

# NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN LQR VÀO HỆ THỐNG TREO BÁN TÍCH CỰC

## RESEARCH ON APPLICATION OF LQR CONTROLLER IN SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEM

Lê Bảo Việt, Nguyễn Tiến Dũng, Trịnh Minh Hoàng

Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

### TÓM TẮT

Ngành công nghiệp ô tô trên thế giới đã có những bước phát triển vượt bậc trong những năm gần đây. Ngày nay, ô tô ngày càng hiện đại và là một phương tiện giao thông đường bộ không thể thiếu trong việc phát triển kinh tế, đặc biệt là với kinh tế Việt Nam. Để đáp ứng những nhu cầu ngày càng tăng cao trong việc vận chuyển người và hàng hóa, đòi hỏi những chiếc ô tô di chuyển trên đường phải có tính bền bỉ, êm dịu và có tính đa dụng. Có thể nói hệ thống treo là một phần quan trọng không thể thiếu trên ô tô hiện đại, hệ thống này giúp đảm bảo sự êm dịu cho người và hàng hóa trên ô tô, ngoài ra hệ thống treo cũng góp phần không nhỏ vào việc đảm bảo tính ổn định cho xe khi di chuyển trên đường. Phần lớn các ô tô hiện nay vẫn sử dụng các hệ thống treo thụ động được cấu tạo từ các cụm chi tiết cơ khí, các hệ thống treo kiểu này thường đơn giản, dễ tháo lắp và sửa chữa nhưng tính êm dịu lại chưa cao. Một số các hãng xe đã bắt đầu phát triển và ứng dụng hệ thống treo bán tích cực trên xe của mình và cho thấy những hiệu quả tích cực trong việc cải thiện độ êm dịu và tính năng động học của xe. Việc nghiên cứu hệ thống treo đòi hỏi chi phí thử nghiệm rất lớn, vậy nên trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển LQR vào hệ thống treo bán tích cực bằng phương pháp mô phỏng số, kết quả của nghiên cứu có thể được ứng dụng để lựa chọn và tính toán bộ điều khiển trong thực tế, giúp giảm thời gian và chi phí thử nghiệm.

**Từ khóa:** Hệ thống treo bán tích cực; Bộ điều khiển LQR; Phương pháp mô phỏng số; Hệ thống treo thụ động.

### ABSTRACT

The world automobile industry has made remarkable progress in recent years. Today, cars are increasingly modern and are an indispensable means of road transport in economic development, especially the Vietnamese economy. To meet the increasing demand for moving people and goods, cars on the road must be durable, light and versatile. It can be said that the suspension system is an important and indispensable part of modern cars. This system helps ensure comfort for people and goods in the vehicle. In addition, the suspension system also contributes significantly to the success of the car. Ensures the vehicle's stability when traveling on the road. Most cars today still use passive suspension systems made up of mechanical assemblies. These types of suspension systems are often simple, easy to disassemble and repair, but are not highly recyclable. Some automakers

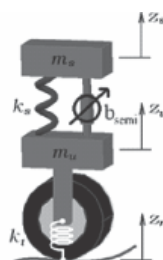
*have begun to develop and apply semi-active suspension systems on their vehicles and are seeing positive effects in improving driving feel and vehicle dynamics. Research on suspension systems requires huge testing costs, so in this study the authors conducted research on applying the LQR controller to semi-active suspension systems using numerical simulation methods and obtained results. as follows: Research results can be applied to select and calculate controllers in practice, helping to reduce testing time and costs.*

**Keywords:** *Semi-active suspension systems; LQR controller; Numerical simulation method; Passive suspension.*

## 1. TỔNG QUAN

### 1.1. Hệ thống treo bán tích cực

Không giống như các thiết kế hệ thống treo thụ động, hệ thống treo bán tích cực có khả năng điều chỉnh đặc tính động của hệ thống. Với khả năng này, hệ thống treo bán tích cực có thể thích ứng với các lực giảm chấn tốt hơn, phù hợp hơn khi hệ thống chịu tác động từ ngoại lực. Đối với hệ thống treo bán tích cực, các nhà thiết kế đã cố gắng thay đổi lực cản giảm chấn bằng một số phương án khác nhau, như: Thay đổi tiết diện của van tiết lưu trong giảm chấn hoặc thay đổi độ nhớt của dầu dùng trong giảm chấn. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành nghiên cứu về hệ thống treo sử dụng giảm chấn có thể thay đổi độ nhớt của dầu. Hình 1.1, mô tả một ví dụ về xe một phần tư mô hình hệ thống treo bán tích cực sử dụng lò xo chung để đỡ tải và sử dụng bộ giảm chấn có thể điều chỉnh để mang lại khả năng giảm chấn tối ưu cho hệ thống.



Hình 1.1: Mô hình hệ thống treo bán tích cực.

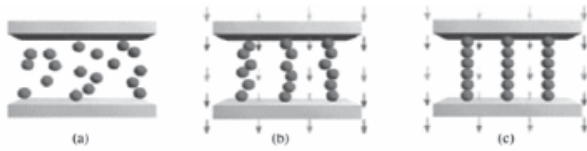
### 1.2. TỔNG QUAN VỀ GIẢM CHẤN DẦU TỪ TRƯỜNG

#### 1.2.1. Chất lỏng MR

Chất lỏng MR là viết tắt của chất lỏng từ lưu biến được phát hiện lần đầu tiên bởi nhà phát minh Willis Winslow, người đã đạt được bằng sáng chế của Hoa Kỳ về các chất lỏng này vào năm 1947, và được phát triển bởi Jacob Rabinow vào năm 1948. Ứng suất chảy của chất lỏng có thể được xác định bằng cách thay đổi cường độ trường xuyên qua chất lỏng một cách liên tục, dẫn đến sự thay đổi của lực giảm chấn liên tục. Những chất lỏng dạng này đã được ứng dụng rất rộng rãi trong khoa học và công nghệ hiện đại đặc biệt là trong hệ thống treo trên ô tô. Luận văn này, tác giả tập trung vào bộ giảm chấn chất lỏng MR, được coi là phù hợp hơn bộ giảm chấn chất lỏng ER cho ứng dụng ô tô vì những lý do được đưa ra dưới đây.

Chất lỏng MR bao gồm các mảnh kim loại cực nhỏ có khả năng phân cực từ tính, chẳng hạn như các hạt sắt, lơ lửng trong chất lỏng, có thể kể đến một số loại chất lỏng như dầu khoáng, dầu tổng hợp, nước hoặc glycol. Một chất lỏng MR điển hình sẽ chứa 20 đến 40 phần trăm thể tích các hạt sắt tương đối tinh khiết có đường kính khoảng 3 đến 10 micron và thông thường, một số chất phụ gia, tương

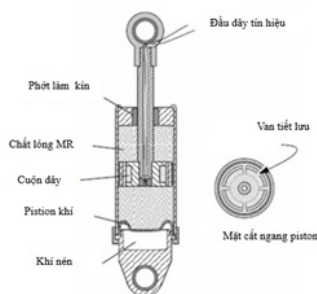
tự như chất phụ gia trong chất bôi trơn thương mại, được thêm vào để giữ cho các hạt kim loại không bị vón cục.



Hình 1.2. Hoạt động của chất lỏng MR.

### 1.2.2. Giảm chấn dầu từ trường MRD

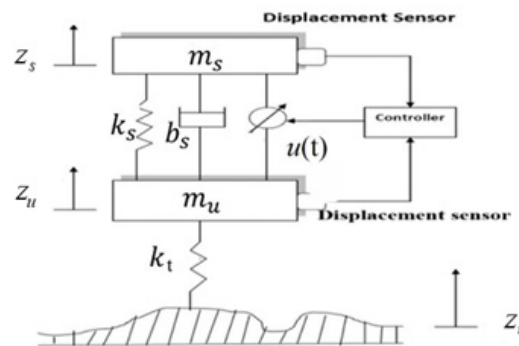
Bộ giảm chấn MR về cơ bản bao gồm một pít-tông, cuộn dây, bầu khí nén, vòng đệm và một bình chứa chất lỏng MR. Hình 1.3, cho thấy bộ giảm chấn dầu từ trường MRD. Thông qua các lỗ ở đầu piston, cần piston được đẩy vào vỏ làm cho chất lỏng MR chảy từ buồng áp suất cao sang buồng áp suất thấp. Bầu khí nén chứa khí nén (thường là nitơ) và piston của nó hoạt động như một rào cản giữa chất lỏng MR và khí. Bầu khí nén phục vụ ba mục đích: Hồi vị cho cần piston khi bị nén, trên thực tế khi cần piston di chuyển, sự thay đổi thể tích ở hai khoang phía bên trên và bên dưới không đều nhau nên cần không thể di chuyển do lượng dầu chênh lệch không có chỗ chứa, lúc này khí nén sẽ bị nén lại hoặc nở ra để nhường chỗ cho dầu thừa. Ngăn chặn hiện tượng xâm thực ở trong dầu giảm chấn. Khắc phục hiện tượng giãn nở khi dầu co dẫn ở các mức nhiệt khác nhau.



Hình 1.3. Mặt cắt ngang của một giảm chấn dầu từ trường MRD

## 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG TREO BÁN TÍCH CỰC

Một phương pháp phổ biến để đơn giản hóa mô hình hệ thống treo trên ô tô là sử dụng mô hình xe một phần tử. Các mô hình xe  $\frac{1}{4}$  thường bao gồm các thành phần động lực học và khối lượng.



Hình 2.1. Mô hình hệ thống treo bán tích cực  $\frac{1}{4}$

Trong đó: Khối lượng được treo ký hiệu là  $m_s$ , là khối lượng của thân xe; trong trường hợp này,  $m_s$  sẽ bằng  $\frac{1}{4}$  tổng khối lượng thân xe. Vị trí của khối lò xo được biểu thị bằng  $z_s$ . Khối lượng không treo, ký hiệu là  $m_u$ , đại diện cho khối lượng của bánh xe, trục và cụm phanh và vị trí của nó được biểu thị bằng  $z_u$ . Hệ thống treo được mô hình hóa bằng cách sử dụng tổ hợp lò xo và giảm chấn ( $k_s$  và  $b_s$ ). Biên dạng đường được cung cấp bởi  $z_r$  được coi là đầu vào duy nhất trong mô hình này, vì không có điều khiển nào được tham gia. Lớp có độ cứng nhưng độ giảm chấn rất nhỏ và được coi bằng 0. Độ cứng của lớp được ký hiệu là  $k_t$ . Đầu vào lực giảm chấn hiện được ký hiệu là  $u(t)$ . Bộ giảm chấn MR bao gồm, lực ma sát và lực giảm chấn có thể điều khiển được, được biểu thị bằng  $u(t)$ .

Nhóm tác giả tiến hành xây dựng mô hình toán học của mô hình một phần tử gồm hai bậc tự do được biểu diễn như sau:

$$m_s \ddot{z}_s = k_s(z_u - z_s) + b_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + u \quad (2.1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = -k_s(z_u - z_s) - b_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + k_t(z_r - z_u) - u \quad (2.2)$$

Để thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống, học viên đã tiến hành biểu diễn các phương trình dưới dạng không gian trạng thái. Mô hình không gian trạng thái giúp chúng ta giải phương trình vi phân bậc một thay vì bậc hai và đã có nhiều nghiên cứu về nó trên thế giới. Việc xác định các trạng thái phụ thuộc vào người thiết kế bộ điều khiển. Người thiết kế nên chọn các trạng thái quan trọng đối với hệ thống cũng như các trạng thái mà người thiết kế quan tâm. Các biến trong phương trình vi phân mô tả hệ thống treo được học viên gán thành các biến trong vectơ biểu thị trạng thái của hệ thống. Trong công thức không gian trạng thái, X là vectơ biểu thị trạng thái hệ thống.

Bảng 1. Ý nghĩa các trạng thái:

| Trạng thái | Biến        |
|------------|-------------|
| $x_1$      | $z_s$       |
| $x_2$      | $\dot{z}_s$ |
| $x_3$      | $z_u$       |
| $x_4$      | $\dot{z}_u$ |
| Kích động  | $z_r$       |

Dạng không gian trạng thái của các phương trình (2.1) và (2.2) có dạng tổng quát như phương trình dưới đây:

$$\dot{X}(t) = A * X(t) + B * u(t) + L * z_r(t) \quad (2.3)$$

Trong đó, A là ma trận hệ số không đổi  $n \times n$  và n bằng số trạng thái; B và L là vectơ  $n \times 1$  hệ số không đổi. X(t) là trạng thái và là vectơ  $n \times 1$ ; u(t) là lực điều khiển là đầu vào giá trị vô hướng;  $x_r(t)$  là mặt cắt đường là giá trị vô hướng. Các ma trận A, B, L được biểu diễn như sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-k_s}{m_s} & \frac{-b_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & \frac{b_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-k_s}{m_u} & \frac{b_s}{m_u} & \frac{-k_s - k_t}{m_u} & \frac{-b_s}{m_u} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m_s \\ 0 \\ -1 \\ m_u \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_t \\ m_u \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 3. NGHIÊN CỨU BỘ ĐIỀU KHIỂN LQR

Mục tiêu của hệ thống điều khiển là tìm ra lực giảm chấn tối ưu nằm trong miền làm việc của bộ giảm chấn MR. Lý thuyết bộ điều khiển bậc hai tuyến tính (LQR) đã được nhiều nhà nghiên cứu áp dụng trong nỗ lực thiết kế bộ điều khiển tối ưu cho hệ thống treo chủ động và bán chủ động. Loại bộ điều khiển này hoạt động theo hướng tạo ra lực truyền động tối ưu dẫn đến giảm thiểu chỉ số hiệu suất. Chỉ số hiệu suất là tiêu chí do người dùng xác định dựa trên tính năng của mô hình và các trạng thái. Lực điều khiển được xác định bằng phương trình.

$$u(t) = -Ku(t) \quad (2.6)$$

Ma trận K là ma trận  $4 \times 4$  với đầu vào là 4 biến trạng thái. Ma trận K có giá trị thay đổi, khi các ma trận trọng số tính đến hiệu quả điều khiển (ma trận Q) và mức độ tiêu thụ năng lượng (ma trận R) trong điều khiển thay đổi. Như vậy, ở từng vùng vận tốc được tuyến tính hóa ứng với mỗi ma trận A lựa chọn ma trận Q và R như trên thì được giá trị K này không thay đổi quá trình điều khiển.

Ma trận K được xác định bằng biểu thức (2.7):

$$K = R^{-1} B^T P \quad (2.7)$$

Trong đó, ma trận P phải thỏa mãn phương trình:

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (2.8)$$

Kết hợp hai phương trình (2.6) và (2.7), ta được:

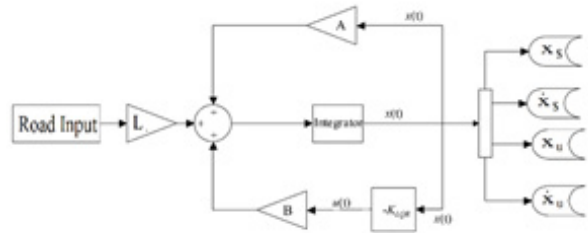
$$u(t) = -(R^{-1} B^T P)x(t) \quad (2.9)$$

Việc lựa chọn Q và R xác định tính tối ưu trong luật điều khiển tối ưu. Những ma trận này được người thiết kế lựa chọn. Các giá trị của ma trận này thường được xác định bằng phép thử trong mô phỏng. Ma trận Q và R được chọn làm đường chéo theo quy tắc chung. Nói chung, khi một trạng thái quan trọng và có độ lớn nhỏ thì phần tử đường chéo tương ứng phải lớn. Đối với ma trận Q cố định, việc giảm giá trị ma trận R sẽ làm giảm thời gian chuyển tiếp và độ vọt lố nhưng làm tăng thời gian tăng và sai số trạng thái ổn định. Trong điều kiện khác, khi R cố định nhưng Q giảm, thời gian chuyển tiếp và độ vọt lố sẽ tăng, trong khi thời gian tăng và sai số trạng thái xác lập sẽ giảm. Trong luận văn này, các giá trị được chọn để giảm gia tốc khối lượng được treo mà không ảnh hưởng đáng kể đến các khía cạnh hiệu suất khác. Theo kết quả mô phỏng, hệ số trọng số hiệu năng tốt nhất được lựa chọn như sau:

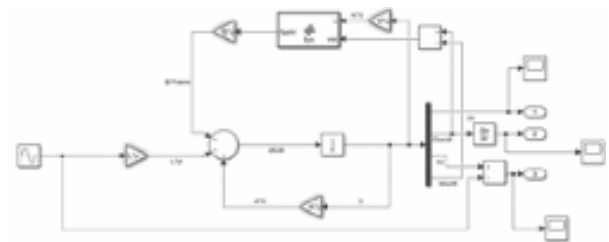
$$Q = 1e6 * [10 \quad 5 \quad 7 \quad 3] \quad (2.10)$$

$$R = [1] \quad (2.11)$$

$$K = lqr(A, B, Q, R) \quad (2.12)$$



Hình 3.1. Sơ đồ khối của hệ thống treo bán tích cực



Hình 3.2. Sơ đồ khối Ssimulink của hệ thống treo bán tích cực

Thông số đầu vào cho sơ đồ khối Simulink được biểu thị trong bảng 2 và hình dưới đây:

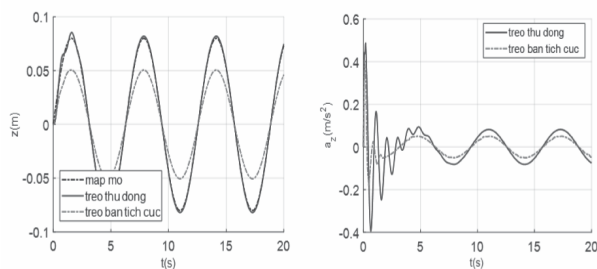
Bảng 2. Thông số đầu vào:

| Ký hiệu | Đơn vị                          | Giá trị |
|---------|---------------------------------|---------|
| $m_s$   | Khối lượng được treo (kg)       | 450     |
| $m_u$   | Khối lượng không được treo (kg) | 48      |
| $k_s$   | Độ cứng lò xo (N.m)             | 26500   |
| $k_t$   | Độ cứng lớp (N.m)               | 175000  |
| $b_s$   | Hệ số cản giảm chấn (N.s/m)     | 1200    |

#### 4. KẾT QUẢ KHẢO SÁT

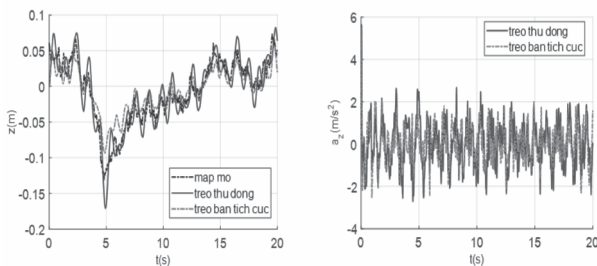
Nhóm tác giả đã tiến hành mô phỏng hoạt động của hệ thống treo bán tích cực trên phần mềm mô phỏng Matlab-Simulink, đồng thời đã tiến hành khảo sát và so sánh chất lượng

dao động của hai hệ thống treo thụ động thông thường và treo bán tích cực trên các loại mặt đường khác nhau, như: Đường mấp mô hình sin, đường loại C theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016, với vận tốc di chuyển của xe là 40 (km/h).



Hình 4.1. So sánh dao động theo phương thẳng đứng của thân xe và gia tốc theo phương thẳng đứng

Kết quả trên hình 4.1 cho thấy, khi đi trên mặt đường mấp mô hình sin có chiều cao mấp mô là 0.08 m thì hệ thống treo bán tích cực được ứng dụng bộ điều khiển LQR cho thấy dao động và gia tốc thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện rõ rệt.



Hình 4.2. So sánh dao động theo phương thẳng đứng của thân xe và gia tốc theo phương thẳng đứng

Kết quả trên hình 4.2 cho thấy, khi đi trên mặt đường mấp mô dạng B-C có chiều dài là 250m thì hệ thống treo bán tích cực được ứng dụng bộ điều khiển LQR, biên độ dao động và gia tốc thân xe theo phương thẳng đứng đã được cải thiện rõ rệt, cho phép nhóm tác giả có cơ sở để triển khai các nghiên cứu tiếp theo.

## 5. KẾT LUẬN

Nhóm tác giả đã xây dựng được mô hình động lực học của hệ thống treo ¼ và đã tiến hành nghiên cứu, ứng dụng thành công bộ điều khiển LQR vào hệ thống treo bán tích cực. Kết quả cho thấy mức độ êm dịu và chất lượng dao động của xe khi sử dụng hệ thống treo bán tích cực được cải thiện tương đối nhiều so với các hệ thống treo truyền thống. Kết quả của nghiên cứu này sẽ là cơ sở để nhóm nghiên cứu thực hiện các nghiên cứu tiếp theo và là cơ sở để lựa chọn bộ điều khiển trong thực tế dành cho hệ thống treo bán tích cực. ❖

Ngày nhận bài: 10/4/2024

Ngày phản biện: 20/5/2024

## Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Hữu Cẩn, Dư Quốc Thịnh, Phạm Minh Thái, Nguyễn Văn Tài, Lê Thị Vàng, 2007; *Lý thuyết ô tô máy kéo*, NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
- [2]. Lưu Văn Tuấn, 2019; *Lý thuyết ô tô*, NXB. Giáo dục Việt Nam.
- [3]. Nguyễn Trọng Hoan, 2019; *Thiết kế tính toán ô tô*, NXB. Giáo dục Việt Nam.
- [4]. Võ Văn Hùng, Nguyễn Tiến Dũng, Dương Ngọc Khánh, Hoàng Đàm Phúc, 2019; *Động lực học ô tô*, NXB. Giáo dục Việt Nam.
- [5]. Behnam Riaz, 2021. *Design and Investigation of a Semi-Active Suspension System in Automotive Applications*. Doctoral thesis, University of Windsor, Canada.
- [6]. R. Goodall, 1997. *Active Railway Suspensions: Implementation Status and Technological Trends*, Vehicle System Dynamics. Doctoral thesis.
- [7]. Rao, K. Dhananjay, and Shambhu Kumar, 2015. *Modeling and simulation of quarter car semi active suspension system using LQR controller*. *Proceedings of the 3rd International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications (FICTA)*.