

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CẦN THƠ
KHOA CÔNG NGHỆ

VÕ NHỈ KHANG
NGUYỄN HOÀNG THI

THIẾT KẾ VÀ ĐIỀU KHIỂN
HỆ THỐNG NÂNG BI TRONG TỦ TRƯỞNG

LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC
NGÀNH KỸ THUẬT CƠ ĐIỆN TỬ

2022

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CẦN THƠ
KHOA CÔNG NGHỆ

VÕ NHỈ KHANG
NGUYỄN HOÀNG THI

THIẾT KẾ VÀ ĐIỀU KHIỂN
HỆ THỐNG NÂNG BI TRONG TỦ TRƯỞNG

LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC
NGÀNH KỸ THUẬT CƠ ĐIỆN TỬ

CÁN BỘ HƯỚNG DẪN
TS. NGUYỄN VĂN MƯỢT

Tháng 05 / 2022

CHẤP THUẬN CỦA HỘI ĐỒNG

Luận văn này, với đề tựa là “THIẾT KẾ VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG NÂNG BI TRONG TỪ TRƯỜNG”, do hai sinh viên Võ Nhi Khang và Nguyễn Hoàng Thi thực hiện theo sự hướng dẫn của TS. Nguyễn Văn Mướt. Luận văn đã báo cáo và được Hội đồng chấm luận văn thông qua ngày 27/05/2022.

Giảng viên phản biện 1

Giảng viên phản biện 2

ThS. ĐÁI TIẾN TRUNG

TS. TRẦN NHỰT THANH

Chủ tịch Hội đồng

Cán bộ hướng dẫn

ThS. ĐÁI TIẾN TRUNG

TS. NGUYỄN VĂN MƯỢT

LỜI CẢM TẠ

Quá trình thực hiện luận văn tốt nghiệp là giai đoạn quan trọng nhất quãng đời mỗi sinh viên, giúp trang bị cho chúng em những kỹ năng cần thiết và quý báu để áp dụng vào công việc cũng như cuộc sống sau này.

Đầu tiên, chúng em xin chân thành cảm ơn quý Thầy, Cô khoa Công Nghệ nói chung và các Thầy, Cô trong bộ môn Tự động hóa nói riêng đã chỉ dạy cũng như trang bị cho chúng em kiến thức trong suốt thời gian sinh viên để hoàn thành được bài luận văn này.

Đặc biệt, chúng em xin cảm ơn thầy Nguyễn Văn Mướt và thầy Trần Nhật Thanh đã tận tình giúp đỡ, định hướng cách làm việc và góp ý trong suốt quá trình thực hiện bài luận văn và tạo điều kiện cho chúng em hoàn thành tốt công việc nghiên cứu của mình.

Cuối cùng chúng em xin cảm ơn gia đình, người thân và bạn bè đã luôn bên cạnh, ủng hộ và động viên.

Chúng em xin chân thành cảm ơn!

TÓM TẮT

Hệ thống nâng bi trong từ trường là một hệ phi tuyến bao gồm một nam châm điện được quấn bởi dây đồng quanh lõi thép để nâng một viên bi sắt. Viên bi được nâng lên bởi từ trường sinh ra từ nam châm điện được một hệ thống điều khiển để giữ cho viên bi nằm lơ lửng ở một khoảng cách (giữa viên bi và nam châm điện) được đặt trước.

Mục tiêu của việc nghiên cứu này nhằm: Tìm hiểu các phương pháp xây dựng mô hình toán học và điều khiển một hệ thống phi tuyến và không ổn định để điều khiển vị trí của vật được nâng; so sánh các bộ điều khiển khác nhau giữa lý thuyết mô phỏng và hệ thống thực tế; hoàn thành một mô hình hoàn chỉnh để ứng dụng trong việc nghiên cứu và học tập về điều khiển tự động. Để đáp ứng được các mục tiêu đã đề ra, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình toán học của hệ thống; khảo sát cảm biến hồng ngoại để xác định vị trí của viên bi; thực hiện mô phỏng các giải thuật điều khiển: Trượt, hồi tiếp tuyến tính hóa, LQR (Linear–Quadratic Regulator) bằng MATLAB; xây dựng mô hình thực tế; thử nghiệm điều khiển và hiệu chỉnh để so sánh với kết quả mô phỏng được. Kết quả đạt được là mô hình thực nghiệm có thể giữ viên bi ở các điểm cân bằng đặt trước bởi bộ điều khiển LQG (Linear–Quadratic–Gaussian Control), tín hiệu điều khiển thực tế giống với mô hình đã được mô phỏng.

Hệ thống này có thể được phát triển và thử nghiệm với những giải thuật điều khiển như: điều khiển thích nghi,... như một cách áp dụng kiến thức lý thuyết đã học được vào mô hình thực tế đã xây dựng.

Từ khóa: hệ nâng bi trong từ trường, hệ phi tuyến, điều khiển trượt, điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa, điều khiển LQR.

ABSTRACT

The magnetic ball levitation system is a nonlinear system consisting of an electromagnet which is created by wrapping a coil of copper wire around an iron core in order to lift an iron ball. The ball is levitated thanks to the magnetic field generated by the electromagnet which is controlled by a system to keep the ball suspended at a desired distance (between the ball and the electromagnet).

The objectives of this study are: Understanding the methods of modeling and controlling a nonlinear and unstable system to control the position of the object which is levitated; comparing the different controllers between the simulation and the real system; completing a model for application in the studying and learning in automatic control. In order to meet the goals, the mathematical modeling of the system is determined, the IR (Infrared Radiation) sensor to detect the position of the ball, performing the simulation in some control algorithms: Sliding mode control, feedback linearization control, LQR (Linear–Quadratic Regulator) in MATLAB; building the real model, controlling and calibrating the system to compare with simulated results. The result is that the experimental model can keep the ball at the equilibrium points through the LQG (Linear–Quadratic–Gaussian Control) controller, the experimental control signal is the same as the simulated control signal.

This system can be developed and tested on the real time model with other control algorithms such as sliding mode control, adaptive control, etc. This is the way to apply theoretical knowledge into our practical model.

Keyword: magnetic levitation, nonlinear system, sliding mode control, feedback linearization control, LQR control.

Title: Design and control magnetic ball levitation system.

LỜI CAM ĐOAN

Chúng tôi xin cam đoan luận văn này được hoàn thành dựa trên các kết quả nghiên cứu của chúng tôi. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình luận văn nào trước đây.

Ngày 27/05/2022

Ký tên

Ký tên

Nguyễn Hoàng Thi

Võ Nhĩ Khang

MỤC LỤC

| | |
|---|------------|
| Lời cảm tạ | i |
| Tóm tắt | ii |
| Abstract | iii |
| Lời cam đoan..... | iv |
| Danh mục hình..... | vii |
| Danh mục bảng | x |
| Danh mục từ viết tắt..... | xi |
| Chương 1: Tổng quan..... | 1 |
| 1.1 Đặt vấn đề..... | 1 |
| 1.2 Mục tiêu nghiên cứu | 2 |
| 1.3 Công việc cần thực hiện | 2 |
| 1.4 Phương pháp nghiên cứu | 2 |
| 1.5 Cấu trúc bài báo cáo | 3 |
| Chương 2: Cơ sở lý thuyết..... | 4 |
| 2.1 Hệ thống nâng bi trong từ trường | 4 |
| 2.1.1 Giới thiệu hệ thống | 4 |
| 2.1.2 Mô hình toán học | 5 |
| 2.1.3 Các phương pháp điều khiển đề xuất áp dụng với hệ thống..... | 7 |
| 2.2 Điều khiển trượt (Sliding Mode Control – SMC) | 8 |
| 2.2.1 Nguyên lý điều khiển trượt..... | 8 |
| 2.2.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ nâng bi trong từ trường | 10 |
| 2.3 Điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa | 12 |
| 2.3.1 Nguyên lý điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa..... | 12 |
| 2.3.2 Thiết kế bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho hệ nâng bi trong từ trường | 14 |
| 2.4 Bộ điều khiển LQR..... | 16 |
| 2.4.1 Nguyên lý bộ điều khiển LQR..... | 16 |
| 2.4.2 Thiết kế bộ điều khiển LQR cho hệ nâng bi trong từ trường | 17 |

| | |
|--|-----------|
| Chương 3: Kết quả thực hiện..... | 21 |
| 3.1 Sơ đồ các khối chức năng trong hệ thống | 21 |
| 3.1.1 Nguồn..... | 22 |
| 3.1.2 Vi điều khiển..... | 23 |
| 3.1.3 Máy tính PC | 24 |
| 3.1.4 Module truyền thông UART..... | 25 |
| 3.1.5 Cảm biến | 25 |
| 3.1.6 Nam châm điện và viên bi | 28 |
| 3.1.7 Mạch điều khiển dòng..... | 30 |
| 3.1.8 Mô hình cơ khí..... | 32 |
| 3.1.9 Mô hình thực tế..... | 35 |
| 3.2 Kết quả mô phỏng..... | 36 |
| 3.2.1 Xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống | 36 |
| 3.2.2 Điều khiển trượt Sliding Mode Control (SMC)..... | 37 |
| 3.2.3 Điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa..... | 42 |
| 3.2.4 Điều khiển LQR..... | 45 |
| 3.2.5 Nhận xét chung | 51 |
| 3.3 Kết quả thực nghiệm..... | 51 |
| 3.3.1 Kết quả đáp ứng hệ thống (Điểm cân bằng $x_{1e} = 0.015$) | 52 |
| 3.3.2 Kết quả đáp ứng hệ thống (Điểm cân bằng $x_{1e} = 0.017$) | 53 |
| 3.3.3 Kết quả đáp ứng hệ thống (Điểm cân bằng $x_{1e} = 0.02$) | 53 |
| Chương 4: Kết luận và kiến nghị..... | 56 |
| 4.1 Kết quả đạt được..... | 56 |
| 4.2 Mặt hạn chế | 56 |
| 4.3 Hướng phát triển..... | 56 |
| Tài liệu tham khảo | 57 |
| Phụ lục A | 59 |
| Phụ lục B | 62 |

DANH MỤC HÌNH

| | |
|--|----|
| Hình 2.1 Sơ đồ hệ thống nâng bi trong từ trường [4]. | 4 |
| Hình 2.2 Đường sức từ tạo ra bởi cuộn dây có dòng điện đi qua [14]. | 4 |
| Hình 2.3 Trạng thái của viên bi khi chưa có bộ điều khiển (điều kiện ban đầu $x_1 = 0.025\text{m}$). | 6 |
| Hình 2.4 Sơ đồ nguyên lý điều khiển trượt [13]. | 9 |
| Hình 2.5 Sơ đồ khối điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa [7]. | 13 |
| Hình 2.6 Bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa [7]. | 13 |
| Hình 2.7 Bộ điều khiển bám cho đối tượng được hồi tiếp tuyến tính hóa [7]. | 14 |
| Hình 2.8 Sơ đồ điều khiển phản hồi trạng thái [15]. | 16 |
| Hình 2.9 Sơ đồ khối bộ lọc Kalman [7]. | 19 |
| Hình 2.10 Sơ đồ khối điều khiển LQG. [7] | 20 |
| Hình 3.1 Sơ đồ tổng quan điều khiển hệ thống. | 21 |
| Hình 3.2 Sơ đồ khối hệ thống. | 21 |
| Hình 3.3 Bộ nguồn điều chỉnh DC Keithley. | 22 |
| Hình 3.4 STM32F407 Discovery. | 23 |
| Hình 3.5 Thư viện Waijung để lập trình STM32 trên Simulink [5]. | 24 |
| Hình 3.6 Máy tính PC kết nối với thiết bị. | 24 |
| Hình 3.7 Module chuyển USB UART TTL FT232RL. | 25 |
| Hình 3.8 Cảm biến RPR 220. | 26 |
| Hình 3.9 Sơ đồ nguyên lý mạch cảm biến sử dụng RPR 220. | 27 |
| Hình 3.10 Mạch điện cảm biến khoảng cách. | 27 |
| Hình 3.11 Cảm biến dòng điện ACS712. | 27 |
| Hình 3.12 Nam châm điện được quấn thực tế. | 29 |
| Hình 3.13 Viên bi sắt được sử dụng. | 30 |
| Hình 3.14 Cặp diode bảo vệ mosfet và tăng tốc độ xả dòng cho tải cảm. | 30 |
| Hình 3.15 Mạch nguyên lý của driver. | 31 |
| Hình 3.16 Sơ đồ kết nối thực tế mạch điện. | 31 |

| | |
|---|----|
| Hình 3.17 Mạch điện thực tế..... | 32 |
| Hình 3.18a Ý tưởng mô hình – hướng nhìn 1..... | 33 |
| Hình 3.18b Ý tưởng mô hình – hướng nhìn 2. | 34 |
| Hình 3.18c Ý tưởng mô hình – hướng nhìn 3..... | 34 |
| Hình 3.19 Mô hình thực tế hệ thống nâng bi trong từ trường..... | 35 |
| Hình 3.20 Hệ thống thực tế..... | 36 |
| Hình 3.21 Thiết lập thông số và vị trí ban đầu của hệ thống. | 36 |
| Hình 3.22 Khối “Magnetic Levitation” mô tả hệ thống. | 37 |
| Hình 3.23 Chi tiết khối tạo tín hiệu thay đổi..... | 37 |
| Hình 3.24 Tín hiệu đặt thay đổi được tạo. | 38 |
| Hình 3.25 Khối mô tả bộ điều khiển trượt. | 38 |
| Hình 3.26 Sơ đồ mô phỏng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt. | 39 |
| Hình 3.27 Đáp ứng hệ thống dùng trượt với luật điều khiển dùng hàm Sign. | 39 |
| Hình 3.28 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat..... | 40 |
| Hình 3.29 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat với tín hiệu đặt thay đổi. | 40 |
| Hình 3.30 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat khi khối lượng tăng 20%. | 41 |
| Hình 3.31 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat khi khối lượng giảm 20%. | 41 |
| Hình 3.32 Sơ đồ mô phỏng điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa. | 42 |
| Hình 3.33 Đáp ứng hệ thống sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa. | 43 |
| Hình 3.34 Đáp ứng hệ thống với tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa. | 44 |
| Hình 3.35 Đáp ứng hệ thống với tín hiệu đặt thay đổi sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa khung thời gian từ 0 đến 0.7 giây. | 44 |
| Hình 3.36 Sơ đồ mô phỏng điều khiển LQR. | 45 |
| Hình 3.38 Đáp ứng của 3 thông số trạng thái của mô hình với bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$ | 46 |

| | |
|---|----|
| Hình 3.39 Đáp ứng của 3 thông số trạng thái của mô hình với bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$ của hai trường hợp thông số Q và R..... | 47 |
| Hình 3.40 Điện áp điều khiển mô phỏng của bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$ | 48 |
| Hình 3.41 Mô phỏng tín hiệu nhiễu thêm vào tín hiệu đo của trạng thái vị trí viên bi..... | 49 |
| Hình 3.42 Sơ đồ mô phỏng điều khiển LQG. | 49 |
| Hình 3.43 Đáp ứng của 3 thông số trạng thái của mô hình với bộ điều khiển LQG tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$ | 50 |
| Hình 3.44 Điện áp điều khiển mô phỏng của bộ điều khiển LQG tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$ | 50 |
| Hình 3.45 Sơ đồ chương trình nạp vào board vi điều khiển. | 51 |
| Hình 3.46 Sơ đồ điều khiển dùng bộ điều khiển LQG. | 52 |
| Hình 3.47 Đáp ứng hệ thống tại điểm cân bằng 0.015. | 52 |
| Hình 3.48 Đáp ứng hệ thống tại điểm cân bằng 0.017. | 53 |
| Hình 3.49 Đáp ứng hệ thống tại điểm cân bằng 0.02. | 53 |
| Hình 3.50 Điện áp điều khiển tại điểm cân bằng 0.015..... | 54 |
| Hình 3.51 Điện áp điều khiển tại điểm cân bằng 0.017..... | 55 |
| Hình 3.52 Điện áp điều khiển tại điểm cân bằng 0.02..... | 55 |

DANH MỤC BẢNG

| | |
|--|----|
| Bảng 1: Thông số mô phỏng hệ thống nâng bi trong từ trường..... | 7 |
| Bảng 2: Thông số cuộn dây ứng với 1kg dây đồng | 28 |
| Bảng 3: Thông số của nam châm điện | 29 |

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

| Thuật ngữ viết tắt | Diễn giải |
|--------------------|---|
| ADC | Analog-to-Digital Converter |
| IC | Integrated Circuit |
| IR | Infrared Radiation |
| LQG | Linear–Quadratic–Gaussian Control |
| LQR | Linear–Quadratic Regulator |
| MAGLEV | Magnetically Levitated System |
| MCU | Microcontroller Unit |
| PC | Personal Computer |
| PD | Proportional and Derivative Controller |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| SMC | Sliding Mode Control |
| UART | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter |
| USB | Universal Serial Bus |
| VĐK | Vi điều khiển |

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1 Đặt vấn đề

Việc nghiên cứu hệ thống nâng vật bằng từ trường cho thấy khả năng ứng dụng rất lớn và đã được ứng dụng nhiều trong thực tế. Trong các hệ thống này, các thành phần của hệ thống không tiếp xúc bề mặt với nhau và được gọi chung là hệ thống MAGLEV (Magnetically Levitated System):

- Hệ thống treo trong xe, ô lăn không ma sát đầu tiên được sử dụng bởi B. A. Holes ở đại học Virginia vào năm 1937.
- Năm 1954 hệ thống được ứng dụng bởi Laurencean và Tournier ở Pháp. Hệ thống này nhằm mục đích kiểm tra khí động học trong đường hầm tuabin gió.
- Hệ thống còn được sử dụng trên xe đệm từ trường tốc độ cao (magnetic suspension high speed train).

Ưu điểm chính của hệ thống này là triệt tiêu ma sát khi một vật chuyển động trên bề mặt của một vật khác. Vật được nâng trong từ trường bằng hệ thống này bằng cách cho một dòng điện chạy qua cuộn dây của nam châm điện, chính lực từ này sẽ cân bằng với trọng lực của vật làm cho vật treo lơ lửng trên không. Vị trí của vật được nâng là một thông số quan trọng trong quá trình điều khiển hệ thống, tuy nhiên đây là một hệ thống phi tuyến và không ổn định.

Đã có nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu về vấn đề này và áp dụng điều khiển thành công cho hệ thống nâng vật kim loại trong từ trường như: phương pháp điều khiển LQR [1], điều khiển tuyến tính hóa hồi tiếp [2], điều khiển trượt [3],.... Và một số giải thuật điều khiển nâng cao hơn như: điều khiển trượt mờ [3], điều khiển PD (Proportional and Derivative Controller) mờ [4].

Vì vậy, luận văn nghiên cứu và thiết kế hệ thống điều khiển áp dụng bộ điều khiển trượt, điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa và điều khiển LQR cho hệ nâng bi trong từ trường dựa vào thông tin đo vị trí viên bi và dòng điện của nam châm điện để hiệu chỉnh dòng điện để nâng viên bi ở vị trí chính xác. Đề tài nhằm tìm hiểu về mô hình phi tuyến của đối tượng và áp dụng các phương pháp trên để điều khiển đúng các yêu cầu kỹ thuật của đối tượng với mô hình thực tế.

1.2 Mục tiêu nghiên cứu

Đề tài luận văn “Thiết kế và điều khiển hệ thống nâng bi trong từ trường” nhằm vào mục tiêu chính là xây dựng mô hình thực tế để có thể áp dụng các phương pháp điều khiển cho mô hình. Thông qua đó, mục tiêu cụ thể được đưa ra gồm:

- Tìm hiểu các phương pháp xây dựng và điều khiển hệ thống phi tuyến - hệ nâng bi trong từ trường.
- Thiết kế và xây dựng mô hình thực tế của hệ thống để phục vụ công tác học tập và nghiên cứu các môn học về điều khiển học.
- So sánh sự tương quan và khác biệt giữa mô hình được mô phỏng và mô hình thực nghiệm khi thực hiện điều khiển.

1.3 Công việc cần thực hiện

- Tìm hiểu mô hình toán học cho đối tượng điều khiển là hệ nâng bi trong từ trường.
- Thiết kế bộ điều khiển trượt, bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa, LQR cho đối tượng.
- Mô phỏng các bộ điều khiển đã thiết kế bằng phần mềm MATLAB/Simulink.
- Thiết kế và thực hiện lắp ráp mô hình đối tượng thực tế và tính toán thay đổi thông số mô hình toán học tương ứng với mô hình thực.
- Thực hiện điều khiển mô hình thực tế đối tượng trên cơ sở các bộ điều khiển đã thiết kế thông qua board vi điều khiển STM32F407 Discovery bằng thư viện Waijung [5] trên Simulink.
- Kiểm tra và sửa lỗi và hoàn thiện hệ thống.

1.4 Phương pháp nghiên cứu

- Phân tích đối tượng điều khiển: tìm hiểu mô hình bằng cách xác định các tham số, tính chất vật lý từ đó đưa ra phương trình trạng thái của hệ thống.
- Phân tích lý thuyết thiết kế các bộ điều khiển: nghiên cứu về cách xây dựng bộ điều khiển cho hệ phi tuyến, khảo sát và chọn lựa các bộ điều khiển phù hợp với tính chất của hệ thống.

- Mô phỏng điều khiển hệ thống trên máy tính: xây dựng mô hình của hệ thống và bộ điều khiển bằng phần mềm MATLAB/Simulink để kiểm tra chất lượng của bộ điều khiển đã thiết kế.
- Điều khiển mô hình thực: Thiết kế, lắp ráp mô hình hệ thống và tiến hành áp dụng các bộ điều khiển cho mô hình thực nghiệm.

1.5 Cấu trúc bài báo cáo

Luận văn gồm 4 chương với các nội dung sau:

- Chương 1: Giới thiệu tổng quan đề tài, mục đích và phương pháp nghiên cứu của luận văn.
- Chương 2: Trình bày cơ sở lý thuyết về các thông số của hệ nâng bi trong từ trường; giới thiệu về bộ điều khiển sẽ áp dụng trong đề tài bằng cách nêu lý thuyết về phương pháp điều khiển và xây dựng bộ điều khiển đó cho hệ thống.
- Chương 3: Nêu lên phương pháp xây dựng mô hình thực tế hệ thống; trình bày về việc xây dựng mô phỏng hệ thống và các bộ điều khiển đã nêu ở chương 2; tiến hành mô phỏng điều khiển và điều khiển thực nghiệm mô hình và so sánh kết quả.
- Chương 4: Trình bày kết luận về hệ thống đã điều khiển. Nêu ra ưu, nhược điểm của đề tài và phương hướng phát triển.

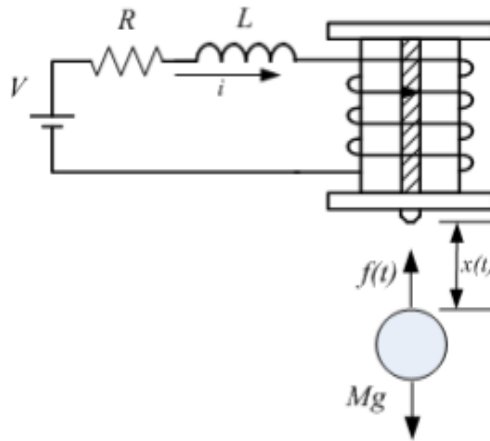
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Nội dung của chương này sẽ được chia làm 4 phần chính nói về mô hình toán học của hệ thống và 3 bộ điều khiển được ứng dụng trong đề tài. Các bộ điều khiển được trình bày lần lượt là: Bộ điều khiển trượt, bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa và cuối cùng là bộ điều khiển LQR.

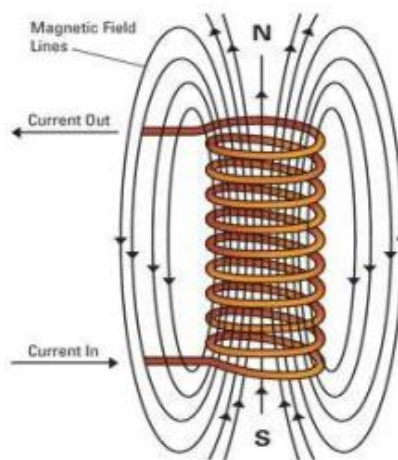
2.1 Hệ thống nâng bi trong từ trường

2.1.1 Giới thiệu hệ thống

Hình 2.1 là sơ đồ cấu trúc vật lý và các thành phần trong hệ thống nâng bi trong từ trường. Khi dòng điện đi qua cuộn dây được quấn quanh lõi thép, từ trường được sinh ra xung quanh nó và có thể được định hướng theo hướng mong muốn như Hình 2.2.



Hình 2.1 Sơ đồ hệ thống nâng bi trong từ trường [4].



Hình 2.2 Đường sức từ tạo ra bởi cuộn dây có dòng điện đi qua [14].

Như minh họa trong Hình 2.1 thì hướng lực từ là hướng dương theo chiều dọc hướng xuống, hệ có gốc tọa độ là bề mặt nam châm. Khi cuộn dây được nhận điện áp điều khiển V thì viên bi sắt có khối lượng M được giữ ở một khoảng cách x (khoảng cách từ viên bi đến lõi thép).

2.1.2 Mô hình toán học

Phương trình động học của hệ thống đã được nhiều tác giả nghiên cứu với cách tiếp cận khác nhau, ở đề tài luận văn này sử dụng các phương trình được mô tả ở (2.1) [3].

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = v \\ u = Ri + \frac{d(L(h)i)}{dt} \\ m \frac{dv}{dt} = mg_c - C \left(\frac{i}{h}\right)^2 \end{cases} \quad (2.1)$$

Trong đó :

- h : Vị trí của viên bi (m)
- v : Vận tốc của viên bi (m/s)
- i : Dòng điện qua cuộn dây (A)
- u : Điện áp cung cấp cho cuộn dây (V)
- R : Điện trở của cuộn dây (Ω)
- $L(h)$: Điện cảm của cuộn dây (H)
- C : Hằng số lực từ (Nm^2/A^2)
- m : Khối lượng của viên bi (kg)
- g_c : Gia tốc trọng trường (m/s^2)

Ở Hình 2.2 bên trong cuộn dây các đường sức gần như song song nên lực từ sinh ra có thể xem là tuyến tính. Tuy nhiên, ra khỏi cuộn dây độ tuyến tính của lực từ bắt đầu giảm do các đường sức từ có xu hướng tạo thành một đường cong khép kín hướng ra và vào cuộn dây. Điện cảm của cuộn dây là một hàm phi tuyến phụ thuộc vào vị trí của viên bi:

$$L(h) = L_i + \frac{2C}{h} \quad (2.2)$$

Trong đó $L(h)$ là một thông số của hệ thống, L_i là điện cảm của cuộn dây khi viên bi ở rất xa lõi thép.

Các biến trạng thái được chọn như sau:

$$\begin{cases} x_1 = h \\ x_2 = v \\ x_3 = i \end{cases} \quad (2.3)$$

Vectơ trạng thái của hệ thống là $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$

Từ (2.1), (2.2), (2.3) ta được phương trình trạng thái của hệ:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{x}_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2} \right) + \frac{1}{L} u \end{cases} \quad (2.4)$$

Ta gọi điểm cân bằng x_e của hệ thống là nghiệm của hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = 0 \\ \dot{x}_3 = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Từ (2.4) và (2.5) suy ra:

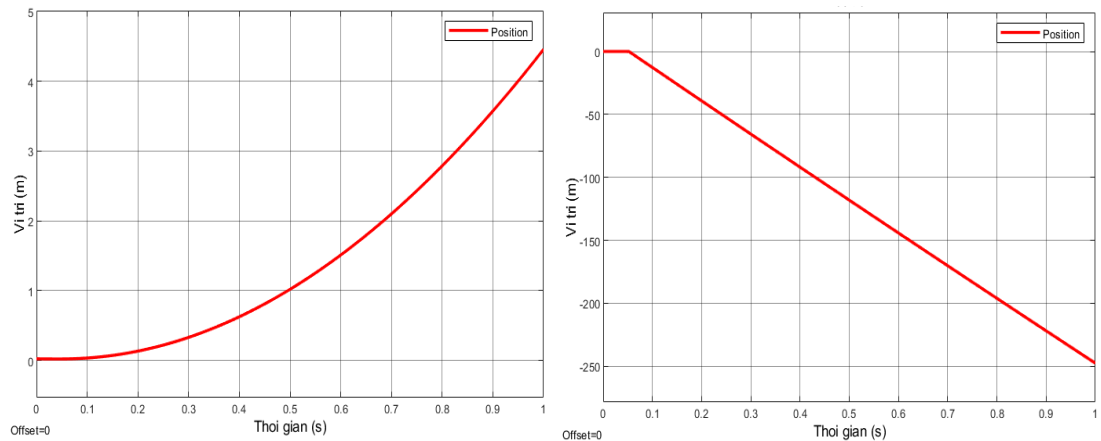
$$x_e = [x_{1e} \ 0 \ x_{3e}]^T \quad (2.6)$$

Với x_{3e} thỏa mãn phương trình sau:

$$x_{3e} = x_{1e} \sqrt{\frac{g_c m}{c}} \quad (2.7)$$

Gọi $x_d = [x_{1d} \ x_{2d} \ x_{3d}]^T$ là vectơ trạng thái mong muốn.

Mục tiêu của việc điều khiển là điều khiển được trạng thái x của hệ thống về trạng thái mong muốn x_d .



(a) Không có điện áp điều khiển (b) Có điện áp điều khiển khi $u = 24V$

Hình 2.3 Trạng thái của viên bi khi chưa có bộ điều khiển (điều kiện ban đầu $x_1 = 0.025m$).

Từ kết quả mô phỏng cho thấy, hệ thống có độ phi tuyến cao và không ổn định. Đối tượng không thể được điều khiển bằng cách khuếch đại tín hiệu điều khiển. Như ở Hình 2.3a thì khi không có điện áp điều khiển thì vị trí của vật sẽ tiến ra vô cùng (rơi xuống đất) hoặc bị hút dính và nam châm khi đưa điện áp điều khiển cố định 24V vào – Hình 2.3b. Hiện tượng này là do lực từ tạo ra tỷ lệ với bình phương của dòng điện và tỷ lệ nghịch với bình phương vị trí của vật [1]:

$$F_{lev}(t) = C \cdot \frac{I_e^2}{z(t)^2} \quad (2.8)$$

Với C là hằng số lực từ, I_e là dòng điện của nam châm, $z(t)$ là khoảng cách giữa vật và nam châm. Do đó khi đối tượng ở càng gần nam châm thì lực hút tạo ra càng lớn và ngược lại.

Các thông số của hệ thống được dùng để mô phỏng trong bài viết được thể hiện qua Bảng 1.

Bảng 1: Thông số mô phỏng hệ thống nâng bi trong từ trường

| Thông số | Giá trị | Đơn vị |
|--------------------------|----------------------|------------|
| Khối lượng viên bi, m | 15×10^{-3} | kg |
| Số vòng dây quấn, N | 1760 | Vòng |
| Tiết diện lõi quấn, S | 1.2×10^{-3} | m^2 |
| Điện trở cuộn dây, R | 29.1 | Ω |
| Điện cảm cuộn dây, L_i | 1.38 | H |
| Hằng số lực điện từ, C | 2.6×10^{-4} | Nm^2/A^2 |

2.1.3 Các phương pháp điều khiển đề xuất áp dụng với hệ thống

Hệ thống nâng vật trong từ trường dưới đã được nghiên cứu và ứng dụng vào thực tế: ổ lăn không ma sát, hệ thống giảm rung, tàu điện,... Có rất nhiều phương pháp điều khiển đã áp dụng thành công đối với hệ thống nâng bi trong từ trường như: bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa [2], bộ điều khiển phân bố cực có bộ quan sát trạng thái [4], bộ điều khiển trượt-mờ [3], bộ điều khiển PD mờ [4]...

Những phương pháp này dựa vào thông số và thực hiện tuyến tính hóa mô hình chính xác của đối tượng, sau đó áp dụng lý thuyết điều khiển vào và đạt được kết quả tốt. Trong đề tài này, các bộ điều khiển: trượt, hồi tiếp tuyến tính hóa, LQR sẽ được nghiên cứu và áp dụng.

2.2 Điều khiển trượt (Sliding Mode Control – SMC)

2.2.1 Nguyên lý điều khiển trượt

Nguyên lý của bộ điều khiển trượt đối với hệ thống phi tuyến bậc n có phương trình toán học như sau [12]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ x^{(n)} = f(X) + g(X).u \end{cases} \quad (2.9)$$

Trong đó:

- $u \in R$ là tín hiệu điều khiển.
- x_1 là tín hiệu ngõ ra.
- $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in R^n$ là vector trạng thái.
- n là bậc của mô hình đối tượng điều khiển.

Để điều khiển bám mục tiêu, cần xác định luật điều khiển hồi tiếp cho trạng thái của hệ thống vòng kín sẽ bám theo trạng thái mong muốn $X_d = [x_d \ \dot{x}_d \ \dots \ x_d^{(n-1)}]^T$.

Gọi e là sai lệch giữa tín hiệu ra và tín hiệu đặt (tín hiệu mong muốn) của hệ thống:

$$e = X - X_d = [e \ \dot{e} \ \dots \ e^{(n-1)}]^T \quad (2.10)$$

Lúc này, mục tiêu của việc điều khiển ổn định hệ thống là xác định luật điều khiển hồi tiếp $u = u(X)$ sao cho ngõ ra của hệ thống $e \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ bằng cách chọn biểu thức mặt trượt:

$$S(e) = e^{(n-1)} + a_{n-2} e^{(n-2)} + \dots + a_1 \dot{e} + a_0 e \quad (2.11)$$

Các hệ số a_0, a_1, \dots, a_{n-2} phải được chọn sao cho đa thức đặc trưng là đa thức Hurwitz:

$$A = \lambda^{n-1} + a_{n-2} \lambda^{n-2} + \dots + a_1 \lambda + a_0 \quad (2.12)$$

Nghĩa là đa thức A của phương trình vi phân $S(e) = 0$ có tất cả các nghiệm của đa thức có phần thực âm.

Thay thế sai số $e = X - X_d$ vào (2.11) sau đó lấy đạo hàm của đa thức mới tính toán, ta được:

$$S = x_n + a_{n-2} x_{n-1} + \dots + a_1 x_2 + a_0 x_1 +$$

$$-(x_d^{(n-1)} + a_{n-2} x_d^{(n-2)} + \dots + a_1 \dot{x}_d + a_0 x_d) \quad (2.13)$$

Và:

$$\begin{aligned} \dot{S} = \dot{x}_n + a_{n-2} \dot{x}_{n-1} + \dots + a_1 \dot{x}_2 + a_0 \dot{x}_1 + \\ -(x_d^{(n)} + a_{n-2} x_d^{(n-1)} + \dots + a_1 \ddot{x}_d + a_0 \dot{x}_d) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Từ (2.9) và (2.14), suy ra:

$$\begin{aligned} \dot{S} = f(X) + g(X).u + a_{n-2} \dot{x}_{n-1} + \dots + a_1 \dot{x}_2 + a_0 \dot{x}_1 + \\ -(x_d^{(n)} + a_{n-2} x_d^{(n-1)} + \dots + a_1 \ddot{x}_d + a_0 \dot{x}_d) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Sử dụng phương pháp Lyapunov, ta chọn một hàm xác định V như sau:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.16)$$

$$\Rightarrow \dot{V} = S\dot{S} \quad (2.17)$$

Để \dot{V} xác định âm, chọn luật điều khiển u sao cho:

- Khi $S > 0$ thì $\dot{S} < 0$.
- Khi $S < 0$ thì $\dot{S} > 0$.

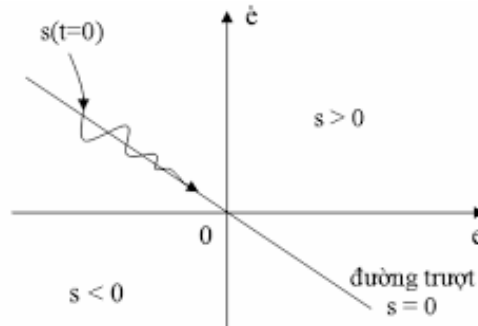
Nói cách khác, với hàm trượt $S(e)$ xác định luật điều khiển u thỏa:

$$\begin{cases} \dot{S} = -\alpha \cdot \text{sign}(S) \\ \alpha > 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\Rightarrow S\dot{S} = -\alpha|S|$$

$$\Rightarrow S\dot{S} = \dot{V} < 0 \text{ (thỏa điều kiện)}$$

Với luật điều khiển như đã trình bày ở trên thì hệ thống sẽ được ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov, lúc này mọi trạng thái của hệ thống nằm bên ngoài mặt trượt sẽ được đưa về mặt trượt $S(e) = 0$ và điều chỉnh bền vững trên mặt trượt này. Tuy nhiên, ở thực tế việc điều khiển trượt sẽ làm cho hệ dao động quanh mặt trượt ở Hình 2.4.



Hình 2.4 Sơ đồ nguyên lý điều khiển trượt [13].

2.2.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ nâng bi trong từ trường

Từ mô hình của hệ thống đã được trình bày kết hợp với cơ sở lý thuyết điều khiển trượt, mục tiêu của việc điều khiển là đưa trạng thái $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]$ của hệ thống về trạng thái mong muốn $X_d = [x_{1d} \ x_{2d} \ x_{3d}]$.

Từ (2.4) ta thực hiện chuyển đổi trục tọa độ:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1d} \\ z_2 = x_2 \\ z_3 = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \end{cases} \quad (2.19)$$

Nếu z_1, z_2, z_3 được đưa về 0 khi $t \rightarrow \infty$ thì x_1 sẽ hội tụ về x_{1d} , x_2 sẽ hội tụ về $x_{2d} = 0$ và x_3 sẽ hội tụ về $x_{3d} = x_{1d} \sqrt{\frac{g_c m}{c}}$ khi $t \rightarrow \infty$.

Đạo hàm (2.19) ta được mô hình động học của hệ thống trong hệ tọa độ mới:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{x}_1 \\ \dot{z}_2 = \dot{x}_2 \\ \dot{z}_3 = -\frac{c}{m} \left(\frac{2x_3 x_1^2 \dot{x}_3 - 2x_1 x_3^2 \dot{x}_1}{x_1^4} \right) \end{cases} \quad (2.20)$$

Từ (2.4) và (2.20) ta được:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{x}_1 \\ \dot{z}_2 = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \dot{z}_3 = -\frac{2C}{m} \left[\left(1 - \frac{2C}{Lx_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right] - \frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} u \end{cases} \quad (2.21)$$

Từ (2.19) và (2.21), ta được:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = 2(g_c - z_3) \left[\frac{z_2}{(z_1 + x_{1d})} \left(1 - \frac{2C}{L(z_1 + x_{1d})} \right) + \frac{R}{L} \right] - \frac{2C}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{c}{m}} (g_c - z_3) \cdot u \end{cases} \quad (2.22)$$

Đặt:

$$\begin{cases} f(z) = 2(g_c - z_3) \left[\frac{z_2}{(z_1 + x_{1d})} \left(1 - \frac{2C}{L(z_1 + x_{1d})} \right) + \frac{R}{L} \right] \\ g(z) = -\frac{2C}{L(z_1 + x_{1d})} \sqrt{\frac{c}{m}} (g_c - z_3) u \end{cases} \quad (2.23)$$

Mô hình động học của hệ thống trong tọa độ mới thu được từ (2.22) và (2.23):

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = f(z) + g(z).u \end{cases} \quad (2.24)$$

Với hàm $f(z)$ tương ứng với $f(X)$ và $g(z)$ tương ứng với $g(X)$ trong hệ tọa độ gốc:

$$\begin{cases} f(X) = -\frac{2C}{m} \left[\left(1 - \frac{2C}{Lx_1}\right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \right] \\ g(X) = -\frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} u \end{cases} \quad (2.25)$$

Ngõ ra của hệ thống trong hệ tọa độ mới là:

$$e = z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (2.26)$$

Từ (3.24), (3.25), (3.26) suy ra mối quan hệ giữa ngõ ra và ngõ vào của hệ thống như sau:

$$\ddot{e} = f(z) + g(z).u \quad (2.27)$$

Mặt trượt được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} S &= \ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_0 e = \ddot{z} + a_1 \dot{z} + a_0 z \\ &= z_3 + a_1 z_2 + a_0 z_1 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Với a_1 và a_0 là các hệ số được chọn sao cho đa thức đặc trưng của phương trình vi phân $S = 0$ là đa thức Hurwitz (a_1 và a_0 là các hệ số dương).

Lấy đạo hàm của S theo thời gian, ta được:

$$\dot{S} = \dot{z}_3 + a_1 \dot{z}_2 + a_0 \dot{z}_1 = f(z) + g(z).u + a_1 z_3 + a_0 z_2 \quad (2.29)$$

Chọn luật điều khiển u :

$$u = \frac{1}{g(z)} [-f(z) - a_1 z_3 - a_0 z_2 - W \text{sign}(z_3 + a_1 z_2 + a_0 z_1)] \quad (2.30)$$

Thay u ở (3.30) vào (3.29) :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= f(z) + g(z). \frac{1}{g(z)} [-f(z) - a_1 z_3 - a_0 z_2 - W \text{sign}(z_3 + a_1 z_2 + \\ &\quad + a_0 z_1)] + a_1 z_3 + a_0 z_2 \\ &= -W \text{sign}(z_3 + a_1 z_2 + a_0 z_1) \\ &= -W \text{sign}(S) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Từ (2.31) ta có được $SS < 0$ (điều kiện để đảm bảo tính bền vững của luật điều khiển) nếu W là hằng số dương.

Mặt trượt S được viết lại dưới dạng hàm của x_1, x_2, x_3 dựa vào (2.19):

$$S = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_0 (x_1 - x_{1d}) \quad (2.32)$$

Ta suy ra được luật điều khiển u :

$$u = \frac{1}{g(X)} \left[-f(X) - a_1 \left(g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) - a_0 x_2 + \right. \\ \left. - W \operatorname{sign} \left(g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_0 (x_1 - x_{1d}) \right) \right] \quad (2.33)$$

Chọn $W = 200$, $a_0 = 930$ và $a_1 = 61$ cho bộ điều khiển trượt với thông số hệ thống đã nêu ở Bảng 1.

2.3 Điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa

2.3.1 Nguyên lý điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa

Xét hệ thống phi tuyến bậc n được mô tả bởi phương trình trạng thái:

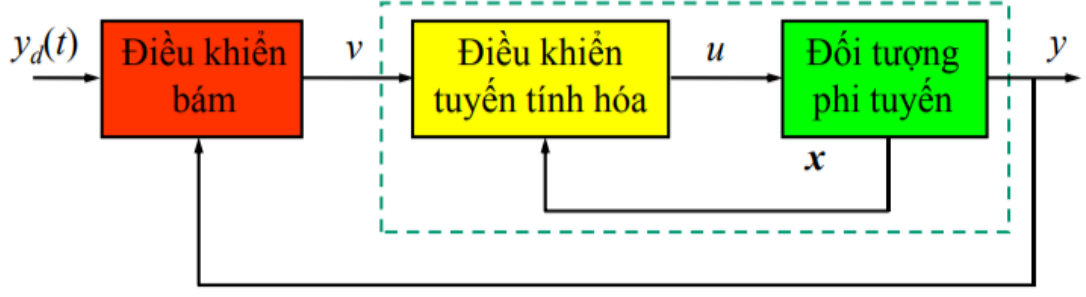
$$\begin{cases} \dot{x} = a(x) + b(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.34)$$

Trong đó:

- $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in R^n$ là véc tơ trạng thái của hệ thống.
- $u \in R^n$ là tín hiệu vào.
- $y \in R^n$ là tín hiệu ra.
- $a(x) \in R^n, b(x) \in R^n$ là các véc tơ hàm trơn mô tả động học của hệ thống.
- $h(x) \in R^n$ là hàm mô tả quan hệ giữa biến trạng thái và tín hiệu ra.

Mục tiêu điều khiển đặt ra là điều khiển tín hiệu ra $y(t)$ bám theo tín hiệu đặt $y_d(t)$ và nguyên lý của bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa được nêu ở [12] được thể hiện qua Hình 2.5 mô tả hai vòng điều khiển của bộ điều khiển với:

- Vòng điều khiển trong bao gồm bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa dùng để biến đổi hệ phi tuyến thành hệ tuyến tính – Hình 2.6.
- Vòng điều khiển ngoài là bộ điều khiển bám được thiết kế dựa vào lý thuyết điều khiển thông thường – Hình 2.7.



Hình 2.5 Sơ đồ khối điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa [7].

Nếu đối tượng có bậc tương đối bằng n , bằng cách lấy đạo hàm của phương trình $y = h(x)$ ở (2.34) n lần, có thể biểu diễn mối quan hệ vào ra của đối tượng dưới dạng:

$$y^{(n)} = a(x) + b(x)u \quad (2.35)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} a(x) = L_f^n \cdot h(x) \\ b(x) = L_g \cdot L_f^{n-1} \cdot h(x) \neq 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

Với $L_f \cdot h(x)$ là đạo hàm của hàm $h(x)$ dọc theo véc-tơ $f(x)$:

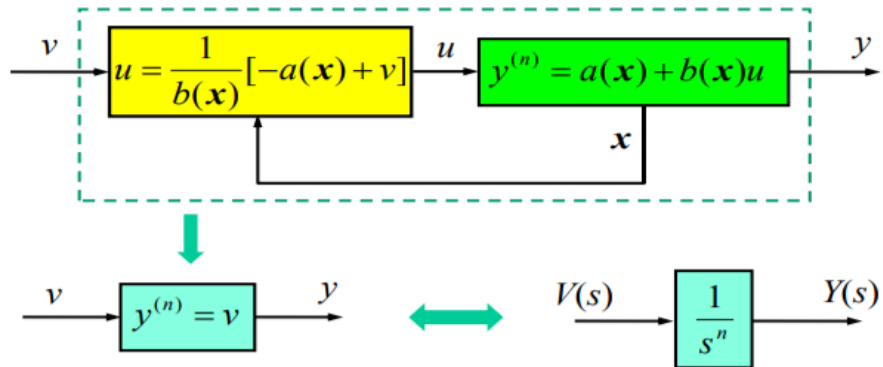
$$L_f \cdot h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \cdot f(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial h(x)}{\partial x_n} \right] [f_1(x), \dots, f_n(x)]^T \quad (2.37)$$

$$L_f^k \cdot h(x) = \frac{\partial L_f^{k-1} \cdot h(x)}{\partial x} \cdot f(x)$$

$$L_g \cdot L_f^k \cdot h(x) = \frac{\partial L_f^k \cdot h(x)}{\partial x} \cdot g(x)$$

Luật điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa của hệ thống:

$$u(x) = \frac{1}{b(x)} [a(x) + v(t)] \quad (2.38)$$



Hình 2.6 Bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa [7].

Đối tượng phi tuyến với tín hiệu vào $u(t)$ được biến đổi thành đối tượng tuyến tính với tín hiệu vào là $v(t)$. Lúc này, ta thiết kế bộ điều khiển bám cho đối tượng đã tuyến tính hóa trên – Hình 2.6.

Đặt sai lệch giữa tín hiệu đặt y_d (y_d phải khả vi bị chặn đến bậc n) và tín hiệu ra là e :

$$e = y_d - y \quad (2.39)$$

Bộ điều khiển bám sẽ có dạng:

$$v = y_d^{(n)} + [k_1 e^{(n-1)} + k_2 e^{(n-2)} + \dots + k_n e] \quad (2.40)$$

Lúc này, đặc tính động học của sai số:

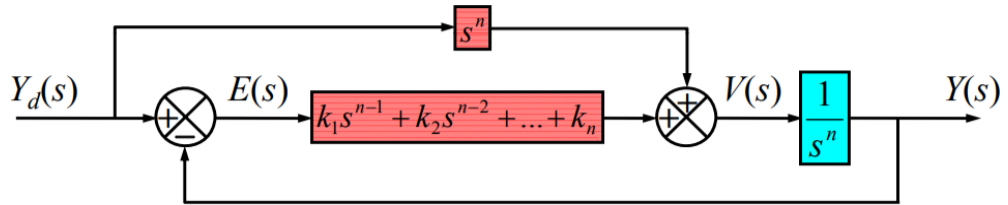
$$(s^n + k_1 s^{n-1} + k_2 s^{n-2} + \dots + k_n).E(s) = 0 \quad (2.41)$$

Suy ra, đa thức đặc trưng là:

$$\Delta(s) = s^n + k_1 s^{n-1} + k_2 s^{n-2} + \dots + k_n \quad (2.42)$$

Chọn k_i ($i=1, n$) sao cho $\Delta(s)$ là đa thức Hurwitz, tức là các nghiệm của phương trình $\Delta(s) = 0$ đều nằm bên trái mặt phẳng phức.

Mục tiêu của việc điều khiển lúc này là làm cho hệ thống kín ổn định và $e(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.



Hình 2.7 Bộ điều khiển bám cho đối tượng được hồi tiếp tuyến tính hóa [7].

2.3.2 Thiết kế bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho hệ nâng bi trong từ trường

Từ phương trình trạng thái (2.4) của hệ thống, lấy đạo hàm tín hiệu ra ta được:

$$\begin{cases} \dot{y} = \dot{x}_1 = x_2 \\ \ddot{y} = \dot{x}_2 = g_c - \frac{c}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \\ \ddot{y} = -\frac{2c}{m} \left[\left(1 - \frac{2c}{Lx_1} \right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right] - \frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} u \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\Rightarrow \ddot{y} = f(X) + g(X).u \quad (2.44)$$

Với:

$$\begin{cases} f(X) = -\frac{2C}{m} \left[\left(1 - \frac{2C}{Lx_1}\right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \right] \\ g(X) = -\frac{2Cx_3}{Lmx_1^2} u \end{cases} \quad (2.45)$$

Theo (2.38), ta có biểu thức bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa:

$$u(x) = \frac{1}{-\frac{2Cx_3}{Lmx_1^2}} \left\{ -\frac{2C}{m} \left[\left(1 - \frac{2C}{Lx_1}\right) \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \right] + v(t) \right\} \quad (2.46)$$

Thay (2.46) vào (2.44), ta được hệ tuyến tính:

$$\ddot{y} = v \quad (2.47)$$

Biểu thức bộ điều khiển bám tuyến tính theo (2.40):

$$v = \ddot{y}_d + (k_1 \ddot{e} + k_2 \dot{e} + k_3 e) \quad (2.48)$$

Với $e = y_d - y$ (2.49)

Từ (2.47), (2.48), (2.49) ta được đặc tính động học của sai số:

$$\ddot{e} + k_1 \ddot{e} + k_2 \dot{e} + k_3 e = 0 \quad (2.50)$$

Suy ra đa thức đặc trưng là:

$$\Delta(s) = s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + k_3 \quad (2.51)$$

Mục tiêu cần thiết kế bộ điều khiển cho mô hình sao cho tín hiệu bám được xung vuông với độ vọt lố 20% và thời gian xác lập là 0.1s (tiêu chuẩn 5%).

Từ (2.51), theo [12] phương trình đặc trưng sẽ có dạng:

$$\Delta(s) = (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(s + p) \quad (2.52)$$

Với $p \gg \xi\omega_n$ để ảnh hưởng của p lên chất lượng quá độ không lớn mà chỉ phụ thuộc vào cặp cực quyết định.

Công thức tính độ vọt lố:

$$POT = e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100\% \Rightarrow \xi = 0.456 \quad (2.53)$$

Thời gian quá độ được tính theo tiêu chuẩn 5% là:

$$T_{settling} = \frac{3}{\xi\omega_n} \Rightarrow \omega_n = 32.895 \quad (2.54)$$

Chọn $p = 100$, từ đó suy ra được thông số của bộ điều khiển bám là:

$$\begin{cases} k_1 = 130 \\ k_2 = 4082 \\ k_3 = 108208 \end{cases} \quad (2.55)$$

2.4 Bộ điều khiển LQR

Điều khiển tối ưu là phương pháp điều khiển nhằm xác định luật điều khiển cho hệ thống động cho trước sao cho tối thiểu hóa một chỉ tiêu chất lượng nào đó. Điều khiển toàn phương tuyến tính LQR là phương pháp điều khiển tối ưu để tối thiểu hóa hàm mục tiêu dạng toàn phương với nguyên lý của bộ điều khiển được trình bày ở [7].

2.4.1 Nguyên lý bộ điều khiển LQR

Đối tượng tuyến tính bậc n được mô tả bởi phương trình trạng thái:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.56)$$

Trong đó:

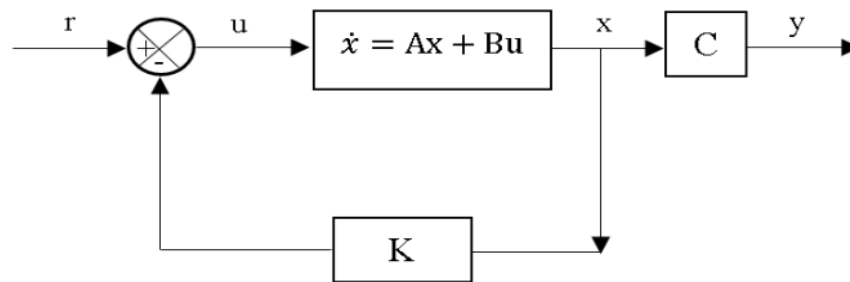
- $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ là véc-tơ trạng thái.
- $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$ là véc-tơ tín hiệu điều khiển.

Bộ điều khiển này tính toán tín hiệu điều khiển u để tối thiểu hóa hàm mục tiêu dạng toàn phương:

$$J = \int_0^\infty (X^T Q X + R u^2) dt \quad (2.57)$$

Trong đó: Q là ma trận bán xác định dương và $R > 0$ chứa các hệ số do người thiết kế chọn trước.

Tín hiệu điều khiển $u = -Kx$ theo nguyên lý bộ phản hồi trạng thái như Hình 2.8.



Hình 2.8 Sơ đồ điều khiển phản hồi trạng thái [15].

Kết hợp (2.56) và tín hiệu điều khiển u , ta được:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \quad (2.58)$$

Với K được lấy ra từ biểu thức:

$$J = K = R^{-1} B^T P \quad (2.59)$$

Và P là nghiệm của phương trình đại số Riccati:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (2.60)$$

Hàm Hamilton để tìm lời giải tối ưu:

$$H = \frac{1}{2} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] + \lambda^T(t) [A x(t) + B u(t)] \quad (2.61)$$

Điều kiện cần để có lời giải tối ưu là:

- Phương trình trạng thái (2.46).
- Phương trình đồng trạng thái:

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -Q x(t) - A \lambda(t) \quad (2.62)$$

- Điều kiện dừng:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = R u(t) + B^T \lambda(t) = 0 \quad (2.63)$$

$$\Rightarrow u(t) = -R^{-1} B^T \lambda(t) \quad (2.64)$$

Thay (2.64) vào (2.56), ta được:

$$\dot{x}(t) = A x(t) - B R^{-1} B^T \lambda(t) \quad (2.65)$$

Kết hợp (2.65) và (2.62), ta được:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B R^{-1} B^T \\ -Q & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Giải phương trình vi phân trên ta tìm được $x(t)$ và $\lambda(t)$. Sau đó, ta thay $\lambda(t)$ vào (2.62) để tìm được lời giải tối ưu.

Lúc này ta được luật điều khiển tối ưu:

$$u^*(t) = -K(t)x(t) \quad (2.67)$$

Trong đó $K(t) = R^{-1} B^T P(t)$ với P(t) là nghiệm bán xác định dương của phương trình vi phân Riccati:

$$\dot{P} = P A + A^T P + Q - P B R^{-1} B^T P \quad (2.68)$$

Để xác định các trọng số Q, R trong bộ điều khiển, theo [15] có nhiều cách để thực hiện. Phương án “Thử và cân chỉnh” được sử dụng trong đề tài luận văn này: Xác định Q và R rồi thay đổi các giá trị để được đầu ra mong muốn.

2.4.2 Thiết kế bộ điều khiển LQR cho hệ nâng bi trong từ trường

Tuyến tính hóa hệ thống nâng bi trong từ trường ở xung quanh điểm cân bằng

$$x_e = [x_{1e} \ 0 \ x_{3e}]^T \text{ với } x_{3e} \text{ thỏa mãn điều kiện } x_{3e} = x_{1e} \cdot \sqrt{\frac{gm}{c}}$$

Từ (2.4), ta có mô hình không gian trạng thái tuyến tính của hệ là:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u} \\ \tilde{y} = C\tilde{x} \end{cases} \quad (2.69)$$

Trong đó:
$$\begin{cases} \tilde{x} = x - x_e \\ \tilde{y} = y - y_e \\ \tilde{u} = u - u_e \end{cases}$$

Các ma trận trạng thái của hệ tuyến tính là :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2Cx_{3e}^2}{mx_{1e}^3} & 0 & -\frac{2Cx_{3e}}{mx_{1e}^2} \\ 0 & \frac{2Cx_{3e}}{Lx_{1e}^2} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}; C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (2.70)$$

Chọn điểm cân bằng $x_e = [0.015 \quad 0 \quad 0.357]^T$ và các giá trị thông số của hệ thống, thay vào (2.70) ta được:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1308 & 0 & -54.981 \\ 0 & 0.583 & -20.57 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.797 \end{bmatrix}; C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (2.71)$$

Có 2 giả thiết được đặt ra khi thiết kế bộ điều khiển LQR cho hệ nâng bi trong từ trường:

- Giả thiết 1: Hệ thống phản hồi đầy đủ trạng thái tức là có thể đo được 3 biến trạng thái vị trí, vận tốc và cường độ dòng điện của hệ thống.
 \Rightarrow Thiết kế bộ điều khiển LQR như đã nêu ở lý thuyết.
- Giả thiết 2: Chỉ đo được trạng thái vị trí của viên bi, vận tốc và cường độ dòng điện không đo được; có nhiễu đo vị trí viên bi tác động vào hệ thống với phương sai là 0.0001.
 \Rightarrow Sử dụng bộ điều khiển LQR kết hợp với bộ lọc Kalman.

2.4.2.1 Giả thiết 1

Lúc này, để tìm được trọng số K của bộ điều khiển, lệnh “ $lqr=(A,B,Q,R)$ ” trên MATLAB được sử dụng.

Giá trị của Q và R được chọn trong mô hình là:

$$Q = \begin{bmatrix} 100000 & 0 & 0 \\ 0 & 100000 & 0 \\ 0 & 0 & 100000 \end{bmatrix}; R = 0.00001 \quad (2.72)$$

Ta thu được giá trị của K là:

$$K = [-4.76 \times 10^6 \quad -0.16 \times 10^6 \quad 0.1 \times 10^6] \quad (2.73)$$

2.4.2.2 Giả thiết 2

Bộ lọc Kalman [7] là thuật toán sử dụng chuỗi các giá trị đo lường, bị ảnh hưởng bởi nhiễu và sai số, để ước đoán biến số nhằm tăng độ chính xác. Bộ lọc Kalman thực hiện phương pháp truy hồi đối với chuỗi các giá trị đầu vào bị nhiễu, nhằm tối ưu hóa giá trị ước đoán trạng thái của hệ thống.

Xét hệ tuyến tính:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (2.74)$$

Trong đó: $w(t)$ là nhiễu hệ thống, $v(t)$ là nhiễu đo lường.

Giả sử nhiễu hệ thống và nhiễu đo lường có phân bố Gauss, không tương quan, có trung bình bằng 0 và phương sai là:

$$E[ww^T] = Q_N; E[vv^T] = R_N \quad (2.75)$$

Bộ lọc Kalman:

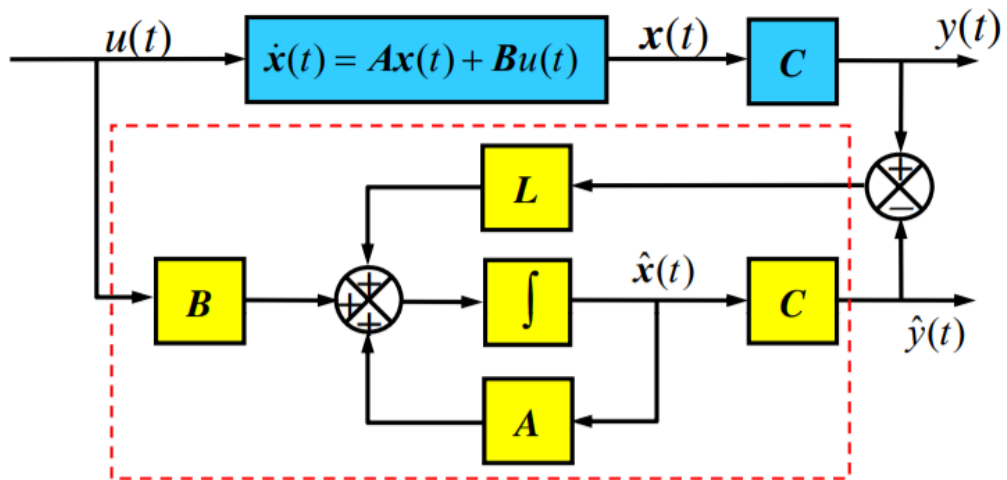
$$\begin{cases} \hat{x}(t) = [A\hat{x}(t) + Bu(t)] + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (2.76)$$

Trong đó L là độ lợi của bộ lọc Kalman:

$$L = \Pi C^T R_N^{-1} \quad (2.77)$$

Với Π là nghiệm của phương trình Ricatti:

$$A\Pi + \Pi A^T - \Pi C^T R_N^{-1} C \Pi + Q_N = 0 \quad (2.78)$$



Hình 2.9 Sơ đồ khối bộ lọc Kalman [7].

Kết hợp bộ điều khiển LQR với bộ lọc Kalman ta sẽ có được bộ điều khiển LQG cho hệ tuyến tính bị tác động bởi nhiễu như ở hệ (3.66). Ở Hình 2.10 là sự kết hợp của bộ điều khiển LQR và bộ lọc Kalman, trạng thái ngõ ra của hệ thống sẽ được so sánh với bộ ước lượng bằng bộ lọc Kalman, sau đó trọng số K của bộ điều khiển LQR sẽ sử dụng các thống số trạng thái ước lượng đó để đưa vào điều khiển hệ thống.

Bằng cách sử dụng lệnh MATLAB, ta tìm được K của bộ điều khiển LQR và L của bộ lọc Kalman:

$$K = \text{lqr}(A,B,Q,R);$$

$$L = \text{lqe}(A,G,C,QN,RN);$$

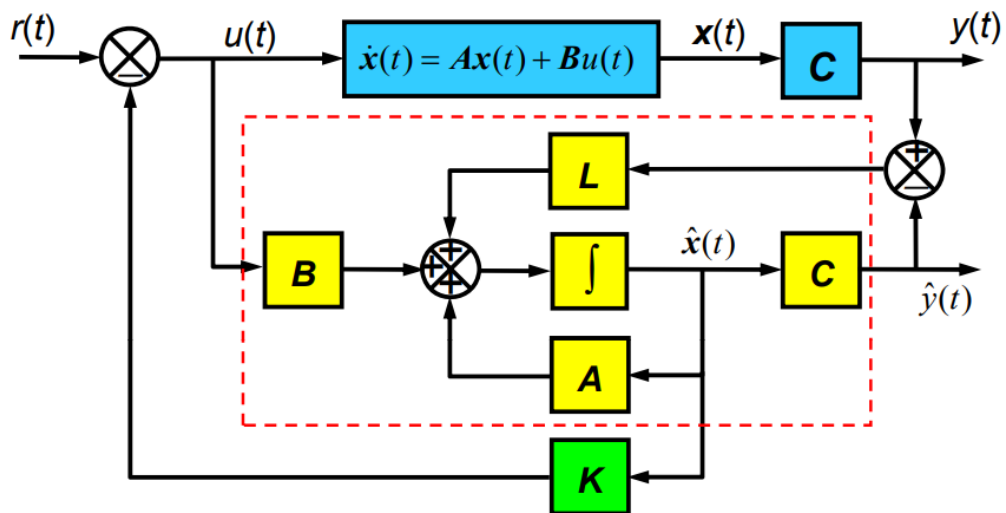
Với G là ma trận đơn vị cấp 3.

Theo [7], Q và R như (2.72) và QN, RN được chọn là:

$$QN = \begin{bmatrix} 0.000001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.000001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.000001 \end{bmatrix}; RN = 0.0001 \quad (2.79)$$

Ta thu được L ứng với vị trí cân bằng đã tuyến tính hóa của hệ thống:

$$L = \begin{bmatrix} 71.8 \\ 2575.3 \\ 26.6 \end{bmatrix} \quad (2.80)$$



Hình 2.10 Sơ đồ khối điều khiển LQG. [7]

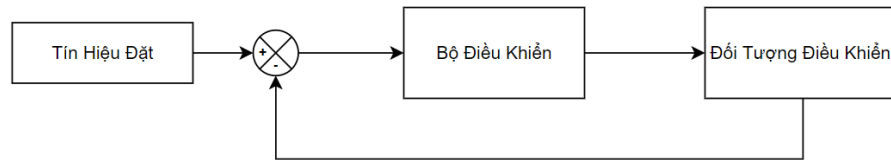
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ THỰC HIỆN

Từ các cơ sở lý thuyết đã được nghiên cứu và trình bày ở Chương 2, nhóm tác giả tiến hành thiết kế, lựa chọn thiết bị và lắp đặt mô hình vật lý của đối tượng hệ nâng bi trong từ trường. Ở chương này, tổng quan về hệ thống với các khối chức năng, linh kiện được sử dụng và mô hình cơ khí sẽ được trình bày. Đồng thời, nhóm tác giả sẽ tiến hành mô phỏng hệ thống và bộ điều khiển trên phần mềm MATLAB/Simulink. Cuối cùng là áp dụng các bộ điều khiển đó vào mô hình thực tế.

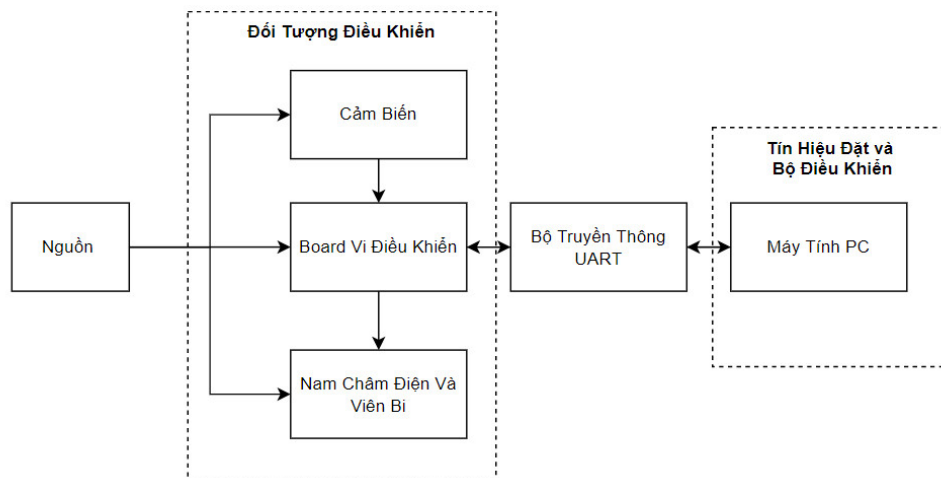
3.1 Sơ đồ các khối chức năng trong hệ thống

Các thành phần chính cần có để điều khiển được mô hình: Máy tính, board vi điều khiển, module truyền thông UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), cảm biến dòng điện, mạch điều khiển dòng, cảm biến vị trí, nam châm điện, khung sườn hệ thống, viên bi sắt,...

Sơ đồ tổng quan về việc điều khiển hệ thống cơ bản được thể hiện qua Hình 3.1. Tín hiệu đặt sẽ được so sánh với tín hiệu cảm biến từ hệ thống đưa về, sai lệch đó sẽ được đưa vào bộ điều khiển để tính toán đưa tín hiệu sang điều khiển hệ thống.



Hình 3.1 Sơ đồ tổng quan điều khiển hệ thống.



Hình 3.2 Sơ đồ khối hệ thống.

Board vi điều khiển (VĐK): Sử dụng board VĐK STM32F407 Discovery đọc giá trị của cảm biến khoảng cách và cảm biến dòng điện và xuất tín hiệu PWM (Pulse Width Modulation) để điều khiển dòng điện qua nam châm điện.

Máy tính PC (Personal Computer): Chứa bộ điều khiển đã được thiết kế. Đây là nơi thu nhận thông tin từ cảm biến và tính toán, đưa ra tín hiệu điều khiển.

Bộ truyền thông UART: Giúp VĐK và máy tính PC truyền nhận được thông tin với nhau. VĐK gửi thông tin giá trị cảm biến đọc được cho máy tính PC và ngược lại, máy tính PC truyền tín hiệu điều khiển cho VĐK.

Cảm biến: Giúp hệ thống xác định vị trí của viên bi và cường độ dòng điện đi qua nam châm điện để đưa vào tính toán trong máy tính PC.

Nam châm điện và viên bi: Được điều khiển theo tín hiệu xung PWM từ vi điều khiển đưa vào mạch điều khiển dòng.

Nguồn: Bao gồm khối nguồn +24V được lấy từ bộ nguồn DC cung cấp cho nam châm điện, và một số nguồn ổn áp với 3 ngõ ra điện áp khác nhau cho từng khối chức năng khác: +12V, +5V, +3.3V.

3.1.1 Nguồn

Hệ thống sử dụng các nguồn điện áp một chiều khác nhau cho từng khối chức năng, bao gồm:

- Nguồn +24V: cung cấp cho nam châm điện và mạch nguồn ổn áp.
- Nguồn +12V: dùng cho mạch điều khiển dòng điện qua nam châm điện.
- Nguồn +5V: đây là nguồn được sử dụng cho cảm biến đo dòng điện.
- Nguồn +3.3V: được sử dụng cho cảm biến hồng ngoại đo vị trí viên bi.
- Ngoài ra, board vi điều khiển và module UART sử dụng nguồn từ cổng USB (Universal Serial Bus) của máy tính.



Hình 3.3 Bộ nguồn điều chỉnh DC Keithley.

Bộ nguồn chính 24V của hệ thống KEITHLEY 2231A có:

- 3 ngõ ra cách ly, công suất tối đa 195W.
- Độ phân giải: 10mV, 1mA.
- Độ chính xác: $\leq 0.06\% + 20\text{mV}$, $0.2\% + 10\text{mA}$.
- Nguồn: 110VAC/230VAC, 47-60Hz.

3.1.2 Vi điều khiển

Yêu cầu: Có ít nhất 2 ngõ vào ADC (Analog-to-Digital Converter) và 1 ngõ ra xuất tín hiệu PWM.

Chức năng: 2 ngõ vào ADC để đọc cảm biến dòng điện và cảm biến khoảng cách. Ngõ ra PWM để đưa vào mạch điều khiển dòng điều khiển dòng điện đi qua nam châm điện.

Dựa vào yêu cầu và chức năng trên, nhóm tác giả đã chọn board vi điều khiển STM32F407 Discovery (Hình 3.4) là sản phẩm của hãng STMicroelectronics. Cấu tạo chính của board STM32F407 Discovery bao gồm [10]:

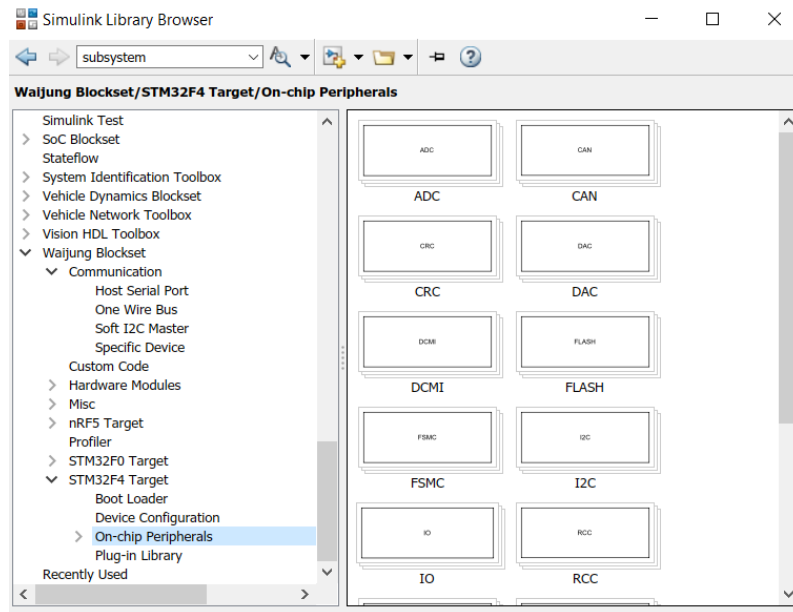
- Chip vi điều khiển STM32F407VGT6 32-bit ARM Cortex-M4F core, 1 MB Flash, 192 KB RAM.
- Tích hợp sẵn mạch nạp và Debug ST-LINK/V2.
- Nguồn cấp từ cổng Mini USB qua các IC (Integrated Circuit) nguồn chuyển thành 3V3 để cấp cho MCU (Microcontroller Unit).
- Có sẵn các chân nguồn: 3V và 5V.
- Ba kênh ADC độ phân giải 12-bit.
- Sáu kênh UART với tốc độ tối đa 11.25 Mbit/s.



Hình 3.4 STM32F407 Discovery.

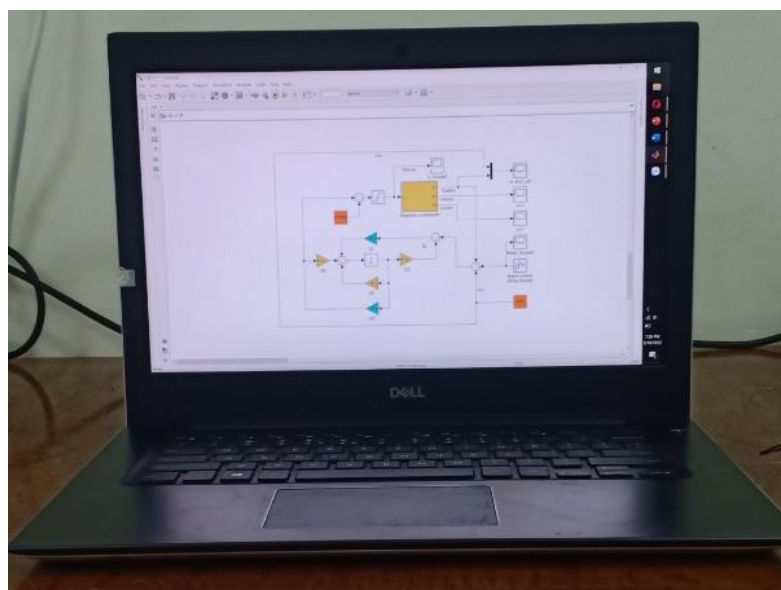
3.1.3 Máy tính PC

- Yêu cầu: có cài đặt phần mềm MATLAB.
- Chức năng: Máy tính chứa chương trình điều khiển, giao tiếp với board vi điều khiển để lấy thông tin vị trí, dòng điện và xuất tín hiệu điều khiển cho mạch điều khiển dòng qua nam châm điện.



Hình 3.5 Thư viện Waijung để lập trình STM32 trên Simulink [5].

Board Vi điều khiển STM32F407 được lập trình bằng MATLAB/Simulink với thư viện Waijung được hỗ trợ sẵn [5] với một số khối chức năng tiêu biểu như: truyền thông, ADC, PWM,....



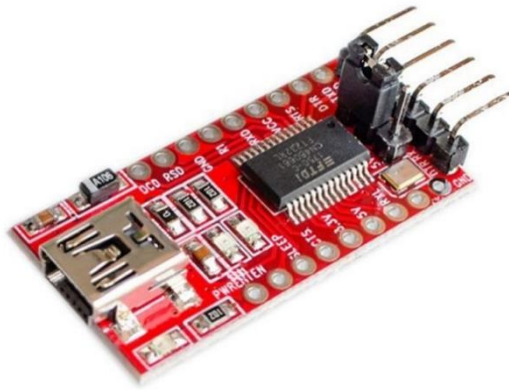
Hình 3.6 Máy tính PC kết nối với thiết bị.

3.1.4 Module truyền thông UART

Board vi điều khiển STM32F407 Discovery không thể giao tiếp trực tiếp với máy tính. Và ở ứng dụng đề tài này, việc xử lý tính toán bộ điều khiển được thực hiện trên máy tính và board vi điều khiển chỉ đảm nhận vai trò:

- Đọc giá trị cảm biến gửi về máy tính để tính toán điều khiển.
- Nhận tín hiệu điều khiển từ máy tính và xuất tín hiệu PWM cho mạch điều khiển dòng.

Do đó, module chuyển đổi USB UART được lựa chọn sử dụng để đảm nhận nhiệm vụ truyền thông giữa máy tính và board vi điều khiển là mạch chuyển USB UART TTL FT232RL (Hình 3.7) với tốc độ baud lên đến 3 Mbps.



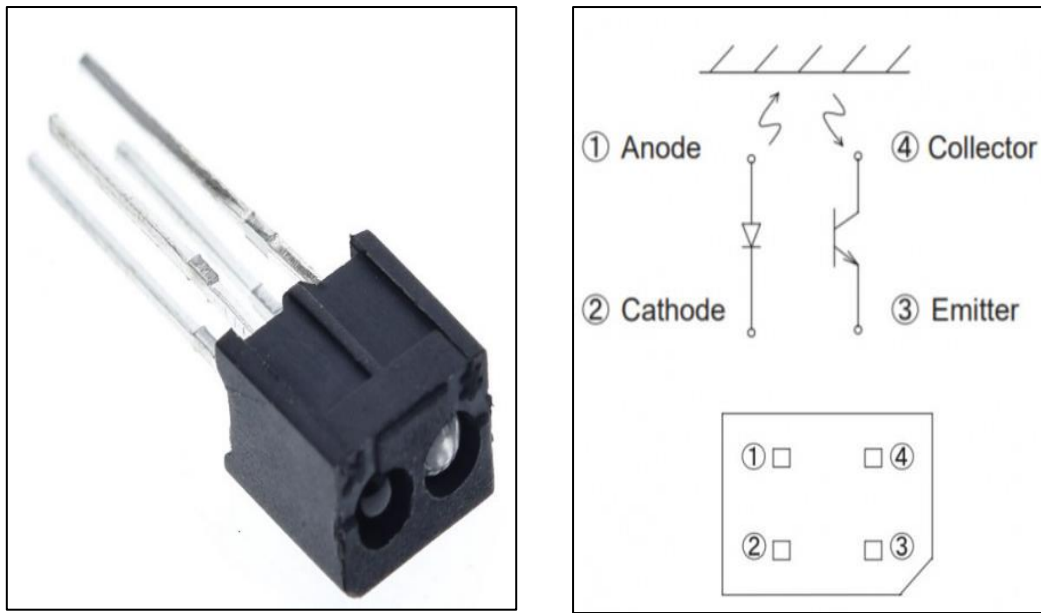
Hình 3.7 Module chuyển USB UART TTL FT232RL.

3.1.5 Cảm biến

- Yêu cầu:
 - + Cảm biến đo khoảng cách: Đo được khoảng cách từ 0 – 25 mm.
 - + Cảm biến đo dòng điện: Đo được dòng điện từ 0 – 1A.
- Chức năng: Đo khoảng cách giữa viên bi và nam châm điện, đo dòng điện qua nam châm điện. Đây là 2 thông số trạng thái cần có để điều khiển hệ thống nâng bi trong từ trường.

- **Cảm biến đo khoảng cách**

Cảm biến được dùng trong đề tài này là cảm biến hồng ngoại RPR 220 (Hình 3.8) để đo khoảng cách giữa viên bi và nam châm điện.



(a) Hình dáng bên ngoài

(b) Sơ đồ chân và cấu tạo bên trong

Hình 3.8 Cảm biến RPR 220.

Cảm biến RPR bao gồm 1 LED phát hồng ngoại và 1 phototransistor thu hồng ngoại. Dòng vào LED phát hồng ngoại nhỏ hơn 50mA và phần thu hồng ngoại có dòng đi qua nhỏ hơn 0.8mA.

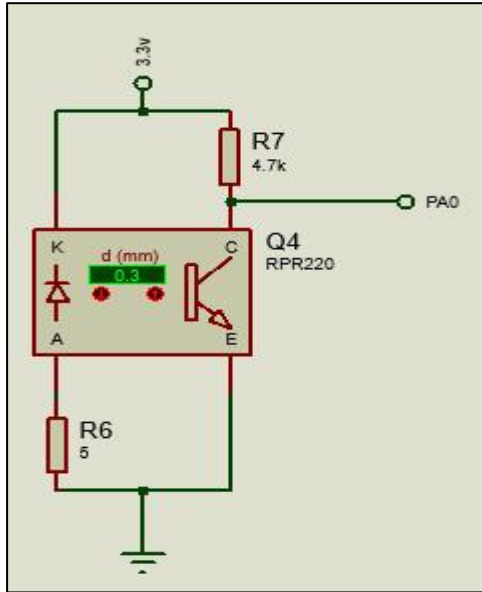
Nguyên lý hoạt động của cảm biến là khi LED phát phát tia sáng hồng ngoại ra môi trường, khi gặp vật cản tia sáng đó bị phản xạ lại và mắt thu sẽ ghi nhận sự biến đổi của ánh sáng hồng ngoại. Ánh sáng kích thích càng nhiều, transistor sẽ có độ khuếch đại càng lớn.

Với thông số và đặc tính trên, cấp nguồn 3.3 V cho cả mắt phát và mắt thu. Cần có điện trở hạn dòng để cảm biến hoạt động bình thường:

$$\begin{cases} 3.3 = V_{phát} + R_{phát} \times 0.04 \\ 3.3 = R_{thu} \times I_{Cphát_max} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_{phát} = 5\Omega \\ R_{thu} = 4125\Omega \end{cases}$$

Từ tính toán trên, chọn điện trở được mắc cho mắt phát là 5 Ω và điện trở cho mắt thu là 4K7 Ω . Ta có sơ đồ nguyên lý của mạch cảm biến điện áp như Hình 3.9, tín hiệu được khuếch đại sau khi có ánh sáng hồng ngoại kích thích sẽ được xuất ra chân Out (PA0) để board vi điều khiển đọc giá trị.



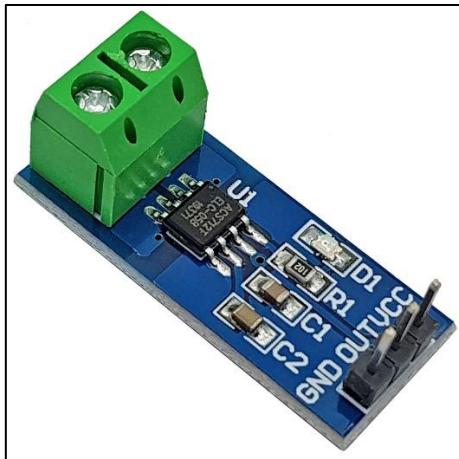
Hình 3.9 Sơ đồ nguyên lý mạch cảm biến sử dụng RPR 220.



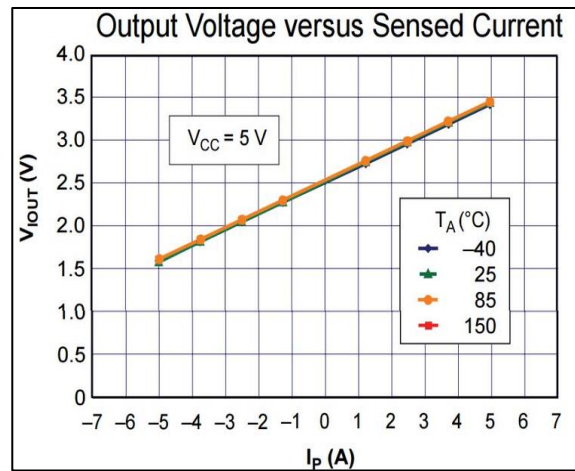
Hình 3.10 Mạch điện cảm biến khoảng cách.

• Cảm biến đo dòng điện

Để đo được dòng điện nhỏ dưới 1A và có tín hiệu xuất ra phù hợp để đọc ở board vi điều khiển, mạch cảm biến dòng điện ACS712 5A (Hình 3.11) được lựa chọn để sử dụng trong đề tài này.



(a) Hình dáng bên ngoài



(b) Đặc tính cảm biến

Hình 3.11 Cảm biến dòng điện ACS712.

Nguyên lý hoạt động của cảm biến dùng để đo dòng điện dựa trên nguyên lý hiệu ứng Hall. Module xuất ra điện áp 0 – 5V tỷ lệ với dòng điện đi qua dây dẫn. Độ nhạy của cảm biến ACS712 5A này là 185m V/Amp.

Điện áp cần cung cấp cho cảm biến là 5V và ngõ ra OUT được mắc trực tiếp vào board vi điều khiển để đọc tín hiệu điện áp cảm biến trả về.

3.1.6 Nam châm điện và viên bi

Yêu cầu: Lực nâng đủ lớn để nâng được vật có khối lượng khoảng 15g với khoảng cách xa nhất là 25mm và nam châm hoạt động ổn định.

Chức năng: dùng để nâng hạ viên bi tiến tới vị trí cân bằng đặt trước.

Lựa chọn số vòng quấn và tiết diện dây quấn:

- Khối lượng riêng của đồng là $D_{Cu} = 8900 \text{ kg/m}^3$, giả sử với m (kg) dây đồng với chiều dài l (m), tiết diện S (m^2), ta có được:

$$m = D \cdot V = D \cdot l \cdot S \quad (3.2)$$

$$S = \frac{m}{D \cdot l} \quad (3.3)$$

- Điện trở của dây dẫn theo điện trở suất là:

$$r = \rho \frac{l}{S} \quad (3.4)$$

Trong đó: ρ là điện trở suất (Ωm), l là chiều dài dây dẫn (m), S là tiết diện dây dẫn (m^2). $\rho_{Cu} = 1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$.

- Từ (3.3) và (3.4), ta có:

$$r = \rho \frac{D l^2}{m} \quad (3.5)$$

Bảng 2: Thông số cuộn dây ứng với 1kg dây đồng

| Đường kính dây (mm) | Tiết diện dây (m^2) | Chiều dài dây (m) | Điện trở (Ω) | Số vòng (theo trung bình chu vi) |
|---------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0.3 | 7.1×10^{-8} | 1583 | 379.02 | 5653 |
| 0.5 | 1.9×10^{-7} | 591 | 52.87 | 2110 |
| 0.6 | 2.8×10^{-7} | 401 | 24.34 | 1432 |
| 0.7 | 3.8×10^{-7} | 295 | 13.2 | 1053 |
| 0.8 | 5.0×10^{-7} | 245 | 8.3 | 875 |
| 1 | 7.9×10^{-7} | 142 | 3.06 | 507 |

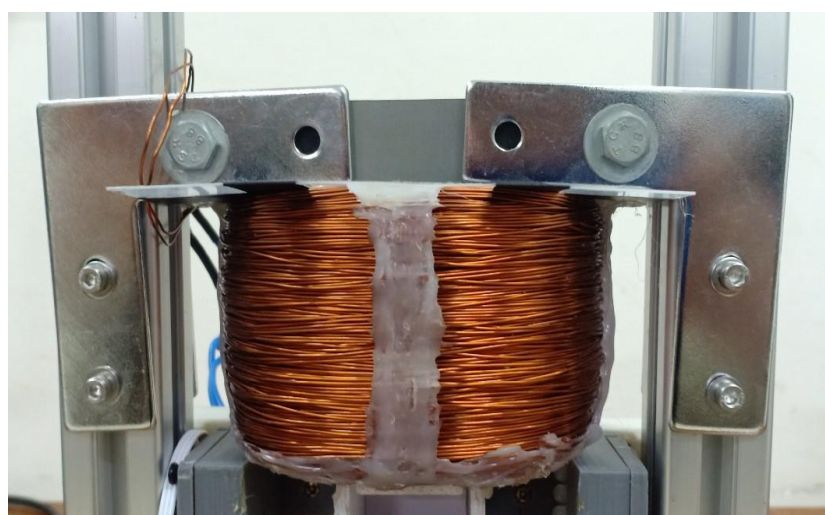
- Dòng điện đi qua nam châm điện có ảnh hưởng đến lực hút, nguồn cung cấp là nguồn DC 24V nên để cân bằng giữa dòng điện tối đa mà lõi dây có thể chịu được và lực hút đề tài chọn sử dụng 2kg dây đồng với đường kính lõi 0.7mm.

Cách xác định hằng số lực từ được nêu trong [1] như sau:

- Bước 1: Đảm bảo cảm biến dòng điện và cảm biến vị trí hoạt động đúng nguyên tắc và ổn định.
- Bước 2: Điều chỉnh tăng chậm điện áp cấp cho nam châm.
- Bước 3: Lấy giá trị của vị trí và dòng điện tại thời điểm nam châm bắt đầu được nâng lên (khi lực từ bằng với lực trọng trường).
- Bước 4: Thay giá trị vị trí và dòng điện vào biểu thức $C = \frac{mg}{\left(\frac{i}{x}\right)^2}$
- Bước 5: Lặp lại từ Bước 1 đến Bước 4 với các vị trí khác nhau của nam châm trên miền làm việc.
- Bước 6: Hằng số lực từ là giá trị trung bình cộng của các giá trị C vừa đo.

Bảng 3: Thông số của nam châm điện

| Thông số | Giá trị | Đơn vị |
|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| Số vòng dây quấn | 2136 | Vòng |
| Đường kính dây đồng | 0.7 | mm |
| Điện trở cuộn dây | 29.1 | Ω |
| Dòng điện tối đa đi qua | 0.84 | A |
| Độ từ cảm cuộn dây | 1.38 | H |
| Hằng số lực điện từ | 2.6×10^{-4} | Nm^2/A^2 |
| Kích thước nam châm | 45 x 25 x 70 | mm x mm x mm |



Hình 3.12 Nam châm điện được quấn thực tế.

Viên bi sắt có khối lượng 15g, đường kính 17mm được sử dụng trong đề tài này (Hình 3.13).

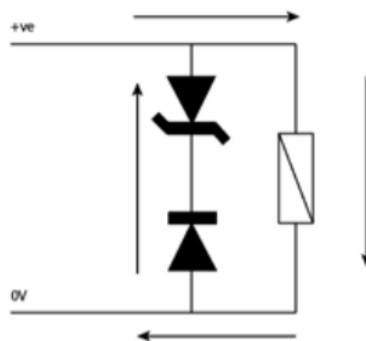


Hình 3.13 Viên bi sắt được sử dụng.

3.1.7 Mạch điều khiển dòng

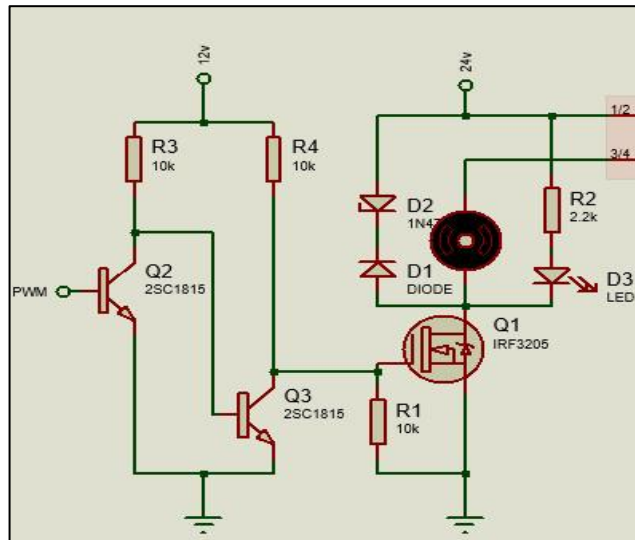
Để điều khiển được dòng điện cung cấp cho nam châm điện cần thiết kế 1 mạch điện để nhận tín hiệu PWM từ board vi điều khiển. Do điện áp ra từ chân PWM của board vi điều khiển dưới 3.3V nên để tạo được sự kích dẫn mosfet dứt khoát hơn, một mạch lái mosfet bằng 2 transistor NPN được sử dụng.

Nam châm điện là tải có tính cảm kháng, khi đóng cắt dòng điện đi qua sẽ sinh ra suất điện động cảm ứng gây ra điện áp ngược có thể làm hỏng mosfet nên cần có biện pháp bảo vệ phần mạch driver này. Theo [11], một diode được mắc song song với cuộn dây đi với chiều ngược với chiều dòng điện chạy qua nam châm điện sẽ có tác dụng bảo vệ trong trường hợp này. Để tăng tốc độ xả dòng cuộn dây, 1 diode zenner được mắc nối tiếp với diode bảo vệ (Hình 3.14).



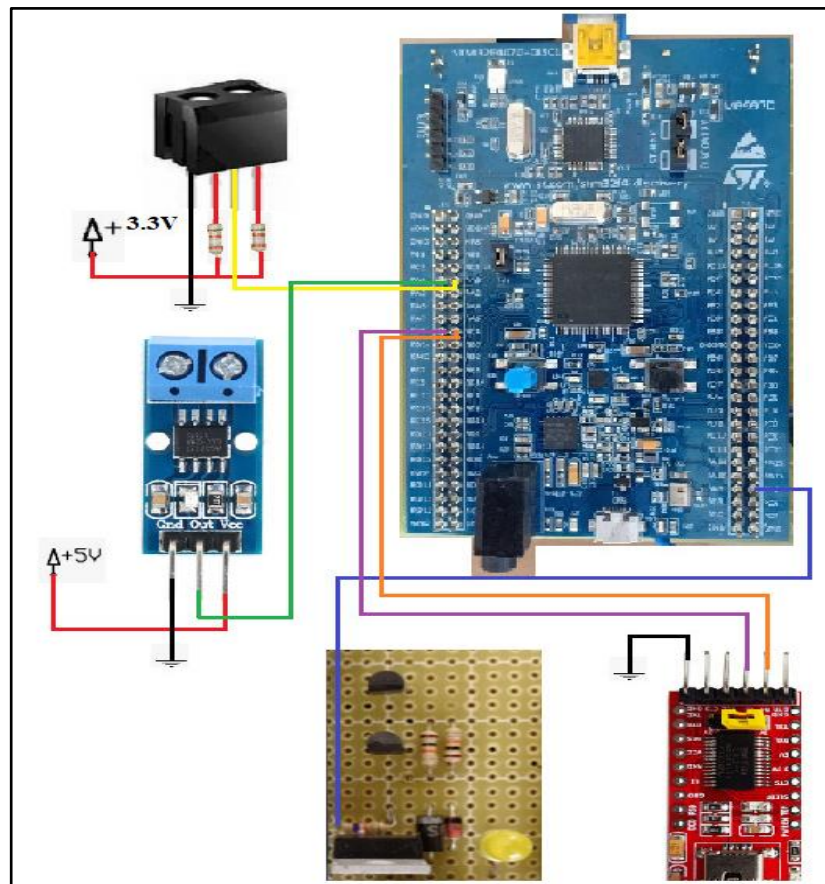
Hình 3.14 Cặp diode bảo vệ mosfet và tăng tốc độ xả dòng cho tải cảm.

Từ những thành phần có trong mạch điện ở trên, ta tiến hành ghép nối thực tế mạch điện và có sơ đồ nguyên lý như Hình 3.15.

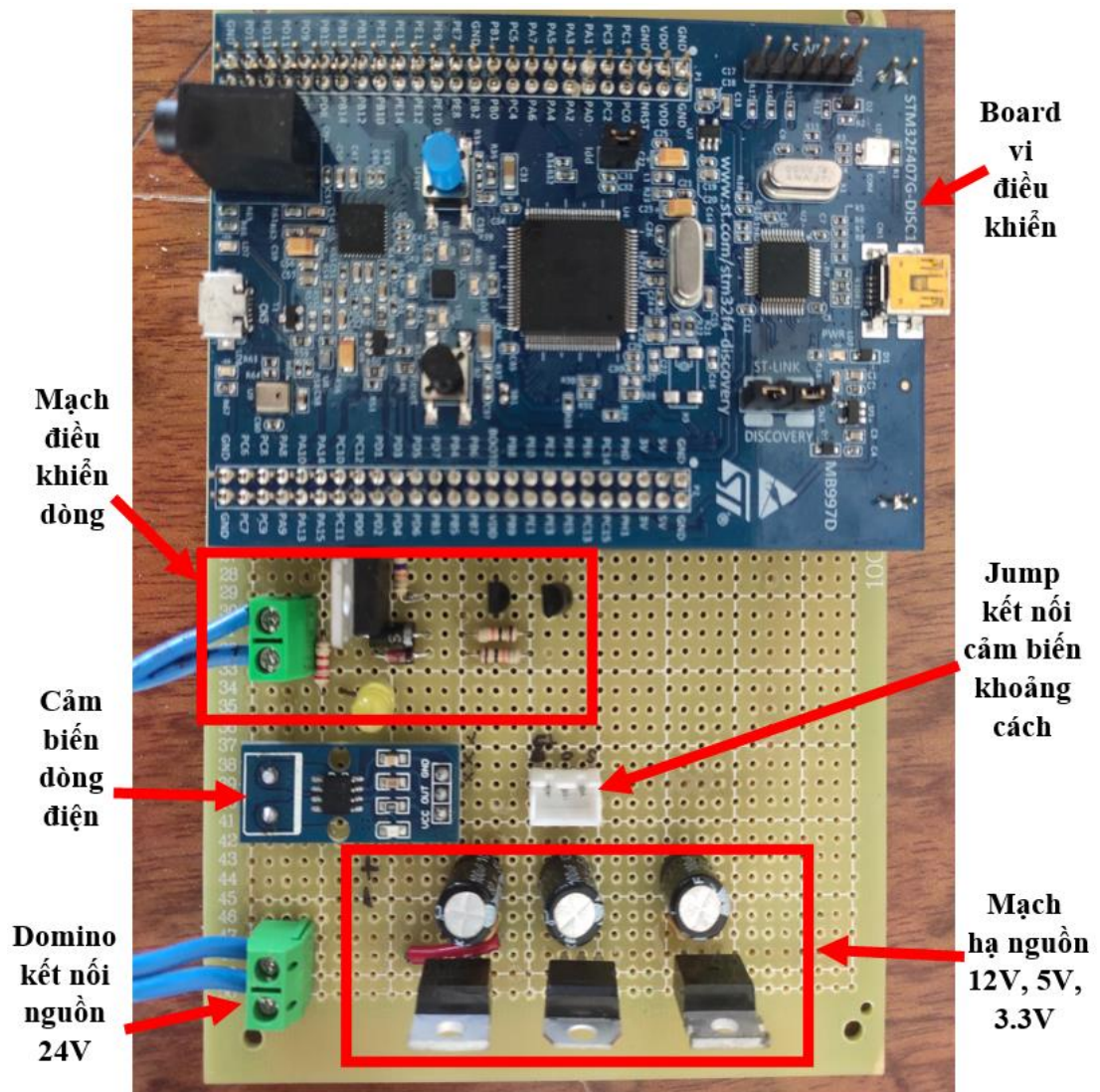


Hình 3.15 Mạch nguyên lý của driver.

Thực hiện kết nối các thành phần của mạch điện trong hệ thống như đã trình bày theo sơ đồ nối dây Hình 3.16. Kết quả lắp mạch thực tế được thể hiện qua Hình 3.17.



Hình 3.16 Sơ đồ kết nối thực tế mạch điện.

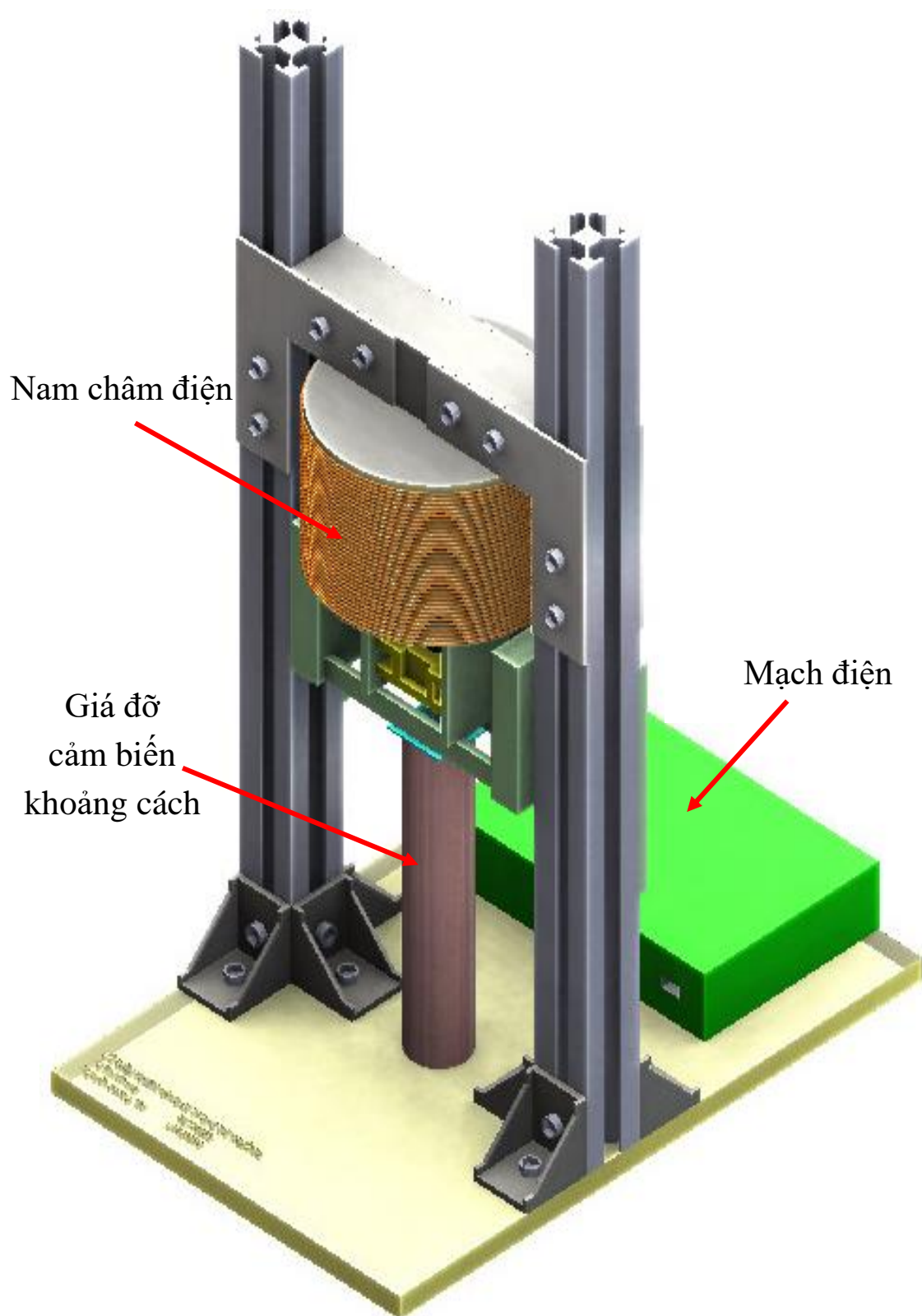


Hình 3.17 Mạch điện thực tế.

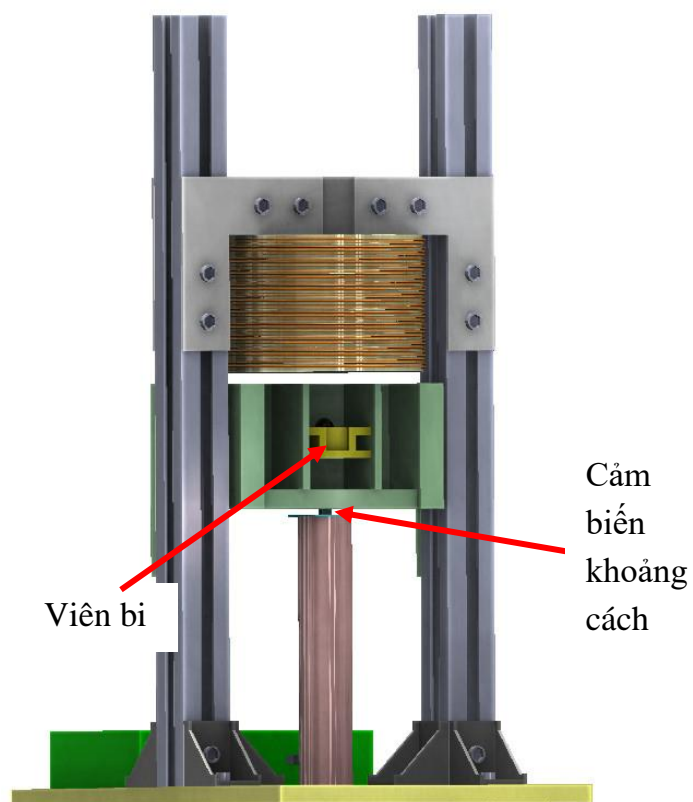
3.1.8 Mô hình cơ khí

Khung sườn hệ thống được bằng nhôm định hình 3030, để được làm bằng tấm mica và một số phụ kiện khác với kích thước mô hình 400 x 200 x 300 (mm).

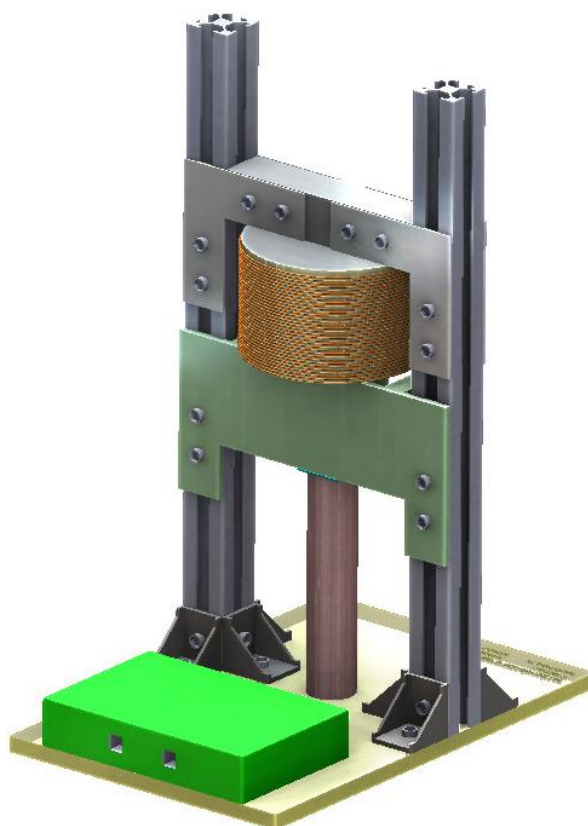
Ý tưởng ban đầu được phát thảo thành bản vẽ 3D bằng phần mềm SolidWorks (Hình 3.18a, Hình 3.18b, Hình 3.18c).



Hình 3.18a Ý tưởng mô hình – hướng nhìn 1.



Hình 3.18b Ý tưởng mô hình – hướng nhìn 2.

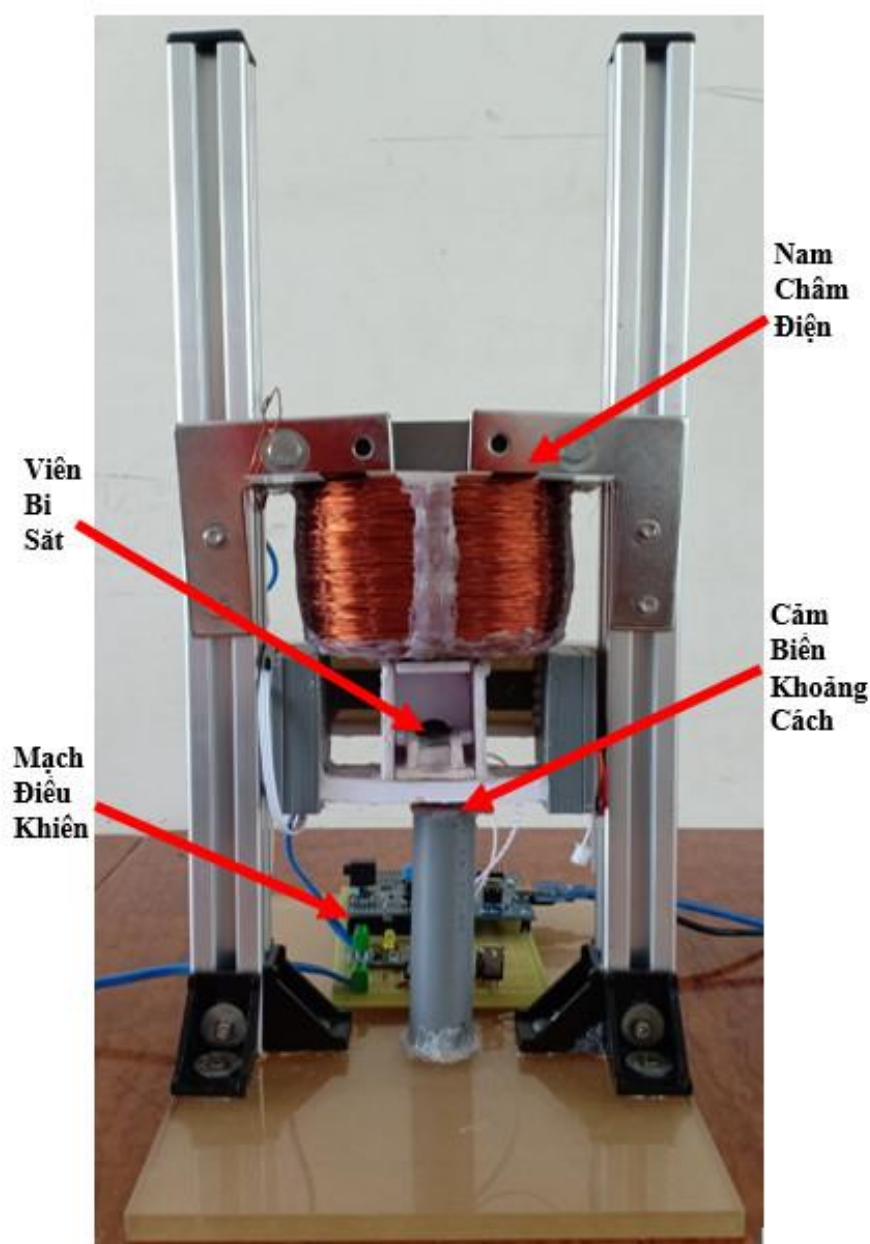


Hình 3.18c Ý tưởng mô hình – hướng nhìn 3.

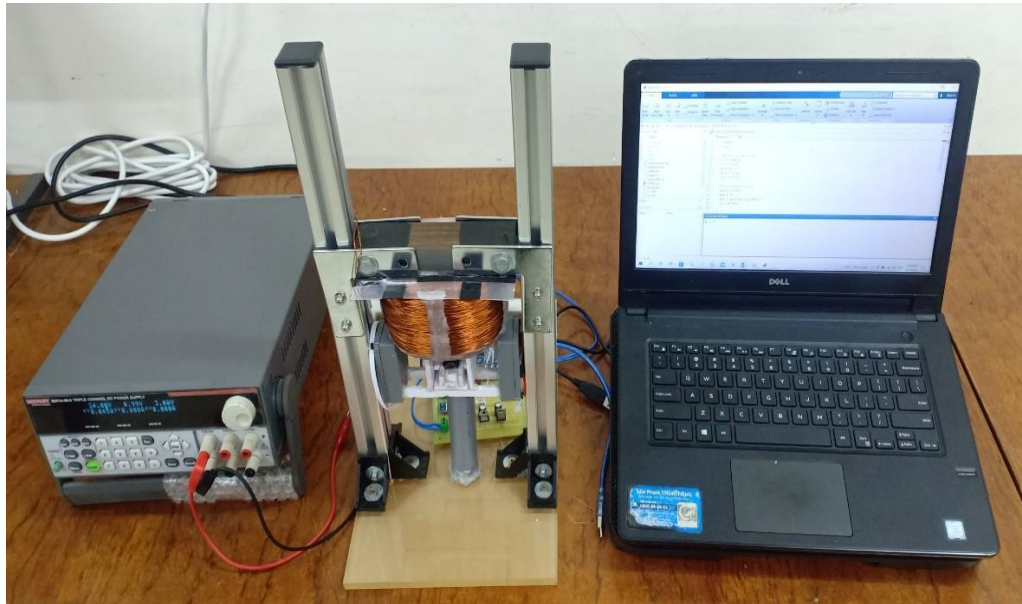
3.1.9 Mô hình thực tế

Mô hình thực tế xây dựng được (Hình 3.19) bao gồm một nam châm điện được quấn với lực từ đủ lớn để nâng được viên bi (Hình 3.13) ở vị trí cân bằng trong khoảng từ 0 – 25mm. Nam châm được gắn trên thanh nhôm định hình, phía dưới từ để có một cảm biến hồng ngoại hướng từ dưới lên trên tâm nam châm để đo khoảng cách viên bi.

Viên bi được sử dụng trong đề tài này được gắn thêm một đế màu trắng phía dưới để cảm biến phản hồi vị trí viên bi chính xác và ổn định hơn.



Hình 3.19 Mô hình thực tế hệ thống nâng bi trong từ trường.



Hình 3.20 Hệ thống thực tế.

3.2 Kết quả mô phỏng

3.2.1 Xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống

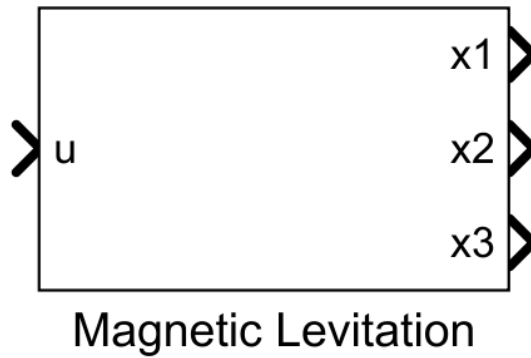
Từ phương trình trạng thái của hệ (2.4), nhóm tác giả xây dựng mô hình của hệ nâng bi trong từ trường với:

- Một ngõ vào u là tín hiệu điện áp điều khiển.
- Ba biến trạng thái x_1 , x_2 và x_3 lần lượt là vị trí viên bi, vận tốc viên bi và cường độ dòng điện qua cuộn dây.

```
%Thong so mo hinh
C = 2.6e-4;
L1 = 1.38;
R = 29.1;
m = 0.0145;
g_c = 9.81;

%Vi tri ban dau
x1_init = 0.025;
x2_init = 0;
x3_init = x1_init*sqrt(g_c*m/C);
```

Hình 3.21 Thiết lập thông số và vị trí ban đầu của hệ thống.



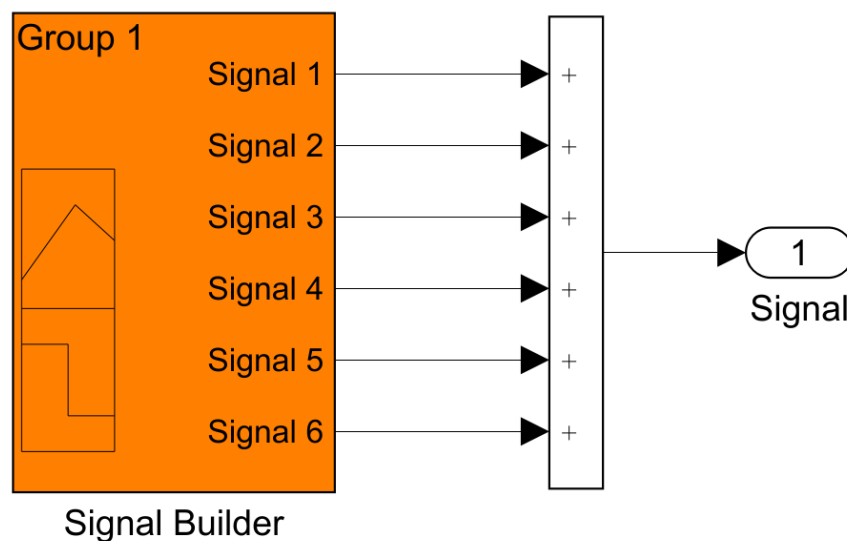
Hình 3.22 Khối “Magnetic Levitation” mô tả hệ thống.

3.2.2 Điều khiển trượt Sliding Mode Control (SMC)

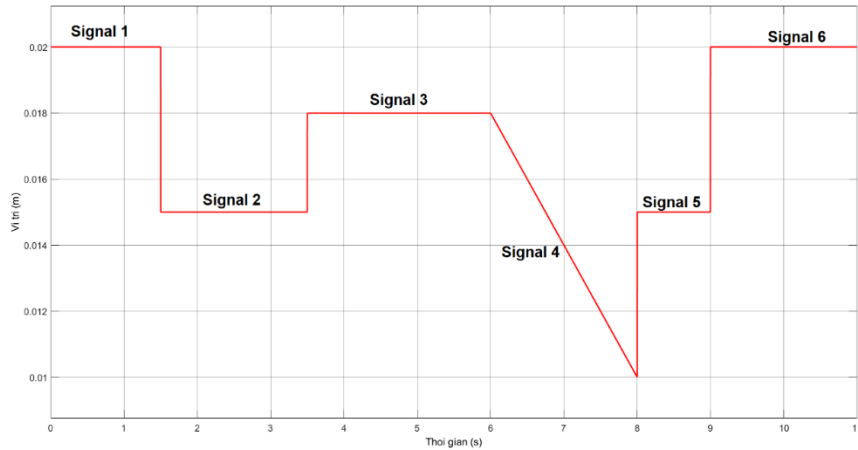
Bộ điều khiển trượt được mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/Simulink với các thông số như đã được thiết kế.

Ở phần mô phỏng hệ thống này 2 dạng tín hiệu vị trí đặt mong muốn đầu vào sẽ được đưa vào bộ điều khiển để kiểm tra độ đáp ứng của bộ điều khiển đã thiết kế:

- Tín hiệu vào thứ 1 là hằng số, được đặt ở vị trí 0.015m.
- Tín hiệu vào thứ 2 là một tín hiệu thay đổi theo thời gian, được tạo bởi khối “Signal Builder” của Simulink, tín hiệu thay đổi trong khoảng 0.01 - 0.02m được thể hiện qua Hình 3.24.
- Hai tín hiệu này khi mô phỏng được thay đổi bằng một khối “Manual Switch” để tiện cho việc thay đổi tín hiệu đầu vào.



Hình 3.23 Chi tiết khối tạo tín hiệu thay đổi.



Hình 3.24 Tín hiệu đặt thay đổi được tạo.

Trong phần mô phỏng này, ở luật điều khiển u đã tính toán ở (2.33):

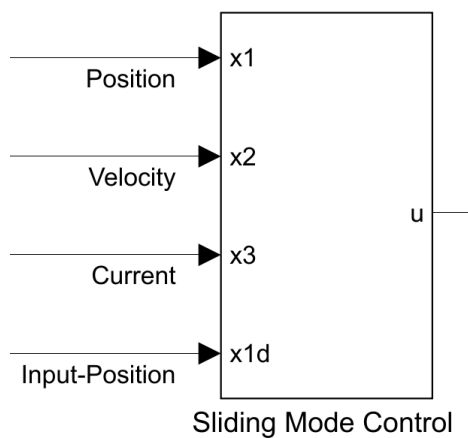
$$u = \frac{1}{g(X)} \left[-f(X) - a_1 \left(g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 \right) - a_0 x_2 + \right. \\ \left. - W \operatorname{sign} \left(g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + a_1 x_2 + a_0 (x_1 - x_{1d}) \right) \right]$$

Với $W = 200$, $a_0 = 930$ và $a_1 = 61$.

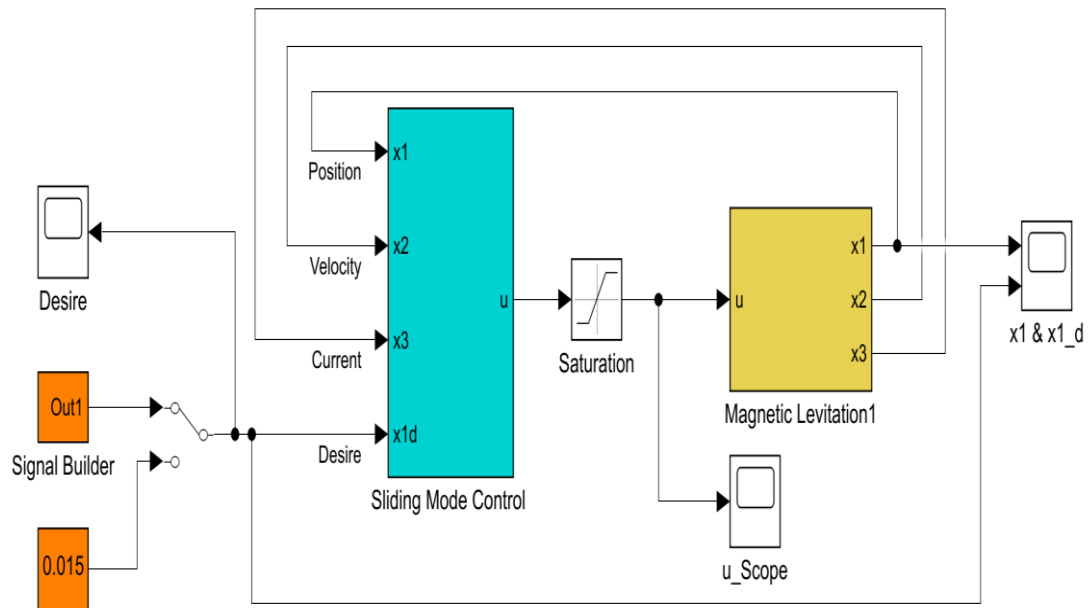
Bộ điều khiển trượt với hệ thống ở nghiên cứu này cũng sẽ thực hiện các hàm Sign và Sat để kiểm tra tính đáp ứng của hệ thống.

Khối Simulink chứa luật điều khiển u được thể hiện ở Hình 3.25 và được đưa vào điều khiển hệ thống. Ở Hình 3.26 là sơ đồ mô phỏng điều khiển trượt hệ nâng bi trong từ trường với tín hiệu điều khiển u được giới hạn cho phù hợp với thực tế là 0 - 24V.

- Sơ đồ mô phỏng



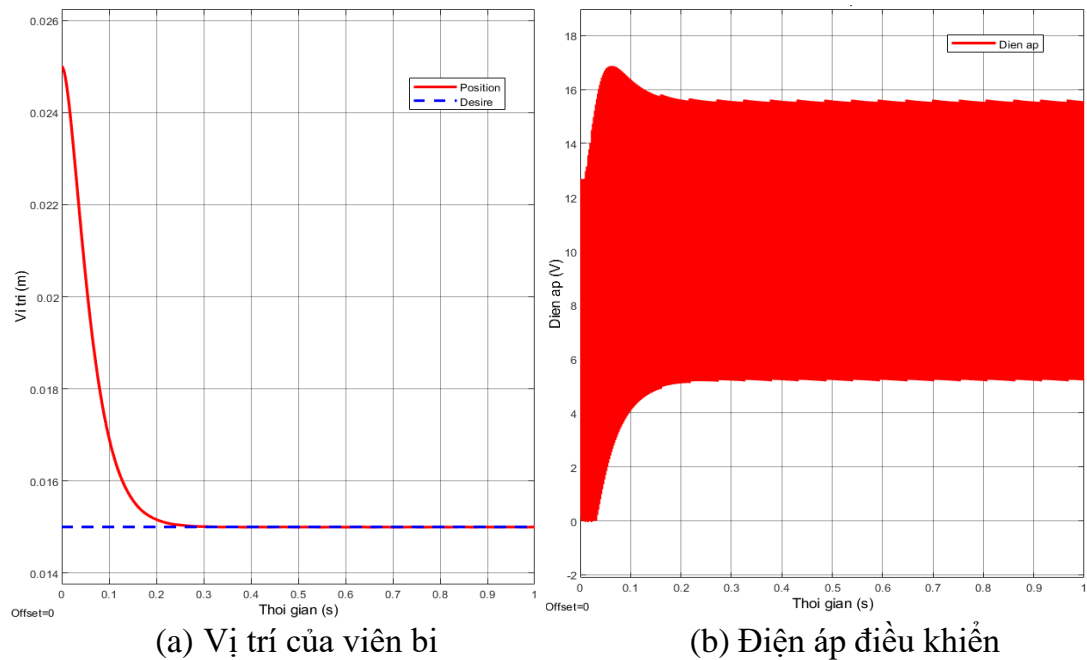
Hình 3.25 Khối mô tả bộ điều khiển trượt.



Hình 3.26 Sơ đồ mô phỏng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt.

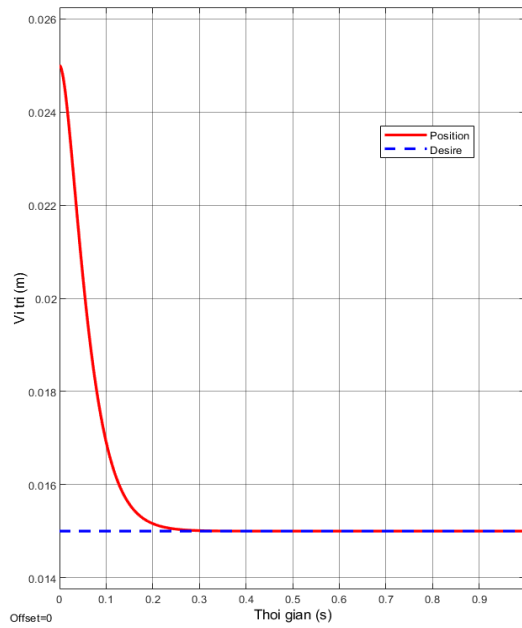
- Kết quả mô phỏng

3.2.2.1 Tín hiệu đặt là hằng số $x_{1d} = 0.015$

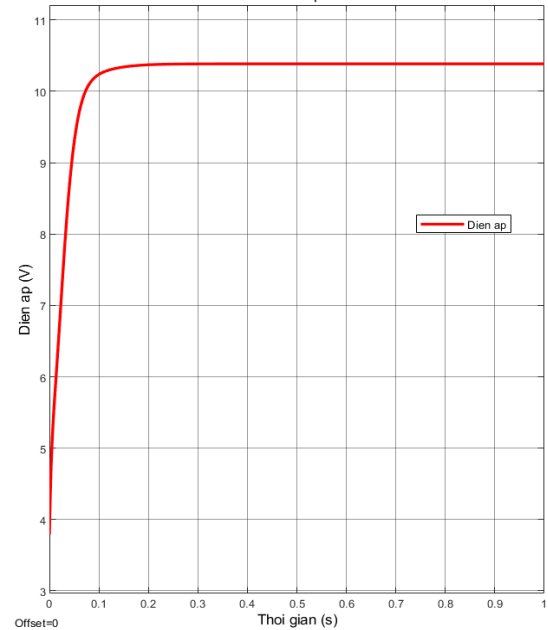


Hình 3.27 Đáp ứng hệ thống dùng trượt với luật điều khiển dùng hàm Sign.

Tín hiệu đặt là hằng số khi đưa vào bộ điều khiển trượt đều cho ra kết quả điều khiển tốt, vị trí của viên bi bám theo tín hiệu mong muốn. Điện áp điều khiển khi sử dụng hàm Sat (Hình 3.27b) có sự ổn định và không bị dao động như ở trường hợp luật điều khiển sử dụng hàm Sign (Hình 3.28b).



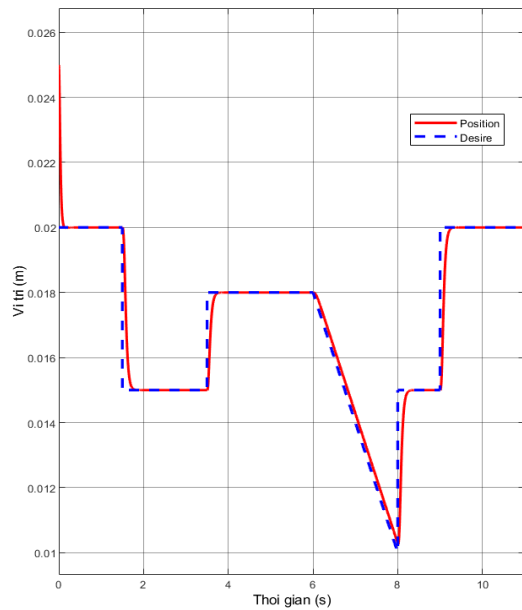
(a) Vị trí của viên bi



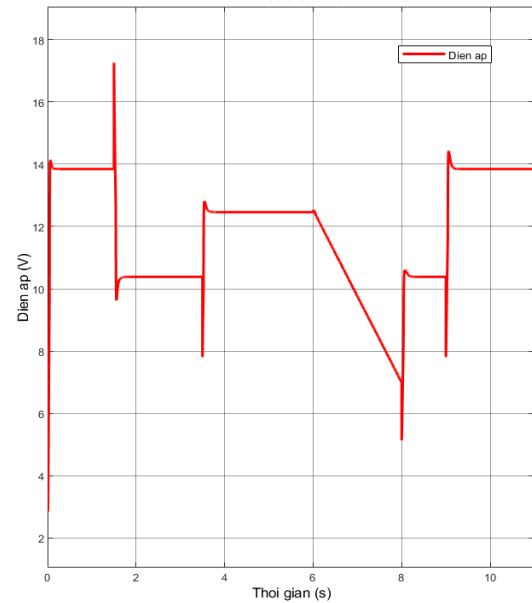
(b) Điện áp điều khiển

Hình 3.28 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat.

3.2.2.2 Tín hiệu đặt thay đổi



(a) Vị trí của viên bi

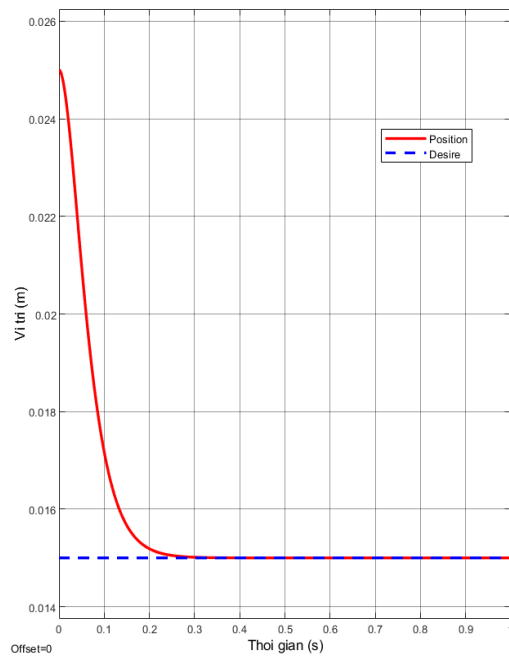


(b) Điện áp điều khiển

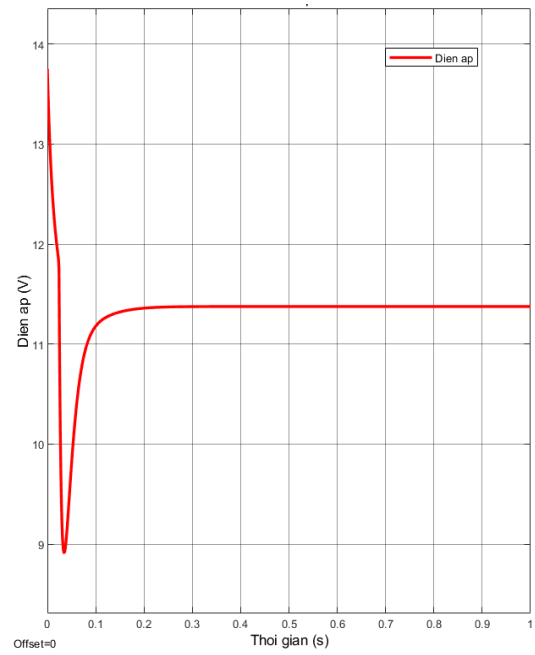
Hình 3.29 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat với tín hiệu đặt thay đổi.

Với tín hiệu đặt thay đổi thì bộ điều khiển trượt sử dụng hàm Sat cho đáp ứng tốt và không xuất hiện vọt lố, vị trí viên bi vẫn bám được theo tín hiệu đặt.

3.2.2.3 Tín hiệu đặt là hằng số và khối lượng tăng 20%



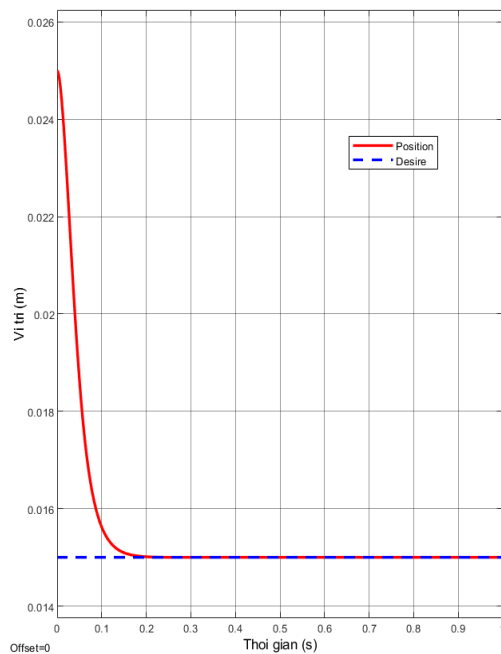
(a) Vị trí của viên bi



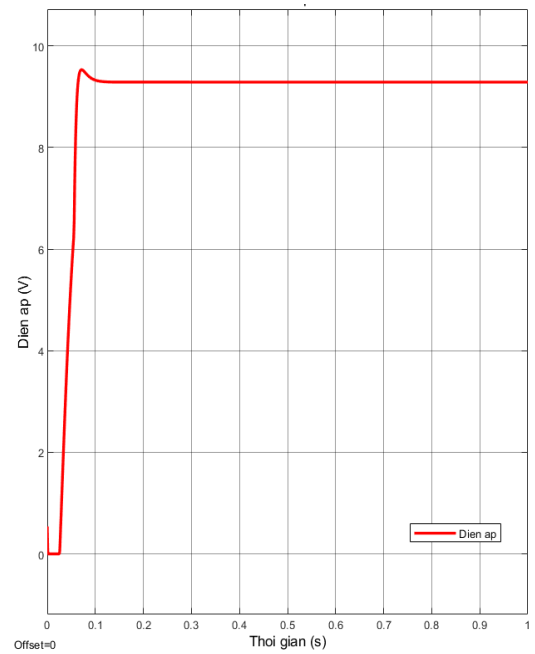
(b) Điện áp điều khiển

Hình 3.30 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat khi khối lượng tăng 20%.

3.2.2.4 Tín hiệu đặt là hằng số và khối lượng giảm 20%



(a) Vị trí của viên bi



(b) Điện áp điều khiển

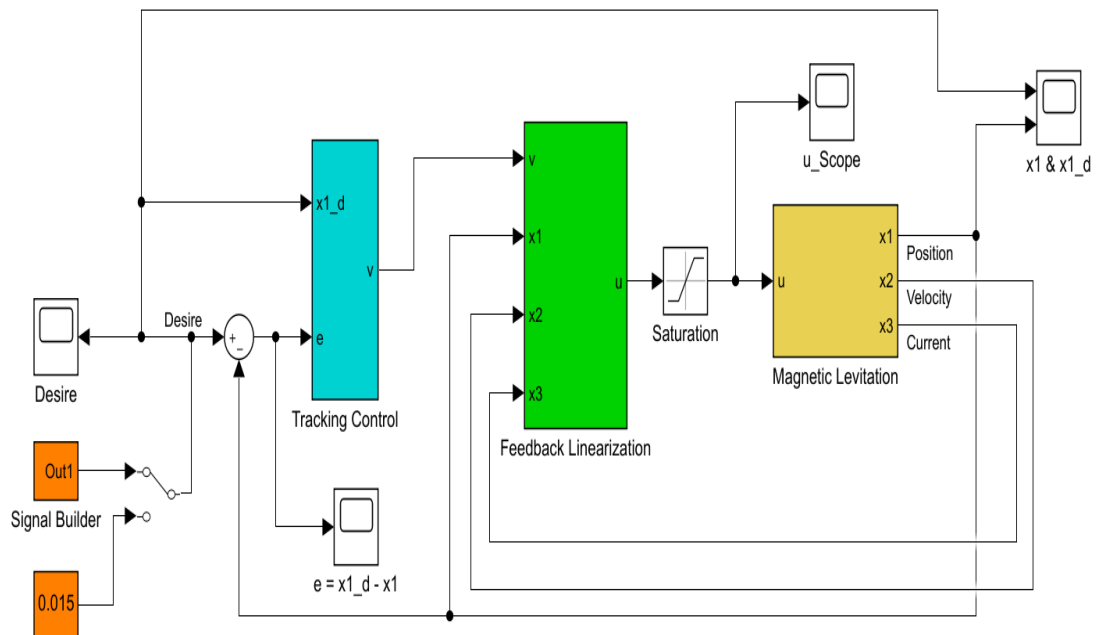
Hình 3.31 Đáp ứng hệ thống dùng bộ điều khiển trượt với luật điều khiển dùng hàm Sat khi khối lượng giảm 20%.

3.2.2.5 Nhận xét về điều khiển trượt:

- Luật điều khiển chứa hàm Sign gây nên hiện tượng “Chattering” khiến việc điều khiển không tốt và được thay thế bằng hàm Sat.
- Tuy thời gian đáp ứng của cả 2 hàm gần như nhau xấp xỉ 0.35s nhưng điện áp điều khiển ở Hình 3.27b có hiện tượng dao động, sự thay đổi điện áp điều khiển liên tục sẽ gây nóng mạch điện tử và giảm độ bền hệ thống.
- Khi thay đổi khối lượng thì thời gian đáp ứng và trạng thái ổn định gần như không thay đổi.
 - + Khi khối lượng tăng thêm 20%, điện áp điều khiển cần để đạt được trạng thái ổn định mong muốn lớn hơn khoảng 10% (Hình 3.30b) so với ở Hình 3.28b.
 - + Khi khối lượng giảm 20% - Hình 3.31, hiện tượng vọt lố xảy ra với độ vọt lố khoảng 23% nhưng điện áp điều khiển khi đạt trạng thái ổn định lại giảm 10% so với hệ thống ở Hình 3.28.

3.2.3 Điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa

- Sơ đồ mô phỏng



Hình 3.32 Sơ đồ mô phỏng điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa.

Sơ đồ ở Hình 3.32 gồm 2 phần chính:

- Phần thứ nhất là bộ hồi tiếp tuyến tính hóa hệ thống: bao gồm khối “Magnetic Levitation” và khối “Feedback Linearization”. Lúc này hệ thống đã được tuyến tính hóa, cần tín hiệu điều khiển $v(t)$ từ bộ điều khiển bám để hệ thống ổn định theo tín hiệu đặt.
- Phần thứ hai là bộ điều khiển bám là khối “Tracking Control” với thông số đã được nêu ở Mục 2.3.2:

$$v = \ddot{y}_d + (k_1 \ddot{e} + k_2 \dot{e} + k_3 e)$$

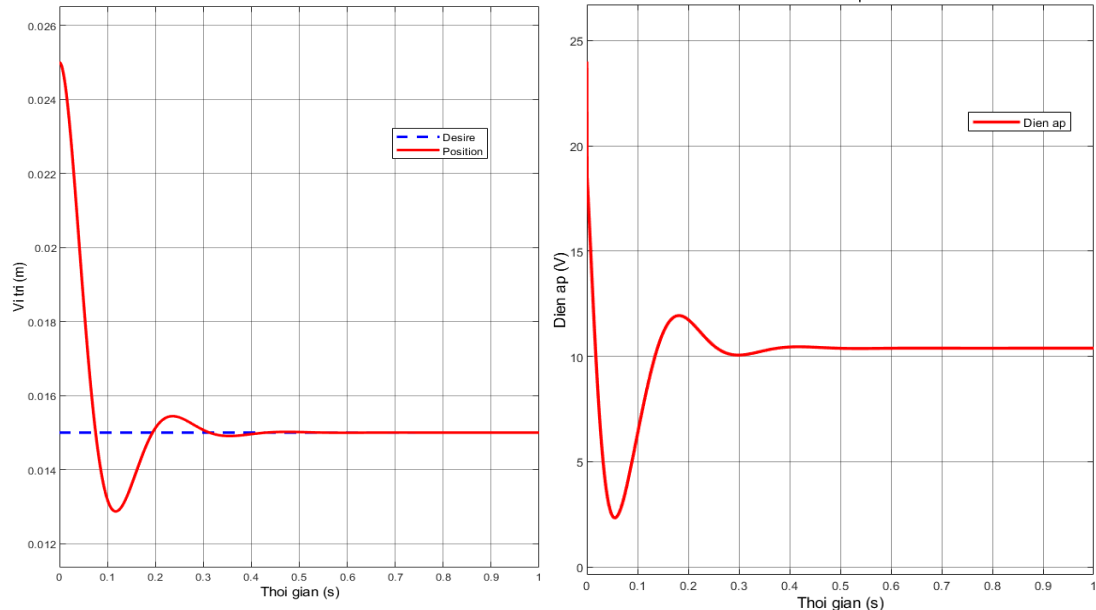
+ Với $e = y_d - y$

$$+ \begin{cases} k_1 = 130 \\ k_2 = 4082 \\ k_3 = 108208 \end{cases}$$

Tín hiệu đặt được sử dụng tương tự như ở phần mô phỏng bộ điều khiển trượt.

- Kết quả mô phỏng

3.2.3.1 Tín hiệu đặt là hằng số $x_{1d} = 0.015$



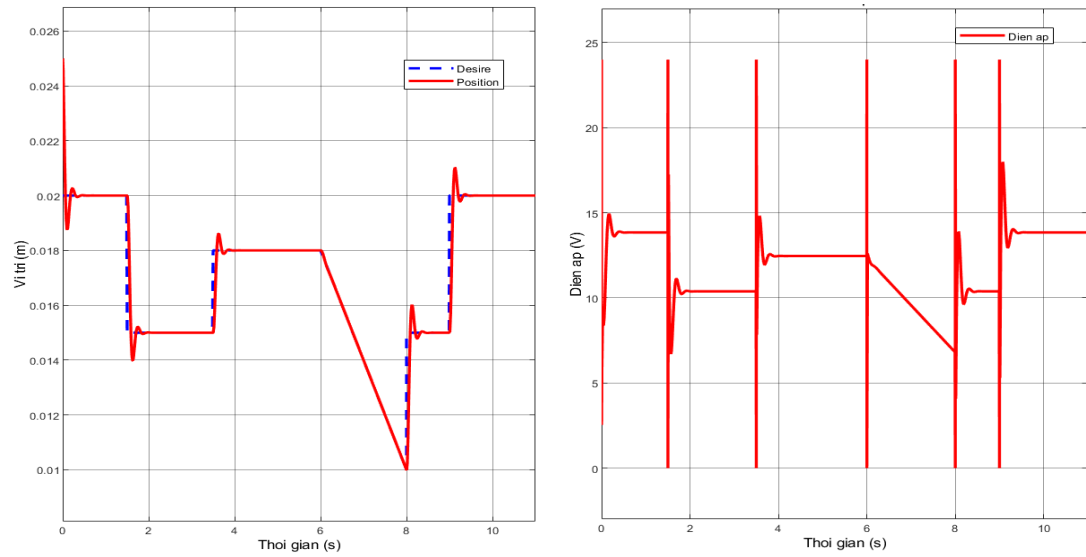
(a) Vị trí của viên bi

(b) Điện áp điều khiển

Hình 3.33 Đáp ứng hệ thống sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa.

Bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho đáp ứng ngõ ra tốt với tín hiệu đặt cố định. Thời gian xác lập khoảng 0.4s với độ vọt lố 15%, điện áp điều khiển khi hệ thống đã ổn định ở khoảng 10.5V.

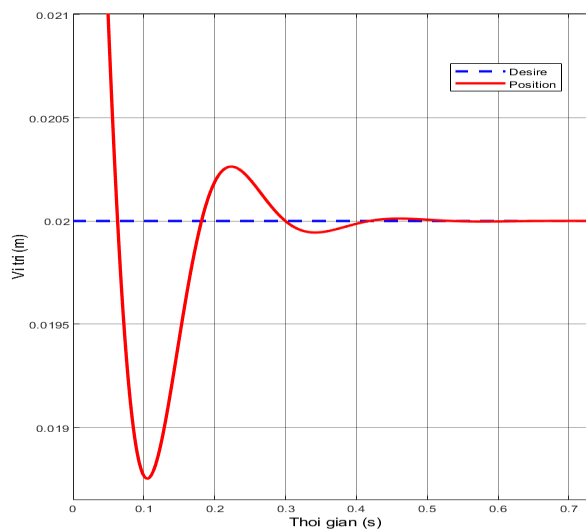
3.2.3.2 Tín hiệu đặt thay đổi



(a) Vị trí của viên bi

(b) Điện áp điều khiển

Hình 3.34 Đáp ứng hệ thống với tín hiệu đặt thay đổi theo thời gian sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa.



Hình 3.35 Đáp ứng hệ thống với tín hiệu đặt thay đổi sử dụng bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa khung thời gian từ 0 đến 0.7 giây.

Với tín hiệu đặt thay đổi liên tục, bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho đáp ứng ngõ ra tốt. Tuy nhiên điện áp điều khiển có lúc đạt tới mức cao nhất 24V hoặc thấp nhất 0V, việc tín hiệu điều khiển như vậy ở thực tế có thể dẫn đến việc viên bi bị hút chặt vào nam châm điện.

Giới hạn ở việc điều khiển thông qua mô phỏng, bộ điều khiển vẫn điều khiển điện áp viên bi bám theo tín hiệu đặt. Thời gian xác lập vào khoảng 0.6s với độ vọt lố khoảng 6%.

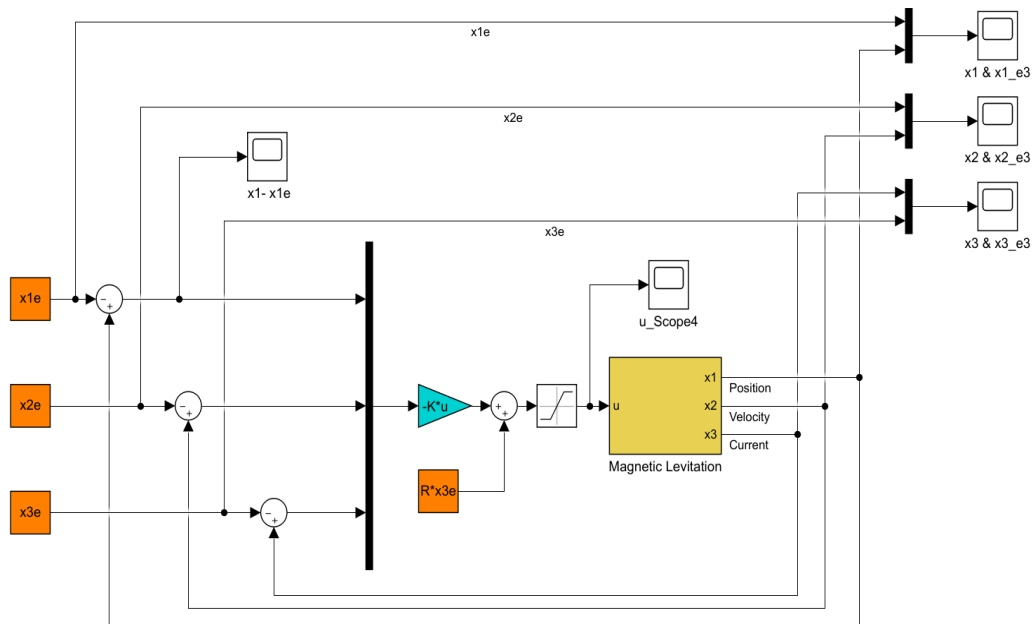
3.2.3.3 Nhận xét về bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa:

- Kết quả mô phỏng điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa cho ra vị trí viên bi bám tốt theo tín hiệu đặt cố định hay thay đổi.
- Đáp ứng của hệ thống chậm hơn yêu cầu đặt ra khi thiết kế bộ điều khiển. Xét với trường hợp tín hiệu đặt vào cố định Hình 3.33:
 - + Thời gian xác lập khi mô phỏng ở cả hai trường hợp đều lớn hơn thiết kế với thời gian xác lập là 0.1s.
 - + Độ vọt lố đáp ứng yêu cầu đặt ra khi thiết kế là 20%.
 - + Ở tín hiệu đặt thay đổi, đáp ứng của bộ điều khiển có độ vọt lố thấp hơn, tuy nhiên có thể với tín hiệu điều khiển như Hình 3.34b có thể dẫn đến không điều khiển được ở mô hình thực tế.

3.2.4 Điều khiển LQR

3.2.4.1 Mô phỏng điều khiển LQR

- Sơ đồ mô phỏng:

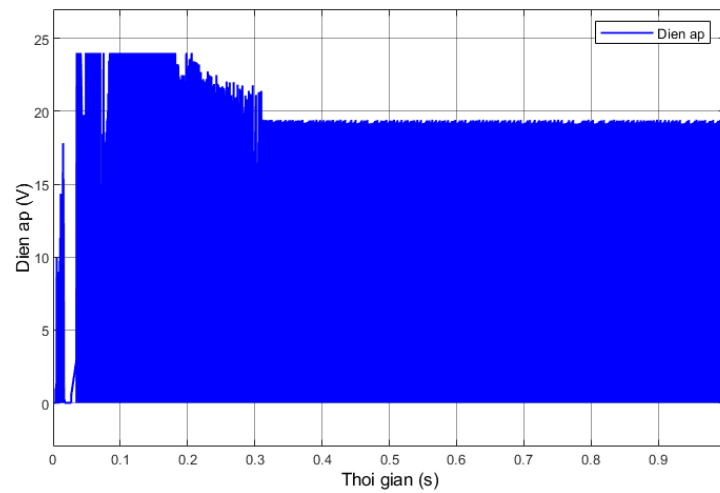


Hình 3.36 Sơ đồ mô phỏng điều khiển LQR.

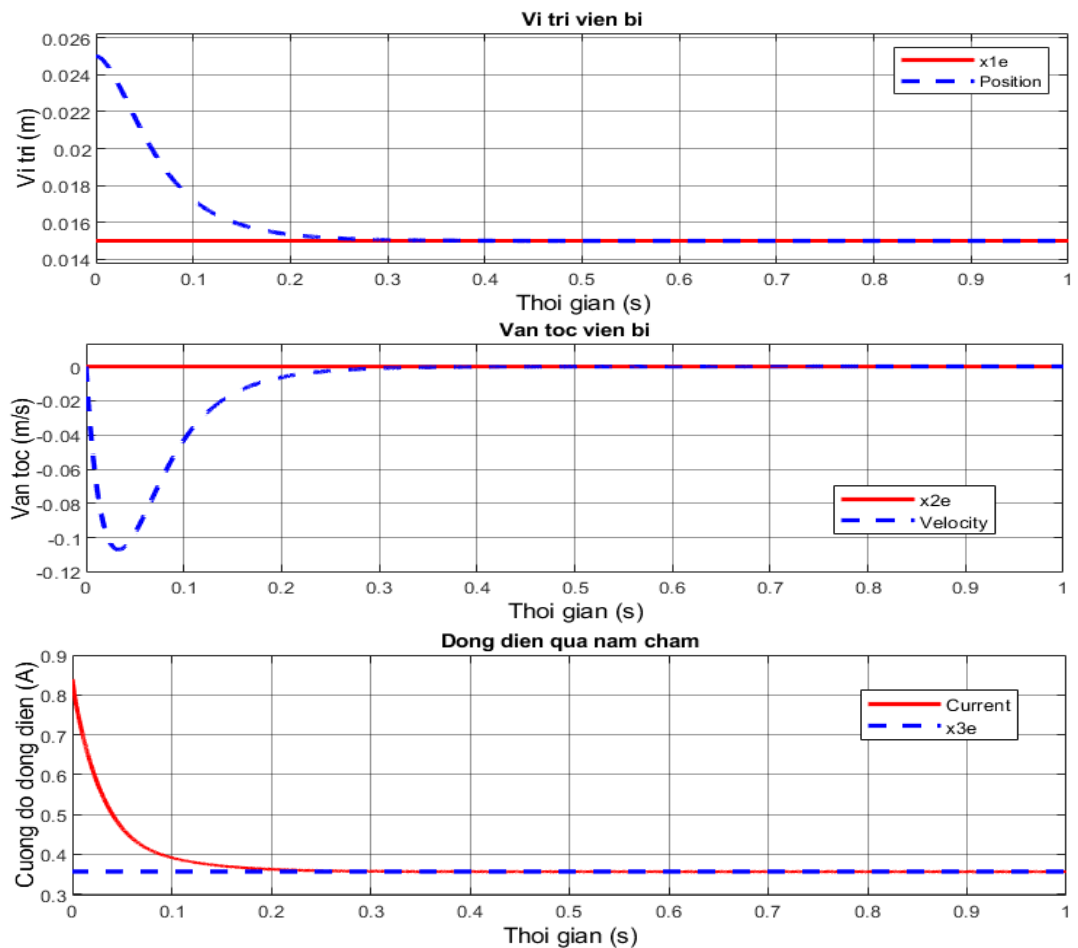
Vị trí làm việc tĩnh được chọn là $x_e = [0.015 \ 0 \ 0.357]^T$ và giá trị thông số K thu được ở Mục 2.4.2.1 là:

$$K = [-4.76 \times 10^6 \quad -0.16 \times 10^6 \quad 0.1 \times 10^6]$$

- Kết quả mô phỏng



Hình 3.37 Điện áp điều khiển mô phỏng của bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$.



Hình 3.38 Đáp ứng của 3 thông số trạng thái của mô hình với bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$.

Thời gian đáp ứng của hệ thống khoảng 0.4s và tín hiệu ngõ ra không có vọt lố. Sai số giữa trạng thái cân bằng được đặt và trạng thái cân bằng thực tế bằng 0 sau khoảng thời gian xác lập.

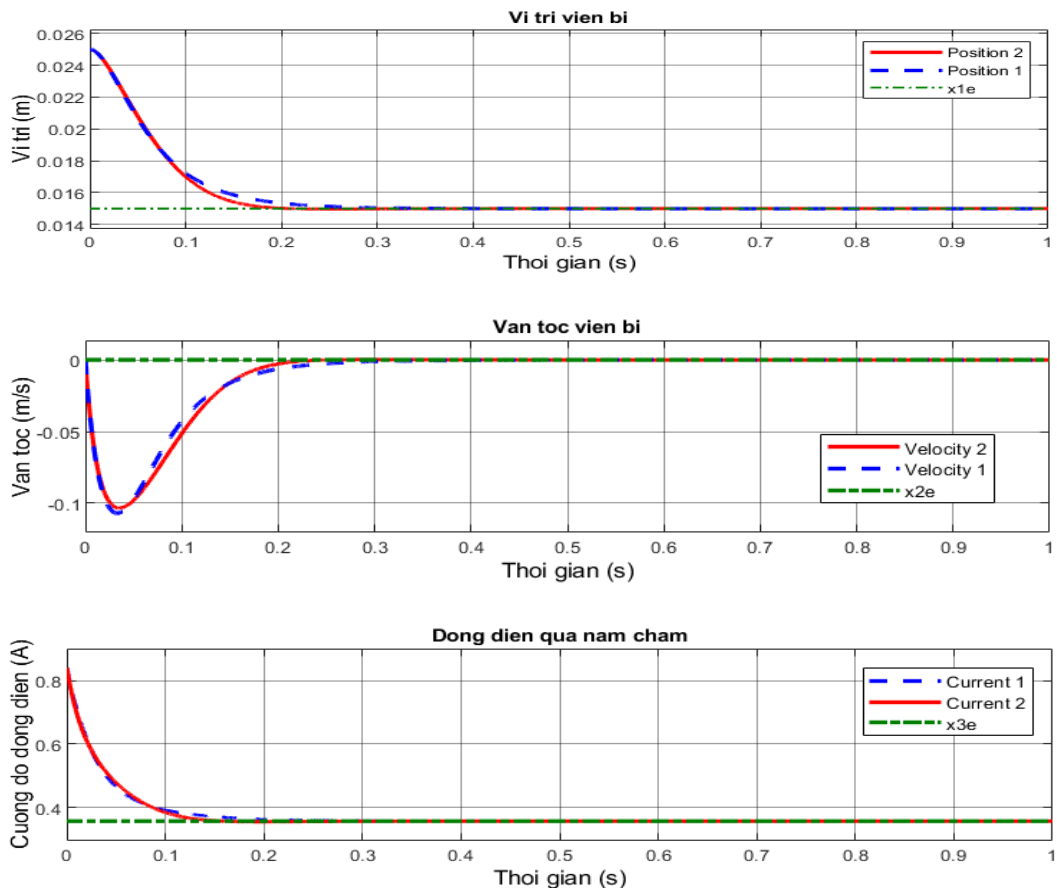
Điện áp điều khiển có hiện tượng dao động và không ổn định dẫn đến hệ thống làm việc quá tải và giảm độ bền các linh kiện điện tử.

Xét Q và R ở (2.72) trong trường hợp ngược lại: Q rất nhỏ và R rất lớn để kiểm tra tính đáp ứng của hệ thống. Ta được:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0000001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0000001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0000001 \end{bmatrix}; R = 100000 \quad (3.6)$$

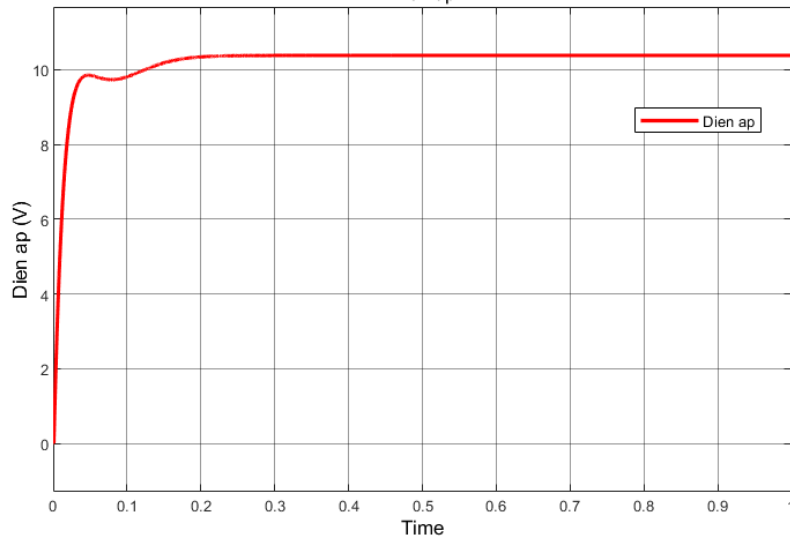
Ta thu được giá trị của K' là:

$$K' = [-3.41 \times 10^3 \quad -0.108 \times 10^3 \quad 0.088 \times 10^3] \quad (3.7)$$



* Với tín hiệu 1 ứng với giá trị K, tín hiệu 2 ứng với giá trị K' trong bộ điều khiển

Hình 3.39 Đáp ứng của 3 thông số trạng thái của mô hình với bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$ của hai trường hợp thông số Q và R.



Hình 3.40 Điện áp điều khiển mô phỏng của bộ điều khiển LQR tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$.

Cả ba thông số trạng thái của hệ thống ở trường hợp 2 đều cho đáp ứng tốt hơn ở trường hợp 1. Trạng thái cân bằng đạt được như trạng thái đặt, điện áp điều khiển ổn định hơn vào khoảng 10.4V. Việc này giúp giảm hao phí năng lượng trong hệ thống và tăng độ bền linh kiện.

Nhận xét: Trạng thái đáp ứng của hệ thống tăng khi thành phần Q được tăng lên. Tín hiệu điều khiển ổn định, ít tiêu hao năng lượng khi tăng R.

3.2.4.2 Mô phỏng điều khiển LQG

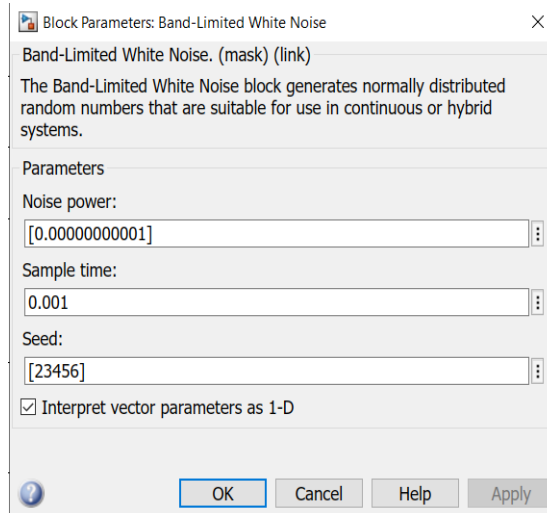
Với Q và R như (3.6) và QN, RN được chọn như đã nêu ở Mục 2.4.2.2:

$$QN = \begin{bmatrix} 0.000001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.000001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.000001 \end{bmatrix}; RN = 0.0001$$

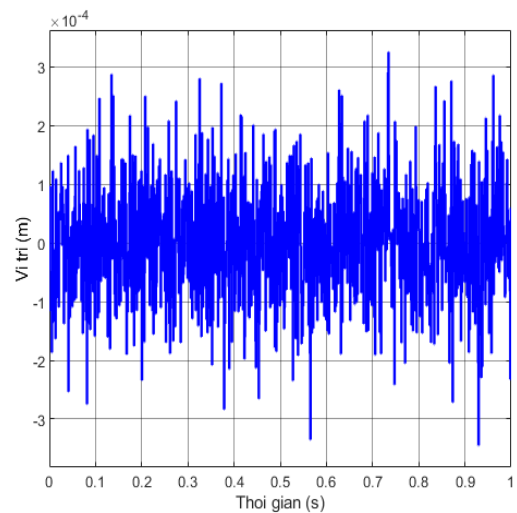
$$\rightarrow L = \begin{bmatrix} 71.8 \\ 2575.3 \\ 26.6 \end{bmatrix}$$

Bộ điều khiển LQG có chứa bộ lọc Kalman để ước lượng trạng thái hệ thống, do giả thiết chỉ biết được vị trí của viên bi và có nhiễu đo lường tác động nên phần mô phỏng sẽ thêm tín hiệu nhiễu bằng khối Band-Limited White Noise của Simulink để kiểm tra khả năng điều khiển.

Tín hiệu nhiễu được thiết lập và thể hiện qua Hình 3.41.



(a) Thông số thiết lập

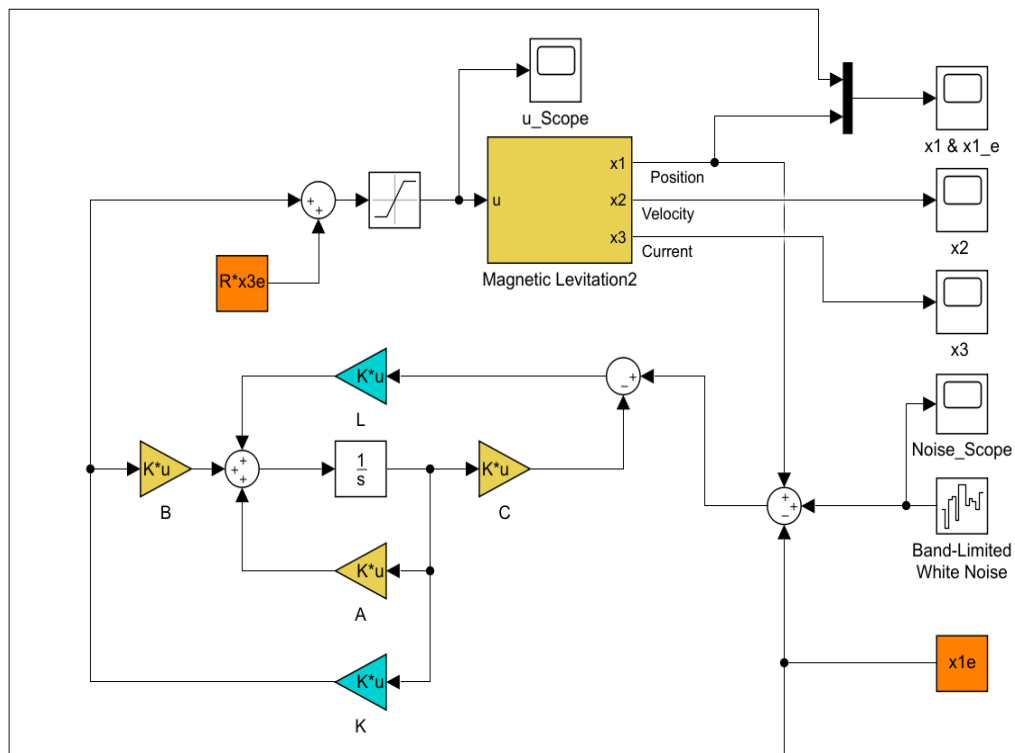


(b) Tín hiệu mô phỏng

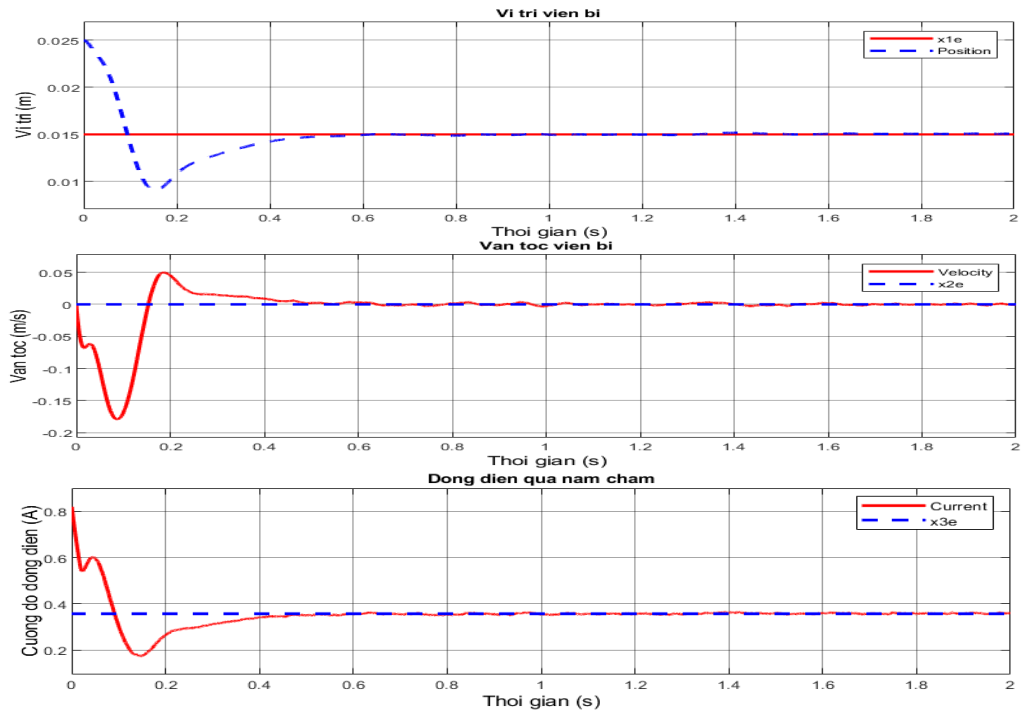
Hình 3.41 Mô phỏng tín hiệu nhiễu thêm vào tín hiệu đo của trạng thái vị trí viên bi.

Nhiều tác động được đặt vào lệch khoảng 1.5% so với tín hiệu vị trí phản hồi về bộ điều khiển. Bộ lọc Kalman được thêm vào bộ điều khiển LQR ở phần trên để ước lượng 2 thành phần trạng thái không quan sát được là vận tốc và dòng điện của nam châm điện.

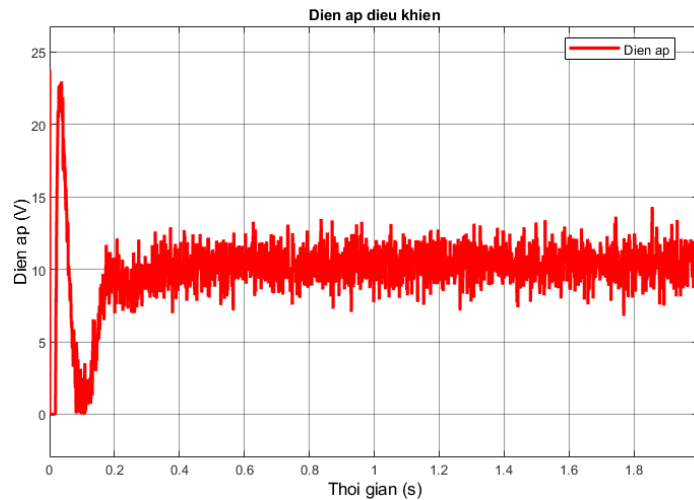
- Sơ đồ mô phỏng



Hình 3.42 Sơ đồ mô phỏng điều khiển LQG.



Hình 3.43 Đáp ứng của 3 thông số trạng thái của mô hình với bộ điều khiển LQG tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$.



Hình 3.44 Điện áp điều khiển mô phỏng của bộ điều khiển LQG tại vị trí làm việc $x_{1e} = 0.015$.

- Nhận xét:
 - Khi có thêm tín hiệu nhiễu nhiều đo lường, tuy tín hiệu đáp ứng tốt nhưng lại xuất hiện tình trạng vọt lố lớn khoảng 35%. Thời gian đáp ứng khoảng 0.6s.
 - Điện áp điều khiển có dao động nhưng với biên độ nhỏ 7 – 12V.

- Đáp ứng của bộ điều khiển LQG không tốt bằng của bộ điều khiển LQR nhưng kết quả mô phỏng lại có thể tin tưởng hơn do có thêm thành phần nhiễu tác động vào hệ thống.

3.2.5 Nhận xét chung

Các bộ điều khiển đã thiết kế cho kết quả đáp ứng tương đối tốt. Bộ điều khiển trượt với hàm Sat cho kết quả điều khiển tốt nhất, còn bộ điều khiển LQG cho kết quả điều khiển chưa hiệu quả.

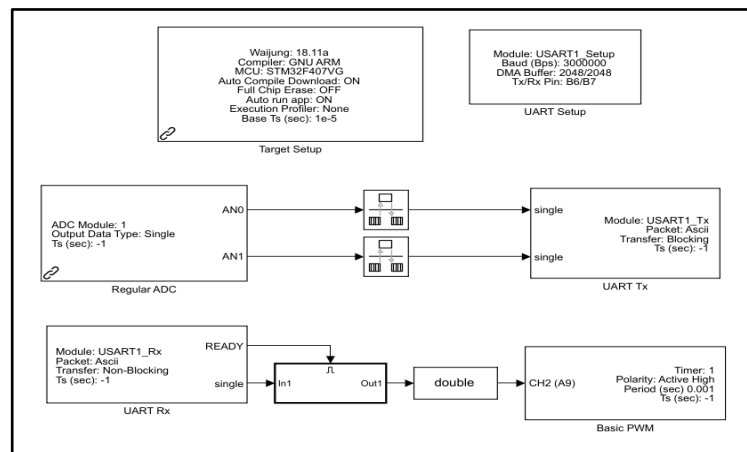
Tuy nhiên, khi xét đến trường hợp có nhiễu tác nhân gây nhiễu như ở thực nghiệm do chưa xem xét ở những bộ điều khiển còn lại nên có thể nói bộ điều khiển LQG có thể đáp ứng được khi hệ thống có nhiễu tác động.

Khi tín hiệu đặt cố định hay thay đổi thì bộ điều khiển trượt và điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa luôn cho kết quả hệ thống đáp ứng tốt. Còn ở bộ điều khiển LQR hay LQG được thiết kế dựa trên việc tuyến tính hóa quanh điểm cân bằng đã đặt nên không thể thay đổi tín hiệu đặt trong quá trình hệ thống hoạt động.

3.3 Kết quả thực nghiệm

Từ mô hình thực tế đã xây dựng, nhóm tác giả sử dụng bộ điều khiển LQG được thiết kế ở Chương 2 để chạy mô hình thực.

- Sơ đồ điều khiển

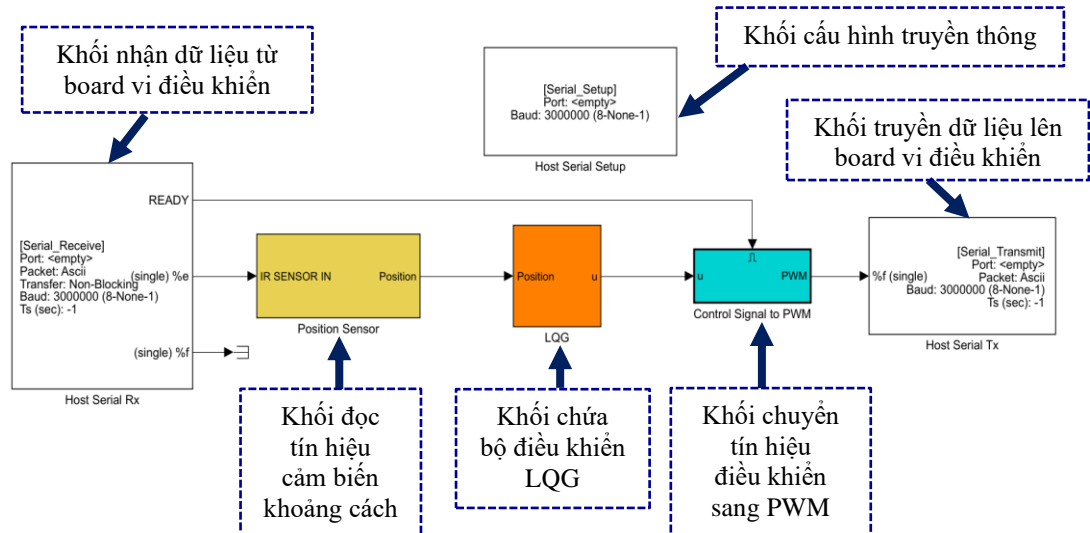


Hình 3.45 Sơ đồ chương trình nạp vào board vi điều khiển.

Để thực hiện điều khiển hệ thống thực tế, board vi điều khiển STM32F407 cần được nạp trước chương trình để đọc tín hiệu analog (ADC) và xuất tín hiệu xung (PWM) đồng thời truyền thông được với máy tính (Hình 3.45). Sau đó một chương trình trên PC sẽ nhận thông tin đưa về từ board vi điều khiển và

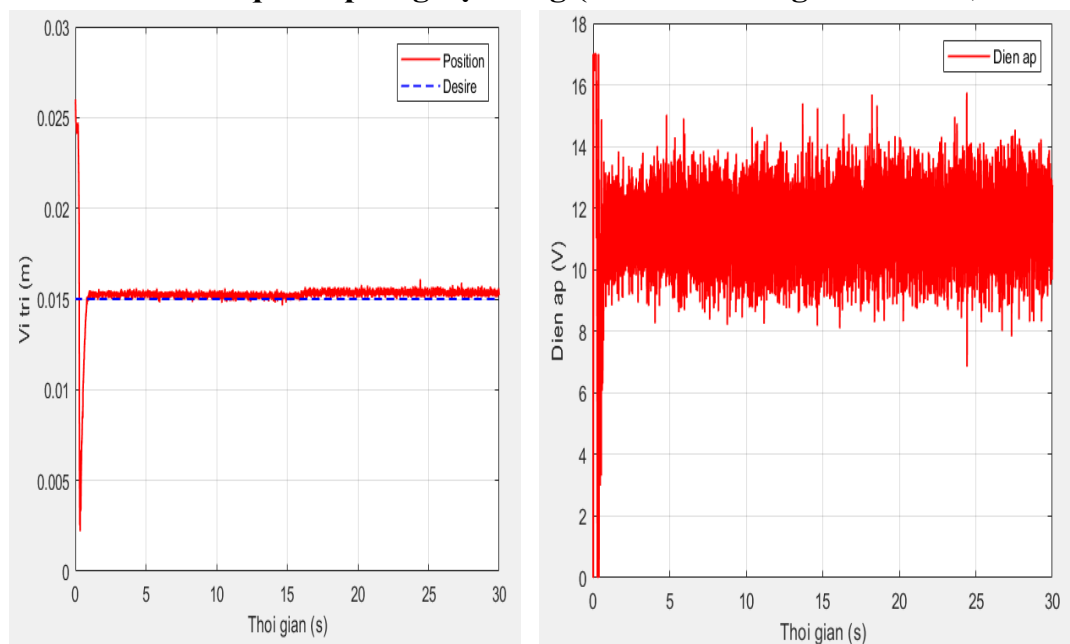
tiến hành tính toán thông số điều khiển và truyền ngược lại cho board vi điều khiển để điều khiển điện áp cung cấp cho nam châm điện.

Hình 3.46 là phần chương trình trên máy tính chứa bộ điều khiển LQG đã thiết kế.



Hình 3.46 Sơ đồ điều khiển dùng bộ điều khiển LQG.

- **Kết quả đáp ứng hệ thống (Điểm cân bằng $x_{1e} = 0.015$)**



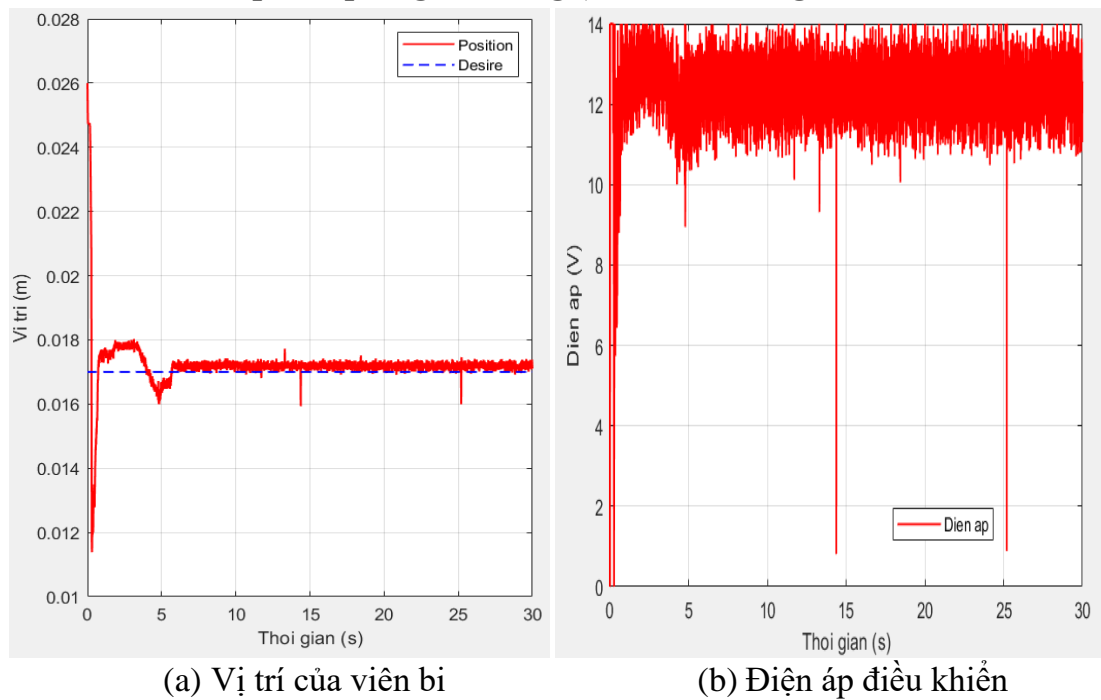
(a) Vị trí của viên bi

(b) Điện áp điều khiển

Hình 3.47 Đáp ứng hệ thống tại điểm cân bằng 0.015.

Kết quả ở Hình 3.47 cho thấy sai số xác lập xấp xỉ khoảng 5%.

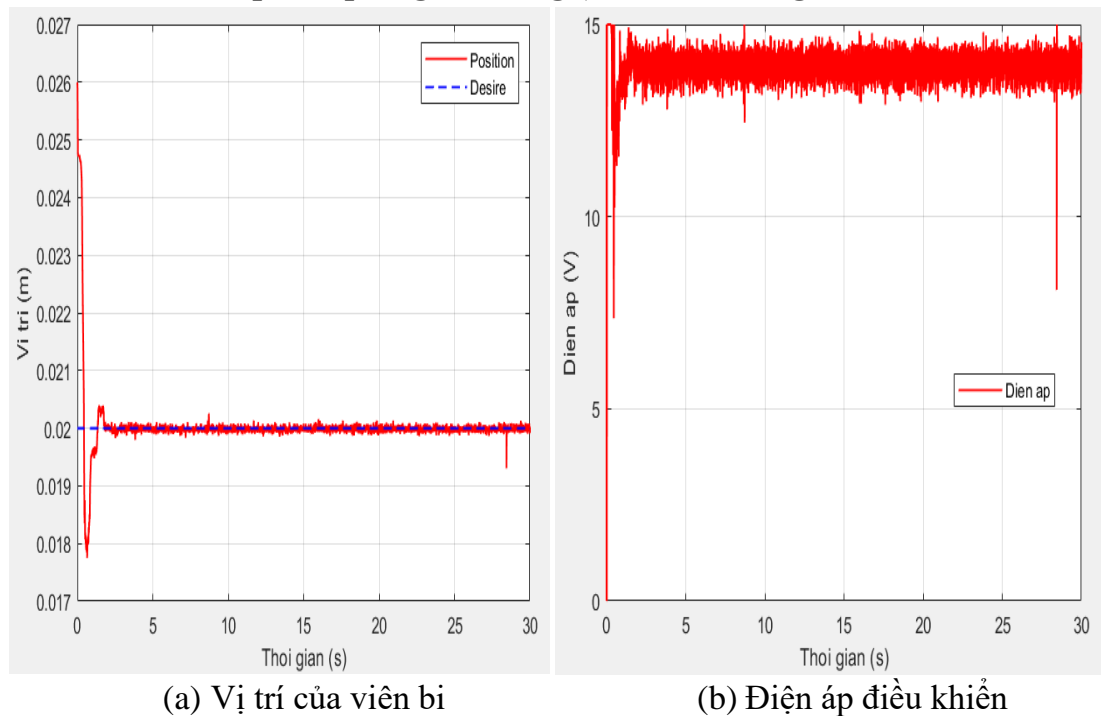
- **Kết quả đáp ứng hệ thống (Điểm cân bằng $x_{1e} = 0.017$)**



Hình 3.48 Đáp ứng hệ thống tại điểm cân bằng 0.017.

Kết quả ở Hình 3.48 cho thấy sai số xác lập xấp xỉ khoảng 3%.

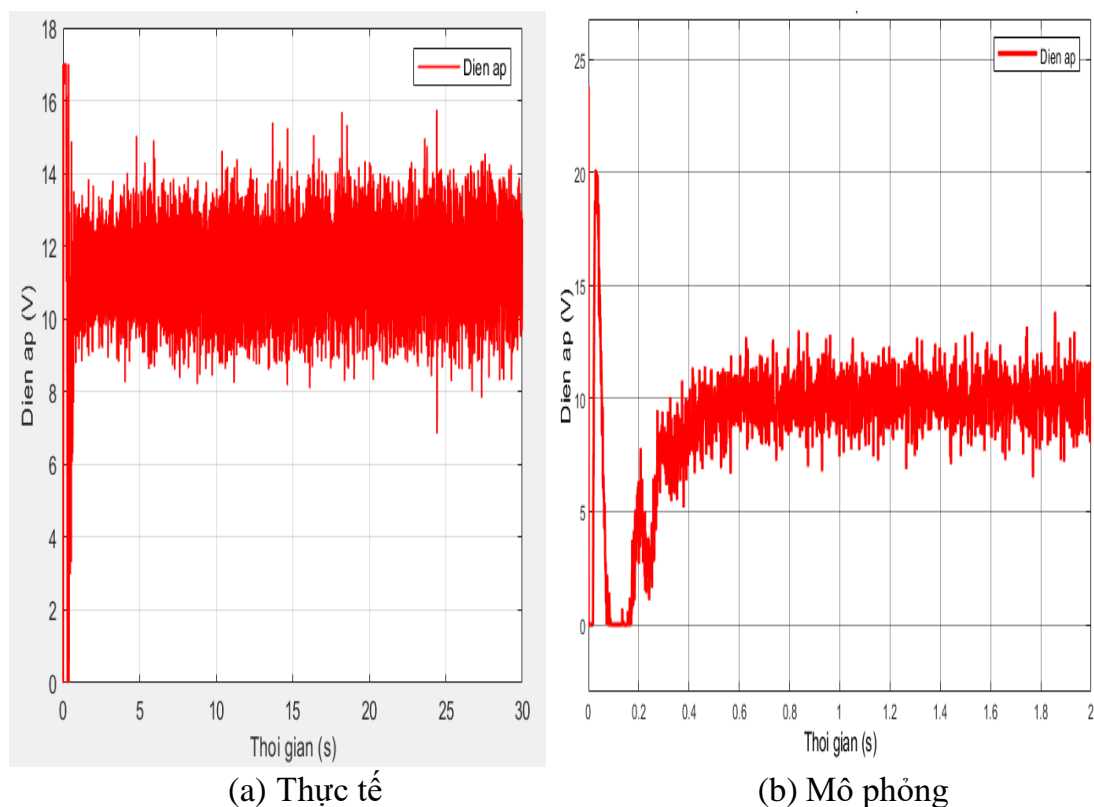
- **Kết quả đáp ứng hệ thống (Điểm cân bằng $x_{1e} = 0.02$)**



Hình 3.49 Đáp ứng hệ thống tại điểm cân bằng 0.02.

Kết quả ở Hình 3.49 cho thấy sai số xác lập xấp xỉ khoảng 1%.

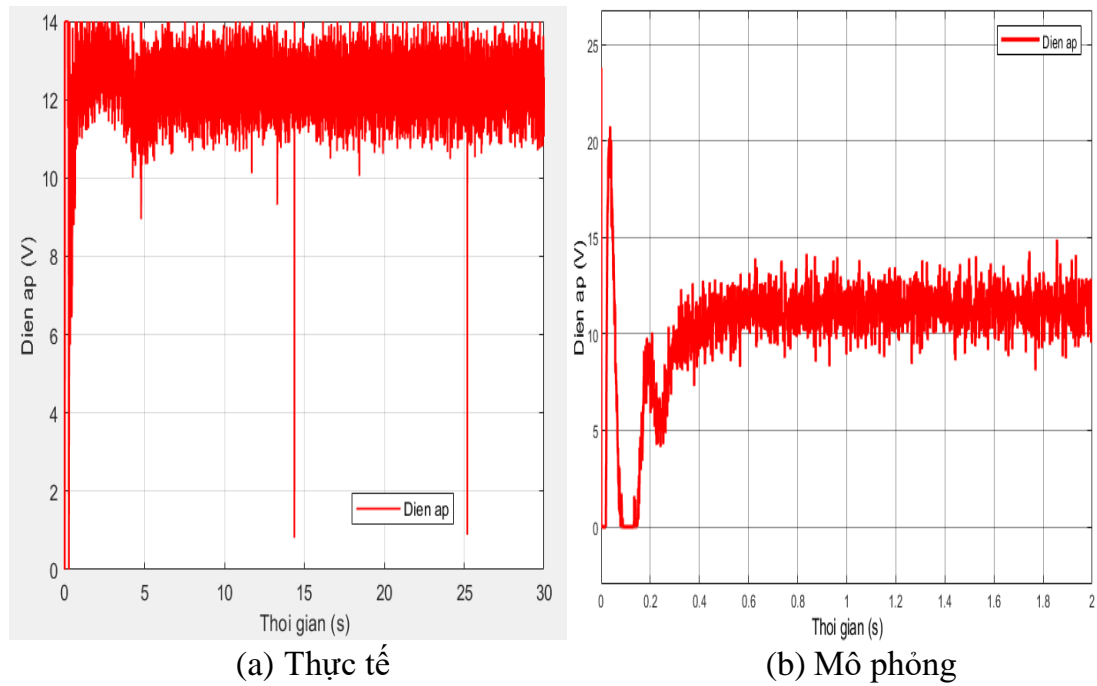
- Nhận xét chung:
 - Với 3 trường hợp trên, hệ thống đáp ứng tốt, khi đã đạt vị trí cân bằng đặt trước thì viên bi sẽ ổn định tại vị trí mong muốn với sai số nhỏ khoảng 5% mặc dù vẫn còn ít dao động.
 - Tuy nhiên, trong mô hình này, việc điều khiển vị trí viên bi cần có sự hỗ trợ ban đầu để đưa viên bi đến vị trí đặt trước. Do đó có trường hợp, viên bi cũng có thể ổn định nhưng vị trí nhưng có sai lệch so với điểm đặt do vị trí đặt để hỗ trợ viên bi ổn định ban đầu không chính xác.
 - Việc tiến tới vị trí ổn định nhanh hay chậm tùy thuộc vào sự hỗ trợ của tay khi đưa viên bi vào vị trí cân bằng có nhanh hay không. Như Hình 3.47 khi đưa bi vào đúng vị trí, viên bi được cân bằng tại vị trí đặt trong thời gian ngắn hơn hai trường hợp còn lại.



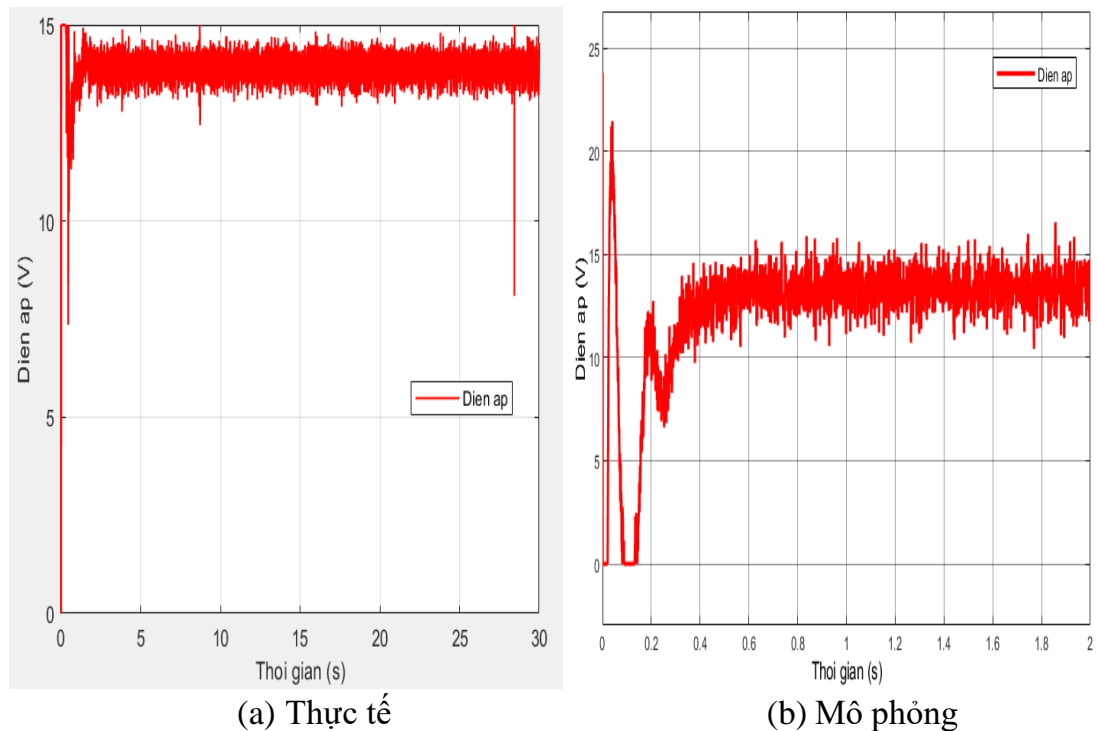
Hình 3.50 Điện áp điều khiển tại điểm cân bằng 0.015.

- So sánh giữa điện áp điều khiển thực tế và trên mô phỏng Hình 3.50, Hình 3.51 và Hình 3.52:
 - Xét tại trạng thái cân bằng, điện áp điều khiển có sự sai lệch giữa mô phỏng và thực tế do tính phi tuyến và độ nhiễu ở hệ thống thực, khác với mô phỏng trực tiếp trên mô hình toán học.

- Vị trí viên bi càng xa cảm biến, việc điều khiển có sự khác biệt lớn giữa mô phỏng và thực tế (Hình 3.50): điện áp mô phỏng trung bình là 9V trong khi điện áp ở thực tế là 12V, sai lệch rơi vào khoảng 34%.
- Tuy có dao động nhưng hệ thống vẫn tương đối ổn định quanh vị trí cân bằng.



Hình 3.51 Điện áp điều khiển tại điểm cân bằng 0.017.



Hình 3.52 Điện áp điều khiển tại điểm cân bằng 0.02.

CHƯƠNG 4: KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

- **Kết quả đạt được**

Trải qua thời gian nghiên cứu, nhóm tác giả đã được một số kết quả nhất định đúng với mục tiêu đã đặt ra:

- Tìm hiểu được mô hình của hệ nâng bi trong từ trường và xây dựng phương trình động học của hệ thống.
- Thiết kế được một số bộ điều khiển phù hợp cho hệ thống đó là bộ điều khiển trượt, bộ điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa, bộ điều khiển LQR và bộ điều khiển LQG.
- Các bộ điều khiển đã thiết cho kết quả mô phỏng tốt trên phần mềm MATLAB với các tín hiệu đặt khác nhau.
- Mô hình thực nghiệm được chế tạo có thể điều khiển được với bộ điều khiển LQG đã thiết kế đạt kết quả như mong đợi.

- **Ưu điểm**

- Hệ thống được thiết kế gọn, đẹp.
- Vị trí điều khiển viên bi mong muốn có thể được điều chỉnh dễ dàng.
- Hệ thống hoạt động ổn định với những vị trí viên bi mong muốn.

- **Mặt hạn chế**

- Cần có sự hỗ trợ ban đầu đưa viên bi về gần vị trí cân bằng trước.
- Cảm biến chưa cho ra được tín hiệu ổn định khi viên bi ở khoảng cách xa so với cảm biến nên việc điều khiển chưa thật sự được chính xác.
- Do hạn chế về mặt thời gian, mô hình thực chỉ chạy được 1 bộ điều khiển LQG, các bộ điều khiển còn lại chưa được thực hiện trên mô hình thực tế.

- **Hướng phát triển**

Từ những kết quả và hạn chế của đề tài đã thực hiện, hướng phát triển tiếp theo của đề tài được đề xuất như sau:

- Khắc phục sai số đo lường từ cảm biến để điều khiển được chính xác khi viên bi có khoảng cách xa cảm biến.
- Tiếp tục nghiên cứu và thử nghiệm với các bộ điều khiển còn lại đã thiết kế cho hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

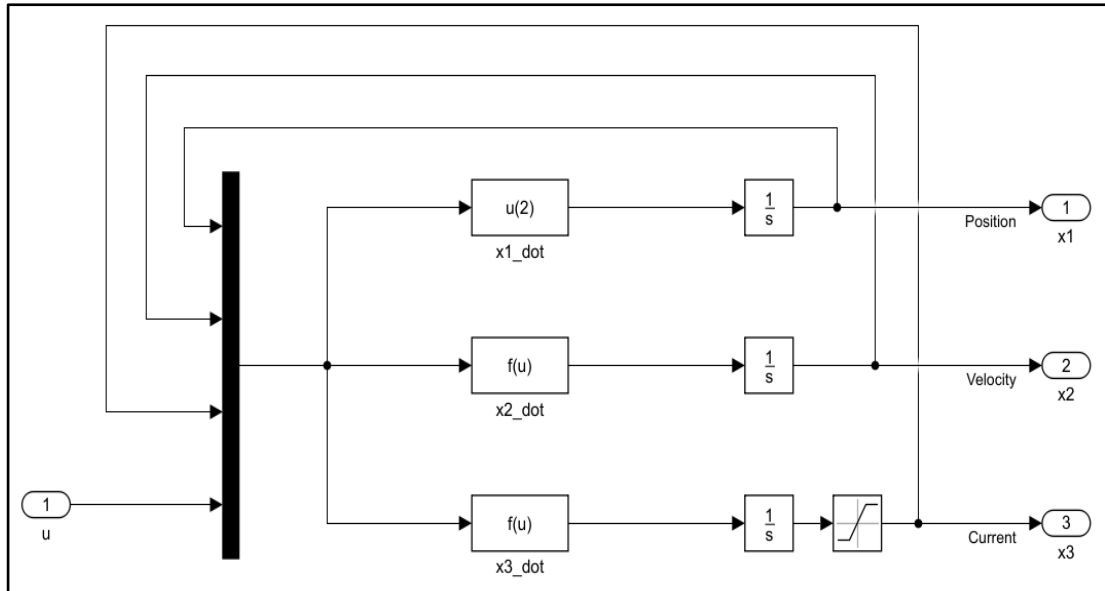
- [1] Trần Nhựt Thanh, “Thiết kế mô hình tàu đệm từ trường”, Luận văn thạc sĩ, Trường đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 2011.
- [2] Rudi Uswarman; Adha Imam Cahyadi; Oyas Wahyunggoro, “Control of a magnetic levitation system using feedback linearization,” *2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA)*, Nov. 2013.
- [3] Lê Thị Kim Loan, “Điều khiển trượt mờ - ứng dụng điều khiển nâng vật trong từ trường”, Luận văn thạc sĩ, Trường đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 2005.
- [4] Lê Vĩnh Phú Đức, “Bộ điều khiển học mờ...trong từ trường”, Luận văn thạc sĩ, Trường đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 2010.
- [5] CÁNDIDO OTERO MOREIRA, “Rapid Control Prototyping Using an STM32 Microcontroller” Bachelorthesis, Technische Universität Clausthal, 2015.
- [6] E Abdollah M. A. Benomair, “Non-linear observer based control of magnetic levitation systems”, Doctorthesis, The University of Sheffield, United Kingdom, 2017.
- [7] Huỳnh Thái Hoàng, “Bài giảng Lý thuyết điều khiển nâng cao”, Bộ môn điều khiển tự động, Trường đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 2011.
- [8] Nguyễn Thị Phương Hà, “Lý thuyết điều khiển hiện đại”, nhà xuất bản Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2007.
- [9] W. Barie and J. Chiasson, “Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation”, *International Journal of Systems Science* 27 (1996), vol. 27.
- [10] Discovery kit with STM32F407VG MCU - User manual, [Online]. Available: www.st.com.
- [11] A Layman’s Guide to Coil Suppression, [Online]. Available: www.durakoolrelays.com
- [12] Huỳnh Thái Hoàng, “Bài giảng Cơ sở điều khiển tự động”, Bộ môn điều khiển tự động, Trường đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 2006.

- [13] Bùi Duy Thái, “Ứng dụng điều khiển thích nghi...tay máy”, Luận văn thạc sĩ, Đại học Đà Nẵng, 2011.
- [14] Juan Sebastián Lafuente Larrañaga, , “Design and development of a digitally controlled Magnetic Levitation System”, Masterthesis, Technische Universität Kaiserslautern, 2019.
- [15] Đặng Thanh Thư, “Điều khiển mô hình hệ thống nâng hạ vật bằng từ trường”, Luận văn thạc sĩ, Trường đại học Bách khoa Đà Nẵng, 2010.

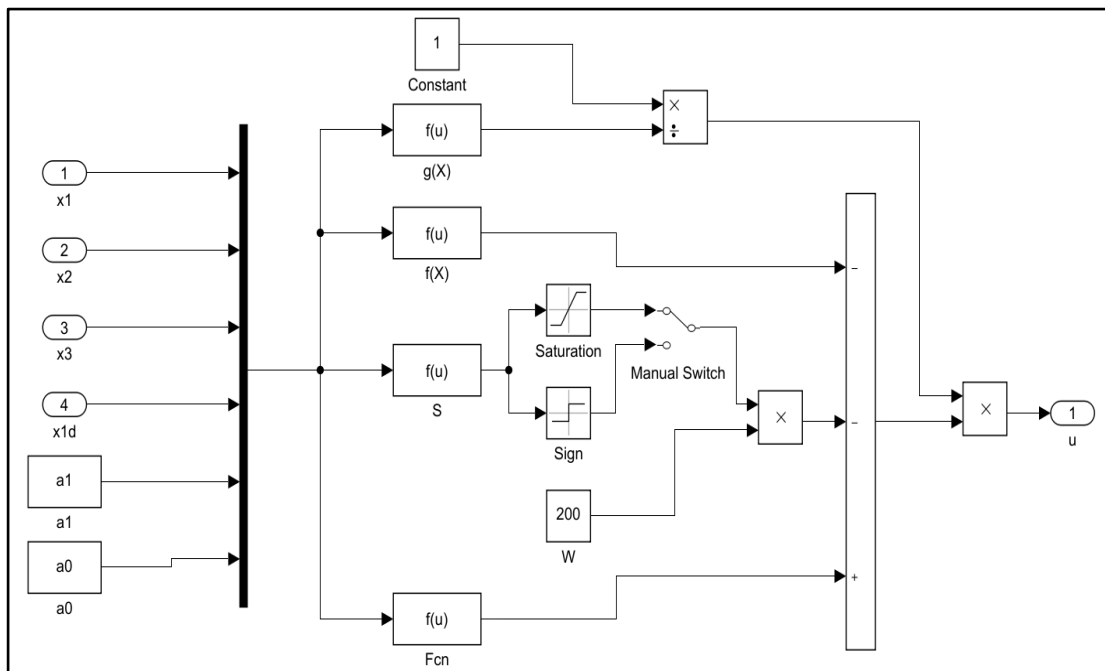
PHỤ LỤC A

CHI TIẾT CÁC KHỐI TRONG SIMULINK

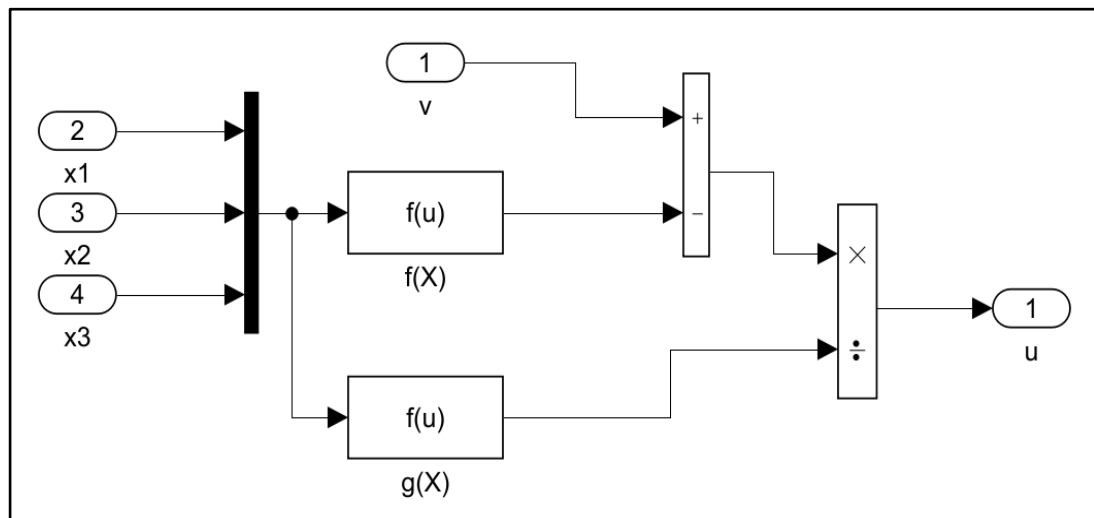
- Khối Magnetic Levitation



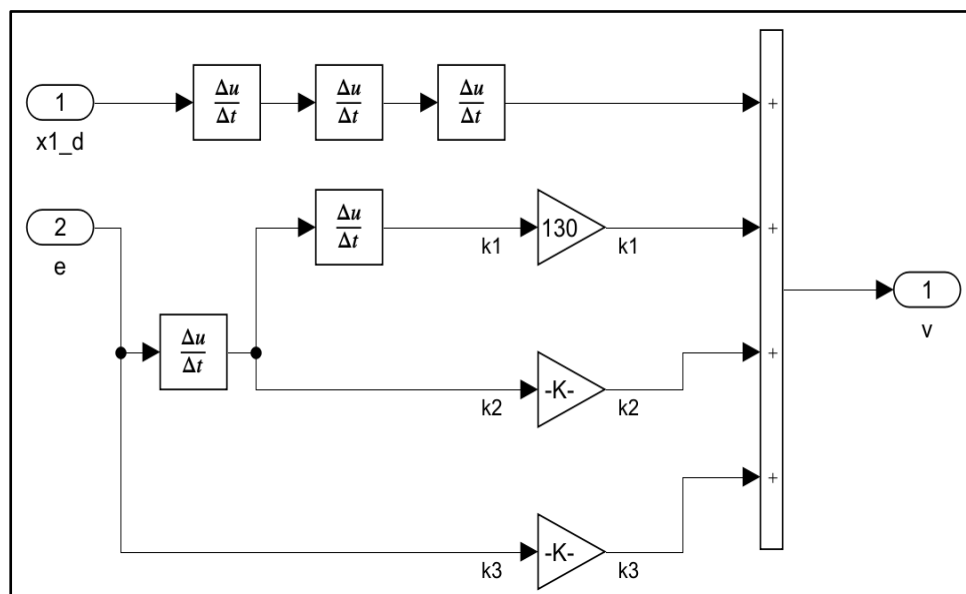
- Khối Sliding Mode Control



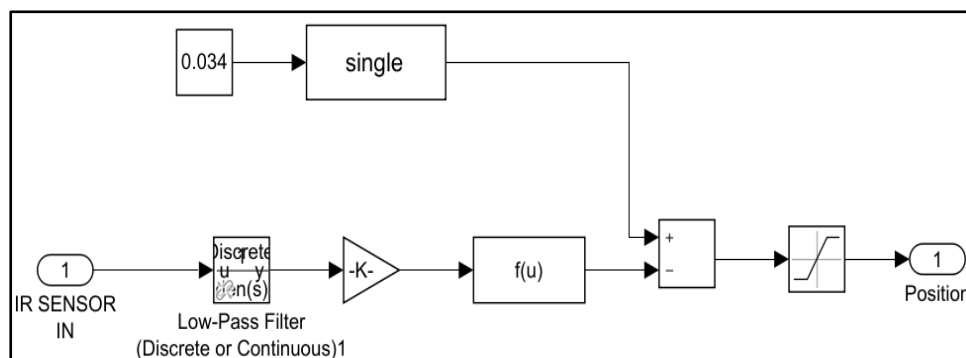
- Khối Feedback Linearization



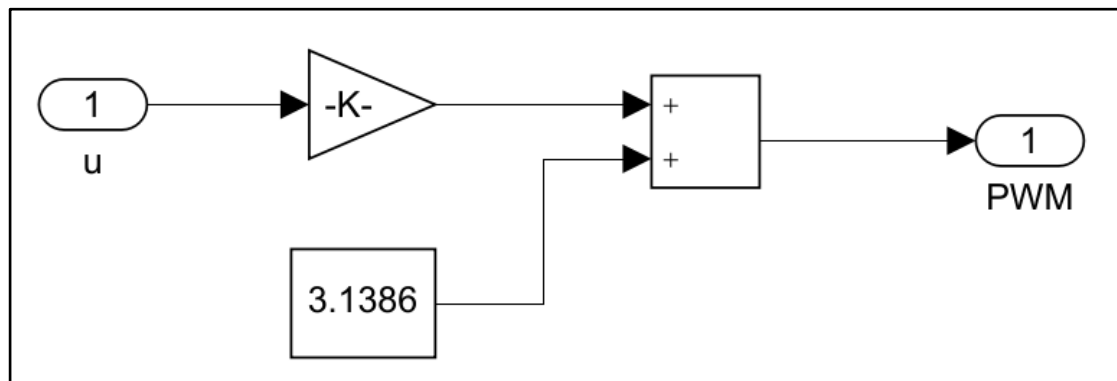
- Khối Tracking Control



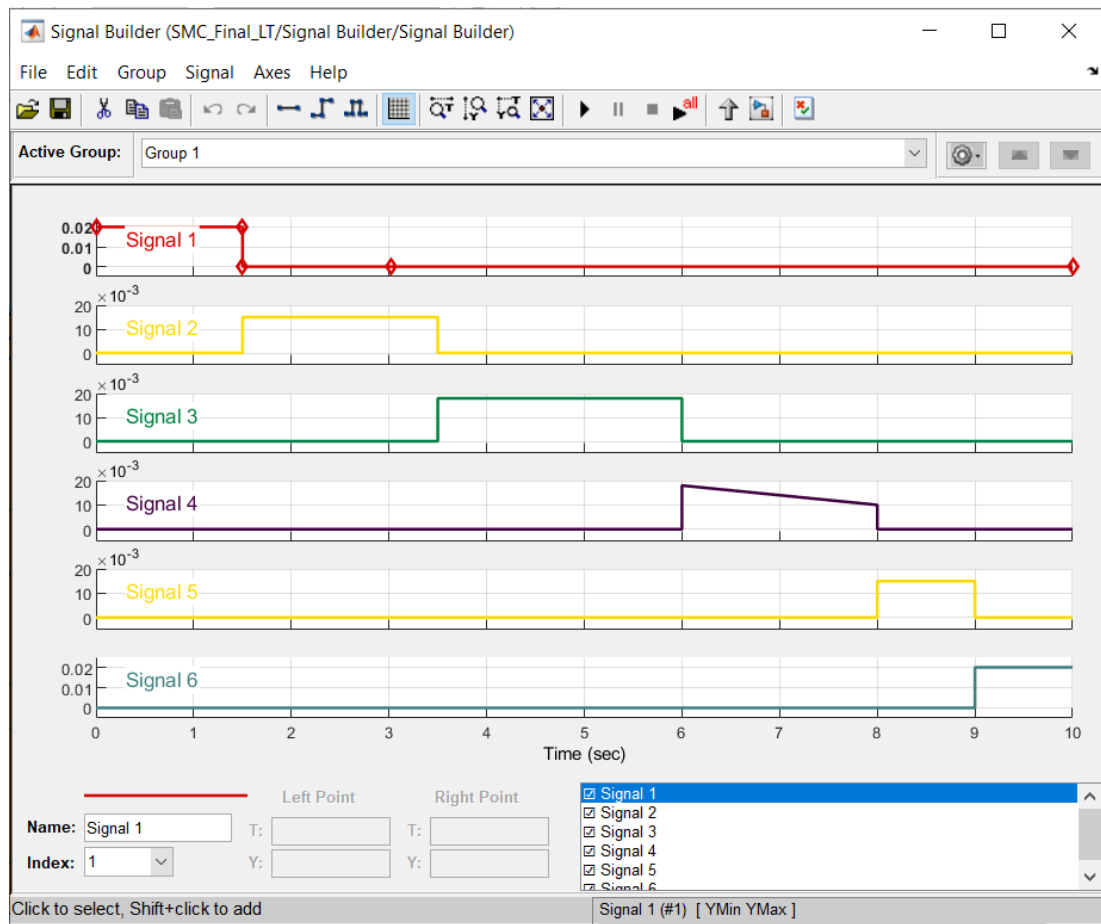
- Khối Position Sensor



- Khối Control Signal to PWM



- Thiết lập khối Signal Builder



PHỤ LỤC B

CODE TÌM THÔNG SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN LQG

```

1  clear
2  clc
3
4  %Thong so mo hinh
5  C = 2.6e-4;
6  L1 = 1.38;
7  R = 29.1;
8  m = 0.015;
9  g_c = 9.81;
10
11 %Diem dung he thong
12 x1e = 0.015;
13 x2e = 0;
14 x3e = x1e*sqrt(g_c*m/C);
15 ue = R*x3e;
16
17 %Ma tran trang thai
18 A1 = [ 0 1 0;
19        2*C*x3e^2/(m*x1e^3) 0 -2*C*x3e/(m*x1e^2);
20        0 2*C*x3e/((L1+2*C/x1e)*x1e^2) -R/(L1+2*C/x1e)];
21 B1 = [0;
22        0;
23        1/(L1+2*C/x1e)];
24 C1 = [1 0 0];
25 D1 = 0;
26
27 %Bo dieu khien LQR
28 R1 = 0.00001;
29 Q = [100000 0 0;
30       0 100000 0;
31       0 0 100000];
32 K = lqr(A1,B1,Q,R1);
33
34 % Bo loc Kalman
35 QN = 0.000001*eye(3);
36 RN = 0.0001;
37 G = eye(3);
38 LN = lqe(A1,G,C1,QN,RN);

```

THÔNG TIN SINH VIÊN



Tên sinh viên: Võ Nhi Khang

MSSV: B1806258

Ngành học : Kỹ thuật Cơ điện tử Khóa: 44 (2018)

Ngày tháng năm sinh: 25/06/2000

Nơi sinh: An Giang

Địa chỉ: Ấp Búng Nhỏ, Xã Khánh Bình, Huyện An Phú, tỉnh An Giang

Địa chỉ mail: khangb1806258@student.ctu.edu.vn

vonhikhang2506@gmail.com

Số mobile: 0834.694.823

THÔNG TIN SINH VIÊN



Tên sinh viên: Nguyễn Hoàng Thi

MSSV: B1806298

Ngành học : Kỹ thuật Cơ điện tử Khóa: 44 (2018)

Ngày tháng năm sinh: 24/09/2000

Nơi sinh: Sóc Trăng

Địa chỉ: 364B Lê Duẩn, phường 9, TP. Sóc Trăng, tỉnh Sóc Trăng.

Địa chỉ mail: thib1806298@student.ctu.edu.vn

nguyenhoangthi2409@gmail.com

Số mobile: 0988.922.689