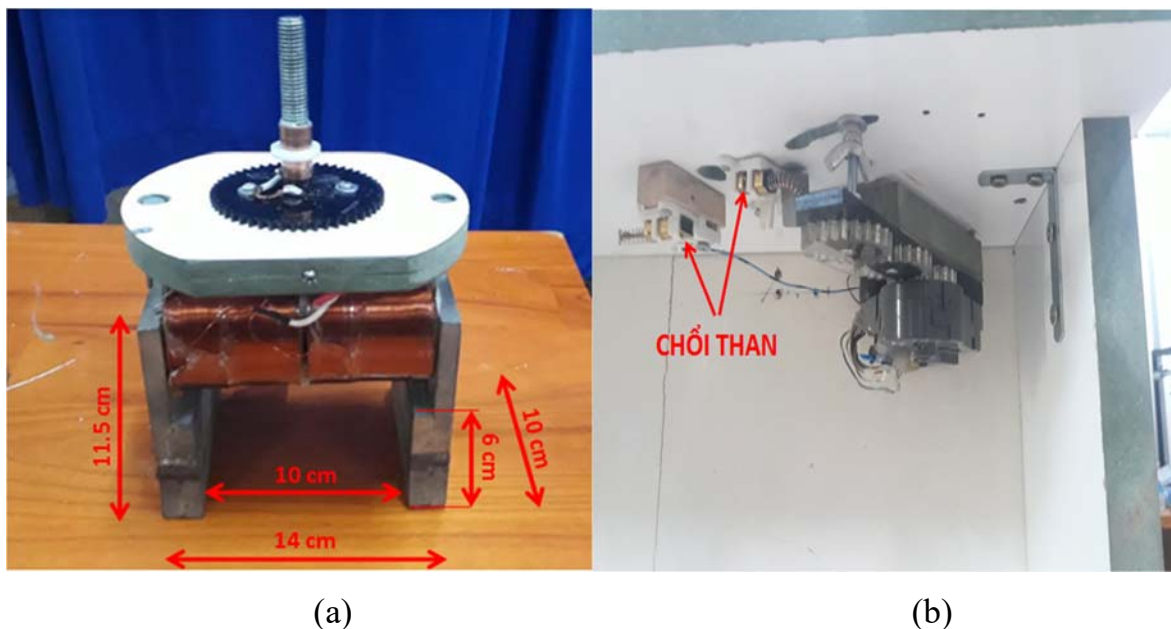


Hình 3.1. Khung máy và các thông số kích thước.

3.1.2. Nam châm điện

Nam châm điện được cấu tạo gồm một lõi sắt hình chữ U và dây dẫn bằng đồng có lớp cách điện quấn quanh lõi sắt. Để đảm bảo nam châm được cấp điện liên tục và ổn định trong suốt quá trình vận hành hệ đo mà không gặp vấn đề vướng dây điện nguồn cấp cho nam châm quay, ngõ cấp điện vào của nam châm được nối gồm hai cổ góp bằng đồng đặt đồng trục với trục quay của nam châm.

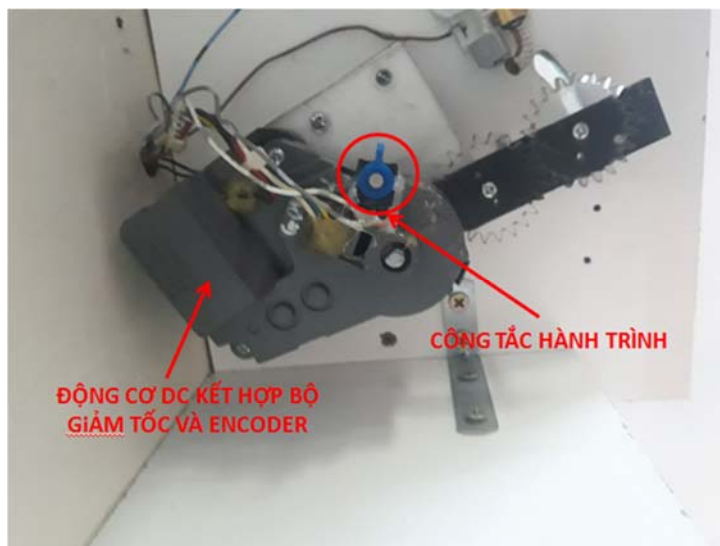
Hai cổ góp này cách điện với nhau và thông qua hệ thống chổi than được nối với nguồn ngoài, nam châm sẽ được cấp điện liên tục trong suốt quá trình quay.



Hình 3.2. Nam châm chữ U được tích hợp cổ góp (a) và hệ thống chổi than kết nối với nguồn vào (b).

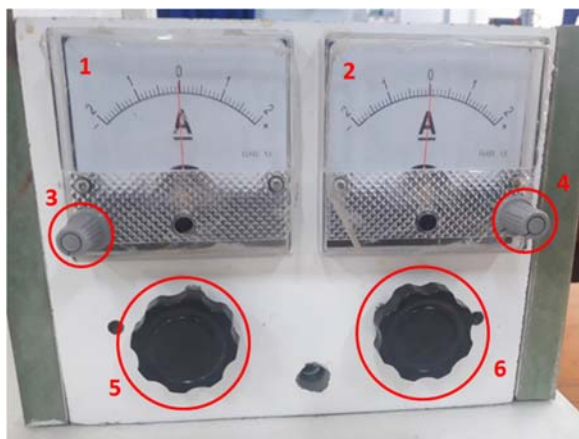
3.1.3. Hệ thống truyền động

Như đã được đề cập trong chương 2, động cơ DC tích hợp bộ giảm tốc cùng hệ truyền động bánh răng được sử dụng nhằm điều khiển tốc độ quay của nam châm. Cụ thể hệ truyền động bánh răng gồm 3 bánh răng cùng kích thước và có số răng là 22, trong đó có một bánh răng chủ động gắn với trục động cơ hai bánh răng thụ động ăn khớp với bánh chủ động và đóng vai trò truyền động cho bánh răng 51 răng gắn trên trục nam châm với hệ số truyền đã được tính toán ở mục 2.5.3. Bên cạnh đó, bên trong hộp động cơ còn được lắp đặt một encoder có nhiệm vụ đọc góc quay của nam châm. Ngoài ra một công tắc hành trình được gắn trên hộp động cơ với nhiệm vụ gửi tín hiệu về Arduino để thực hiện trình ngắt động cơ khi cần gạt chạm vào công tắc.



Hình 3.3. Hệ động cơ và truyền động của bộ thí nghiệm.

3.1.4. Hệ đồng hồ và biến trở điều chỉnh dòng điện



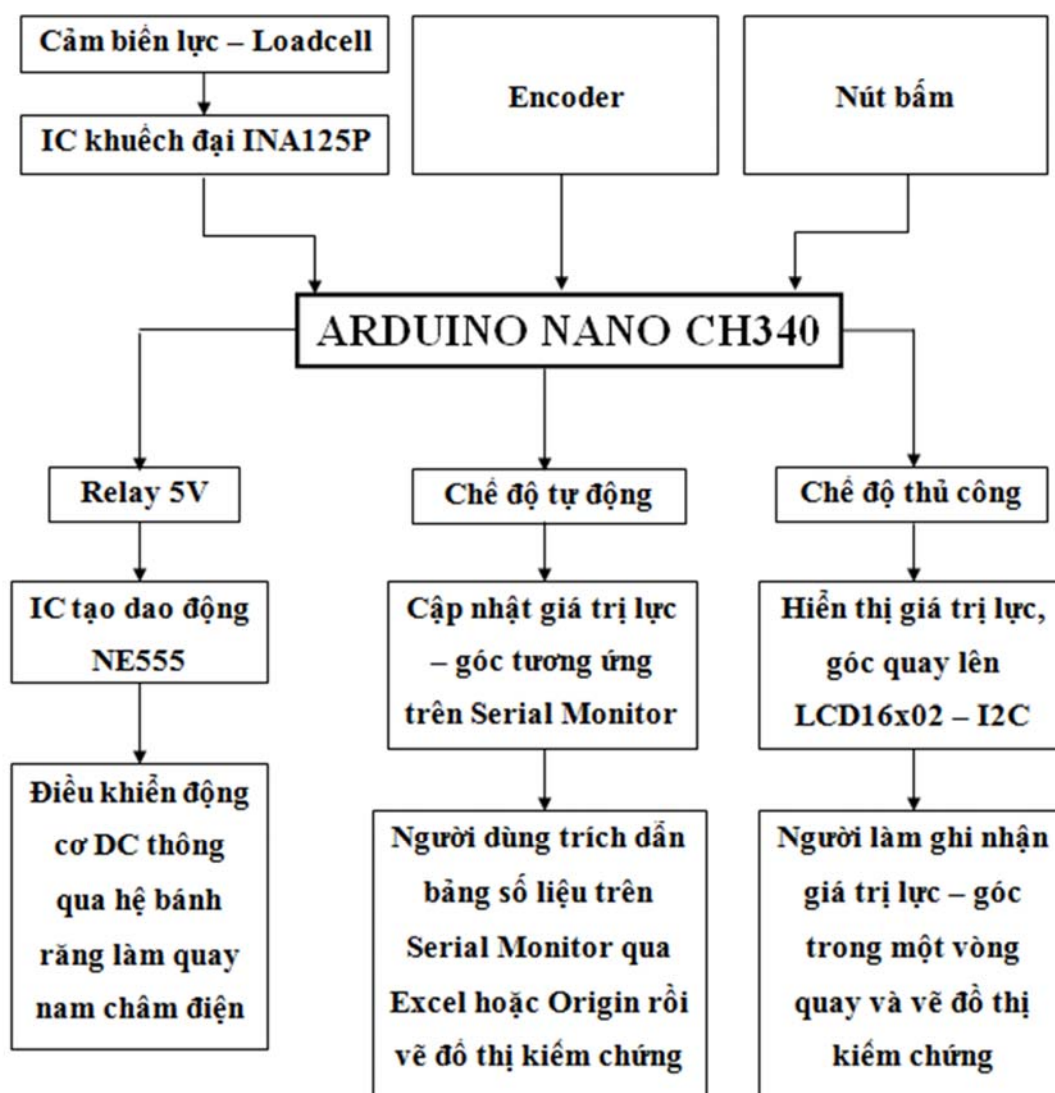
Hình 3.4. Hệ đồng hồ đo và điều chỉnh chiều, cường độ dòng điện qua nam châm (số 1) và khung dây (số 2).

Hai ampe kế có giới hạn đo là 2A, độ chia nhỏ nhất là 0.1A được gắn trên bộ khung nhằm xác định cường độ dòng điện chạy qua nam châm điện (số 1) và qua khung dây dẫn (số 2). Bên cạnh đó, ampe kế được nối với hai biến trở nhằm thay đổi cường độ dòng điện qua nam châm điện và khung dây, từ đó người dùng dễ dàng tiến hành khảo sát lực từ ở các giá trị cường độ dòng điện, cảm ứng từ khác nhau. Ngoài ra, hai công tắc đảo cực (số 3, 4) được kết nối với hai ampe kế có tác dụng đảo chiều dòng điện nhằm giúp người làm thí nghiệm có

thể khảo sát thí nghiệm trên khi thay đổi chiều của từ trường bên trong nam châm cũng như chiều của lực từ.

3.2. Mạch điện tử

3.2.1. Nguyên lý hoạt động của mạch điện tử



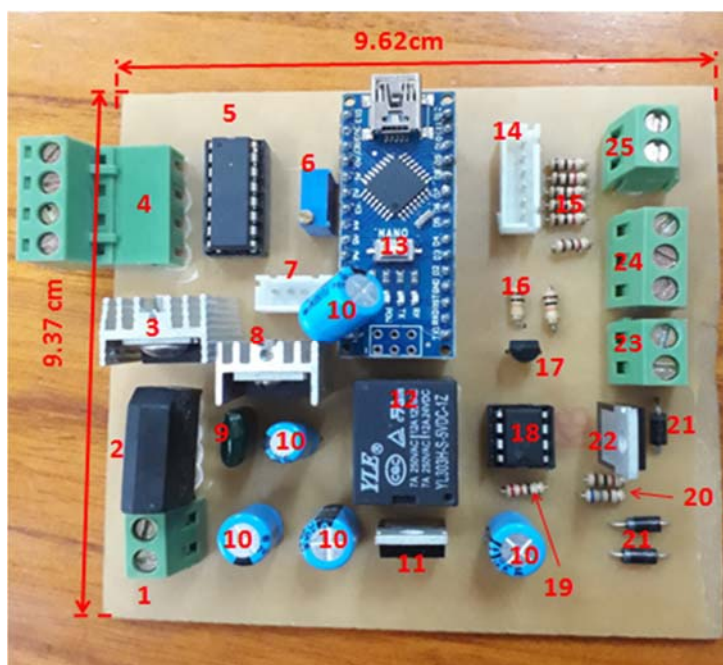
Hình 3.5. Sơ đồ nguyên lý của hệ điện tử trong mô hình.

3.2.2. Chức năng của từng bộ phận trong hệ thống

Trong mô hình này, Arduino Nano CH340 đóng vai trò là bộ xử lý trung tâm có nhiệm vụ đọc giá trị của các loại cảm biến và thể hiện các thông tin lên màn hình LCD. Bộ thí nghiệm có thể hoạt động ở hai chế độ: thủ công và tự

động. Ở chế độ thủ công, Arduino Nano đọc giá trị của cảm biến lực – loadcell, giá trị góc từ encoder và hiển thị các giá trị đó lên màn hình LCD để người dùng ghi nhận, xử lý số liệu và vẽ đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của lực từ theo góc quay trên giấy. Ở chế độ làm việc tự động, Arduino ghi nhận các giá trị lực, góc quay và lưu vào bộ nhớ. Sau đó người dùng sẽ trích dẫn các giá trị đo được qua các phần mềm Microsoft Excel, Origin rồi xử lý và vẽ đồ thị.

3.3. Mạch điện tử hoàn chỉnh



Hình 3.6. Mạch điện tử sau khi hàn linh kiện.

Mạch điện tử được thiết kế bằng phần mềm OrCAD và được gia công tại phòng thí nghiệm.

Ở hình 3.6, các linh kiện được đánh số thứ tự từ trái sang phải như sau:

Bảng 2. Bảng thống kê các linh kiện trong mạch điện tử.

Số thứ tự	Tên linh kiện
1	Domino cấp nguồn vào xoay chiều
2	Diode chỉnh lưu cầu RS507L
3	IC ổn áp 7812
4	Domino ngõ vào của cảm biến lực – Loadcell

5	IC khuếch đại đo lường INA125P
6	Biến trở 100 Ohm
7	Pin cắm chân LCD 16x02 – I2C
8	IC ổn áp 7805
9	Tụ 104
10	Tụ phân cực 100 μ F – 50V
11	IC ổn áp 7809
12	Relay 5V
13	Arduino Nano CH340
14	Pin cắm chân các nút bấm
15	Điện trở 1K Ohm
16	Điện trở 10K Ohm
17	Transistor C828
18	IC tạo dao động NE555
19	Điện trở 220 Ohm
20	Điện trở 660 Ohm
21	Diode 1A
22	Transistor TIP41C
23	Domino ngõ ra của động cơ DC
24	Domino ngõ vào của encoder
25	Domino ngõ vào của công tắc hành trình

3.3.1. Cách sử dụng mạch điện tử

Tiếp theo, hệ điện tử được kết nối với các linh kiện và nguồn nuôi theo các bước sau:

- + Bước 1: Kết nối 4 dây ngõ ra của cảm biến lực với domino số 4.
- + Bước 2: Kết nối chân pin của LCD 16x02 – I2C với đế pin số 7.
- + Bước 3: Kết nối chân pin của các nút bấm với đế pin số 14.

- + Bước 4: Kết nối 2 chân cực của động cơ DC với domino số 23.
- + Bước 5: Kết nối 3 chân (+, –, signal) của encoder với domino số 24.
- + Bước 6: Kết nối 2 chân cực của công tắc hành trình với domino số 25.
- + Bước 7: Cấp nguồn xoay chiều cho mạch điện tử vào domino số 1.

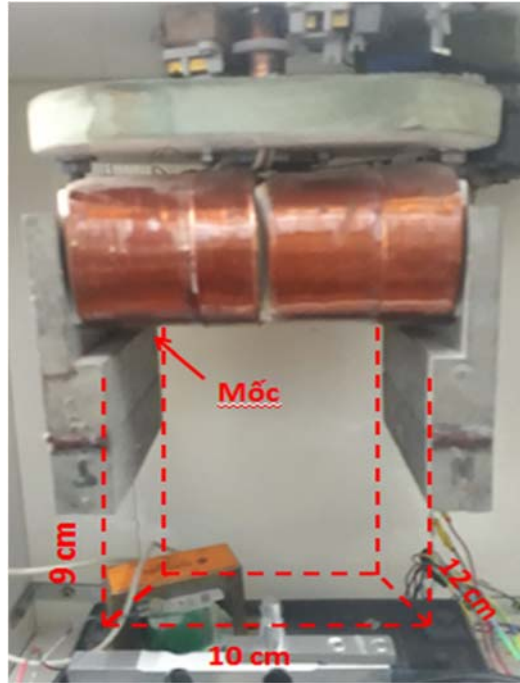
3.4. Kết quả đo đạc

3.4.1. Khảo sát từ trường bên trong nam châm chữ U

a. Bố trí hệ đo – tiến hành đo

Mục tiêu của bộ thí nghiệm này là khảo sát lực tác dụng lên dòng điện thẳng đặt trong từ trường đều, do đó yêu cầu đặt ra khi tiến hành thiết kế bộ thí nghiệm là phải đảm bảo từ trường giữa hai bản kim loại của nam châm chữ U là từ trường đều. Tuy nhiên độ lớn cảm ứng từ tại mỗi vị trí trong vùng từ trường này không đều nhau. Do đó phải tiến hành khảo sát độ lớn cảm ứng từ ở tất cả các điểm trong vùng từ trường giữa hai bản kim loại của nam châm. Các bước được thực hiện như sau:

+ **Bước 1:** Xác định vùng từ trường cần khảo sát. Ở đây vùng từ trường được khảo sát có dạng hình hộp với kích thước 12x10x9cm ở giữa hai bản kim loại của nam châm như hình 3.7.



Hình 3.7. Vùng từ trường khảo sát bên trong nam châm điện.

- + **Bước 2:** Nối nam châm với nguồn điện và lần lượt điều chỉnh biến trở cho cường độ dòng điện qua nam châm có giá trị 0.5A và 1.0A.
- + **Bước 3:** Chia vùng từ trường này thành các ô nhỏ có thể tích 1cm^3 , chọn gốc tọa độ đo là ô trong cùng, ở mép trên của bản kim loại như hình 3.7.
- + **Bước 4:** Đặt hệ đo như trong hình 3.7, quay nam châm về vị trí 0^0 (vị trí cần gạt của nam châm vừa chạm công tắc hành trình khi qua từ trái sang phải).
- + **Bước 5:** Reset giá trị cảm ứng từ được ghi nhận bởi máy đo về giá trị 0.



(a)



(b)

Hình 3.8. Đầu dò đo cảm ứng từ trước (a) và sau khi reset (b).

+ **Bước 6:** Tiến hành khảo sát cảm ứng từ \vec{B} từ ô được chọn làm mốc và lần lượt đo cảm ứng từ tại tất cả các ô trong vùng này bằng cách dịch chuyển các thanh trượt trên các hệ tọa độ x, y, z như trong hình.

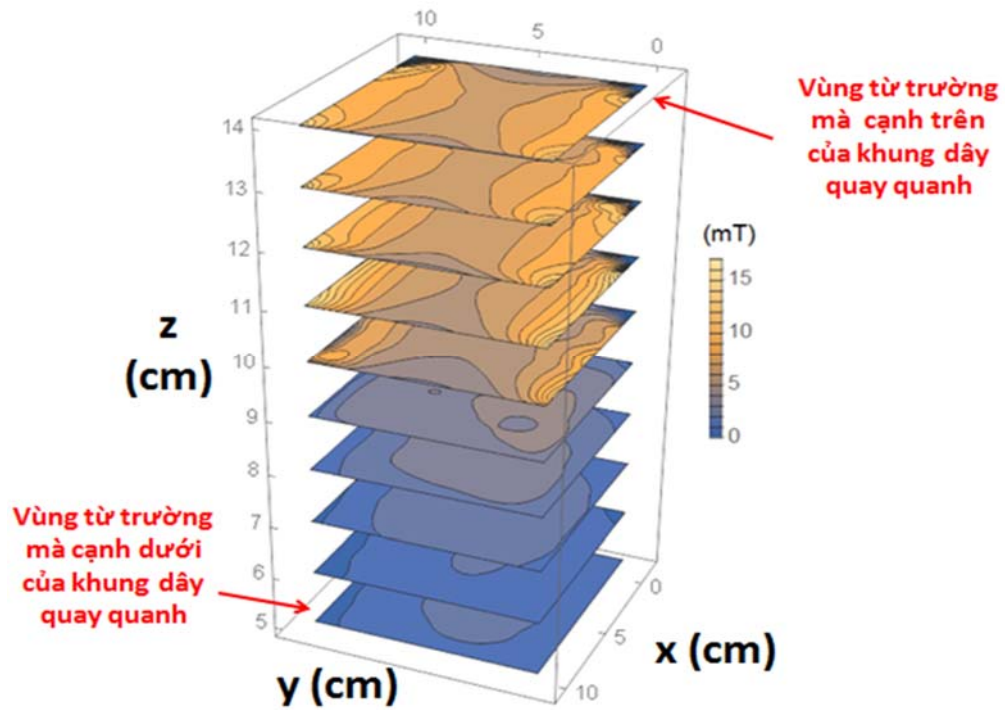


Hình 3.9. Hệ đo cảm ứng từ đã được lắp đặt và tiến hành đo bằng cách di chuyển hệ theo ba trục x, y, z.

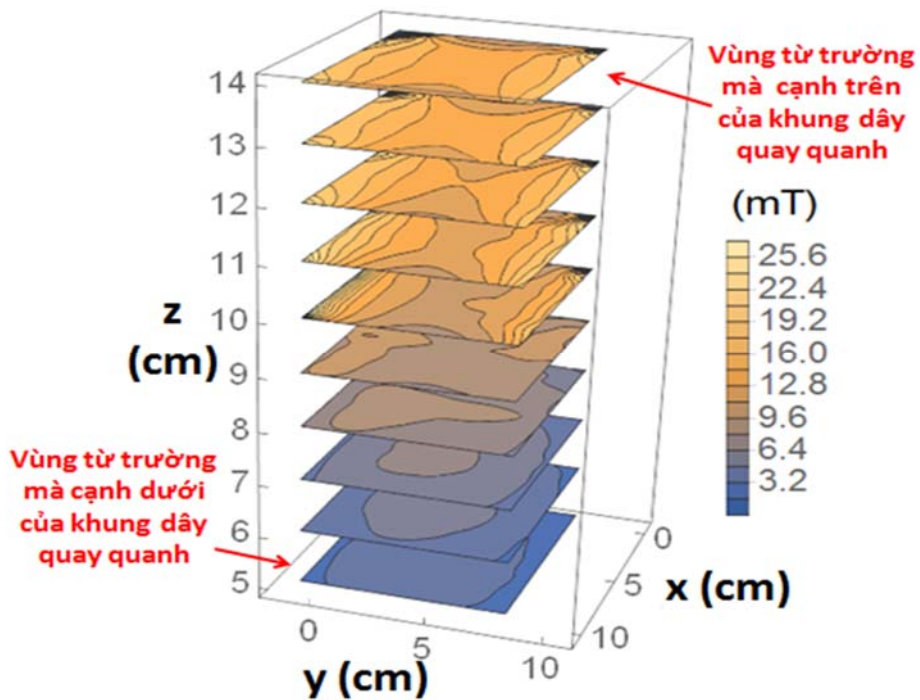
+ **Bước 7:** Cập nhập dữ liệu vào bảng và tiến hành vẽ đồ thị độ lớn cảm ứng từ bên trong nam châm điện trong phần mềm Mathematica 11.3.

b. Kết quả khảo sát

Tiến hành thí nghiệm khảo sát theo các bước trên, các số liệu thu được sẽ được đưa vào phần mềm Mathematica 11.3 và vẽ thành đồ thị như sau:



(a)



(b)

Hình 3.10. Đồ thị ba chiều biểu diễn độ lớn cảm ứng từ giữa hai bản kim loại của nam châm khi dòng điện qua nam châm có cường độ là 0.5A (a) và 1.0A

Lưu ý, chiều cảm ứng từ giữa hai bản kim loại của nam châm là chiều từ cực Bắc sang cực Nam (từ phải sang trái) như hình 3.7. Từ hai đồ thị hình 3.10a và hình 3.10b có thể thấy, giá trị cảm ứng từ tại các điểm trong từ trường ở giữa hai bản kim loại của nam châm không đều nhau, nhưng vùng không gian ở giữa trong cả hai trường hợp có độ lớn cảm ứng từ chênh lệch không nhiều. Vì khung dây dẫn được sử dụng trong bộ thí nghiệm đặt đồng trục với trục quay của nam châm và chiều dài đoạn dây nằm ngang chịu tác dụng của lực từ là 4cm và cao 1cm, do đó vùng từ trường thực tế khi khung dây đặt trong đó chịu tác dụng của lực từ có kích thước là 5x5x1cm. Ngoài ra, vì khung dây dẫn có hai cạnh nằm ngang là cạnh trên và cạnh dưới nên theo quy tắc bàn tay trái, đặt khung dây có dòng điện đi qua trong vùng từ trường của nam châm, khung dây sẽ chịu hai lực từ ngược chiều. Vì thế giá trị mà cảm biến lực – loadcell thu được là hiệu độ lớn của hai giá trị lực từ trên. Từ đó, tiến hành tính độ lớn trung bình cảm ứng từ của hai vùng không gian có độ cao 5cm và 14cm.

$$B_{TB-\text{toàn vùng}} = \frac{\sum_{x=-1}^{10} \sum_{y=0}^{10} B_{x,y}}{N} \quad (6)$$

Trong đó, N là tổng số giá trị cảm ứng từ tương ứng với một độ cao z trong vùng từ trường khảo sát. Từ biểu thức (6), ta thu được biểu thức tính cảm ứng từ trung bình tại vùng không gian 5x5x1cm ở giữa:

$$B_{TB} = \frac{\sum_{i=3}^7 \sum_{j=3}^7 B_{i,j}}{25} \quad (7)$$

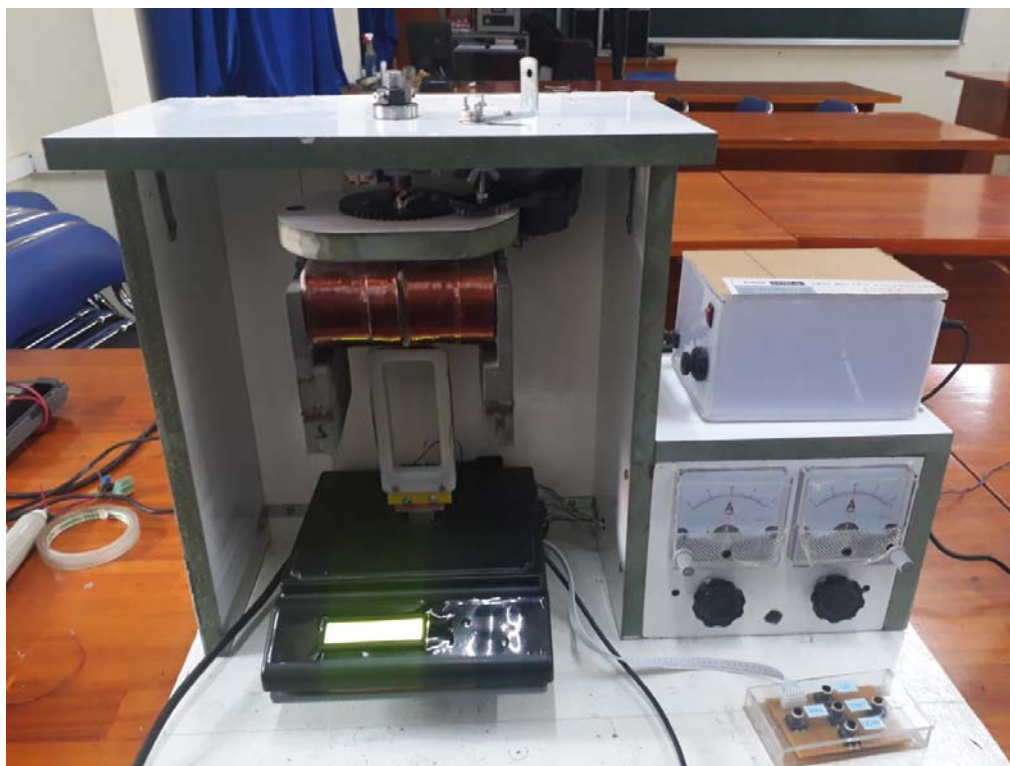
Với i, j là tọa độ mà đầu dò khảo sát độ lớn cảm ứng từ theo trục x, y. Dựa biểu thức (7) và bảng giá trị khảo sát cảm ứng từ \vec{B} ở phần phụ lục, ta thu được giá trị cảm ứng từ trung bình ở hai mức độ cao $z = 5\text{cm}$, $z = 14\text{cm}$ ở bảng 3.

Bảng 3. Độ lớn cảm ứng từ trung bình ở cạnh trên ($z = 5\text{cm}$) và cạnh dưới ($z = 14\text{cm}$) của khung dây.

	$I_{\text{nam châm}} = 0.5\text{A}$	$I_{\text{nam châm}} = 1\text{A}$
$B_{TB\ 5} \text{ (mT)}$	2.10	4.12
$B_{TB\ 14} \text{ (mT)}$	6.95	13.86

3.4.2. Khảo sát lực từ tác lên dòng điện thẳng

a. Bố trí hệ đo – tiến hành đo



Hình 3.11. Bố trí hệ đo lực từ.

Hệ đo được bố trí như hình 3.11 gồm:

- + Một hệ cân điện tử sử dụng cảm biến lực – Loadcell tích hợp cùng mạch điện tử với vi điều khiển Arduino.
- + Khung dây dẫn có kích thước 4x10cm và có số vòng dây là 200 vòng.
- + Một hệ nút bấm cầm tay kết nối với mạch điện tử gồm các nút UP, DOWN, START, OFFSET, TARE có chức năng đã được đề cập ở mục 2.2.3.
- + Một bộ nguồn ngoài có nhiệm vụ cấp nguồn cho nam châm và khung dây dẫn.
- + Bộ khung cơ khí có tích hợp hai ampe kế đo cường độ dòng qua nam châm, khung dây.

Tiếp theo, quy trình khảo sát độ lớn lực từ phụ thuộc vào góc quay α được tiến hành theo các bước sau:

- + **Bước 1:** Kết nối nam châm và khung dây dẫn thẳng với nguồn điện một chiều.
- + **Bước 2:** Nhấn nút OFFSET để nam châm quay về vị trí 0^0 , vị trí cần gạt của nam châm chạm công tắc hành trình.
- + **Bước 3:** Đặt khung dây lên cân lực sao cho mặt phẳng khung dây song song với mặt phẳng của nam châm tại vị trí góc quay bằng 0^0 .
- + **Bước 4:** Điều chỉnh núm vặn đồng hồ 1 sao cho kim điện kế lần lượt chỉ 0.5A và 1.0A là các giá trị cường độ dòng điện qua nam châm.
- + **Bước 5:** Điều chỉnh núm vặn đồng hồ 2 sao cho kim điện kế lần lượt chỉ 0.5A và 1.0A là các giá trị cường độ dòng điện qua cuộn dây.
- + **Bước 6:** Nhấn nút TARE để đặt giá trị lực từ tại vị trí ban đầu là bằng 0.
- + **Bước 7:** Nhấn nút START để chuyển sang mode 2 và hệ bắt đầu đo, nam châm lúc này sẽ quay một vòng quanh trục. Trong quá trình quay, giá trị lực từ và α được đo đạc liên tục và lưu vào bộ nhớ của Arduino trước khi được thể hiện ở bước tiếp theo.



Hình 3.12. LCD hiển thị chuyển sang mode 2 và ghi nhận kết quả đo.

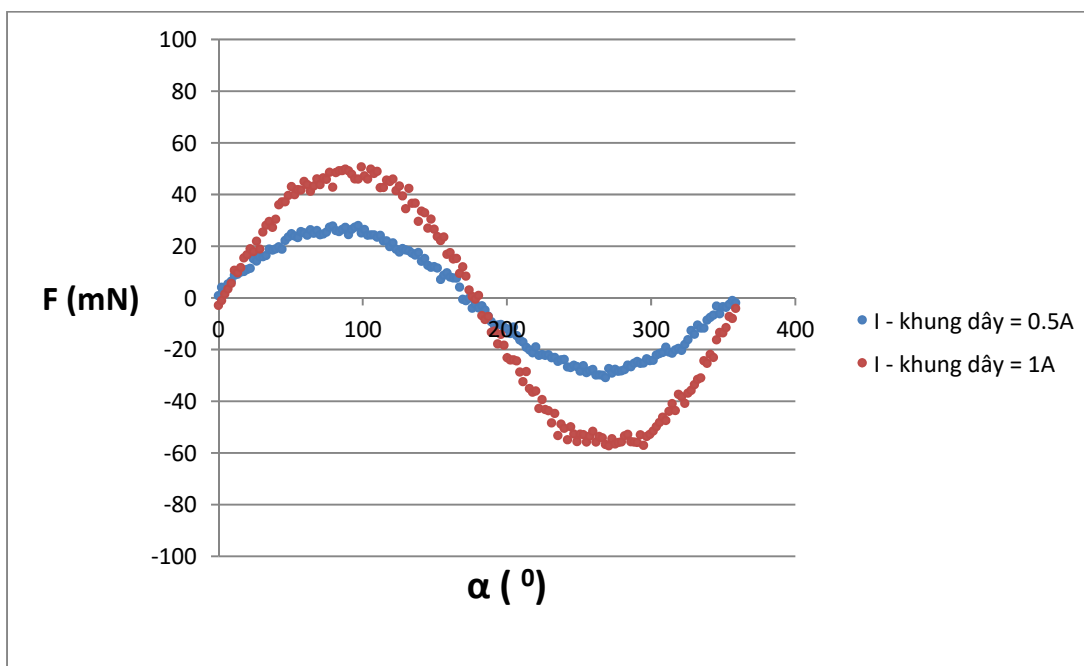
- + **Bước 8:** Ở chế độ thủ công, sau khi đo xong LCD sẽ tự động chuyển sang mode 3, ở mode này các giá trị lực từ và góc quay tương ứng sẽ được hiển thị lại trên màn hình LCD nhằm giúp người làm thí nghiệm dễ quan sát, xử lý số liệu và vẽ đồ thị thủ công hoặc trích dẫn dữ liệu ghi nhận trên Serial Monitor – Arduino IDE qua phần mềm Microsoft Excel và vẽ đồ thị kiểm chứng ở chế độ tự động.



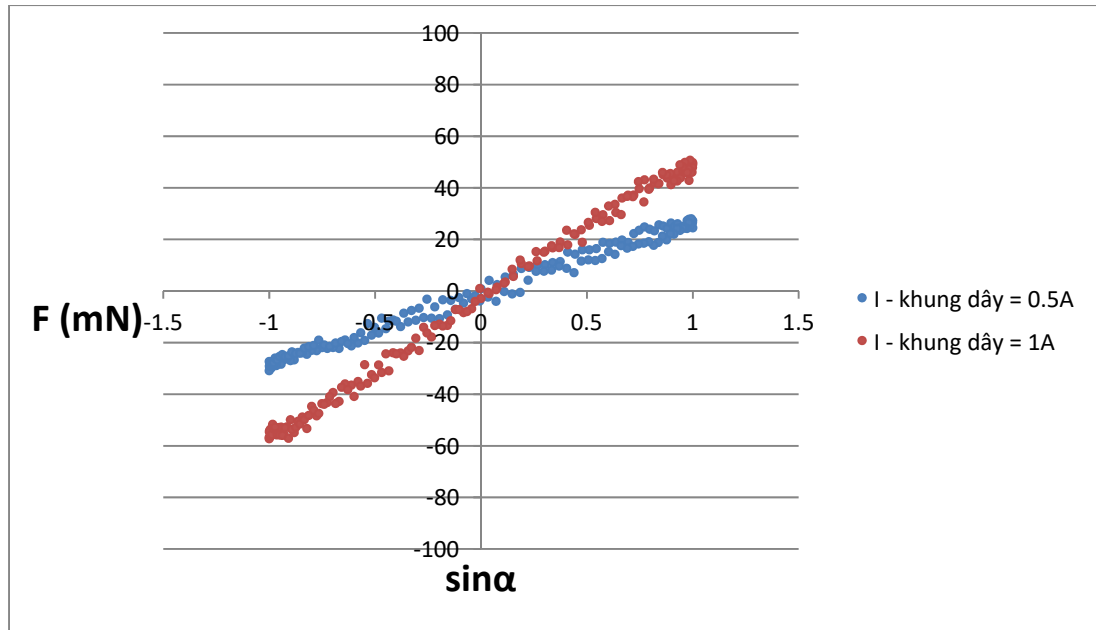
Hình 3.13. LCD chuyển sang mode 3 và hiển thị các giá trị đã ghi nhận.

b. Kết quả đo

Sau khi tiến hành thí nghiệm khảo sát theo các bước trên, số liệu thu được sẽ được đưa vào phần mềm Microsoft Excel và vẽ thành đồ thị như sau:

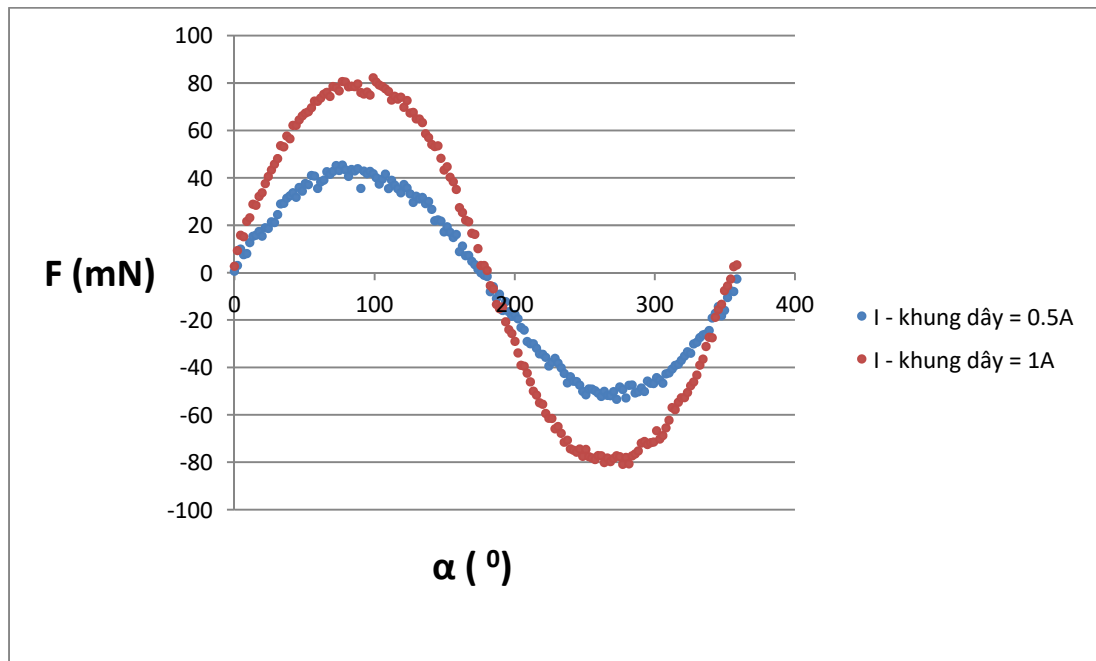


(a)

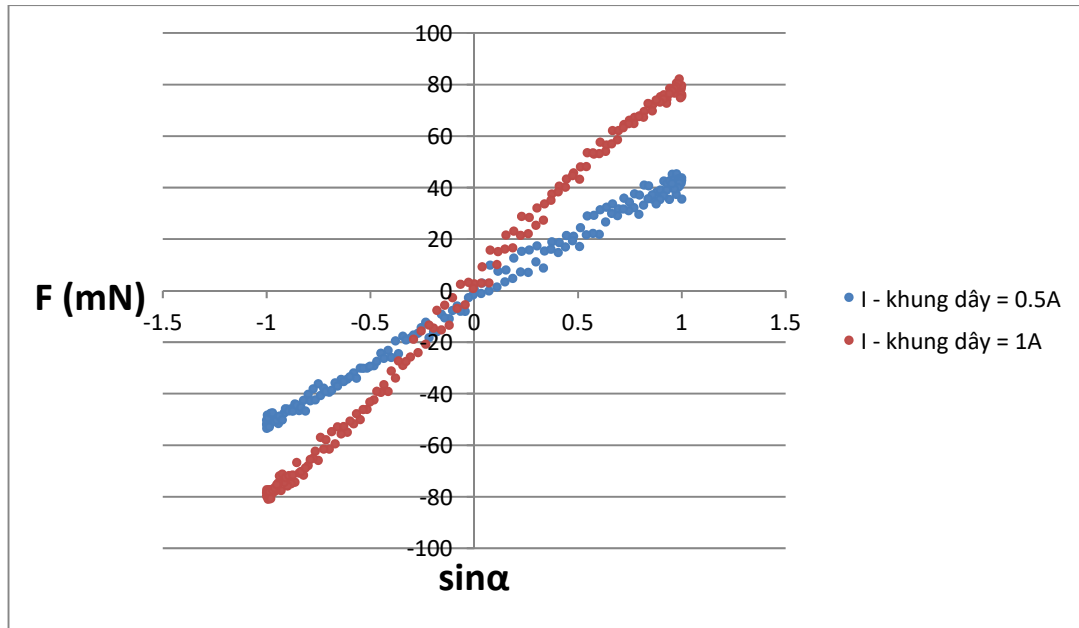


(b)

Hình 3.14. Đồ thị sự phụ thuộc giá trị lực từ \vec{F} vào góc quay α (a) và đồ thị sự phụ thuộc của lực từ theo $\sin \alpha$ (b) khi $I_{\text{nam châm}} = 0.5A$.



(a)



(b)

Hình 3.15. Đồ thị sự phụ thuộc giá trị lực từ \vec{F} vào góc quay α (a) và đồ thị sự phụ thuộc của lực từ theo $\sin \alpha$ (b) khi $I_{\text{nam châm}} = 1.0\text{A}$.

c. Phân tích kết quả

Từ các đồ thị trên, ta có thể thấy lực từ \vec{F} phụ thuộc vào góc quay α hay lực từ F theo $\sin \alpha$ có dạng phù hợp đồ thị lí thuyết ở mục 2.1.2. Cụ thể, độ lớn \vec{F} phụ thuộc vào α tuân theo quy tắc hàm sin và độ lớn \vec{F} theo $\sin \alpha$ có dạng là đường thẳng đi qua gốc tọa độ. Ở cả hai đồ thị của hình 3.14 và hình 3.15, độ lớn F_{max} tương ứng với giá trị $I_{\text{khung dây}} = 1\text{A}$ lớn gần gấp đôi độ lớn F_{max} ứng với $I_{\text{khung dây}} = 0.5\text{A}$.

Bên cạnh đó, hệ số góc của các đường thẳng tương ứng trong đồ thị 3.14b và 3.15b được tính toán thông qua các hàm tính toán trong Excel và thể hiện ở bảng 4 như sau.

Bảng 4. Hệ số góc của các đồ thị ứng với từng mức cường độ dòng điện

$I_{\text{nam châm}}(\text{A})$	$I_{\text{khung dây}}(\text{A})$	Hàm khớp	Hệ số góc
0.5	0.5	$y = 27.74x - 0.870$	27.74
	1.0	$y = 53.97x - 3.233$	53.97

1.0	0.5	$y = 48.11x - 3.461$	48.11
	1.0	$y = 82.66x + 1.331$	82.66

Trong bảng 4, hệ số góc của các đồ thị chính bằng tích NIB/l trong biểu thức (2). Từ đây, đề tài tiến hành kiểm chứng lại độ lớn cảm ứng từ \vec{B} trung bình trong vùng không gian đặt khung dây.

$$\text{Hệ số góc} = NBIl \quad (8)$$

Thế các thông số N, I, l được cho ở bảng bên dưới sẽ thu được độ lớn cảm ứng từ \vec{B} tính toán.

Mặc khác:

$$F_{\text{thực nghiệm}} = \Delta F = NIB_{\text{trên}}l\sin\alpha + NIB_{\text{dưới}}l\sin(\pi + \alpha) \quad (9)$$

Từ công thức (9) suy ra:

$$F_{\text{thực nghiệm}} = \Delta F = NI(B_{\text{trên}} - B_{\text{dưới}})l\sin\alpha \quad (10)$$

Như vậy độ lớn cảm ứng từ \vec{B} trung bình chính là hiệu của $(B_{TB\ 14} - B_{TB\ 5})$ ở bảng 3. Do đó, từ số liệu bảng 3 và công thức (8), ta thu được giá trị cảm ứng từ \vec{B} như sau:

Bảng 5. Kiểm chứng giá trị độ lớn cảm ứng từ từ thực nghiệm đo đạc và tính toán.

N = 200 vòng l = 0.04m				
I_{nam châm} (A)	I_{khung dây} (A)	B_{tính toán} (mT)	B_{thực nghiệm} = $B_{TB\ 14} - B_{TB\ 5}$	Sai số tương đối (%)
0.5	0.5	6.93	4.85	42.89
	1.0	6.75	4.85	39.18
1.0	0.5	12.03	9.74	23.51
	1.0	10.33	9.74	6.06

d. Nhận xét

Nhìn vào bảng 5 có thể thấy khi $I_{\text{nam châm}} = 0.5A$ thì sai số trong hai trường hợp lên đến 42.89% và giảm dần khi tăng $I_{\text{nam châm}}$ và $I_{\text{khung dây}}$. Từ đây có thể rút ra các nguyên nhân chủ yếu dẫn đến sai số lớn như sau:

- + Vật liệu làm nam châm bị nhiễm từ nên vùng từ trường giữa hai bản kim loại của nam châm không đều.

- + IC khuếch đại đo lường INA125P sử dụng chung nguồn nuôi với mạch điện tử nên điện áp cấp cho IC không được ổn định dẫn đến nhiều tín hiệu nhiễu.

- + Mặt phẳng khung dây đặt ở vị trí góc $\alpha = 0^\circ$ không chuẩn dẫn đến sai số trong quá trình đo.

- + Do hệ thống khảo sát lực từ được bố trí ở mục 3.4.1 có giới hạn về độ cao trục z khoảng hơn 9cm nhưng chiều cao khung dây dẫn sử dụng là 10cm nên khung dây không nằm hoàn toàn trong vùng từ trường đo đạc dẫn đến sai số của cảm ứng từ B giữa thực nghiệm và tính toán.

CHƯƠNG 4. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Kết quả thu được ở luận văn này chính là ứng dụng vi điều khiển Arduino Nano CH340 và các loại cảm biến để chế tạo được bộ thí nghiệm khảo sát lực tác dụng lên dòng điện thẳng và vẽ được đồ thị sự phụ thuộc của lực từ \vec{F} vào góc quay α có dạng hình sin hoặc lực từ \vec{F} phụ thuộc vào giá trị $\sin\alpha$ có dạng đường thẳng đi qua gốc tọa độ một cách tự động hóa.

Tuy nhiên, hệ thống vẫn còn một số nhược điểm như sau: vùng từ trường giữa hai bản kim loại của nam châm không đều, tín hiệu ngõ ra của hệ cân điện tử bị nhiễu và khung dây đặt không đúng vị trí góc 0^0 dẫn đến sai số lớn trong kết quả đo. Ngoài ra, đề tài này chưa xây dựng được một phần mềm tự động cập nhật giá trị lực từ - góc quay và vẽ thành đồ thị kiểm chứng sự phụ thuộc \vec{F} vào α hoặc $\sin\alpha$ ứng với từng giá trị cường độ dòng điện.

Từ đó, tôi đề xuất hướng cải tiến như sau: sử dụng lõi sắt non làm nam châm, cải tiến khả năng chống nhiễu của hệ cân điện tử, cân chỉnh lại góc 0^0 chuẩn xác hơn, sử dụng khung dây dẫn có chiều cao nằm hoàn toàn trong vùng từ trường đo đạc. Và thiết kế một phần mềm cập nhật các giá trị lực từ - góc quay α và vẽ đồ thị sự biến thiên của lực từ theo góc quay α nhằm giúp giáo viên và học sinh kiểm chứng lý thuyết lực từ chính xác và dễ dàng hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Công ty Cổ phần Sách và Thiết bị Trường học TP Hồ Chí Minh, *Bộ thí nghiệm lực từ và cảm ứng từ*,
<<https://www.stb.com.vn/vi/thia-t-ba-thpt/vat-li-thpt/bo-tn-luc-tu-va-cam-ung-dien-tu.html>>, truy cập ngày 11/04/2019.
- [2] Công ty TNHH Ngày Chủ Nhật – Sunday, *Bộ thí nghiệm lực từ và cảm ứng điện từ*,
<<http://sachthietbitruonghoc.com/san-pham/145/bo-thi-nghiem-luc-tu-va-cam-ung-dien-tu.html>>, truy cập ngày 11/04/2019.
- [3] Công ty Pasco (Hoa Kỳ), *Magnetic forces on wires experiment*,
<https://www.pasco.com/prodCatalog/EX/EX-9933_magnetic-forces-on-wires-experiment/index.cfm>, truy cập ngày 11/4/2019.
- [4] Trần Trọng Tân, Nguyễn Khánh (2016), *Bộ thí nghiệm đo lực từ bằng hệ thống cân điện tử*, Đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên, Trường Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh.
- [5] 5v.ru, *Arduino Nano v3.0 CH340G*,
<<http://www.5v.ru/nano30-ch340g.htm>>, truy cập ngày 15/03/2019.
- [6] Trần Thanh Phương (2018), *Chế tạo mô hình cửa thông minh đóng mở bằng điện thoại di động*, Luận văn tốt nghiệp Đại học, Trường Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh.
- [7] Candientu88.com, *Cấu tạo và cách hoạt động của loadcell (cảm biến lực)*,
<<https://candientu88.com/cau-tao-va-cach-hoat-dong-cua-loadcell-cam-bien-luc>>, truy cập ngày 13/03/2019.
- [8] Loadcell.com.vn, *Loadcell là gì?*,
<<http://loadcell.com.vn/tin-tuc/loadcell-la-gi.html>>, truy cập ngày 13/03/2019.
- [9] Võ Trần Khoa Nguyên (2018), *Thiết kế mô hình Mặt Trời – Trái Đất – Mặt Trăng phục vụ giảng dạy Thiên văn học cho học sinh Tiểu học và Trung*

học cơ sở, Luận văn tốt nghiệp Đại học, Trường Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh.

[10] Dientuadenz.com, Mạch đa hài dùng 555,
<<https://dientuadenz.com/mach-da-hai-dung-555/>>, truy cập ngày 16/01/2019.

[11] Xeco.wordpress.com, *Tỉ số truyền*,
<<https://xeco.wordpress.com/2011/07/06/t%E1%BB%89-s%E1%BB%91-truy%E1%BB%81n/>>, truy cập ngày 29/03/2019.

[12] techmaster.vn, *Hướng dẫn cách sử dụng Relay*,
<<https://techmaster.vn/posts/33777/hoc-dien-tu-co-ban-huong-dan-cach-su-dung-role>>, truy cập ngày 22/01/2019.

[13] Saonam.pro.vn, *Encoder là thiết bị gì*,
<<https://saonam.pro.vn/tin-cong-nghe/encoder-la-thiet-bi-gi-85.html>>, truy cập ngày 14/03/2019.

[14] Blogin3d.com, *Giáo trình robocon 3 – mạch cảm biến dò đường*,
<<https://blogin3d.com/giao-trinh-robocon-3-mach-cam-bien-do-duong-robot.html>>, truy cập ngày 29/03/2019.

[15] Sites.google.com, *Text LCD là gì?*,
<<https://sites.google.com/site/lcd24hgroup/lcd/text-lcd-la-gi>>, truy cập ngày 14/03/2019.

[16] Hshop.vn, *Mạch giao tiếp LCD1602 – LCD1604 – LCD2004 sang I2C*,
<<https://hshop.vn/products/mach-chuyen-giao-tiep-lcd1602-lcd1604-lcd2004-sang-i2c>>, truy cập ngày 14/03/2019.

PHỤ LỤC

❖ Bảng số liệu khảo sát độ lớn cảm ứng từ giữa bản kim loại của nam châm, đơn vị mT.

➤ Trường hợp $I_{\text{nam châm}} = 0.5\text{A}$

+ Độ cao $z = 5\text{cm}$

$y(\text{cm}) \backslash x(\text{cm})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	1.03	1.22	1.36	1.46	1.51	1.49	1.43	1.29	1.15	0.92	0.61
0	1.07	1.30	1.49	1.61	1.65	1.63	1.57	1.43	1.24	0.96	0.72
1	1.17	1.41	1.62	1.73	1.77	1.75	1.69	1.56	1.34	1.05	0.69
2	1.33	1.65	1.85	1.98	2.02	2.00	1.91	1.77	1.52	1.12	0.77
3	1.38	1.70	1.91	2.04	2.09	2.17	2.07	1.90	1.62	1.25	0.77
4	1.52	1.82	2.09	2.2	2.24	2.20	2.09	1.90	1.59	1.20	0.69
5	1.53	1.83	2.06	2.19	2.23	2.20	2.11	1.93	1.64	1.23	0.73
6	1.50	1.86	2.08	2.18	2.23	2.19	2.09	1.89	1.60	1.19	0.67
7	1.48	1.8	2.01	2.12	2.17	2.15	2.04	1.87	1.59	1.19	0.70
8	1.42	1.75	1.97	2.06	2.08	2.04	1.93	1.77	1.51	1.09	0.67
9	1.37	1.64	1.84	1.95	1.97	1.94	1.85	1.69	1.40	1.07	0.60
10	1.24	1.50	1.67	1.76	1.79	1.76	1.68	1.51	1.27	0.96	0.61

+ Độ cao $z = 6\text{cm}$

$y(\text{cm}) \backslash x(\text{cm})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	0.80	1.00	1.15	1.26	1.29	1.31	1.24	1.14	0.98	0.75	0.48
0	0.91	1.15	1.31	1.42	1.46	1.46	1.41	1.27	1.07	0.81	0.57
1	1.13	1.37	1.53	1.63	1.68	1.67	1.59	1.42	1.21	0.93	0.62
2	1.14	1.42	1.64	1.76	1.80	1.80	1.71	1.57	1.35	1.05	0.63

3	1.25	1.56	1.75	1.89	1.91	1.89	1.82	1.65	1.36	1.02	0.63
4	1.29	1.62	1.81	1.94	1.99	1.95	1.86	1.69	1.43	1.08	0.67
5	1.29	1.61	1.84	1.98	2.01	1.99	1.87	1.71	1.43	1.04	0.70
6	1.33	1.63	1.86	1.98	2.04	2.00	1.92	1.75	1.47	1.11	0.66
7	1.32	1.62	1.85	1.94	2.00	1.98	1.87	1.68	1.40	1.03	0.66
8	1.28	1.55	1.77	1.89	1.93	1.91	1.80	1.65	1.40	1.05	0.62
9	1.20	1.47	1.68	1.79	1.82	1.79	1.69	1.52	1.26	0.94	0.62
10	1.12	1.37	1.55	1.65	1.69	1.65	1.58	1.43	1.21	0.91	0.54

+ Độ cao z = 7cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	1.30	1.52	1.72	1.85	1.89	1.88	1.82	1.68	1.46	1.12	0.71
0	1.37	1.74	1.95	2.05	2.11	2.07	2.00	1.86	1.58	1.18	0.77
1	1.51	1.88	2.10	2.20	2.27	2.25	2.17	2.02	1.75	1.33	0.79
2	1.70	2.09	2.32	2.45	2.46	2.45	2.37	2.16	1.82	1.39	0.82
3	1.78	2.22	2.47	2.60	2.64	2.61	2.52	2.35	2.03	1.51	0.82
4	1.93	2.36	2.62	2.73	2.75	2.71	2.59	2.39	2.02	1.47	0.85
5	1.92	2.36	2.65	2.77	2.80	2.77	2.68	2.47	2.15	1.60	0.90
6	1.92	2.36	2.62	2.77	2.80	2.75	2.67	2.45	2.10	1.61	0.99
7	1.90	2.31	2.59	2.70	2.72	2.69	2.60	2.43	2.12	1.62	0.92
8	1.90	2.32	2.54	2.62	2.60	2.57	2.47	2.31	2.01	1.45	0.85
9	1.80	2.16	2.37	2.43	2.45	2.42	2.33	2.18	1.89	1.42	0.78
10	1.63	1.99	2.15	2.24	2.24	2.20	2.11	1.95	1.69	1.29	0.72

+ Độ cao z = 8cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	1.49	1.82	2.01	2.11	2.16	2.17	2.12	2.01	1.70	1.35	0.75
0	1.74	2.10	2.29	2.39	2.42	2.40	2.37	2.22	1.94	1.45	0.89
1	1.96	2.38	2.60	2.70	2.72	2.71	2.64	2.52	2.27	1.65	0.94
2	2.14	2.65	2.87	2.93	2.95	2.91	2.88	2.71	2.44	1.85	0.99
3	2.29	2.83	3.07	3.15	3.17	3.11	3.07	2.91	2.60	1.99	1.05
4	2.39	3.00	3.24	3.27	3.29	3.26	3.18	3.02	2.69	2.04	1.16
5	2.47	3.05	3.33	3.39	3.37	3.33	3.27	3.12	2.83	2.18	1.16
6	2.57	3.14	3.34	3.41	3.37	3.33	3.25	3.11	2.77	2.13	1.20
7	2.58	3.15	3.36	3.37	3.34	3.29	3.23	3.10	2.81	2.18	1.12
8	2.55	3.13	3.30	3.30	3.25	3.18	3.12	3.01	2.78	2.19	1.28
9	2.38	2.95	3.11	3.08	3.02	2.98	2.91	2.79	2.58	2.02	1.11
10	2.23	2.70	2.81	2.83	2.78	2.71	2.65	2.52	2.29	1.83	1.04

+ Độ cao z = 9cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1		2.29	2.48	2.53	2.57	2.60	2.54	2.49	2.31	1.79	
0	2.29	2.72	2.85	2.82	2.85	2.85	2.88	2.85	2.74	2.14	0.92
1	2.79	3.26	3.29	3.21	3.18	3.19	3.23	3.23	3.12	2.43	0.95
2	3.01	3.59	3.62	3.54	3.50	3.48	3.49	3.52	3.38	2.69	1.33
3	3.22	3.88	3.94	3.82	3.75	3.72	3.74	3.71	3.59	2.89	1.23
4	3.29	4.01	4.07	3.98	3.88	3.85	3.82	3.85	3.70	3.01	1.51
5	3.39	4.15	4.20	4.10	4.00	3.93	3.94	3.93	3.79	3.09	1.39
6	3.49	4.24	4.25	4.11	4.00	3.93	3.94	3.94	3.85	3.24	1.70

7	3.59	4.34	3.28	4.07	3.94	3.86	3.85	3.90	3.88	3.35	1.61
8	3.74	4.34	4.18	3.94	3.76	3.68	3.70	3.76	3.81	3.31	1.59
9	3.61	4.12	3.92	3.69	3.50	3.41	3.40	3.45	3.50	3.18	1.54
10	3.21	3.62	3.47	3.28	3.12	3.04	3.02	3.01	2.98	2.63	1.32

+ Độ cao z = 10cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			3.40	3.30	3.37	3.29	3.36	3.53	3.74		
0		4.89	4.30	4.00	3.87	3.89	4.01	4.42	5.00	5.71	
1	7.46	6.35	5.42	4.80	4.52	4.42	4.53	4.82	5.43	6.33	4.41
2	7.33	6.24	5.39	4.87	4.64	4.63	4.79	5.20	5.86	6.39	3.19
3	7.32	6.28	5.55	5.07	4.83	4.75	4.88	5.16	5.79	6.22	2.55
4	8.75	7.08	6.12	5.55	5.25	5.17	5.32	5.59	6.13	7.15	4.29
5	10.04	7.14	6.11	5.62	5.29	5.20	5.33	5.64	6.15	7.49	5.03
6	8.65	6.84	5.92	5.40	5.12	5.09	5.24	5.61	6.28	7.59	2.39
7	9.75	7.15	6.00	5.32	5.02	4.96	5.10	5.48	6.34	7.89	3.15
8	10.60	7.35	5.88	5.10	4.81	4.69	4.79	5.20	5.97	7.68	4.17
9	11.65	7.05	5.44	4.70	4.40	4.31	4.40	4.79	5.71	8.32	7.50
10	6.89	5.59	4.65	4.17	3.92	3.82	3.88	4.08	4.55	5.48	3.05

+ Độ cao z = 11cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			4.06	3.92	3.84	3.86	3.99	4.25	4.68		
0		7.29	5.54	4.86	4.57	4.52	4.66	5.10	6.05	8.88	
1	14.53	8.70	6.43	5.53	5.13	5.05	5.22	5.73	6.78	9.54	16.55

2	12.93	9.12	7.03	6.03	5.55	5.42	5.55	5.98	6.95	8.85	14.33
3	11.8	8.52	6.98	6.17	5.76	5.67	5.83	6.26	7.18	9.16	13.12
4	11.26	8.59	7.14	6.37	5.98	5.85	5.98	6.35	7.19	8.88	12.40
5	11.03	8.55	7.14	6.41	6.03	5.91	6.01	6.39	7.15	8.79	12.05
6	10.76	8.60	7.20	6.43	6.02	5.90	6.00	6.41	7.21	8.88	12.01
7	10.95	8.68	7.20	6.39	5.95	5.79	5.93	6.35	7.22	9.01	11.82
8	11.36	8.88	7.16	6.22	5.73	5.60	5.71	6.24	7.24	9.35	12.16
9	12.97	9.12	6.91	5.89	5.41	5.25	5.37	5.86	7.02	9.78	13.52
10	14.99	7.97	6.10	5.26	4.87	4.76	4.85	5.23	6.16	8.82	13.10

+ Độ cao z = 12cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			4.36	4.22	4.16	4.20	4.36	4.70	5.22		
0		10.59	7.09	5.80	5.15	4.88	4.84	5.06	5.60	6.70	
1	11.44	8.92	6.93	5.97	5.52	5.43	5.63	6.22	7.52	9.99	11.83
2	9.91	8.96	7.50	6.55	6.02	5.86	6.00	6.50	7.49	8.99	10.23
3	9.35	8.48	7.40	6.62	6.21	6.11	6.29	6.80	7.70	8.97	9.66
4	8.78	8.43	7.52	6.84	6.42	6.29	6.42	6.84	7.56	8.60	9.47
5	8.54	8.31	7.51	6.85	6.49	6.38	6.50	6.91	7.58	8.61	9.27
6	8.88	8.31	7.48	6.82	6.45	6.32	6.46	6.88	7.62	8.61	9.28
7	8.89	8.39	7.48	6.77	6.35	6.22	6.39	6.84	7.65	8.71	9.33
8	9.55	8.71	7.48	6.64	6.15	6.00	6.16	6.66	7.61	8.91	9.83
9	11.00	9.04	7.31	6.33	5.82	5.66	5.81	6.33	7.44	9.45	11.05
10	14.31	7.59	5.80	4.93	4.47	4.32	4.42	4.84	5.70	7.59	16.05

+ Độ cao z = 13cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			5.36	4.95	4.69	4.57	4.58	4.74	5.00		
0		8.34	6.60	5.80	5.40	5.28	5.40	5.82	6.63	8.20	
1	9.21	8.25	6.60	5.64	5.13	4.98	5.14	5.63	6.59	8.23	9.72
2	8.83	7.83	6.87	6.03	5.55	5.41	5.55	6.02	6.84	7.90	8.53
3	8.32	8.27	7.62	7.00	6.62	6.48	6.65	7.07	7.74	8.47	8.84
4	8.07	8.14	7.64	7.12	6.78	6.65	6.77	7.14	7.71	8.28	8.48
5	8.03	8.10	7.64	7.14	6.82	6.70	6.82	7.19	7.71	8.25	8.30
6	8.07	8.21	7.71	7.19	6.84	6.73	6.84	7.20	7.75	8.28	8.31
7	8.23	8.34	7.74	7.14	6.77	6.62	6.75	7.15	7.76	8.40	8.30
8	8.78	8.69	7.75	6.99	6.53	6.35	6.51	6.95	7.74	8.70	8.64
9	10.32	9.31	7.66	6.70	6.17	5.96	6.07	6.51	7.43	8.96	10.23
10	16.01	8.56	6.87	6.01	5.58	5.43	5.53	5.90	6.68	8.33	14.20

+ Độ cao z = 14cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			5.00	4.79	4.68	4.69	4.86	5.18	5.66		
0		7.34	6.18	5.62	5.36	5.35	5.60	6.15	7.18	9.58	
1	10.76	8.84	7.30	6.52	6.09	6.00	6.19	6.74	7.72	9.50	11.17
2	9.15	8.53	7.61	6.93	6.55	6.44	6.62	7.07	7.84	8.77	9.42
3	8.73	8.15	7.51	7.01	6.72	6.67	6.88	7.33	7.95	8.60	8.94
4	8.47	8.12	7.58	7.14	6.85	6.77	6.91	7.28	7.80	8.37	8.76
5	8.45	8.02	7.52	7.12	6.87	6.82	6.97	7.35	7.85	8.38	8.70
6	8.49	8.05	7.53	7.10	6.82	6.75	6.91	7.27	7.80	8.37	8.75

7	8.69	8.16	7.52	7.01	6.70	6.60	6.78	7.21	7.84	8.54	8.93
8	9.14	8.39	7.47	6.82	6.45	6.34	6.53	7.02	7.83	8.87	9.51
9	10.56	8.82	7.31	6.49	6.04	5.92	6.06	6.56	7.53	9.35	11.01
10	14.09	8.06	6.56	5.83	5.47	5.35	5.48	5.86	6.71	8.65	14.42

➤ Trường hợp $I_{\text{nam châm}} = 1.0\text{A}$

+ Độ cao $z = 5\text{cm}$

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	2.00	2.41	2.75	2.94	3.00	3.06	2.99	2.75	2.40	1.94	1.37
0	2.20	2.71	3.08	3.30	3.41	3.38	3.26	3.05	2.66	2.12	1.51
1	2.34	2.89	3.28	3.55	3.65	3.64	3.50	3.24	2.84	2.23	1.61
2	2.56	3.19	3.61	3.86	3.97	3.95	3.79	3.51	3.06	2.42	1.72
3	2.64	3.33	3.76	4.04	4.14	4.13	3.98	3.66	3.14	2.48	1.78
4	2.69	3.36	3.85	4.14	4.25	4.24	4.03	3.74	3.28	2.57	1.84
5	2.78	3.52	3.97	4.26	4.34	4.33	4.12	3.80	3.27	2.58	1.72
6	2.85	3.57	4.05	4.34	4.45	4.42	4.21	3.89	3.40	2.65	1.79
7	2.77	3.50	3.95	4.20	4.30	4.26	4.06	3.72	3.21	2.50	1.64
8	2.65	3.38	3.81	4.04	4.14	4.09	3.91	3.61	3.14	2.52	1.69
9	2.49	3.09	3.50	3.71	3.79	3.71	3.56	3.28	2.85	2.24	1.60
10	2.35	2.85	3.24	3.43	3.51	3.45	3.31	3.01	2.61	2.06	1.51

+ Độ cao $z = 6\text{cm}$

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	2.70	3.22	3.62	3.84	3.95	3.93	3.76	3.52	3.10	2.54	1.87
0	2.74	3.44	3.86	4.12	4.25	4.37	4.28	4.02	3.54	2.83	2.07
1	3.12	3.93	4.42	4.65	4.75	4.73	4.55	4.23	3.70	2.92	2.08

2	3.41	4.31	4.88	5.18	5.25	5.21	5.02	4.69	4.11	3.16	2.20
3	3.42	4.27	4.90	5.14	5.27	5.20	5.01	4.68	4.08	3.22	2.08
4	3.46	4.48	5.00	5.28	5.37	5.28	5.10	4.74	4.09	3.19	2.04
5	3.57	4.51	5.09	5.38	5.45	5.41	5.22	4.84	4.24	3.28	2.21
6	3.51	4.45	5.02	5.31	5.38	5.31	5.12	4.72	4.21	3.31	2.24
7	3.36	4.26	4.77	5.03	5.10	5.04	4.82	4.49	3.90	3.03	2.05
8	3.31	4.13	4.61	4.86	4.90	4.82	4.64	4.31	3.72	2.94	2.02
9	3.14	3.91	4.38	4.60	4.66	4.56	4.38	4.05	3.53	2.77	1.91
10	2.91	3.61	4.01	4.21	4.26	4.22	4.03	3.70	3.23	2.56	1.79

+ Độ cao z = 7cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	3.15	3.88	4.36	4.64	4.77	4.74	4.57	4.34	3.90	3.15	2.20
0	3.32	4.32	4.82	5.10	5.12	5.16	5.06	4.88	4.39	3.61	2.60
1	3.89	4.91	5.40	5.61	5.66	5.64	5.59	5.32	4.81	3.91	2.61
2	4.05	5.24	5.91	6.02	5.93	5.94	5.83	5.64	5.12	4.32	2.94
3	4.29	5.49	6.04	6.33	6.39	6.24	6.22	5.93	5.31	4.21	2.73
4	4.35	5.69	6.31	6.56	6.62	6.54	6.39	6.08	5.51	4.56	3.05
5	4.40	5.67	6.28	6.51	6.53	6.60	6.44	6.14	5.53	4.40	2.92
6	4.46	5.70	6.32	6.57	6.58	6.51	6.4	6.15	5.56	4.52	3.07
7	4.41	5.64	6.25	6.41	6.42	6.38	6.21	5.96	5.35	4.41	2.99
8	4.22	5.49	6.04	6.19	6.14	6.06	5.91	5.65	5.18	4.21	2.89
9	4.04	5.25	5.69	5.81	5.75	5.71	5.53	5.25	4.81	3.85	2.60
10	3.83	4.78	5.17	5.29	5.25	5.18	5.00	4.72	4.25	3.38	2.19

+ Độ cao z = 8cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1	3.87	4.87	5.36	5.54	5.59	5.53	5.51	5.32	4.99	4.18	2.75
0	5.51	6.35	6.55	6.54	6.48	6.48	6.51	6.52	6.19	5.06	3.02
1	5.25	6.52	6.81	6.85	6.75	6.72	6.72	6.62	6.16	5.12	3.30
2	5.82	7.42	7.78	7.63	7.54	7.51	7.48	7.47	7.23	6.53	4.05
3	6.03	7.50	7.71	7.63	7.56	7.60	7.69	7.64	7.49	6.20	3.89
4	6.47	7.99	8.29	8.20	8.07	7.91	7.88	7.81	7.40	6.15	3.90
5	6.52	8.19	8.61	8.60	8.41	8.38	8.39	8.25	8.04	6.7	4.29
6	6.37	8.04	8.41	8.32	8.20	8.06	8.05	7.95	7.56	6.42	4.04
7	6.4	8.14	8.39	8.28	8.04	7.89	7.82	7.76	7.45	6.31	4.12
8	6.42	8.09	8.41	8.05	7.81	7.71	7.55	7.53	7.24	6.14	4.12
9	6.33	7.62	7.78	7.55	7.26	7.09	7.01	6.98	6.75	5.92	3.92
10	5.40	6.55	6.74	6.60	6.45	6.30	6.18	6.02	5.73	4.86	3.24

+ Độ cao z = 9cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1		7.25	7.21	6.85	6.82	6.92	6.87	7.34	7.75	7.05	
0	10.02	9.78	8.78	8.21	7.90	7.83	8.25	8.59	9.44	9.68	9.55
1	10.00	10.22	9.64	9.05	8.67	8.57	8.82	9.41	9.71	9.61	5.78
2	10.03	10.91	10.29	9.46	9.15	9.03	9.10	9.52	9.82	9.37	6.01
3	10.07	10.49	10.07	9.51	9.20	9.09	9.20	9.52	10.01	9.73	5.60
4	10.36	11.32	10.53	9.94	9.49	9.43	9.56	9.79	10.08	9.88	5.93
5	8.64	10.02	9.72	9.30	9.01	8.88	8.91	9.08	9.24	8.21	4.57
6	9.02	10.21	9.82	9.31	9.00	8.83	8.91	9.09	9.29	8.43	4.48
7	9.01	10.11	9.65	9.09	8.72	8.59	8.64	8.86	9.09	8.44	4.65

8	9.39	10.33	9.48	8.81	8.43	8.25	8.34	8.65	9.06	8.77	5.36
9	9.14	9.63	8.83	8.17	7.78	7.63	7.68	7.94	8.36	8.28	5.41
10	7.42	8.03	7.69	7.28	6.99	6.85	6.82	6.91	7.00	6.52	4.46

+ Độ cao z = 10cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			9.23	8.21	7.89	7.84	8.08	8.72	10.23		
0		14.15	11.00	9.54	9.06	8.93	9.34	10.33	12.89	18.80	
1	25.10	14.93	11.74	10.34	9.74	9.64	10.04	10.99	12.88	17.17	25.40
2	24.60	14.84	12.25	10.96	10.25	10.20	10.54	11.55	13.30	16.83	26.50
3	27.10	14.97	12.49	11.30	10.65	10.55	10.81	11.59	13.01	16.37	23.00
4	25.30	15.04	12.66	11.45	10.83	10.70	10.98	11.79	13.25	16.94	23.80
5	25.00	15.07	12.64	11.45	10.92	10.81	11.99	11.76	13.25	17.02	24.50
6	24.20	15.13	12.64	11.36	10.72	10.55	10.80	11.54	13.09	16.68	23.90
7	23.00	15.08	12.51	11.15	10.48	10.31	10.63	11.66	13.59	18.04	23.10
8	26.80	15.79	12.31	10.76	9.91	9.67	9.93	10.74	12.64	17.24	23.80
9	23.10	14.34	11.12	9.70	9.03	8.79	9.00	9.75	11.48	16.14	20.50
10	14.00	11.19	9.41	8.55	8.00	7.83	7.92	8.34	9.27	10.97	9.53

+ Độ cao z = 11cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			10.37	9.31	8.75	8.64	8.90	9.72	11.20		
0		16.41	12.22	10.45	9.70	9.50	9.85	10.82	13.05	19.60	
1	23.80	17.15	13.60	11.80	11.21	11.12	11.65	13.18	16.28	20.00	26.20
2	21.60	16.75	14.08	12.72	11.98	11.90	12.40	13.64	15.88	18.92	23.90

3	19.90	16.80	14.37	13.13	12.39	12.13	12.40	13.28	15.28	17.87	22.90
4	19.48	16.53	14.42	13.37	12.55	12.45	12.75	13.64	15.40	18.41	22.30
5	19.81	16.87	14.65	13.35	12.66	12.44	12.90	13.75	15.46	18.60	21.70
6	19.63	17.20	14.98	13.47	12.67	12.29	12.79	13.74	15.40	18.20	21.50
7	20.40	17.16	14.57	12.91	12.05	11.66	12.10	13.17	15.30	19.09	22.10
8	22.20	17.72	14.08	12.25	11.37	11.12	11.52	12.66	14.91	19.42	23.40
9	28.10	17.92	13.39	11.47	10.56	10.32	10.65	11.71	14.15	20.90	28.90
10	17.60	13.78	11.05	9.68	8.97	8.83	9.02	9.71	11.26	14.28	11.65

+ Độ cao z = 12cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			10.77	9.88	9.50	9.35	9.82	10.76	12.31		
0		17.42	13.45	11.59	10.91	10.82	11.14	12.48	14.88	19.75	
1	20.40	17.52	14.62	12.79	11.88	11.60	12.01	13.25	15.40	18.80	20.50
2	18.46	16.59	14.75	13.39	12.64	12.40	12.84	13.89	15.50	17.50	18.00
3	17.25	16.35	14.92	13.65	12.87	12.64	13.01	13.92	15.38	17.00	18.01
4	16.30	16.13	14.84	13.61	13.02	12.81	13.12	13.98	15.29	16.92	17.72
5	16.82	16.21	14.81	13.58	12.91	12.75	13.07	13.84	15.21	16.89	17.80
6	17.49	16.64	14.95	13.56	12.79	12.54	12.79	13.50	14.85	16.69	18.05
7	17.91	16.96	15.01	13.43	12.54	12.21	12.47	13.36	14.91	17.01	18.30
8	19.46	17.66	14.99	12.98	11.93	11.62	11.88	12.86	14.72	17.49	19.64
9	24.00	18.59	14.42	12.29	11.15	10.79	11.02	11.90	13.75	17.64	24.70
10	17.18	15.36	12.38	10.83	10.00	9.69	9.82	10.50	11.89	14.42	12.52

+ Độ cao z = 13cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			11.25	10.39	9.91	9.80	10.01	10.69	11.88		
0		16.82	13.59	12.02	11.33	11.19	11.65	12.68	14.48	18.60	
1	18.11	17.06	14.73	13.01	12.17	11.98	12.31	13.41	15.31	17.87	18.59
2	17.03	16.62	15.21	13.75	12.99	12.75	13.04	13.92	15.36	16.96	16.52
3	16.55	16.19	15.15	14.17	13.39	13.28	13.55	14.34	15.43	16.60	16.99
4	16.37	16.18	15.15	14.3	13.66	13.43	13.67	14.36	15.44	16.44	15.91
5	16.04	16.06	15.13	14.16	13.51	13.35	13.68	14.41	15.48	16.42	15.49
6	16.01	16.17	15.16	14.15	13.44	13.25	13.61	14.39	15.52	16.61	15.71
7	16.52	16.60	15.23	13.99	13.24	12.92	13.22	14.06	15.39	16.79	16.02
8	17.82	17.37	15.33	13.62	12.85	12.48	12.78	13.55	15.38	17.59	17.36
9	21.80	18.34	14.88	12.95	11.99	11.57	11.81	12.65	14.31	17.89	21.90
10	18.28	15.55	12.84	11.48	10.68	10.39	10.52	11.13	12.31	14.61	13.76

+ Độ cao z = 14cm

y(cm) x(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1			10.80	10.12	9.81	9.82	10.15	10.87	12.35		
0		16.54	13.37	12.01	11.49	11.34	11.85	12.85	14.95	19.49	
1	19.80	17.33	15.20	13.75	13.11	12.98	13.52	14.64	16.52	19.08	20.20
2	18.36	16.67	15.11	13.97	13.35	13.24	13.69	14.72	16.21	17.91	19.00
3	17.68	16.16	15.03	14.03	13.49	13.38	13.85	14.69	15.90	17.08	17.89
4	17.08	15.88	14.95	14.20	13.70	13.61	13.95	14.71	15.72	16.92	17.69
5	17.09	16.10	15.11	14.22	13.68	13.56	13.90	14.66	15.62	16.74	17.57
6	17.18	16.02	14.99	14.05	13.51	13.40	13.69	14.52	15.59	16.74	17.91
7	17.69	16.34	15.01	13.88	13.24	13.02	13.39	14.29	15.60	17.19	18.07

8	18.77	16.91	14.78	13.31	12.62	12.34	12.73	13.77	15.42	17.85	19.42
9	23.20	17.49	14.36	12.75	11.88	11.65	12.00	12.95	14.96	19.11	24.30
10	19.72	15.00	12.52	11.29	10.63	10.42	10.65	11.32	12.66	15.15	11.87

❖ **Bảng số liệu khảo sát độ lớn lực từ theo góc quay α và theo $\sin\alpha$.**

➤ **Trường hợp $I_{\text{nam châm}} = 0.5\text{A}$, $I_{\text{khung dây}} = 0.5\text{A}$**

Lần 1	Lần 2	Lần 3	F_{TB} (mN)	α (°)	α (rad)	$\sin\alpha$
-1.90	4.65	-0.22	0.843	0.0	0.000	0.000
1.68	1.32	9.30	4.100	2.2	0.038	0.038
4.10	3.37	-0.09	2.460	4.4	0.077	0.077
8.24	3.02	4.82	5.360	6.6	0.115	0.115
9.01	3.92	6.35	6.427	8.8	0.154	0.153
7.67	9.79	8.69	8.717	11.0	0.192	0.191
10.28	4.88	12.19	9.117	13.2	0.230	0.228
10.61	8.44	10.81	9.953	15.4	0.269	0.265
7.06	12.15	11.33	10.180	17.6	0.307	0.302
11.94	10.32	10.67	10.977	19.8	0.345	0.339
9.45	14.42	10.31	11.393	22.0	0.384	0.374
14.65	17.92	12.62	15.063	24.2	0.422	0.410
15.07	12.64	14.96	14.223	26.4	0.461	0.444
14.81	16.38	16.64	15.943	28.6	0.499	0.478
14.68	15.81	17.27	15.920	30.8	0.537	0.512
15.09	17.35	16.71	16.383	33.0	0.576	0.544
17.34	21.02	18.21	18.857	35.2	0.614	0.576
16.34	19.87	19.14	18.450	37.4	0.652	0.607
16.66	21.94	18.20	18.933	39.6	0.691	0.637
21.76	18.58	18.87	19.737	41.8	0.729	0.666

16.62	23.49	16.37	18.827	44.0	0.768	0.694
15.60	22.55	28.51	22.220	46.2	0.806	0.721
20.21	23.52	26.94	23.557	48.4	0.844	0.748
23.67	22.44	28.28	24.797	50.6	0.883	0.772
21.46	23.02	27.28	23.920	52.8	0.921	0.796
20.55	23.30	26.05	23.300	55.0	0.959	0.819
18.54	26.38	31.94	25.620	57.2	0.998	0.840
25.82	22.31	27.39	25.173	59.4	1.036	0.860
19.76	24.84	28.13	24.243	61.6	1.075	0.879
20.76	26.87	31.36	26.330	63.8	1.113	0.897
18.43	27.75	28.85	25.010	66.0	1.151	0.913
19.27	27.29	31.60	26.053	68.2	1.190	0.928
17.96	25.88	29.44	24.427	70.4	1.228	0.942
19.41	25.86	28.87	24.713	72.6	1.266	0.954
16.81	28.76	30.66	25.410	74.8	1.305	0.965
20.99	29.34	31.65	27.327	77.0	1.343	0.974
23.99	28.68	30.76	27.810	79.2	1.382	0.982
24.09	24.11	29.96	26.053	81.4	1.420	0.989
23.64	24.30	28.87	25.603	83.6	1.458	0.994
26.27	22.46	30.60	26.443	85.8	1.497	0.997
24.21	29.43	28.15	27.263	88.0	1.535	0.999
20.85	28.32	24.29	24.487	90.2	1.573	1.000
26.32	27.39	25.79	26.500	92.4	1.612	0.999
24.88	25.32	31.80	27.333	94.6	1.650	0.997
26.93	25.89	30.99	27.937	96.8	1.689	0.993
24.77	27.57	23.02	25.120	99.0	1.727	0.988
22.91	24.20	32.26	26.457	101.2	1.765	0.981

23.54	23.96	25.20	24.233	103.4	1.804	0.973
20.84	23.44	28.69	24.323	105.6	1.842	0.963
23.69	22.25	27.16	24.367	107.8	1.881	0.952
21.84	21.22	27.37	23.477	110.0	1.919	0.940
20.98	26.26	25.33	24.190	112.2	1.957	0.926
19.25	25.60	21.19	22.013	114.4	1.996	0.911
20.19	20.53	25.42	22.047	116.6	2.034	0.895
14.51	20.48	24.48	19.823	118.8	2.072	0.877
15.78	23.08	24.91	21.257	121.0	2.111	0.858
12.62	20.87	22.98	18.823	123.2	2.149	0.837
9.08	19.58	24.38	17.680	125.4	2.188	0.816
12.71	21.92	22.59	19.073	127.6	2.226	0.793
13.25	21.18	21.19	18.540	129.8	2.264	0.769
12.53	17.47	24.66	18.220	132.0	2.303	0.744
11.22	19.30	21.31	17.277	134.2	2.341	0.718
10.04	18.48	21.17	16.563	136.4	2.379	0.690
12.17	20.64	19.87	17.560	138.6	2.418	0.662
5.51	17.90	19.13	14.180	140.8	2.456	0.633
9.36	18.32	17.99	15.223	143.0	2.495	0.603
8.32	15.14	14.20	12.553	145.2	2.533	0.572
4.20	15.45	15.77	11.807	147.4	2.571	0.540
3.05	14.96	18.18	12.063	149.6	2.610	0.507
4.60	12.95	17.10	11.550	151.8	2.648	0.474
1.65	5.17	14.44	7.087	154.0	2.686	0.440
4.16	8.92	13.14	8.740	156.2	2.725	0.405
1.95	11.08	15.92	9.650	158.4	2.763	0.369
-1.72	11.41	14.47	8.053	160.6	2.802	0.334

0.53	10.70	11.80	7.677	162.8	2.840	0.297
5.24	6.90	10.71	7.617	165.0	2.878	0.260
0.07	3.16	9.16	4.130	167.2	2.917	0.223
-7.72	1.82	4.15	-0.583	169.4	2.955	0.185
-5.02	-1.97	3.62	-1.123	171.6	2.993	0.148
-3.01	-2.20	4.61	-0.200	173.8	3.032	0.110
-7.74	-4.56	0.28	-4.007	176.0	3.070	0.071
-8.58	-1.18	2.58	-2.393	178.2	3.109	0.033
-10.25	-3.67	2.20	-3.907	180.4	3.147	-0.005
-6.66	-0.69	-1.91	-3.087	182.6	3.185	-0.044
-10.64	-5.98	2.47	-4.717	184.8	3.224	-0.082
-12.07	-7.11	-2.10	-7.093	187.0	3.262	-0.120
-14.63	-12.53	-0.54	-9.233	189.2	3.300	-0.158
-16.08	-15.07	-1.05	-10.733	191.4	3.339	-0.196
-12.48	-16.36	-2.87	-10.570	193.6	3.377	-0.233
-11.72	-10.89	-8.32	-10.310	195.8	3.416	-0.271
-11.93	-11.03	-11.19	-11.383	198.0	3.454	-0.307
-13.14	-16.62	-6.19	-11.983	200.2	3.492	-0.344
-15.22	-20.11	-6.04	-13.790	202.4	3.531	-0.379
-13.49	-12.02	-8.31	-11.273	204.6	3.569	-0.415
-15.80	-18.35	-9.71	-14.620	206.8	3.608	-0.449
-18.52	-19.68	-10.80	-16.333	209.0	3.646	-0.483
-19.95	-18.68	-12.71	-17.113	211.2	3.684	-0.516
-23.72	-20.45	-13.39	-19.187	213.4	3.723	-0.549
-24.22	-19.93	-16.30	-20.150	215.6	3.761	-0.581
-23.81	-21.07	-18.91	-21.263	217.8	3.799	-0.611
-17.33	-21.67	-17.98	-18.993	220.0	3.838	-0.641

-24.49	-25.40	-16.87	-22.253	222.2	3.876	-0.670
-23.48	-26.02	-16.32	-21.940	224.4	3.915	-0.698
-24.19	-25.31	-17.28	-22.260	226.6	3.953	-0.725
-23.85	-23.53	-18.61	-21.997	228.8	3.991	-0.751
-25.01	-26.28	-18.22	-23.170	231.0	4.030	-0.776
-25.79	-24.37	-18.96	-23.040	233.2	4.068	-0.799
-25.17	-27.17	-21.36	-24.567	235.4	4.106	-0.822
-25.67	-28.64	-17.64	-23.983	237.6	4.145	-0.843
-26.51	-25.87	-19.15	-23.843	239.8	4.183	-0.863
-27.19	-27.29	-25.65	-26.710	242.0	4.222	-0.882
-28.22	-27.61	-25.14	-26.990	244.2	4.260	-0.899
-28.37	-27.13	-22.73	-26.077	246.4	4.298	-0.915
-27.30	-28.97	-23.64	-26.637	248.6	4.337	-0.930
-30.49	-32.80	-21.87	-28.387	250.8	4.375	-0.944
-25.77	-29.87	-23.15	-26.263	253.0	4.413	-0.956
-28.27	-34.24	-24.29	-28.933	255.2	4.452	-0.966
-28.60	-33.42	-22.74	-28.253	257.4	4.490	-0.975
-28.42	-32.41	-22.34	-27.723	259.6	4.529	-0.983
-28.52	-32.14	-28.90	-29.853	261.8	4.567	-0.989
-27.45	-31.44	-30.52	-29.803	264.0	4.605	-0.994
-31.62	-30.45	-27.68	-29.917	266.2	4.644	-0.998
-27.13	-32.82	-32.69	-30.880	268.4	4.682	-1.000
-27.23	-31.75	-23.14	-27.373	270.6	4.720	-1.000
-28.07	-33.10	-26.23	-29.133	272.8	4.759	-0.999
-27.50	-32.63	-22.93	-27.687	275.0	4.797	-0.996
-27.34	-30.51	-27.40	-28.417	277.2	4.836	-0.992
-25.37	-35.81	-23.53	-28.237	279.4	4.874	-0.987

-29.64	-29.63	-24.02	-27.763	281.6	4.912	-0.980
-27.68	-28.33	-22.06	-26.023	283.8	4.951	-0.972
-25.53	-30.59	-24.00	-26.707	286.0	4.989	-0.962
-25.16	-30.38	-20.52	-25.353	288.2	5.027	-0.951
-22.57	-29.98	-21.43	-24.660	290.4	5.066	-0.938
-23.96	-28.67	-23.41	-25.347	292.6	5.104	-0.924
-23.34	-30.12	-22.13	-25.197	294.8	5.143	-0.909
-26.40	-24.50	-19.94	-23.613	297.0	5.181	-0.892
-24.37	-28.22	-20.21	-24.267	299.2	5.219	-0.874
-24.72	-28.46	-19.28	-24.153	301.4	5.258	-0.855
-22.95	-26.05	-17.48	-22.160	303.6	5.296	-0.834
-21.28	-25.51	-17.85	-21.547	305.8	5.335	-0.813
-21.59	-23.53	-18.27	-21.130	308.0	5.373	-0.790
-17.06	-22.72	-17.48	-19.087	310.2	5.411	-0.766
-17.47	-25.33	-20.03	-20.943	312.4	5.450	-0.740
-22.11	-23.88	-18.40	-21.463	314.6	5.488	-0.714
-16.06	-23.01	-21.45	-20.173	316.8	5.526	-0.687
-16.53	-22.46	-19.77	-19.587	319.0	5.565	-0.658
-17.08	-23.07	-20.86	-20.337	321.2	5.603	-0.629
-17.09	-20.42	-16.63	-18.047	323.4	5.642	-0.599
-16.34	-17.68	-14.57	-16.197	325.6	5.680	-0.567
-11.37	-13.72	-12.81	-12.633	327.8	5.718	-0.535
-12.26	-19.94	-10.06	-14.087	330.0	5.757	-0.503
-11.46	-13.58	-6.52	-10.520	332.2	5.795	-0.469
-9.48	-19.72	-5.91	-11.703	334.4	5.833	-0.435
-10.23	-17.65	-7.28	-11.720	336.6	5.872	-0.400
-8.58	-13.56	-3.70	-8.613	338.8	5.910	-0.364

-7.97	-12.64	-2.05	-7.553	341.0	5.949	-0.328
-7.16	-11.57	-1.38	-6.703	343.2	5.987	-0.292
-4.70	-7.61	2.74	-3.190	345.4	6.025	-0.255
-6.73	-8.94	-2.87	-6.180	347.6	6.064	-0.218
-3.22	-6.98	-0.10	-3.433	349.8	6.102	-0.180
-1.20	-9.60	-0.25	-3.683	352.0	6.140	-0.142
-2.10	-7.09	1.51	-2.560	354.2	6.179	-0.104
1.86	-4.88	-0.05	-1.023	356.4	6.217	-0.066
-0.99	-4.83	0.06	-1.920	358.6	6.256	-0.028

➤ Trường hợp $I_{\text{nam châm}} = 0.5\text{A}$, $I_{\text{khung dây}} = 1.0\text{A}$

Lần 1	Lần 2	Lần 3	F_{TB} (mN)	α (°)	α (rad)	$\text{Sin}\alpha$
-1.62	-0.82	-6.30	-2.913	0.0	0.000	0.000
0.11	1.52	-4.77	-1.047	2.2	0.038	0.038
-0.89	3.08	2.26	1.483	4.4	0.077	0.077
-1.97	8.01	4.30	3.447	6.6	0.115	0.115
5.80	4.41	6.65	5.620	8.8	0.154	0.153
12.33	7.14	12.47	10.647	11.0	0.192	0.191
12.07	7.16	9.80	9.677	13.2	0.230	0.228
14.30	11.66	9.08	11.680	15.4	0.269	0.265
16.65	16.81	12.86	15.440	17.6	0.307	0.302
21.19	17.89	10.95	16.677	19.8	0.345	0.339
20.29	15.11	21.55	18.983	22.0	0.384	0.374
21.96	14.43	17.20	17.863	24.2	0.422	0.410
23.89	21.31	20.49	21.897	26.4	0.461	0.444
22.53	13.29	20.81	18.877	28.6	0.499	0.478
31.30	26.35	18.80	25.483	30.8	0.537	0.512

32.48	27.56	24.18	28.073	33.0	0.576	0.544
33.75	30.76	24.16	29.557	35.2	0.614	0.576
31.64	26.72	23.35	27.237	37.4	0.652	0.607
38.86	32.14	20.20	30.400	39.6	0.691	0.637
35.78	35.10	37.11	35.997	41.8	0.729	0.666
38.08	35.69	37.55	37.107	44.0	0.768	0.694
40.35	34.51	36.63	37.163	46.2	0.806	0.721
38.51	39.21	41.15	39.623	48.4	0.844	0.748
44.57	40.44	44.17	43.060	50.6	0.883	0.772
42.14	34.71	42.89	39.913	52.8	0.921	0.796
40.86	39.36	45.43	41.883	55.0	0.959	0.819
44.10	37.96	43.02	41.693	57.2	0.998	0.840
50.25	38.79	46.08	45.040	59.4	1.036	0.860
46.88	39.98	44.55	43.803	61.6	1.075	0.879
41.12	37.14	45.45	41.237	63.8	1.113	0.897
46.31	37.19	46.30	43.267	66.0	1.151	0.913
41.47	46.42	50.23	46.040	68.2	1.190	0.928
42.31	47.53	41.58	43.807	70.4	1.228	0.942
51.41	38.27	49.66	46.447	72.6	1.266	0.954
46.72	45.29	45.54	45.850	74.8	1.305	0.965
48.49	47.82	49.41	48.573	77.0	1.343	0.974
46.91	41.47	40.07	42.817	79.2	1.382	0.982
51.41	52.23	41.74	48.460	81.4	1.420	0.989
45.26	48.00	54.18	49.147	83.6	1.458	0.994
52.72	49.01	45.95	49.227	85.8	1.497	0.997
55.35	41.09	52.90	49.780	88.0	1.535	0.999
50.60	43.47	53.36	49.143	90.2	1.573	1.000

44.47	48.79	50.25	47.837	92.4	1.612	0.999
48.86	47.88	41.34	46.027	94.6	1.650	0.997
37.95	51.86	48.13	45.980	96.8	1.689	0.993
48.75	50.01	53.24	50.667	99.0	1.727	0.988
48.18	44.25	49.18	47.203	101.2	1.765	0.981
40.91	51.16	45.78	45.950	103.4	1.804	0.973
53.50	49.60	46.39	49.830	105.6	1.842	0.963
50.94	46.29	47.19	48.140	107.8	1.881	0.952
48.09	50.16	48.49	48.913	110.0	1.919	0.940
41.30	46.28	40.26	42.613	112.2	1.957	0.926
39.11	40.66	48.27	42.680	114.4	1.996	0.911
46.41	40.88	49.32	45.537	116.6	2.034	0.895
51.02	42.81	41.20	45.010	118.8	2.072	0.877
49.06	46.38	42.35	45.930	121.0	2.111	0.858
45.87	32.93	45.64	41.480	123.2	2.149	0.837
50.56	43.23	36.06	43.283	125.4	2.188	0.816
36.67	43.23	38.36	39.420	127.6	2.226	0.793
34.24	34.62	34.66	34.507	129.8	2.264	0.769
41.32	39.79	45.99	42.367	132.0	2.303	0.744
31.80	37.30	40.56	36.553	134.2	2.341	0.718
35.65	34.98	39.37	36.667	136.4	2.379	0.690
23.44	29.71	35.61	29.587	138.6	2.418	0.662
29.41	36.50	34.75	33.553	140.8	2.456	0.633
32.21	29.51	37.01	32.910	143.0	2.495	0.603
26.60	21.20	33.18	26.993	145.2	2.533	0.572
28.96	26.28	36.20	30.480	147.4	2.571	0.540
26.98	27.74	24.90	26.540	149.6	2.610	0.507

27.21	22.14	21.82	23.723	151.8	2.648	0.474
22.73	22.34	21.37	22.147	154.0	2.686	0.440
23.14	21.62	25.91	23.557	156.2	2.725	0.405
14.58	17.68	18.23	16.830	158.4	2.763	0.369
16.62	20.49	15.38	17.497	160.6	2.802	0.334
12.23	18.59	14.20	15.007	162.8	2.840	0.297
14.90	11.13	19.69	15.240	165.0	2.878	0.260
7.35	9.04	11.93	9.440	167.2	2.917	0.223
11.02	11.27	13.65	11.980	169.4	2.955	0.185
8.89	9.22	7.14	8.417	171.6	2.993	0.148
-0.45	7.00	2.59	3.047	173.8	3.032	0.110
-0.62	-2.33	4.45	0.500	176.0	3.070	0.071
0.34	-8.03	6.14	-0.517	178.2	3.109	0.033
1.28	-3.06	4.65	0.957	180.4	3.147	-0.005
-5.02	-6.88	-8.76	-6.887	182.6	3.185	-0.044
-3.54	-13.42	-8.13	-8.363	184.8	3.224	-0.082
-3.28	-9.06	-9.28	-7.207	187.0	3.262	-0.120
-10.22	-16.31	-13.44	-13.323	189.2	3.300	-0.158
-8.39	-25.11	-5.12	-12.873	191.4	3.339	-0.196
-13.42	-28.03	-12.07	-17.840	193.6	3.377	-0.233
-17.42	-16.27	-8.69	-14.127	195.8	3.416	-0.271
-11.39	-17.38	-26.20	-18.323	198.0	3.454	-0.307
-26.85	-19.43	-23.34	-23.207	200.2	3.492	-0.344
-22.27	-27.67	-22.18	-24.040	202.4	3.531	-0.379
-26.16	-27.04	-18.75	-23.983	204.6	3.569	-0.415
-27.80	-23.24	-22.10	-24.380	206.8	3.608	-0.449
-28.08	-31.11	-26.92	-28.703	209.0	3.646	-0.483

-34.45	-29.38	-33.43	-32.420	211.2	3.684	-0.516
-26.37	-26.39	-32.95	-28.570	213.4	3.723	-0.549
-33.50	-31.55	-40.35	-35.133	215.6	3.761	-0.581
-39.60	-34.09	-35.91	-36.533	217.8	3.799	-0.611
-35.71	-35.96	-36.44	-36.037	220.0	3.838	-0.641
-40.70	-40.95	-46.85	-42.833	222.2	3.876	-0.670
-35.39	-36.47	-46.31	-39.390	224.4	3.915	-0.698
-44.93	-36.29	-48.43	-43.217	226.6	3.953	-0.725
-43.68	-42.53	-44.90	-43.703	228.8	3.991	-0.751
-51.66	-47.53	-45.99	-48.393	231.0	4.030	-0.776
-41.32	-44.48	-48.33	-44.710	233.2	4.068	-0.799
-55.28	-51.23	-53.39	-53.300	235.4	4.106	-0.822
-45.29	-49.21	-52.17	-48.890	237.6	4.145	-0.843
-48.30	-50.26	-52.97	-50.510	239.8	4.183	-0.863
-57.53	-54.65	-52.54	-54.907	242.0	4.222	-0.882
-48.77	-50.22	-50.81	-49.933	244.2	4.260	-0.899
-52.91	-53.20	-51.96	-52.690	246.4	4.298	-0.915
-58.34	-51.75	-56.78	-55.623	248.6	4.337	-0.930
-50.59	-48.93	-58.76	-52.760	250.8	4.375	-0.944
-50.96	-53.67	-54.19	-52.940	253.0	4.413	-0.956
-52.60	-52.96	-61.80	-55.787	255.2	4.452	-0.966
-55.51	-54.54	-50.48	-53.510	257.4	4.490	-0.975
-55.36	-51.81	-47.89	-51.687	259.6	4.529	-0.983
-59.77	-57.70	-49.99	-55.820	261.8	4.567	-0.989
-55.92	-54.45	-50.52	-53.630	264.0	4.605	-0.994
-59.19	-52.53	-50.81	-54.177	266.2	4.644	-0.998
-54.55	-53.76	-61.97	-56.760	268.4	4.682	-1.000

-56.25	-57.83	-57.69	-57.257	270.6	4.720	-1.000
-54.11	-54.08	-55.40	-54.530	272.8	4.759	-0.999
-57.65	-55.70	-56.36	-56.570	275.0	4.797	-0.996
-58.45	-58.68	-50.82	-55.983	277.2	4.836	-0.992
-57.49	-53.58	-56.10	-55.723	279.4	4.874	-0.987
-55.87	-51.53	-52.76	-53.387	281.6	4.912	-0.980
-54.46	-54.44	-49.51	-52.803	283.8	4.951	-0.972
-57.77	-54.05	-55.19	-55.670	286.0	4.989	-0.962
-62.72	-55.55	-49.17	-55.813	288.2	5.027	-0.951
-57.74	-54.36	-55.86	-55.987	290.4	5.066	-0.938
-56.43	-55.40	-47.22	-53.017	292.6	5.104	-0.924
-62.85	-60.33	-48.05	-57.077	294.8	5.143	-0.909
-60.40	-50.13	-50.39	-53.640	297.0	5.181	-0.892
-59.62	-54.55	-44.29	-52.820	299.2	5.219	-0.874
-57.76	-47.76	-49.15	-51.557	301.4	5.258	-0.855
-46.10	-49.49	-53.97	-49.853	303.6	5.296	-0.834
-47.60	-49.09	-47.95	-48.213	305.8	5.335	-0.813
-45.66	-46.76	-46.20	-46.207	308.0	5.373	-0.790
-50.69	-47.63	-44.08	-47.467	310.2	5.411	-0.766
-41.40	-50.43	-39.90	-43.910	312.4	5.450	-0.740
-42.16	-36.27	-44.38	-40.937	314.6	5.488	-0.714
-44.31	-48.46	-38.05	-43.607	316.8	5.526	-0.687
-41.05	-33.44	-37.49	-37.327	319.0	5.565	-0.658
-41.49	-41.10	-32.25	-38.280	321.2	5.603	-0.629
-46.94	-38.61	-37.03	-40.860	323.4	5.642	-0.599
-43.25	-34.03	-33.30	-36.860	325.6	5.680	-0.567
-38.47	-35.79	-33.17	-35.810	327.8	5.718	-0.535

-35.05	-34.58	-31.25	-33.627	330.0	5.757	-0.503
-37.95	-34.05	-22.76	-31.587	332.2	5.795	-0.469
-32.71	-33.94	-26.24	-30.963	334.4	5.833	-0.435
-27.68	-27.14	-18.27	-24.363	336.6	5.872	-0.400
-31.54	-24.17	-20.23	-25.313	338.8	5.910	-0.364
-31.28	-19.96	-14.43	-21.890	341.0	5.949	-0.328
-27.24	-20.31	-21.67	-23.073	343.2	5.987	-0.292
-18.66	-15.24	-14.89	-16.263	345.4	6.025	-0.255
-19.13	-10.34	-10.75	-13.407	347.6	6.064	-0.218
-18.25	-6.75	-15.65	-13.550	349.8	6.102	-0.180
-15.91	-16.16	-2.59	-11.553	352.0	6.140	-0.142
-12.49	-2.77	-6.47	-7.243	354.2	6.179	-0.104
-8.45	-7.47	-8.10	-8.007	356.4	6.217	-0.066
-11.58	0.93	-1.53	-4.060	358.6	6.256	-0.028

➤ Trường hợp $I_{\text{nam châm}} = 1.0\text{A}$, $I_{\text{khung dây}} = 0.5\text{A}$

Lần 1	Lần 2	Lần 3	F_{TB} (mN)	α (°)	α (rad)	$\text{Sin}\alpha$
2.96	2.49	-3.80	0.550	0.0	0.000	0.000
11.27	-3.62	1.15	2.933	2.2	0.038	0.038
17.92	3.02	8.63	9.857	4.4	0.077	0.077
10.76	5.31	6.48	7.517	6.6	0.115	0.115
8.55	5.96	9.41	7.973	8.8	0.154	0.153
15.18	8.00	14.62	12.600	11.0	0.192	0.191
26.95	9.55	9.28	15.260	13.2	0.230	0.228
31.60	7.47	8.19	15.753	15.4	0.269	0.265
22.19	15.22	14.54	17.317	17.6	0.307	0.302
18.53	7.99	19.50	15.340	19.8	0.345	0.339

27.85	8.70	20.19	18.913	22.0	0.384	0.374
21.76	13.62	20.45	18.610	24.2	0.422	0.410
29.71	14.41	19.97	21.363	26.4	0.461	0.444
29.15	14.51	19.56	21.073	28.6	0.499	0.478
32.85	16.00	24.38	24.410	30.8	0.537	0.512
36.50	23.67	26.73	28.967	33.0	0.576	0.544
37.96	20.63	29.05	29.213	35.2	0.614	0.576
38.91	25.22	29.93	31.353	37.4	0.652	0.607
43.90	24.11	29.12	32.377	39.6	0.691	0.637
39.75	27.93	33.29	33.657	41.8	0.729	0.666
41.64	21.30	32.28	31.740	44.0	0.768	0.694
39.90	29.43	38.25	35.860	46.2	0.806	0.721
42.18	27.87	33.01	34.353	48.4	0.844	0.748
43.55	34.06	35.05	37.553	50.6	0.883	0.772
46.84	24.24	40.21	37.097	52.8	0.921	0.796
52.25	33.90	36.68	40.943	55.0	0.959	0.819
47.27	35.04	39.70	40.670	57.2	0.998	0.840
45.44	25.43	35.47	35.447	59.4	1.036	0.860
48.03	26.98	39.71	38.240	61.6	1.075	0.879
42.78	35.18	39.04	39.000	63.8	1.113	0.897
44.99	38.23	44.28	42.500	66.0	1.151	0.913
50.30	39.12	35.00	41.473	68.2	1.190	0.928
54.00	34.59	39.34	42.643	70.4	1.228	0.942
58.16	39.06	38.22	45.147	72.6	1.266	0.954
54.52	34.37	40.18	43.023	74.8	1.305	0.965
58.65	38.55	38.79	45.330	77.0	1.343	0.974
59.60	30.19	40.21	43.333	79.2	1.382	0.982

51.95	34.60	35.22	40.590	81.4	1.420	0.989
51.77	36.46	42.22	43.483	83.6	1.458	0.994
51.45	42.35	34.73	42.843	85.8	1.497	0.997
51.75	36.85	42.74	43.780	88.0	1.535	0.999
43.44	28.56	34.49	35.497	90.2	1.573	1.000
46.54	38.62	43.26	42.807	92.4	1.612	0.999
51.52	32.11	41.54	41.723	94.6	1.650	0.997
47.28	40.29	40.38	42.650	96.8	1.689	0.993
44.78	38.91	41.46	41.717	99.0	1.727	0.988
40.28	38.40	41.27	39.983	101.2	1.765	0.981
49.15	28.28	34.53	37.320	103.4	1.804	0.973
43.14	34.70	40.40	39.413	105.6	1.842	0.963
53.04	34.17	37.38	41.530	107.8	1.881	0.952
41.74	31.08	33.33	35.383	110.0	1.919	0.940
46.74	32.32	37.74	38.933	112.2	1.957	0.926
36.87	33.09	40.67	36.877	114.4	1.996	0.911
44.72	26.77	34.51	35.333	116.6	2.034	0.895
37.62	27.88	35.37	33.623	118.8	2.072	0.877
47.12	27.14	37.12	37.127	121.0	2.111	0.858
40.24	33.43	33.29	35.653	123.2	2.149	0.837
39.17	29.62	30.76	33.183	125.4	2.188	0.816
35.78	23.64	29.34	29.587	127.6	2.226	0.793
39.98	24.17	32.36	32.170	129.8	2.264	0.769
40.70	23.05	29.31	31.020	132.0	2.303	0.744
40.05	25.98	28.97	31.667	134.2	2.341	0.718
28.62	28.82	29.78	29.073	136.4	2.379	0.690
37.28	21.60	30.97	29.950	138.6	2.418	0.662

31.33	19.17	29.45	26.650	140.8	2.456	0.633
28.16	15.40	21.95	21.837	143.0	2.495	0.603
23.37	15.00	28.17	22.180	145.2	2.533	0.572
22.81	19.95	22.28	21.680	147.4	2.571	0.540
19.86	12.14	19.30	17.100	149.6	2.610	0.507
25.92	12.47	19.54	19.310	151.8	2.648	0.474
20.16	13.08	17.54	16.927	154.0	2.686	0.440
19.13	6.52	18.73	14.793	156.2	2.725	0.405
21.23	7.79	19.06	16.027	158.4	2.763	0.369
10.22	2.82	13.29	8.777	160.6	2.802	0.334
15.10	9.43	8.88	11.137	162.8	2.840	0.297
14.20	1.02	6.02	7.080	165.0	2.878	0.260
7.09	6.59	7.95	7.210	167.2	2.917	0.223
6.54	-0.74	8.35	4.717	169.4	2.955	0.185
9.37	-6.17	6.84	3.347	171.6	2.993	0.148
1.99	0.02	2.13	1.380	173.8	3.032	0.110
0.14	-2.30	1.70	-0.153	176.0	3.070	0.071
4.05	-4.43	-3.06	-1.147	178.2	3.109	0.033
2.33	-4.26	-3.09	-1.673	180.4	3.147	-0.005
-7.19	-13.41	-3.62	-8.073	182.6	3.185	-0.044
-3.33	-5.08	-9.50	-5.970	184.8	3.224	-0.082
-3.02	-19.31	-10.55	-10.960	187.0	3.262	-0.120
-2.79	-13.70	-11.10	-9.197	189.2	3.300	-0.158
-12.79	-22.83	-12.47	-16.030	191.4	3.339	-0.196
-5.26	-16.04	-15.60	-12.300	193.6	3.377	-0.233
-11.37	-20.61	-17.61	-16.530	195.8	3.416	-0.271
-12.35	-20.80	-22.11	-18.420	198.0	3.454	-0.307

-11.44	-24.27	-17.47	-17.727	200.2	3.492	-0.344
-15.01	-23.42	-20.18	-19.537	202.4	3.531	-0.379
-15.76	-27.94	-26.02	-23.240	204.6	3.569	-0.415
-20.43	-28.42	-24.10	-24.317	206.8	3.608	-0.449
-29.02	-29.51	-28.90	-29.143	209.0	3.646	-0.483
-28.73	-35.01	-26.53	-30.090	211.2	3.684	-0.516
-25.75	-29.99	-34.52	-30.087	213.4	3.723	-0.549
-30.22	-32.81	-32.95	-31.993	215.6	3.761	-0.581
-27.76	-35.12	-40.19	-34.357	217.8	3.799	-0.611
-31.61	-35.28	-36.64	-34.510	220.0	3.838	-0.641
-30.44	-39.51	-37.51	-35.820	222.2	3.876	-0.670
-38.23	-44.44	-35.72	-39.463	224.4	3.915	-0.698
-37.89	-40.19	-35.54	-37.873	226.6	3.953	-0.725
-30.66	-39.98	-37.99	-36.210	228.8	3.991	-0.751
-27.47	-44.13	-42.93	-38.177	231.0	4.030	-0.776
-36.97	-45.59	-38.24	-40.267	233.2	4.068	-0.799
-37.21	-50.48	-40.15	-42.613	235.4	4.106	-0.822
-38.69	-57.29	-43.84	-46.607	237.6	4.145	-0.843
-36.85	-53.30	-41.81	-43.987	239.8	4.183	-0.863
-38.50	-55.77	-43.35	-45.873	242.0	4.222	-0.882
-38.97	-52.85	-46.27	-46.030	244.2	4.260	-0.899
-43.03	-54.04	-45.59	-47.553	246.4	4.298	-0.915
-43.34	-59.32	-47.68	-50.113	248.6	4.337	-0.930
-49.54	-53.82	-51.55	-51.637	250.8	4.375	-0.944
-46.68	-53.10	-47.65	-49.143	253.0	4.413	-0.956
-46.68	-53.44	-47.39	-49.170	255.2	4.452	-0.966
-45.47	-59.78	-44.48	-49.910	257.4	4.490	-0.975

-45.84	-53.77	-53.10	-50.903	259.6	4.529	-0.983
-48.23	-61.16	-47.55	-52.313	261.8	4.567	-0.989
-41.84	-57.73	-50.93	-50.167	264.0	4.605	-0.994
-44.49	-56.64	-54.48	-51.870	266.2	4.644	-0.998
-45.19	-61.21	-49.52	-51.973	268.4	4.682	-1.000
-46.08	-56.97	-47.84	-50.297	270.6	4.720	-1.000
-45.92	-60.17	-54.36	-53.483	272.8	4.759	-0.999
-41.22	-59.30	-44.45	-48.323	275.0	4.797	-0.996
-41.00	-56.22	-50.96	-49.393	277.2	4.836	-0.992
-50.26	-59.52	-49.02	-52.933	279.4	4.874	-0.987
-40.15	-53.79	-48.96	-47.633	281.6	4.912	-0.980
-44.38	-51.92	-46.13	-47.477	283.8	4.951	-0.972
-47.34	-58.86	-46.41	-50.870	286.0	4.989	-0.962
-45.79	-55.80	-49.34	-50.310	288.2	5.027	-0.951
-44.42	-56.75	-45.12	-48.763	290.4	5.066	-0.938
-42.09	-61.66	-46.81	-50.187	292.6	5.104	-0.924
-40.84	-51.46	-45.26	-45.853	294.8	5.143	-0.909
-46.17	-51.64	-42.35	-46.720	297.0	5.181	-0.892
-44.81	-55.90	-39.77	-46.827	299.2	5.219	-0.874
-40.64	-53.30	-39.24	-44.393	301.4	5.258	-0.855
-40.76	-53.00	-42.25	-45.337	303.6	5.296	-0.834
-44.14	-52.37	-43.68	-46.730	305.8	5.335	-0.813
-38.58	-48.77	-41.02	-42.790	308.0	5.373	-0.790
-37.11	-51.59	-38.56	-42.420	310.2	5.411	-0.766
-37.24	-49.67	-35.33	-40.747	312.4	5.450	-0.740
-31.33	-49.17	-37.21	-39.237	314.6	5.488	-0.714
-36.21	-44.47	-35.36	-38.680	316.8	5.526	-0.687

-32.91	-47.42	-30.83	-37.053	319.0	5.565	-0.658
-27.44	-41.86	-36.58	-35.293	321.2	5.603	-0.629
-28.15	-41.74	-30.45	-33.447	323.4	5.642	-0.599
-30.84	-39.92	-31.38	-34.047	325.6	5.680	-0.567
-30.87	-35.76	-23.81	-30.147	327.8	5.718	-0.535
-24.69	-35.94	-27.59	-29.407	330.0	5.757	-0.503
-20.95	-32.41	-28.99	-27.450	332.2	5.795	-0.469
-24.71	-35.59	-18.67	-26.323	334.4	5.833	-0.435
-24.06	-31.77	-22.08	-25.970	336.6	5.872	-0.400
-23.96	-32.66	-16.79	-24.470	338.8	5.910	-0.364
-9.02	-32.94	-15.62	-19.193	341.0	5.949	-0.328
-11.79	-26.12	-13.78	-17.230	343.2	5.987	-0.292
-7.30	-23.80	-12.07	-14.390	345.4	6.025	-0.255
-16.26	-23.76	-14.82	-18.280	347.6	6.064	-0.218
-4.11	-25.25	-18.61	-15.990	349.8	6.102	-0.180
-6.52	-19.80	-5.46	-10.593	352.0	6.140	-0.142
-0.31	-17.14	-5.75	-7.733	354.2	6.179	-0.104
-1.76	-13.03	-9.23	-8.007	356.4	6.217	-0.066
-0.20	-8.28	0.14	-2.780	358.6	6.256	-0.028

➤ Trường hợp $I_{\text{nam châm}} = 1.0\text{A}$, $I_{\text{khung dây}} = 1.0\text{A}$

Lần 1	Lần 2	Lần 3	F_{TB} (mN)	α (°)	α (rad)	$\text{Sin}\alpha$
-2.04	5.67	4.21	2.613	0.0	0.000	0.000
3.07	10.90	13.72	9.230	2.2	0.038	0.038
10.48	12.81	23.85	15.713	4.4	0.077	0.077
11.42	16.11	17.81	15.113	6.6	0.115	0.115
24.01	14.88	25.72	21.537	8.8	0.154	0.153

23.26	18.53	27.42	23.070	11.0	0.192	0.191
29.78	26.66	29.89	28.777	13.2	0.230	0.228
22.66	27.22	35.27	28.383	15.4	0.269	0.265
31.94	29.20	35.12	32.087	17.6	0.307	0.302
28.06	32.27	40.56	33.630	19.8	0.345	0.339
34.98	37.01	40.45	37.480	22.0	0.384	0.374
34.94	41.10	45.50	40.513	24.2	0.422	0.410
37.62	43.13	49.08	43.277	26.4	0.461	0.444
41.10	42.63	53.34	45.690	28.6	0.499	0.478
44.21	43.72	56.20	48.043	30.8	0.537	0.512
54.05	51.33	55.20	53.527	33.0	0.576	0.544
54.45	46.25	58.33	53.010	35.2	0.614	0.576
57.81	53.37	61.62	57.600	37.4	0.652	0.607
49.02	56.00	64.39	56.470	39.6	0.691	0.637
61.01	57.33	67.98	62.107	41.8	0.729	0.666
62.37	61.64	62.36	62.123	44.0	0.768	0.694
61.69	64.52	67.02	64.410	46.2	0.806	0.721
63.61	65.62	69.09	66.107	48.4	0.844	0.748
62.56	65.77	73.44	67.257	50.6	0.883	0.772
63.48	66.87	73.08	67.810	52.8	0.921	0.796
68.48	67.62	72.51	69.537	55.0	0.959	0.819
69.39	70.75	76.86	72.333	57.2	0.998	0.840
67.22	72.23	77.24	72.230	59.4	1.036	0.860
71.75	71.10	77.90	73.583	61.6	1.075	0.879
78.92	73.03	73.85	75.267	63.8	1.113	0.897
75.60	72.09	80.32	76.003	66.0	1.151	0.913
72.72	70.80	79.26	74.260	68.2	1.190	0.928

79.33	72.23	83.87	78.477	70.4	1.228	0.942
78.56	78.98	76.52	78.020	72.6	1.266	0.954
77.07	77.97	74.82	76.620	74.8	1.305	0.965
78.98	77.93	84.80	80.570	77.0	1.343	0.974
80.51	77.43	83.18	80.373	79.2	1.382	0.982
75.74	77.02	82.35	78.370	81.4	1.420	0.989
76.89	75.47	83.46	78.607	83.6	1.458	0.994
79.22	73.39	82.57	78.393	85.8	1.497	0.997
82.44	74.71	81.62	79.590	88.0	1.535	0.999
73.42	73.32	81.06	75.933	90.2	1.573	1.000
71.88	74.98	79.11	75.323	92.4	1.612	0.999
70.74	77.46	80.13	76.110	94.6	1.650	0.997
70.01	73.24	81.25	74.833	96.8	1.689	0.993
85.07	77.49	83.85	82.137	99.0	1.727	0.988
81.78	77.54	81.68	80.333	101.2	1.765	0.981
82.67	74.68	79.94	79.097	103.4	1.804	0.973
80.79	75.94	78.70	78.477	105.6	1.842	0.963
79.63	73.48	79.53	77.547	107.8	1.881	0.952
77.70	72.86	78.65	76.403	110.0	1.919	0.940
71.73	70.02	76.48	72.743	112.2	1.957	0.926
69.45	76.61	76.93	74.330	114.4	1.996	0.911
78.38	69.94	71.08	73.133	116.6	2.034	0.895
72.81	72.45	76.71	73.990	118.8	2.072	0.877
72.30	66.28	70.60	69.727	121.0	2.111	0.858
71.70	71.21	74.89	72.600	123.2	2.149	0.837
68.07	64.75	69.01	67.277	125.4	2.188	0.816
68.16	65.78	68.71	67.550	127.6	2.226	0.793

67.24	60.90	66.38	64.840	129.8	2.264	0.769
66.01	62.81	65.53	64.783	132.0	2.303	0.744
63.49	63.41	62.72	63.207	134.2	2.341	0.718
60.15	55.43	59.98	58.520	136.4	2.379	0.690
56.69	54.54	59.65	56.960	138.6	2.418	0.662
54.86	51.83	55.37	54.020	140.8	2.456	0.633
55.19	49.05	55.20	53.147	143.0	2.495	0.603
51.92	55.69	52.66	53.423	145.2	2.533	0.572
48.55	49.79	46.12	48.153	147.4	2.571	0.540
37.62	46.47	45.51	43.200	149.6	2.610	0.507
42.08	46.70	45.06	44.613	151.8	2.648	0.474
38.42	40.79	41.26	40.157	154.0	2.686	0.440
35.24	38.93	40.71	38.293	156.2	2.725	0.405
34.76	32.44	37.94	35.047	158.4	2.763	0.369
26.30	25.63	30.09	27.340	160.6	2.802	0.334
25.26	22.41	28.29	25.320	162.8	2.840	0.297
21.18	20.59	24.38	22.050	165.0	2.878	0.260
22.49	18.82	23.06	21.457	167.2	2.917	0.223
14.70	16.80	18.22	16.573	169.4	2.955	0.185
18.80	16.18	13.41	16.130	171.6	2.993	0.148
6.22	11.06	12.95	10.077	173.8	3.032	0.110
-0.13	-0.45	9.47	2.963	176.0	3.070	0.071
2.32	2.12	4.35	2.930	178.2	3.109	0.033
1.25	-3.69	4.94	0.833	180.4	3.147	-0.005
-4.56	-10.58	-1.45	-5.530	182.6	3.185	-0.044
-6.61	-10.07	-4.02	-6.900	184.8	3.224	-0.082
-15.66	-18.15	-6.61	-13.473	187.0	3.262	-0.120

-15.70	-21.02	-9.07	-15.263	189.2	3.300	-0.158
-15.73	-12.26	-15.74	-14.577	191.4	3.339	-0.196
-21.42	-23.84	-17.13	-20.797	193.6	3.377	-0.233
-24.83	-27.06	-20.43	-24.107	195.8	3.416	-0.271
-22.45	-29.59	-25.23	-25.757	198.0	3.454	-0.307
-26.78	-32.41	-27.95	-29.047	200.2	3.492	-0.344
-32.33	-38.97	-30.55	-33.950	202.4	3.531	-0.379
-41.67	-41.93	-33.90	-39.167	204.6	3.569	-0.415
-36.63	-43.70	-38.23	-39.520	206.8	3.608	-0.449
-40.44	-46.78	-40.14	-42.453	209.0	3.646	-0.483
-44.48	-48.88	-44.99	-46.117	211.2	3.684	-0.516
-48.44	-47.88	-53.92	-50.080	213.4	3.723	-0.549
-50.25	-51.57	-53.33	-51.717	215.6	3.761	-0.581
-54.32	-55.87	-54.78	-54.990	217.8	3.799	-0.611
-57.47	-58.32	-51.12	-55.637	220.0	3.838	-0.641
-62.70	-61.61	-54.18	-59.497	222.2	3.876	-0.670
-60.69	-62.83	-61.02	-61.513	224.4	3.915	-0.698
-61.06	-61.65	-61.95	-61.553	226.6	3.953	-0.725
-69.56	-68.40	-59.90	-65.953	228.8	3.991	-0.751
-65.67	-70.29	-59.12	-65.027	231.0	4.030	-0.776
-68.90	-72.09	-62.68	-67.890	233.2	4.068	-0.799
-73.15	-70.17	-71.60	-71.640	235.4	4.106	-0.822
-73.80	-74.43	-64.22	-70.817	237.6	4.145	-0.843
-78.40	-73.54	-71.20	-74.380	239.8	4.183	-0.863
-79.28	-77.14	-68.51	-74.977	242.0	4.222	-0.882
-75.01	-80.39	-72.09	-75.830	244.2	4.260	-0.899
-73.33	-77.19	-72.84	-74.453	246.4	4.298	-0.915

-80.06	-78.23	-74.46	-77.583	248.6	4.337	-0.930
-77.84	-72.01	-74.05	-74.633	250.8	4.375	-0.944
-78.02	-77.36	-77.68	-77.687	253.0	4.413	-0.956
-80.98	-82.75	-70.91	-78.213	255.2	4.452	-0.966
-78.69	-81.65	-76.45	-78.930	257.4	4.490	-0.975
-76.28	-81.74	-73.85	-77.290	259.6	4.529	-0.983
-77.01	-80.50	-74.52	-77.343	261.8	4.567	-0.989
-81.30	-82.13	-77.15	-80.193	264.0	4.605	-0.994
-78.04	-80.11	-76.65	-78.267	266.2	4.644	-0.998
-77.88	-85.33	-76.12	-79.777	268.4	4.682	-1.000
-77.16	-83.18	-75.10	-78.480	270.6	4.720	-1.000
-76.26	-81.08	-74.64	-77.327	272.8	4.759	-0.999
-79.19	-81.44	-72.48	-77.703	275.0	4.797	-0.996
-83.21	-81.40	-78.33	-80.980	277.2	4.836	-0.992
-77.59	-81.69	-74.75	-78.010	279.4	4.874	-0.987
-76.59	-85.99	-79.64	-80.740	281.6	4.912	-0.980
-80.50	-77.23	-74.46	-77.397	283.8	4.951	-0.972
-76.67	-78.64	-74.30	-76.537	286.0	4.989	-0.962
-75.41	-78.93	-71.53	-75.290	288.2	5.027	-0.951
-71.51	-72.06	-72.34	-71.970	290.4	5.066	-0.938
-68.82	-71.69	-73.29	-71.267	292.6	5.104	-0.924
-75.57	-75.60	-66.62	-72.597	294.8	5.143	-0.909
-69.96	-74.12	-71.42	-71.833	297.0	5.181	-0.892
-72.45	-74.43	-67.83	-71.570	299.2	5.219	-0.874
-63.81	-72.49	-64.00	-66.767	301.4	5.258	-0.855
-67.47	-75.19	-68.13	-70.263	303.6	5.296	-0.834
-71.18	-73.15	-62.20	-68.843	305.8	5.335	-0.813

-65.74	-68.85	-62.16	-65.583	308.0	5.373	-0.790
-67.21	-64.23	-55.59	-62.343	310.2	5.411	-0.766
-56.12	-64.52	-50.31	-56.983	312.4	5.450	-0.740
-55.28	-59.63	-58.79	-57.900	314.6	5.488	-0.714
-57.07	-58.37	-48.90	-54.780	316.8	5.526	-0.687
-56.84	-55.40	-46.41	-52.883	319.0	5.565	-0.658
-60.10	-45.86	-52.45	-52.803	321.2	5.603	-0.629
-54.76	-49.28	-47.98	-50.673	323.4	5.642	-0.599
-48.37	-46.79	-48.19	-47.783	325.6	5.680	-0.567
-45.10	-47.72	-45.77	-46.197	327.8	5.718	-0.535
-47.18	-41.64	-41.01	-43.277	330.0	5.757	-0.503
-43.64	-34.95	-38.64	-39.077	332.2	5.795	-0.469
-36.59	-34.83	-38.23	-36.550	334.4	5.833	-0.435
-30.83	-29.50	-33.29	-31.207	336.6	5.872	-0.400
-32.81	-23.90	-25.23	-27.313	338.8	5.910	-0.364
-29.95	-24.01	-28.68	-27.547	341.0	5.949	-0.328
-18.51	-18.45	-19.69	-18.883	343.2	5.987	-0.292
-13.15	-14.39	-19.47	-15.670	345.4	6.025	-0.255
-12.99	-7.99	-19.23	-13.403	347.6	6.064	-0.218
-4.22	-8.96	-9.83	-7.670	349.8	6.102	-0.180
-6.87	-5.34	-4.81	-5.673	352.0	6.140	-0.142
-6.93	-1.95	0.60	-2.760	354.2	6.179	-0.104
5.24	3.31	-1.19	2.453	356.4	6.217	-0.066
2.11	6.58	0.88	3.190	358.6	6.256	-0.028

XÁC NHẬN CHỈNH SỬA LUẬN VĂN

Giảng viên hướng dẫn

Phản biện

Th.S Nguyễn Tấn Phát

Th.S Nguyễn Thị Hảo