

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN**

-----***-----

VŨ NGỌC KIÊN

**NGHIÊN CỨU THUẬT TOÁN GIẢM BẠC MÔ HÌNH
VÀ ỨNG DỤNG CHO BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa

Mã số: 62. 52. 02. 16

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

THÁI NGUYÊN, NĂM 2015

Công trình được hoàn thành tại Đại học Thái Nguyên

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Nguyễn Hữu Công

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Bùi Trung Thành

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Đại học Thái Nguyên
Họp tại:

Vào hồi giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại Trung tâm học liệu Đại học Thái Nguyên

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÓ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN ĐÃ CÔNG BỐ

1. Cong Huu Nguyen, Kien Ngoc Vu, Hai Trung Do (2015), “Model reduction based on triangle realization with pole retention”, *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 9, 2015, No. 44, pp. 2187-2196, <http://dx.doi.org/10.12988/ams.2015.5290>
2. Vũ Ngọc Kiên, Đào Huy Du, Nguyễn Hữu Công (2014), “*Model reduction in Schur basis with pole retention*”, Tạp chí Khoa học & Công nghệ Đại học Thái Nguyên, tập 127, số 13, tr. 101 – 106.
3. Cong Nguyen Huu, Kien Vu Ngoc, Du Dao Huy (2013), “Applying order reduction model algorithm for balancing control problems of two-wheeled mobile robot”, *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on*, pp. 1302 – 1307.
4. Cong Nguyen Huu, Kien Vu Ngoc, Du Dao Huy, Thanh Bui Trung (2013), “Researching model order reduction based on Schur analysis”, *Cybernetics and Intelligent Systems (CIS), IEEE Conference on*, pp. 60 – 65.
5. Cong Nguyen Huu, Kien Vu Ngoc, Du Dao Huy (2013), “Research to Improve the Model Order Reduction Algorithm”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ các trường Đại học Kỹ thuật*, số 97, tr. 1-7.

MỞ ĐẦU

1. Giới thiệu

2. Tính khoa học và cấp thiết của luận án

Trong kỹ thuật nói chung và kỹ thuật điều khiển nói riêng, mô tả toán học hệ động học thường được sử dụng với 2 mục đích cơ bản là mô phỏng và điều khiển. Trong cả hai mục đích này, thì ta thường xuyên bắt gặp các mô hình toán học phức tạp, có thể bậc rất cao, như mô hình hệ thống dự báo thời tiết trong nghiên cứu của Cohn (1997), phân tích và thiết kế hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) trong nghiên cứu của Mukherjee (2000), mô phỏng mạch điện trong nghiên cứu của Chiprout (1994), bộ điều khiển tối ưu bền vững bậc cao cho các đối tượng bất định trong công trình của Trung (2012), Thành (2008), bộ lọc số trong công trình của Zhang (2008), ...

Về mặt lý thuyết, các mô hình toán học phức tạp, bậc cao sẽ mô tả một cách chính xác các tính chất của hệ động học – đây là mục tiêu chính của mô tả toán học. Tuy nhiên, sử dụng các mô hình bậc cao này trong thực tế sẽ gặp một số bất lợi như sau:

+ Nếu mô hình phức tạp, bậc cao là mô hình của đối tượng như trong các nghiên cứu của Chiprout (1994), Cohn (1997), Mukherjee (2000), thì sẽ làm gia tăng khối lượng tính toán cần được xử lý làm tăng thời gian mô phỏng do đó hệ thống mô phỏng có thể không đáp ứng được yêu cầu về mặt thời gian (trong mô phỏng hay tìm hiểu tính chất mô hình) hoặc nếu muốn đáp ứng yêu cầu về mặt thời gian thì đòi hỏi hệ thống xử lý phải có tốc độ tính toán cao tương ứng là chi phí phần cứng tăng lên. Đồng thời do mô hình phức tạp bậc cao nên có thể đòi hỏi dung lượng bộ nhớ để lưu trữ dữ liệu về mô hình lớn hơn.

+ Nếu mô hình phức tạp, bậc cao là mô hình bộ điều khiển thu được từ quá trình thiết kế điều khiển bền vững như trong công trình của Trung (2012), Thành (2008), thì mô hình phức tạp, bậc cao sẽ làm gia tăng khối lượng tính toán cần được xử lý, làm cho các hệ thống điều khiển có thể không đáp ứng được yêu cầu điều khiển thời gian thực hoặc nếu muốn đáp ứng được thì yêu cầu phần cứng phải có tốc độ xử lý cao làm tăng chi phí của hệ thống điều khiển hoặc do tính phức tạp của bộ điều khiển sẽ có thể làm tăng khả năng gặp sự cố của hệ thống điều khiển hay giảm độ tin cậy của hệ thống điều khiển. Trong nhiều trường hợp, một hệ thống điều khiển có mô hình quá phức tạp, bậc cao có thể không lắp đặt được trên các thiết bị như thiết bị tự động tự hành, các robot không gian,... do sự hạn chế về không gian, khối lượng của các thiết bị.

Vậy nếu có một mô hình toán học có bậc nhỏ hơn mà có thể mô tả một cách tương đối chính xác hệ động học thì hiệu quả đem lại là:

+ Mô hình bậc thấp sẽ giảm khối lượng tính toán cần được xử lý nên giúp quá trình tính toán nhanh hơn do đó dễ dàng thỏa mãn yêu cầu về thời gian đáp ứng trong mô phỏng cũng như trong điều khiển.

+ Mô hình bậc thấp sẽ giảm khối lượng tính toán cần được xử lý, giảm dung lượng lưu trữ dữ liệu nên yêu cầu về tốc độ, dung lượng bộ nhớ của phần cứng trong mô phỏng và điều khiển giảm đi tương ứng là chi phí kinh tế giảm đi hoặc khai thác hiệu quả các hệ thống cũ, các hệ thống có kết cấu nhỏ gọn (do bị hạn chế về không gian và khối lượng) có cấu hình phần cứng thấp. Đồng thời, khi yêu cầu phần cứng trong mô phỏng và điều khiển giảm hay chính là kết cấu phần cứng đơn giản hơn (ít phần tử hơn) thì độ tin cậy của hệ thống sẽ được nâng lên.

Như vậy, mô hình bậc thấp đã giải quyết hài hòa yêu cầu về độ chính xác của mô hình với khả năng tính toán nhanh, độ tin cậy của hệ thống, chi phí kinh tế nhỏ. Từ thực tế này, tìm cách xác định mô hình bậc thấp từ mô hình gốc bậc cao thỏa mãn một số điều kiện nhất định là một yêu cầu cấp thiết và đây chính là hướng nghiên cứu của luận án.

Trong những năm qua, việc nghiên cứu giảm bậc cho hệ tuyến tính bậc cao đã có nhiều kết quả, tuy nhiên các thuật toán đã được đề xuất vẫn còn có những nhược điểm và cần tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện hơn nữa, đặc biệt với hệ tuyến tính không ổn định bậc cao thì các nghiên cứu trước đây còn rất ít và tồn tại nhiều hạn chế. Trong khi đó các mô hình tuyến tính bậc cao có thể không ổn định, nên yêu cầu cấp thiết là thuật toán giảm bậc cần phải có khả năng giảm bậc được cả hệ ổn định và không ổn định. Do đó trong nội dung luận án này, tác giả tập trung nghiên cứu một cách hệ thống bài toán giảm bậc mô hình tuyến tính và từ đó đề xuất thuật toán giảm bậc mô hình tuyến tính mới hoặc hoàn thiện thuật toán giảm bậc mô hình tuyến tính đã được đề xuất để thuật toán có thể giảm bậc được cả hệ ổn định và hệ không ổn định.

3. Mục tiêu của luận án

3.1. Mục tiêu chung

- Đề xuất thuật toán giảm bậc mô hình tuyến tính mới hoặc hoàn thiện thuật toán giảm bậc mô hình tuyến tính đã được đề xuất để thuật toán có thể giảm bậc được cả hệ ổn định bậc cao và hệ không ổn định bậc cao.

- Thực thi ý tưởng đề xuất cho một số bài toán trong lĩnh vực điều khiển- Tự động hóa như: giảm bậc bộ lọc số, giảm bậc mô hình CD player, giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc cao.

3.2. Mục tiêu cụ thể

- Đề xuất chuẩn độ đo mới để đánh giá tính quan trọng của điểm cực trong thuật toán giảm bậc mô hình có hiệu quả hơn. Từ đó xây dựng thuật toán giảm bậc mới cho hệ tuyến tính bậc cao và thuật toán giảm bậc mới cho hệ không ổn định và kiểm chứng hiệu quả và tính đúng đắn của thuật toán qua một số ví dụ.

- Hoàn thiện thuật toán giảm bậc mô hình đã được đề xuất để thuật toán đáp ứng tốt hơn yêu cầu của bài toán giảm bậc hệ tuyến tính không ổn định bậc cao và kiểm chứng hiệu quả và tính đúng đắn của thuật toán qua một số ví dụ.

- Áp dụng thuật toán giảm bậc mới vào một bài toán trong lĩnh vực điều khiển, cụ thể là bài toán giảm bậc bộ điều khiển bậc cao với hai trường hợp là giảm bậc bộ điều khiển bậc cao của hệ thống ổn định góc tải máy phát đồng bộ (thuật toán, mô phỏng) và giảm bậc bộ điều khiển bậc cao của hệ thống điều khiển bền vững xe hai bánh tự cân bằng (có cả thuật toán, mô phỏng và thực nghiệm).

4. Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

5. Ý nghĩa lí luận và thực tiễn

5.1. Ý nghĩa lí luận

- Hai thuật toán giảm bậc mô hình được xây dựng và hoàn thiện trong luận án có thể được sử dụng để đơn giản hóa một mô hình toán học được mô tả bằng hệ phương trình vi phân cấp n về hệ phương trình vi phân cấp $r < n$ mà vẫn giữ lại những đặc tính cần thiết của mô hình gốc như bảo toàn các điểm cực trội, các giá trị Hankel suy biến quan trọng đồng thời quan hệ vào ra của hệ vẫn được đảm bảo sao cho sai số giữa hệ gốc với hệ giảm bậc không lớn hơn một giá trị cho phép. Hai thuật toán này giúp bổ sung lý thuyết về nhận dạng hệ động lực học và thiết kế hệ thống điều khiển trong lĩnh vực điều khiển và điện – điện tử nói chung.

- Ứng dụng hai thuật toán giảm bậc mô hình vào bài toán giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc cao giúp thu được bộ điều khiển bậc thấp mà vẫn đáp ứng được các yêu cầu của bài toán điều khiển bền vững, kết quả này giúp bổ sung lý thuyết thiết kế bộ điều khiển bền vững bậc thấp trong bài toán điều khiển bền vững.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn

- Kết quả nghiên cứu giúp đơn giản hóa các mô hình bộ điều khiển bậc cao hoặc mô hình đối tượng bậc cao từ đó sẽ giảm khối lượng tính toán cần được xử lý (lập trình, cài đặt đơn giản hơn), giảm dung lượng lưu trữ dữ liệu nên yêu cầu về tốc độ xử lý, dung lượng bộ nhớ của phần cứng

trong mô phỏng và điều khiển giảm đi tương ứng là chi phí kinh tế giảm đi hoặc khai thác hiệu quả các hệ thống cũ, các hệ thống có kết cấu nhỏ gọn (do bị hạn chế về không gian và khối lượng) có cấu hình phần cứng thấp mà vẫn đáp ứng được yêu cầu chất lượng mong muốn. Đồng thời, khi yêu cầu phần cứng trong mô phỏng và điều khiển giảm hay chính là kết cấu phần cứng đơn giản hơn (ít phần tử hơn) thì độ tin cậy của hệ thống sẽ được nâng lên.

- Kết quả nghiên cứu sẽ là tài liệu tham khảo cho sinh viên, học viên cao học và nghiên cứu sinh quan tâm nghiên cứu về giảm bậc mô hình và thiết kế bộ điều khiển bền vững bậc thấp. Có khả năng bổ sung phần tự động giảm bậc mô hình hệ tuyến tính ổn định và không ổn định trong toolbox của Matlab – Simulink.

6. Bố cục luận án

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ GIẢM BẬC MÔ HÌNH

1.1. Bài toán giảm bậc mô hình

Cho một hệ tuyến tính, liên tục, tham số bất biến theo thời gian, có nhiều đầu vào, nhiều đầu ra, mô tả trong không gian trạng thái bởi hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\quad (1.1)$$

trong đó, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^q$, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{q \times n}$.

Mục tiêu của bài toán giảm bậc đối với mô hình mô tả bởi hệ phương trình (1.1) là tìm mô hình mô tả bởi hệ phương trình:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_r &= \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{u} \\ \mathbf{y}_r &= \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r\end{aligned}\quad (1.2)$$

trong đó, $\mathbf{x}_r \in \mathbb{R}^r$, $\mathbf{u}_r \in \mathbb{R}^p$, $\mathbf{y}_r \in \mathbb{R}^q$, $\mathbf{A}_r \in \mathbb{R}^{r \times r}$, $\mathbf{B}_r \in \mathbb{R}^{r \times p}$, $\mathbf{C}_r \in \mathbb{R}^{q \times r}$, với $r \ll n$ sao cho mô hình mô tả bởi hệ phương trình (1.2) có thể thay thế mô hình mô tả bởi hệ phương trình (1.1), đồng thời đáp ứng được một số yêu cầu sau:

1. Sai số giảm bậc nhỏ và có thể đánh giá được sai số giảm bậc;
2. Thuật toán giảm bậc cần tính toán hiệu quả, ổn định;
3. Thuật toán giảm bậc có thể thực hiện tự động dựa trên công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc;
4. Các tính chất quan trọng của hệ thống gốc cần được bảo toàn trong hệ giảm bậc như tính ổn định và tính thụ động, ...

5. Phù hợp với từng yêu cầu riêng biệt của từng bài toán giảm bậc.

1.2. Các nghiên cứu giảm bậc trên thế giới

1.2.1. Nhóm phương pháp dựa trên phân tích nhiễu loạn suy biến (SPA)

1.2.2. Nhóm phương pháp dựa trên phân tích phương thức

1.2.3. Nhóm phương pháp dựa trên SVD

1.2.4. Nhóm phương pháp phù hợp thời điểm (MM) hay phương pháp không gian con Krylov (Krylov Methods)

1.2.5. Nhóm phương pháp kết hợp phân tích giá trị suy biến (SVD) và phù hợp thời điểm (MM)

1.2.6. Nhóm các phương pháp khác

1.3. Các nghiên cứu trong nước về giảm bậc

1.4. Những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu về giảm bậc mô hình

Những vấn đề luận án tập trung giải quyết

Luận án của tác giả sẽ tập trung giải quyết hai vấn đề sau:

Vấn đề thứ nhất là đề xuất thuật toán giảm bậc dựa trên phương pháp phân tích phương thức khắc phục được các nhược điểm còn tồn tại trong các tài liệu của Du (2012), Rammos (2007), cụ thể thuật toán sẽ phải giải quyết được các vấn đề sau:

1. Xây dựng và mở rộng tiêu chuẩn đánh giá tính trội của điểm cực có liên hệ trực tiếp với tiêu chuẩn đánh giá sai số giảm bậc và mục tiêu thu được sai số giảm bậc nhỏ;
2. Xác định một chặn trên của sai số giảm bậc;
3. Với cùng sai số giảm bậc nhỏ - bậc của hệ giảm bậc càng nhỏ càng tốt;
4. Có thể bảo toàn các điểm cực trội của hệ gốc trong hệ giảm bậc;
5. Có khả năng giảm bậc được cho cả hệ ổn định và hệ không ổn định;
6. Sử dụng các công cụ toán học phổ biến, độ phức tạp thuật toán nhỏ.

Vấn đề thứ hai là nghiên cứu hoàn thiện thuật toán giảm bậc cho hệ không ổn định theo hướng tiếp cận thứ 2 (cách giảm bậc trực tiếp hệ không ổn định), cụ thể là tác giả nghiên cứu để xác định được công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc của thuật toán chặt cân bằng mở rộng được đề xuất trong tài liệu của Zilochian (1991) để thuật toán có thể thực hiện giảm bậc tự động dựa trên công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc.

1.5. Kết luận chương 1

Trong chương này, tác giả nghiên cứu và đánh giá một cách có hệ thống về các thuật toán giảm bậc mô hình tuyến tính, qua đó cho thấy các

thuật toán đã đề xuất đều có ưu nhược điểm riêng, cần được áp dụng cho các bài toán giảm bậc thích hợp. Đồng thời, các thuật toán giảm bậc mô hình tuyến tính đã đề xuất chủ yếu áp dụng cho hệ tuyến tính ổn định, các thuật toán giảm bậc cho hệ tuyến tính không ổn định là chưa nhiều. Từ đó, tác giả đã đưa ra hai vấn đề mà luận án trung giải quyết là xây dựng một thuật toán giảm bậc mới và hoàn thiện thuật toán đã được đề xuất trong nghiên cứu của Zilochian (1991) để đáp ứng tốt yêu cầu của bài toán giảm bậc mô hình tuyến tính như tồn tại một chặn trên của sai số giảm bậc, bảo toàn điểm cực trội hoặc các trạng thái Hankel quan trọng, sai số giảm bậc nhỏ, đồng thời có thể giảm bậc được cho cả hệ ổn định và hệ không ổn định.

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN GIẢM BẬC MÔ HÌNH

2.1. Giới thiệu

2.2. Các công cụ toán học sử dụng trong các thuật toán giảm bậc mô hình

2.2.1. Phép phân tích ma trận

2.2.1.1. Phép phân tích giá trị suy biến (SVD)

2.2.1.2. Phép phân tích Schur

2.2.1.3. Phép phân tích Cholesky

2.2.2. Gramian điều khiển và quan sát của hệ tuyến tính

2.3. Thuật toán giảm bậc mô hình mới cho hệ ổn định

2.3.1. Tính trội H_∞

$$\mathbf{A}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_n \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{\text{mod}} = [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{C}_2]. \quad (2.7)$$

Trong nghiên cứu Rammos (2007) đưa ra định nghĩa về điểm cực trội như sau: Cho hệ $\mathbf{G}(s)$ có dạng đường chéo như trong (2.7), điểm cực λ_i của $\mathbf{G}(s)$ được gọi là điểm cực trội nếu số hạng tương ứng của nó

$R_i := \frac{\|\mathbf{C}_i \mathbf{B}_i\|_2}{|\text{Re} \lambda_i|}$ là giá trị lớn nhất so với các số hạng $R_j (j \neq i)$ khác. Giá trị

R_i được gọi là thước đo tính trội của điểm cực λ_i .

Công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc theo chuẩn H_∞ của kỹ thuật chặt mô hình được cho bởi Rammos (2007).

$$\|G(s) - G_{red}(s)\|_{H_\infty} \leq \sum_{\lambda_i \notin \Lambda_r} \frac{\|C_i B_i\|_2}{|\operatorname{Re} \lambda_i|} = \sum_{\lambda_i \notin \Lambda_r} R_i. \quad (2.10)$$

2.3.2. Quá trình tam giác hóa

2.3.2.1. Thuật toán đưa hệ về dạng tam giác

Thuật toán 2.3.2. Thuật toán đưa hệ về dạng tam giác

Đầu vào: Hệ gốc (A, B, C) được mô tả như (1.1)

Bước 1: Phân tích Schur của ma trận A : $A = U\Delta U^T$, trong đó U là ma trận unitary và Δ là ma trận tam giác trên.

Bước 2: Tính Gramian quan sát Q từ phương trình Lyapunov sau:

$$\Delta Q + Q\Delta + (CU)^T (CU) = 0 \quad (2.11)$$

Bước 3: Phân tích Cholesky của Q : $Q = R^T R$, trong đó R là ma trận tam giác trên.

Bước 4: Tính ma trận không suy biến $T = UR^{-1}$.

Bước 5: Tính $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}) = (T^{-1}AT, T^{-1}B, CT)$.

Đầu ra: Hệ tương đương $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C})$.

Định nghĩa 1. Hệ thống tương đương $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C})$ trong Thuật toán 2.3.2 được gọi là quá trình tam giác hóa.

Bổ đề 1. Hệ thống tương đương $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C})$ trong Thuật toán 2.3.2 có các tính chất sau:

(a) Ma trận \tilde{A} có dạng tam giác trên,

(b) Gramian quan sát \tilde{Q} là ma trận đơn vị; trong đó \tilde{Q} là nghiệm của phương trình Lyapunov sau:

$$\tilde{A}^T \tilde{Q} + \tilde{Q} \tilde{A} + \tilde{C}^T \tilde{C} = 0, \quad (2.12)$$

2.3.2.2. Phân tích dạng tam giác

Phân tích $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C})$ thành dạng như sau:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ 0 & \tilde{A}_{22} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = [\tilde{C}_1 \quad \tilde{C}_2].$$

Đặt $G_1(s) := \tilde{C}_1 (sI - \tilde{A}_1)^{-1} \tilde{B}_1$ và $G_2(s) := \tilde{C}_2 (sI - \tilde{A}_2)^{-1} \tilde{B}_2$ tương ứng là ma trận truyền của hai hệ con.

Bổ đề 2. Với cách ký hiệu như trên, ta có thể chứng minh:

$$G(s) = G_1(s) + V(s)G_2(s),$$

với $\mathbf{V}(s) := \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{C}}_1 (s\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}_{11})^{-1} \tilde{\mathbf{C}}_1^T$. Hơn nữa, $\mathbf{V}(s)$ có tính chất sau

$$\mathbf{V}^T(-s)\mathbf{V}(s) = \mathbf{I}.$$

Giả sử rằng hệ tương đương tam giác $(\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}})$ có dạng sau:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & * & * \\ & \ddots & * \\ 0 & & \lambda_n \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{B}}_n \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{C}} = [\tilde{\mathbf{C}}_1 \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{C}}_n]. \quad (2.19)$$

$$\text{Đặt } \mathbf{g}_i(s) := \frac{\tilde{\mathbf{C}}_i \tilde{\mathbf{B}}_i}{s - \lambda_i}; \quad i = 1, \dots, n \text{ và } \mathbf{v}_i(s) := \mathbf{I} - \frac{\tilde{\mathbf{C}}_i \tilde{\mathbf{C}}_i^T}{s - \lambda_i}; \quad i = 1, \dots, n.$$

Bổ đề 3. Với cách ký hiệu như trên, ta có thể chứng minh:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{g}_1(s) + \mathbf{v}_1(s)\mathbf{g}_2(s) + \mathbf{v}_1(s)\mathbf{v}_2(s)\mathbf{g}_3(s) + \dots + \mathbf{v}_1(s)\mathbf{v}_2(s)\dots\mathbf{v}_{n-1}(s)\mathbf{g}_n(s). \quad (2.20)$$

với $\mathbf{v}_i(s)$ có tính chất

$$\mathbf{v}_i^T(-s)\mathbf{v}_i(s) = \mathbf{I}; \quad i = 1, \dots, n-1.$$

2.3.2.3. Phân tích chuẩn H_∞ và H_2 trong quá trình tam giác hóa

Bổ đề 4. Giả sử rằng $\mathbf{G}(s)$ có dạng tam giác như trong (2.19). Thì

$$\begin{aligned} \|\mathbf{G}(s)\|_{H_\infty} &\leq \|\mathbf{g}_1(s)\|_{H_\infty} + \|\mathbf{g}_2(s)\|_{H_\infty} + \dots + \|\mathbf{g}_n(s)\|_{H_\infty} \\ &= \frac{\|\tilde{\mathbf{C}}_1 \tilde{\mathbf{B}}_1\|_2}{|\operatorname{Re} \lambda_1|} + \frac{\|\tilde{\mathbf{C}}_2 \tilde{\mathbf{B}}_2\|_2}{|\operatorname{Re} \lambda_2|} + \dots + \frac{\|\tilde{\mathbf{C}}_n \tilde{\mathbf{B}}_n\|_2}{|\operatorname{Re} \lambda_n|}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Bổ đề 5. Giả sử rằng $\mathbf{G}(s)$ có dạng tam giác như trong (2.19). Thì

$$\begin{aligned} \|\mathbf{G}(s)\|_{H_2} &\leq \|\mathbf{g}_1(s)\|_{H_2} + \|\mathbf{g}_2(s)\|_{H_2} + \dots + \|\mathbf{g}_n(s)\|_{H_2} \\ &= \sqrt{\operatorname{trace}(\tilde{\mathbf{B}}_1^T \tilde{\mathbf{B}}_1)} + \sqrt{\operatorname{trace}(\tilde{\mathbf{B}}_2^T \tilde{\mathbf{B}}_2)} + \dots + \sqrt{\operatorname{trace}(\tilde{\mathbf{B}}_n^T \tilde{\mathbf{B}}_n)}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Định nghĩa 2. (Chỉ số trội H_∞ và H_2) Cho hệ thống $\mathbf{G}(s)$ có dạng tam giác như trong (2.19), điểm cực λ_i của $\mathbf{G}(s)$ được gọi là trội H_∞ nếu thông số

tương ứng của nó $R_i := \frac{\|\tilde{\mathbf{C}}_i \tilde{\mathbf{B}}_i\|_2}{|\operatorname{Re} \lambda_i|}$ là giá trị lớn nhất so với các giá trị $R_j, j \neq i$.

Thông số R_i được gọi là chỉ số trội H_∞ của điểm cực λ_i . Tương ứng, điểm cực λ_i của $\mathbf{G}(s)$ được gọi là trội H_2 nếu thông số tương ứng của

nó $S_i := \sqrt{\operatorname{trace}(\tilde{\mathbf{B}}_i^T \tilde{\mathbf{B}}_i)}$ là giá trị lớn nhất so với các giá trị $S_j, j \neq i$. Thông số S_i được gọi là chỉ số trội H_2 của điểm cực λ_i .

Định nghĩa 3. (Chỉ số trội hỗn hợp) Chỉ số $J_i := \max\{R_i, S_i\}$ được gọi là chỉ số trội hỗn hợp tương ứng với điểm cực λ_i , với $i = 1, \dots, n$.

2.3.3. Giảm bậc mô hình dựa trên cắt ngắn tam giác

2.3.3.1. Phân tích chặn trên của sai số giảm bậc theo chuẩn H_∞ và H_2

Định lý 1. Sai số giảm bậc của hệ thỏa mãn các tính chất sau:

$$(a) \quad \|\mathbf{E}(s)\|_{H_\infty} \leq \|\mathbf{G}_2(s)\|_{H_\infty} \leq R_{r+1} + \dots + R_n,$$

$$(b) \quad \|\mathbf{E}(s)\|_{H_2} \leq \|\mathbf{G}_2(s)\|_{H_2} \leq S_{r+1} + \dots + S_n,$$

$$(c) \quad \max\left\{\|\mathbf{E}(s)\|_{H_\infty}, \|\mathbf{E}(s)\|_{H_2}\right\} \leq \max\left\{\|\mathbf{G}_2(s)\|_{H_\infty}, \|\mathbf{G}_2(s)\|_{H_2}\right\} \leq J_{r+1} + \dots + J_n,$$

trong đó $\mathbf{G}_2(s) = \tilde{\mathbf{C}}_2 (s\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}_{22})^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_2$ là hệ con của $\mathbf{G}(s)$ và R_i, S_i, J_i tương ứng là chỉ số trội H_∞, H_2 và hỗn hợp của điểm cực λ_i , với $i = 1, \dots, n$.

2.3.3.2. Sắp xếp điểm cực theo các chỉ số trội

Thuật toán 2.3.3. (Sắp xếp lại điểm cực theo chỉ số trội H_∞, H_2 và hỗn hợp)

Đầu vào: Hệ $(\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}})$ là dạng tam giác của ma trận truyền $\mathbf{G}(s)$ và cũng là đầu ra của thuật toán 2.3.2.

Bước 1: Với mỗi điểm λ_i , với $i = 1, \dots, n$ ta tính toán chỉ số trội H_∞ tương

ứng $R_i = \frac{\|\tilde{\mathbf{C}}_i \tilde{\mathbf{B}}_i\|_2}{|\operatorname{Re} \lambda_i|}$ (hoặc chỉ số trội H_2 tương ứng $S_i = \sqrt{\operatorname{trace}(\tilde{\mathbf{B}}_i^T \tilde{\mathbf{B}}_i)}$), hoặc

chỉ số trội hỗn hợp tương ứng $J_i = \max\{R_i, S_i\}$).

Bước 2: Chọn chỉ số trội H_∞ lớn nhất R_i (tương tự với chỉ số trội H_2 và hỗn hợp).

Bước 3: Sắp xếp lại điểm cực λ_i (và liên hợp của nó $\bar{\lambda}_i$, nếu cần thiết) thành vị trí đầu tiên trên đường chéo của ma trận $\tilde{\mathbf{A}}$ bằng ma trận đơn nhất (unitary matrix) \mathbf{U}_1 :

$$\mathbf{U}_1^T \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} \lambda_i & * & * & * & * \\ & \bar{\lambda}_i & * & * & * \\ & & * & * & * \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & & & * \end{bmatrix}$$

Bước 4: Tính hệ thống tương đương mới $(\mathbf{U}_1^T \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{U}_1, \mathbf{U}_1^T \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{U}_1)$.

Bước 5: Bỏ đi hai hàng và cột đầu tiên của $(U_1^T \tilde{A} U_1, U_1^T \tilde{B}, \tilde{C} U_1)$ ta thu được một hệ thống nhỏ $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$ với kích cỡ $n-2$.

Bước 6: Lặp lại quá trình trên từ bước 1 đến 5 cho hệ thống nhỏ $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$ và tiếp tục vòng lặp cho đến khi tất cả các điểm cực được sắp xếp lại theo độ lớn của chỉ số trội H_∞ , chỉ số trội H_2 hoặc chỉ số trội hỗn hợp.

Đầu ra: Hệ thống $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C})$ đã được sắp xếp các điểm cực theo chỉ số trội H_∞ hoặc H_2 hoặc hỗn hợp trên đường chéo chính của ma trận \tilde{A}

2.3.3.3 Rút gọn hệ tương đương

2.4. Ví dụ giảm bậc hệ tuyến tính ổn định bậc cao

2.4.1. Ví dụ minh họa 1

2.4.2. Ví dụ minh họa 2

2.5. Thuật toán giảm bậc mới cho hệ không ổn định

2.5.1. Thuật toán giảm bậc cho hệ không ổn định theo phương pháp gián tiếp (Cách tiếp cận thứ nhất)

Thuật toán 2.5.1. Thuật toán giảm bậc cho hệ không ổn định theo phương pháp gián tiếp.

Đầu vào: Hệ (A, B, C) được mô tả trong (1.1) (hệ không ổn định).

Bước 1: Chuyển hệ thống về dạng tựa tam giác ta thu được hệ thống có dạng:

$$A_t = \begin{bmatrix} A_{t11} & A_{t12} \\ 0 & A_{t22} \end{bmatrix}, B_t = \begin{bmatrix} B_{t1} \\ B_{t2} \end{bmatrix}, C_t = [C_{t1} \quad C_{t2}],$$

với $A_{t11} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ (với m là các điểm cực ổn định), $A_{t12} \in \mathbb{R}^{m \times (n-m)}$, $A_{t22} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$, $B_{t1} \in \mathbb{R}^{m \times p}$, $B_{t2} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times p}$, $C_{t1} \in \mathbb{R}^{q \times m}$, $C_{t2} \in \mathbb{R}^{q \times (n-m)}$.

Bước 2: Tính S từ phương trình Lyapunov sau:

$$A_{t11} S - S A_{t22} + A_{t12} = 0.$$

Bước 3: Xác định ma trận chuyển trạng thái

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & . & \mathbf{S} \\ \dots & . & \dots \\ 0 & . & \mathbf{I}_{n-r} \end{bmatrix},$$

với \mathbf{I}_m và \mathbf{I}_{n-m} tương ứng là ma trận đơn vị kích thước $m \times m$ và $(n-m) \times (n-m)$.

Bước 4: Tính $(\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{C}_d) = (\mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}_t \mathbf{W}, \mathbf{W}^{-1} \mathbf{B}_t, \mathbf{C}_t \mathbf{W})$.

Bước 5: Phân tách hệ $(\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{C}_d)$ về dạng:

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{d11} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{d22} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{d1} \\ \mathbf{B}_{d2} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_d = [\mathbf{C}_{d1} \quad \mathbf{C}_{d2}],$$

với $\mathbf{A}_{d11} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $\mathbf{A}_{d22} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times (n-m)}$

$\mathbf{B}_{d1} \in \mathbb{R}^{m \times p}$, $\mathbf{B}_{d2} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times p}$, $\mathbf{C}_{d1} \in \mathbb{R}^{q \times m}$, $\mathbf{C}_{d2} \in \mathbb{R}^{q \times (n-m)}$,

Hệ ổn định $(\mathbf{A}_{d11}, \mathbf{B}_{d1}, \mathbf{C}_{d1})$,

Hệ không ổn định $(\mathbf{A}_{d22}, \mathbf{B}_{d2}, \mathbf{C}_{d2})$.

Bước 6: Giảm bậc hệ ổn định $(\mathbf{A}_{d11}, \mathbf{B}_{d1}, \mathbf{C}_{d1})$ theo thuật toán 2.3.2, 2.3.3 và 2.3.4 thu được hệ rút gọn $(\check{\mathbf{A}}_{11}, \check{\mathbf{B}}_1, \check{\mathbf{C}}_1)$.

Đầu ra: Hệ rút gọn $((\check{\mathbf{A}}_{11}, \check{\mathbf{B}}_1, \check{\mathbf{C}}_1) + (\mathbf{A}_{d22}, \mathbf{B}_{d2}, \mathbf{C}_{d2}))$.

Chi tiết thuật toán 2.5.1 đã được công bố trong bài báo số 1 và số 2 của tác giả.

2.5.2. Thuật toán giảm bậc cho hệ không ổn định theo phương pháp trực tiếp (Cách tiếp cận thứ hai)

Định nghĩa 4. Hệ thống (1.1) được gọi là ổn định $-\beta$ nếu phần thực của các điểm cực hệ $\text{real}(\lambda(\mathbf{A})) < \beta$, với β là một số thực không âm ($\beta \geq 0$). Tập hợp các hệ liên tục ổn định $-\beta$ được ký hiệu là \mathbb{C}_β . Chuẩn $H_{\infty, \beta}$ của $\mathbf{G}(s) \in \mathbb{C}_\beta$ được xác định bởi:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{G}(s)\|_{H_{\infty, \beta}} &:= \sup_{\text{real}(\lambda(\mathbf{A})) < \beta} \sigma_{\max}(\mathbf{G}(s)) \\ &= \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \sigma_{\max}(\mathbf{G}(\beta + j\omega)) \end{aligned}$$

Trong đó $\sigma_{\max}(\mathbf{G}(s))$ là giá trị suy biến lớn nhất của $\mathbf{G}(s)$.

Định lý 2: Cho bất kỳ hệ liên tục $\mathbf{G}(s) \in \mathbb{C}_\beta$ được biểu diễn bởi hệ phương trình (1.1), ta xem xét hệ $\mathbf{G}_\beta(s)$ với chuyển đổi $(\mathbf{A}_\beta, \mathbf{B}_\beta, \mathbf{C}_\beta) = (\mathbf{A} - \beta\mathbf{I}, \mathbf{B}, \mathbf{C})$. Thì hệ $\mathbf{G}_\beta(s)$ có các tính chất sau:

(i) \mathbf{G}_β là ổn định tiệm cận.

(ii) Chuẩn H_∞ của $\mathbf{G}_\beta(s)$ là bằng với chuẩn $H_{\infty, \beta}$ của $\mathbf{G}(s)$, ...

$$\|\mathbf{G}_\beta(s)\|_{H_\infty} = \|\mathbf{G}(s)\|_{H_{\infty, \beta}}.$$

Định lý 3: Đặt $\mathbf{G}(s) \in \mathbb{C}_\beta$ và $\hat{\mathbf{G}}_1(s)$ là hệ giảm bậc thu được từ thuật toán 2.5.2. Thì ta thu được công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc như sau:

$$\|\mathbf{G}(s) - \hat{\mathbf{G}}_1(s)\|_{H_{\infty, \beta}} \leq 2(\sigma_{r+1} + \dots + \sigma_n),$$

trong đó $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ là giá trị Hankel suy biến của $\mathbf{G}_\beta(s)$.

2.6. Ví dụ giảm bậc hệ tuyến tính không ổn định bậc cao

2.6.1. Giảm bậc hệ tuyến tính không ổn định theo thuật toán giảm bậc gián tiếp

2.6.2. Giảm bậc hệ tuyến tính không ổn định theo thuật toán giảm bậc trực tiếp

2.7. Kết luận chương 2

Trong chương này, tác giả đã đạt được một số nội dung sau:

1. Giới thiệu một số công cụ toán học thường dùng trong giảm bậc mô hình.

2. Xây dựng một thuật toán giảm bậc mới cho hệ ổn định (**thuật toán 2.3.2, thuật toán 2.3.3**) trên cơ sở bảo toàn các điểm cực trội của hệ gốc trong hệ giảm bậc. Điểm mới quan trọng của thuật toán là đưa ra chỉ số trội H_∞ , chỉ số trội H_2 , chỉ số trội hỗn hợp H_2/H_∞ để đánh giá tính quan trọng của các điểm cực và khả năng sắp xếp được các điểm cực theo các chỉ số trội giảm dần trên đường chéo chính của ma trận \mathbf{A} và đưa ra được công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc. Đồng thời tác giả đưa ra 3 định nghĩa, 1 định lý và 5 bổ đề mới cùng phần chứng minh đầy đủ.

3. Xây dựng thuật toán giảm bậc mới cho hệ không ổn định theo phương pháp giảm bậc gián tiếp (**thuật toán 2.5.1**) là phần mở rộng của thuật toán mới cho hệ ổn định (**thuật toán 2.3.2, thuật toán 2.3.3**) trên cơ sở bảo toàn các điểm cực trội của hệ gốc trong hệ giảm bậc.

4. Đưa ra được 1 định nghĩa và 2 định lý mới cùng phần chứng minh đầy đủ để xác định công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc từ đó hoàn

thiện thuật toán chặt cân bằng mở rộng cho hệ không ổn định theo nghiên cứu của Zilochian (1991) (*thuật toán 2.5.2*).

5. Các ví dụ giảm bậc hệ tuyến tính ổn định bậc cao (mô hình bộ lọc số Zhang (2008), mô hình CD layer Rammos (2007)) và hệ tuyến tính không ổn định bậc cao cho thấy tính đúng đắn và hiệu quả của các thuật toán giảm bậc đã đề xuất.

CHƯƠNG 3. VỀ MỘT ỨNG DỤNG BÀI TOÁN GIẢM BẬC MÔ HÌNH TRONG ĐIỀU KHIỂN

3.1. Giới thiệu

3.2. Ứng dụng giảm bậc trong bài toán điều khiển ổn định góc tải máy phát đồng bộ

Trong nghiên cứu của Trung (2012), tác giả đã thiết kế bộ điều khiển bền vững RH_∞ để ổn định góc tải của máy phát đồng bộ khi máy phát hòa với lưới, kết quả thu được bộ điều khiển có bậc 28 như sau:

$$\mathbf{R}(s) = \frac{\mathbf{N}(s)}{\mathbf{D}(s)}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{N}(s) = & -0.004867s^{28} - 0.7519s^{27} - 58.8s^{26} - 2526s^{25} - 8.35 \cdot 10^4 s^{24} - 2.128 \cdot 10^6 s^{23} \\ & - 4.383 \cdot 10^7 s^{22} - 7.542 \cdot 10^8 s^{21} - 1.108 \cdot 10^{10} s^{20} - 1.411 \cdot 10^{11} s^{19} - 1.527 \cdot 10^{12} s^{18} \\ & - 1.544 \cdot 10^{13} s^{17} - 1.341 \cdot 10^{14} s^{16} - 1.032e^{15} s^{15} - 7.021 \cdot 10^{15} s^{14} - 4.211 \cdot 10^{16} s^{13} \\ & - 2.213 \cdot 10^{17} s^{12} - 1.01 \cdot 10^{18} s^{11} - 3.954 \cdot 10^{18} s^{10} - 1.306 \cdot 10^{19} s^9 - 3.564 \cdot 10^{19} s^8 \\ & - 7.845 \cdot 10^{19} s^7 - 1.348 \cdot 10^{20} s^6 - 1.723 \cdot 10^{20} s^5 - 1.52 \cdot 10^{20} s^4 - 8.162 \cdot 10^{19} s^3 \\ & - 1.984 \cdot 10^{19} s^2 + 3.89 \cdot 10^{16} s - 125.2 \end{aligned}$$

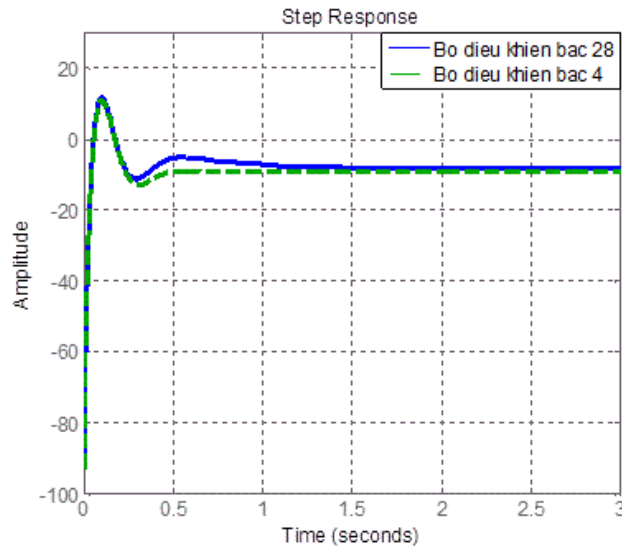
$$\begin{aligned} \mathbf{D}(s) = & 5.25e^{-5} s^{28} + 0.009786s^{27} + 0.8675s^{26} + 48.8s^{25} + 1965s^{24} + 6.056 \cdot 10^4 s^{23} \\ & + 1.49 \cdot 10^6 s^{22} - 3.018 \cdot 10^7 s^{21} + 5.14 \cdot 10^8 s^{20} + 7.483 \cdot 10^9 s^{19} + 9.425 \cdot 10^{10} s^{18} \\ & + 1.035 \cdot 10^{12} s^{17} + 9.968 \cdot 10^{12} s^{16} + 8.432 \cdot 10^{13} s^{15} + 6.266 \cdot 10^{14} s^{14} + 4.079 \cdot 10^{15} s^{13} \\ & + 2.314 \cdot 10^{16} s^{12} + 1.134 \cdot 10^{17} s^{11} + 4.74 \cdot 10^{17} s^{10} + 1.66 \cdot 10^{18} s^9 + 4.762 \cdot 10^{18} s^8 \\ & + 1.085 \cdot 10^{19} s^7 + 1.891 \cdot 10^{19} s^6 + 2.399 \cdot 10^{19} s^5 + 2.062 \cdot 10^{19} s^4 + 1.065 \cdot 10^{19} s^3 \\ & + 2.479 \cdot 10^{18} s^2 - 1.59 \cdot 10^4 s + 2.945 \cdot 10^{-11} \end{aligned}$$

3.2.1. Giảm bậc bộ điều khiển theo thuật toán giảm bậc gián tiếp

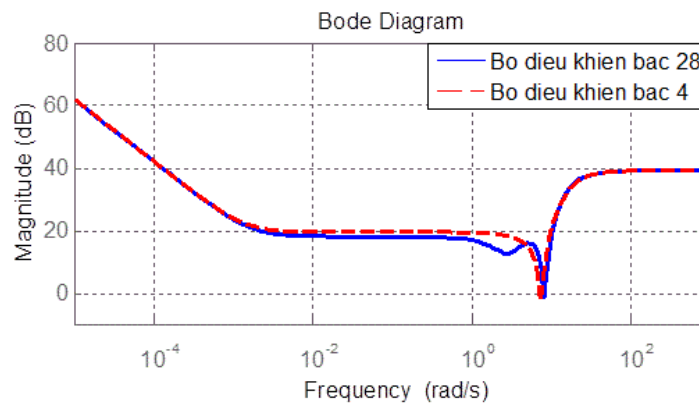
Bảng 3.1. Kết quả giảm bậc bộ điều khiển bậc cao theo thuật toán giảm bậc gián tiếp

Bậc	$\mathbf{R}_r(s)$
-----	-------------------

5	$\frac{-92.89s^5 - 2747s^4 - 2.202 \cdot 10^4 s^3 - 1.515 \cdot 10^5 s^2 - 3.974 \cdot 10^5 s + 1495}{s^5 + 61.72s^4 + 1503s^3 + 1.944 \cdot 10^4 s^2 + 1.167 \cdot 10^5 s - 5.905 \cdot 10^{-16}}$
4	$\frac{-92.89s^4 - 1042s^3 - 4767s^2 - 6.205 \cdot 10^4 s + 85.25}{s^4 + 43.89s^3 + 717.7s^2 + 6651s - 3.366 \cdot 10^{-17}}$



Hình 3.1. Đáp ứng bước nhảy của bộ điều khiển gốc và bộ điều khiển bậc 4

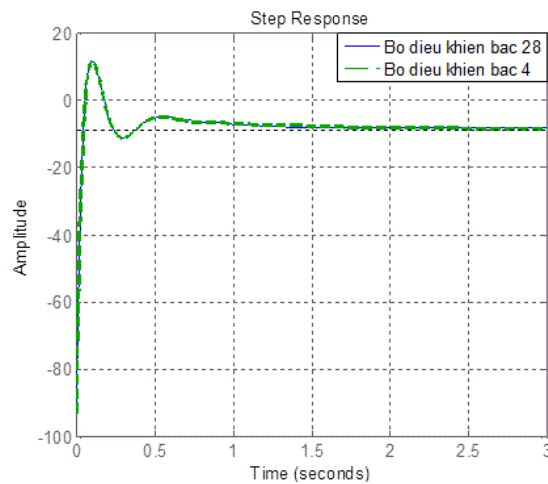


Hình 3.2. Đồ thị bode của bộ điều khiển gốc và bộ điều khiển bậc 4

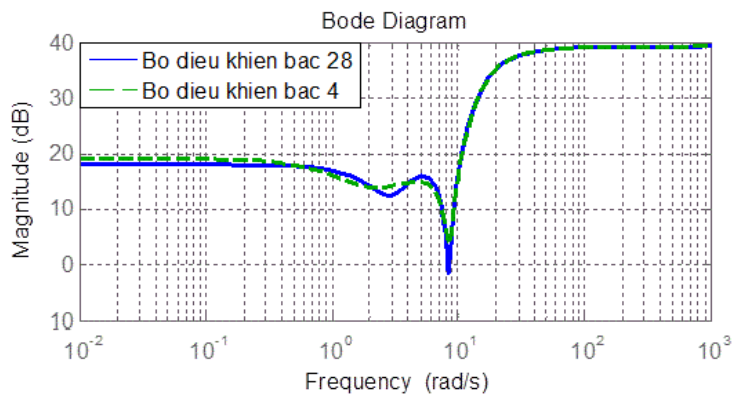
3.2.2. Giảm bậc bộ điều khiển theo thuật toán giảm bậc trực tiếp

Bảng 3.2. Kết quả giảm bậc bộ điều khiển bậc cao theo thuật toán giảm bậc trực tiếp

Bậc	$R_r(s)$
5	$\frac{-92.89s^5 - 438.1s^4 - 7570s^3 - 2.603 \cdot 10^4 s^2 - 3.759 \cdot 10^4 s - 1.26 \cdot 10^4}{s^5 + 36.85s^4 + 557.6s^3 + 4799s^2 + 4428s + 1653}$
4	$\frac{-92.89s^4 - 424s^3 - 7535s^2 - 2.483 \cdot 10^4 s - 3.513 \cdot 10^4}{s^4 + 36.7s^3 + 552.5s^2 + 4720s + 3923}$



Hình 3.3. Đáp ứng bước nhảy của bộ điều khiển gốc và bộ điều khiển bậc 4



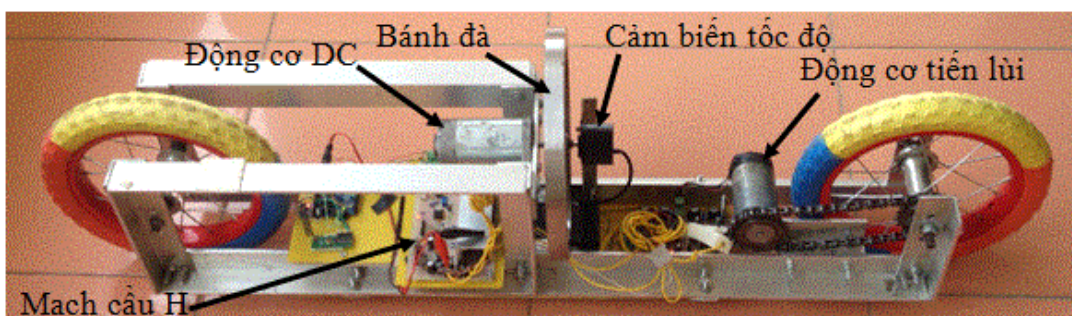
Hình 3.4. Đồ thị bode của bộ điều khiển gốc và bộ điều khiển bậc 4

(* So sánh kết quả giảm bậc bộ điều khiển gốc bậc 28 với kết quả đạt được trong nghiên cứu của Trung (2012)

3.3. Ứng dụng giảm bậc mô hình trong bài toán điều khiển cân bằng xe hai bánh

3.3.1. Bài toán điều khiển cân bằng xe hai bánh

Kết quả của quá trình thiết kế, tác giả thu được mô hình hoàn thiện của xe hai bánh tự cân bằng được thể hiện trong hình 3.5 như sau:



Hình 3.5. Mô hình hoàn thiện của xe hai bánh tự cân bằng

Do tính chất bất định của mô hình xe hai bánh nên tác giả đã thiết kế hệ thống điều khiển bền vững RH_{∞} cho xe hai bánh tự cân bằng thể hiện trong phụ lục 10 và phụ lục 11. Kết quả, tác giả thu được bộ điều khiển như sau:

$$\mathbf{R}(s) = \frac{\mathbf{H}(s)}{\mathbf{D}(s)}$$

với

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(s) = & -2.23 \cdot 10^{-7} s^{30} - 4.67 \cdot 10^{-4} s^{29} - 0.266 s^{28} - 22.96 s^{27} - 1006 s^{26} - 2.853 \cdot 10^4 s^{25} \\ & - 5.837 \cdot 10^5 s^{24} - 4.199 \cdot 10^{11} s^{18} - 9.144 \cdot 10^6 s^{23} - 1.139 \cdot 10^8 s^{22} - 1.158 \cdot 10^9 s^{21} \\ & - 9.776 \cdot 10^9 s^{20} - 6.949 \cdot 10^{10} s^{19} - 2.172 \cdot 10^{12} s^{17} - 9.663 \cdot 10^{12} s^{16} - 3.71 \cdot 10^{13} s^{15} \\ & - 1.231 \cdot 10^{14} s^{14} - 3.53 \cdot 10^{14} s^{13} - 8.74 \cdot 10^{14} s^{12} - 1.862 \cdot 10^{15} s^{11} - 3.398 \cdot 10^{15} s^{10} \\ & - 5.276 \cdot 10^{15} s^9 - 6.903 \cdot 10^{15} s^8 - 7.511 \cdot 10^{15} s^7 - 6.676 \cdot 10^{15} s^6 - 4.721 \cdot 10^{15} s^5 \\ & - 2.556 \cdot 10^{15} s^4 - 9.953 \cdot 10^{14} s^3 - 2.482 \cdot 10^{14} s^2 - 2.977 \cdot 10^{13} s - 0.00439 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(s) = & 4.971 \cdot 10^{-14} s^{30} + 2.032 \cdot 10^{-10} s^{29} + 2.663 \cdot 10^{-7} s^{28} + 1.221 \cdot 10^{-4} s^{27} + 9.72 \cdot 10^{-3} s^{26} \\ & + 0.3918 s^{25} + 10.14 s^{24} + 187.1 s^{23} + 2612 s^{22} + 2.862 \cdot 10^4 s^{21} + 1.088 \cdot 10^7 s^{18} \\ & + 2.523 \cdot 10^5 s^{20} + 1.82 \cdot 10^6 s^{19} + 5.428 \cdot 10^7 s^{17} + 2.273 \cdot 10^8 s^{16} + 8.005 \cdot 10^8 s^{15} \\ & + 2.372 \cdot 10^9 s^{14} + 5.9 \cdot 10^9 s^{13} + 1.225 \cdot 10^{10} s^{12} + 2.107 \cdot 10^{10} s^{11} + 2.962 \cdot 10^{10} s^{10} \\ & + 3.341 \cdot 10^{10} s^9 + 2.941 \cdot 10^{10} s^8 + 1.931 \cdot 10^{10} s^7 + 8.743 \cdot 10^9 s^6 + 2.286 \cdot 10^9 s^5 \\ & + 1.519 \cdot 10^8 s^4 - 5.226 \cdot 10^7 s^3 + 3.6 \cdot 10^{-6} s^2 + 5.32 \cdot 10^{-22} s \end{aligned}$$

3.3.2. Giảm bậc bộ điều khiển bền vững theo thuật toán giảm bậc gián tiếp

Bảng 3.4. Kết quả giảm bậc bộ điều khiển bậc cao

Bậc	Hệ rút gọn $R_r(s)$
5	$\frac{-4.485 \cdot 10^6 s^5 - 6.804 \cdot 10^7 s^4 - 4.123 \cdot 10^8 s^3 - 1.235 \cdot 10^9 s^2 - 1.816 \cdot 10^9 s - 1.09 \cdot 10^9}{s^5 + 2009 s^4 + 1.833 \cdot 10^4 s^3 - 1913 s^2 + 2.165 \cdot 10^{-13} s - 2.804 \cdot 10^{-14}}$
4	$\frac{-4.485 \cdot 10^6 s^4 - 2.65 \cdot 10^7 s^3 - 1.141 \cdot 10^8 s^2 - 1.833 \cdot 10^8 s - 1.176 \cdot 10^8}{s^4 + 2000 s^3 - 206.5 s^2 + 2.369 \cdot 10^{-14} s - 3.026 \cdot 10^{-15}}$

3.3.3. Giảm bậc bộ điều khiển bền vững theo thuật toán giảm bậc trực tiếp

Bảng 3.6. Kết quả giảm bậc bộ điều khiển bậc cao theo thuật toán chặt cân bằng mở rộng

Bậc	Hệ giảm bậc $\hat{R}_1(s)$
5	$\frac{-4.485 \cdot 10^6 s^5 - 6.804 \cdot 10^7 s^4 - 4.123 \cdot 10^8 s^3 - 1.235 \cdot 10^9 s^2 - 1.816 \cdot 10^9 s - 1.09 \cdot 10^9}{s^5 + 2009 s^4 + 1.833 \cdot 10^4 s^3 - 1913 s^2 + 6.614 \cdot 10^{-9} s - 8.44 \cdot 10^{-10}}$

4	$\frac{-4.485 \cdot 10^6 s^4 - 2.655 \cdot 10^7 s^3 - 1.191 \cdot 10^8 s^2 - 1.811 \cdot 10^8 s - 1.182 \cdot 10^8}{s^4 + 2000s^3 - 205.6s^2 - 0.1231s + 0.003463}$
---	---

3.3.4. Áp dụng bộ điều khiển giảm bậc điều khiển cân bằng xe hai bánh

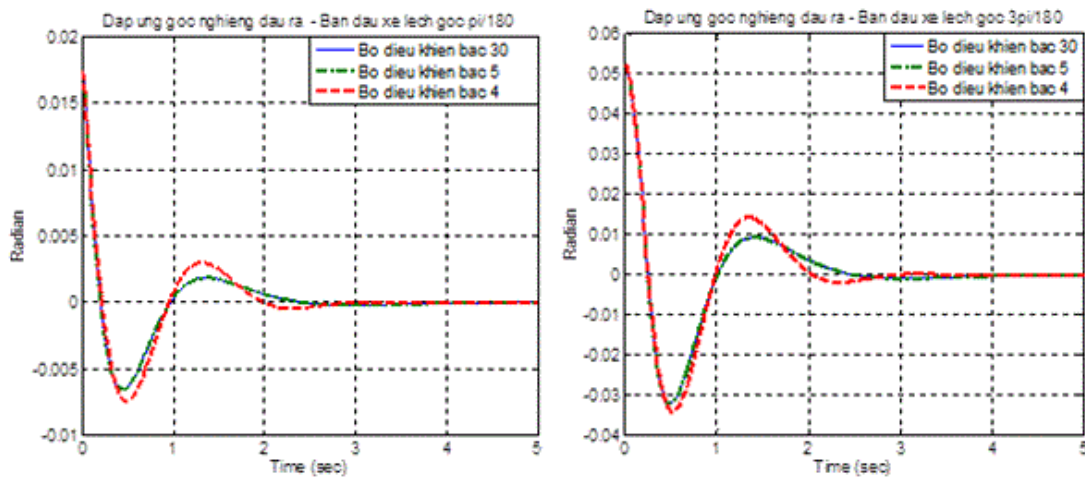
3.3.4.1. Theo thuật toán giảm bậc gián tiếp

Kết quả mô phỏng:

- Khi các thông số của mô hình xe hai bánh là danh định (bảng 9.1 trong phụ lục 9) và ban đầu xe lệch khỏi phương thẳng đứng một góc

$\theta = \left(\frac{\pi}{180} \div \frac{3\pi}{180} \right) (rad)$ thì kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển cân bằng

xe được thể hiện trên hình 3.7 như sau:



(a)

(b)

Hình 3.7. Đáp ứng đầu ra của hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển góc và bộ điều khiển bậc 5, bậc 4

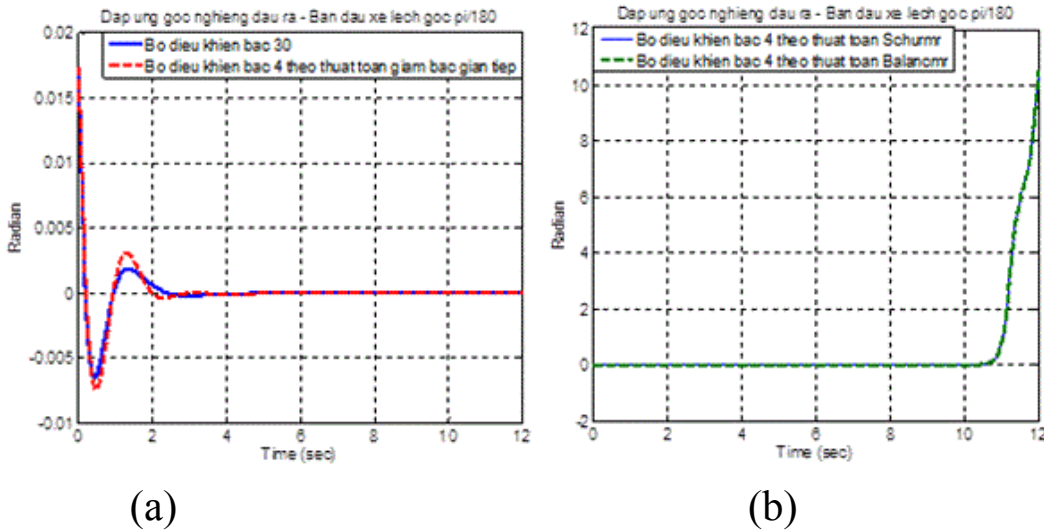
(*) **So sánh** hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển góc, bộ điều khiển giảm bậc theo phương pháp giảm bậc mới và bộ điều khiển giảm bậc theo các phương pháp giảm bậc khác.

Kết quả mô phỏng

- Khi các thông số của mô hình xe hai bánh là danh định (bảng 9.1 trong phụ lục 9) và ban đầu xe lệch khỏi phương thẳng đứng một góc

$\theta = \frac{\pi}{180} (rad)$ thì kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển cân bằng xe được

thể hiện trên hình 3.9 như sau:

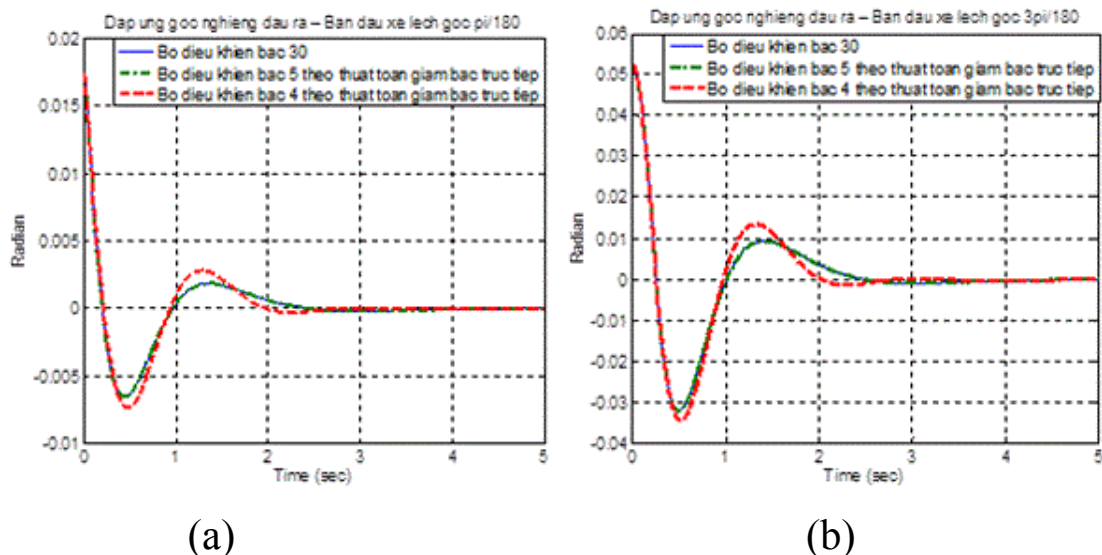


Hình 3.9. Đáp ứng đầu ra của hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển góc và các bộ điều khiển bậc 4

3.3.4.2. Theo thuật toán giảm bậc trực tiếp

Kết quả mô phỏng:

- Khi các tham số của mô hình xe hai bánh là danh định (bảng 9.1 trong phụ lục 9) và ban đầu xe lệch khỏi phương thẳng đứng một góc $\theta = \left(\frac{\pi}{180} \div \frac{3\pi}{180} \right) (rad)$ thì kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển cân bằng xe được thể hiện trên hình 3.15 như sau:

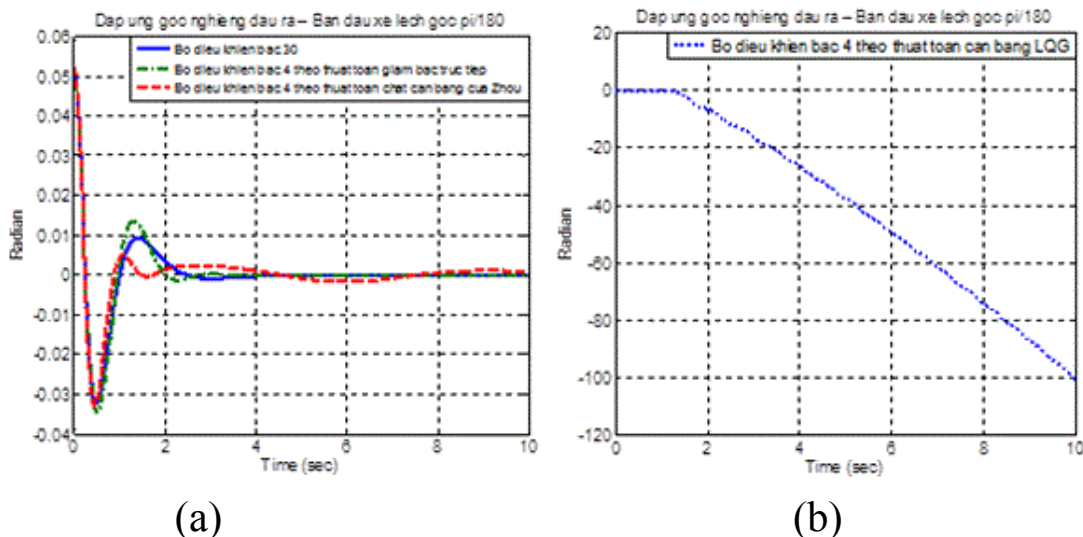


Hình 3.15. Đáp ứng đầu ra của hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển góc và bộ điều khiển bậc 5, bậc 4

(*) **So sánh** hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển góc, bộ điều khiển giảm bậc theo phương pháp giảm bậc trực tiếp và các phương pháp giảm bậc khác.

Kết quả mô phỏng:

- Khi các thông số của mô hình xe hai bánh là danh định (bảng 9.1 trong phụ lục 9) và ban đầu xe lệch khỏi phương thẳng đứng một góc $\theta = \frac{\pi}{180}$ (rad). thì kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển cân bằng xe được thể hiện trên hình 3.17a và 3.17b.



Hình 3.17. Đáp ứng đầu ra của hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển góc và các bộ điều khiển bậc 4

3.4. Kết luận chương 3

Trong nội dung chương 3, tác giả đã đạt được một số kết quả sau:

1. Áp dụng các thuật toán giảm bậc đã được đề xuất để giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc 28 của hệ thống ổn định góc tải của máy phát đồng bộ trong nghiên cứu của Trung (2012) cho thấy có thể sử dụng bộ điều khiển bậc 4 thay thế bộ điều khiển gốc bậc 28 mà chất lượng hệ thống điều khiển vẫn được đảm bảo. Mặt khác, các bộ điều khiển giảm bậc theo các thuật toán mới đều có bậc **nhỏ hơn** bậc của bộ điều khiển thu được theo thuật toán cân bằng ngẫu nhiên trong nghiên cứu của Trung (2012), bậc bộ điều khiển thấp hơn đem lại hiệu quả là lập trình điều khiển đơn giản hơn, tốc độ đáp ứng của hệ thống tốt hơn, khả năng điều khiển thực tốt hơn, chi phí cho phần cứng hệ thống giảm đi so với kết quả trong nghiên cứu của Trung (2012).
2. Áp dụng thuật toán giảm bậc gián tiếp và trực tiếp mới để giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc 30 của hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh cho thấy: Sử dụng bộ điều khiển bậc 5, bậc 4 điều khiển xe hai bánh tự cân bằng (mô hình xe được xây dựng trong phòng thí nghiệm) cho chất lượng đáp ứng đầu ra **tương đương** hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển gốc bậc 30 nên có thể sử dụng

bộ điều khiển bậc 5, bậc 4 thay thế bộ điều khiển góc bậc 30 để điều khiển cân bằng xe hai bánh mà chất lượng (mô phỏng) hệ thống điều khiển cân bằng vẫn được đảm bảo.

3. Hệ thống điều khiển xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển bậc 4 theo thuật toán mới có thể điều khiển cân bằng xe hai bánh trong khi hệ thống điều khiển sử dụng bộ điều khiển bậc 4 theo thuật toán chặt cân bằng của Moore (*balancmr*) và thuật toán chặt cân bằng Schur (*schumr*) không có khả năng điều khiển cân bằng xe hai bánh.
4. Sử dụng bộ điều khiển bậc 4 theo thuật toán chặt cân bằng mở rộng điều khiển cân bằng xe hai bánh cho cho chất lượng đáp ứng đầu ra *tốt hơn* hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển bậc 4 theo thuật toán cân bằng LQG và hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển bậc 4 theo thuật toán chặt cân bằng của Zhou.
5. Các kết quả mô phỏng cho thấy tính đúng đắn của 2 thuật toán giảm bậc và khả năng áp dụng 2 thuật toán để giảm bậc bộ điều khiển bậc cao trong bài toán điều khiển bền vững.

CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM

4.1. Hệ thống thực nghiệm điều khiển xe hai bánh tự cân bằng

Hệ thống thực nghiệm điều khiển cân bằng xe hai bánh được thể hiện trên hình 4.16 như sau:

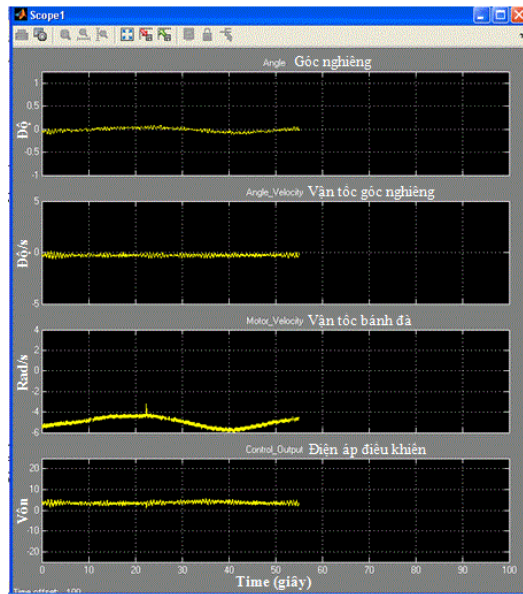


Hình 4.16. Sơ đồ bàn thực nghiệm điều khiển xe hai bánh tự cân bằng

4.2. Kết quả thực nghiệm

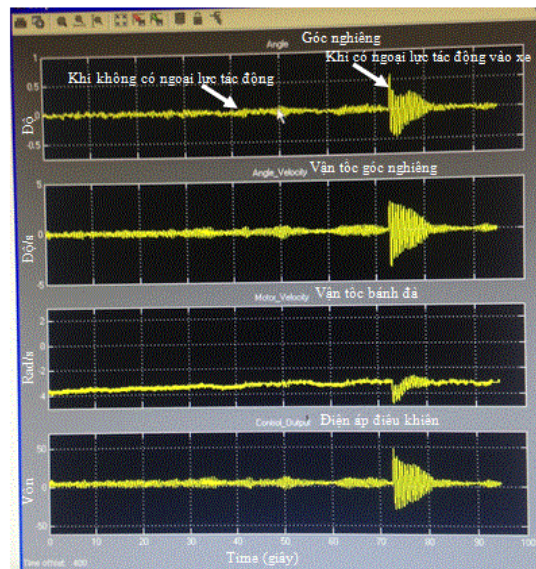
Kết quả thực nghiệm như sau:

- Hoạt động của xe hai bánh khi không mang tải được thể hiện trong hình 4.17.



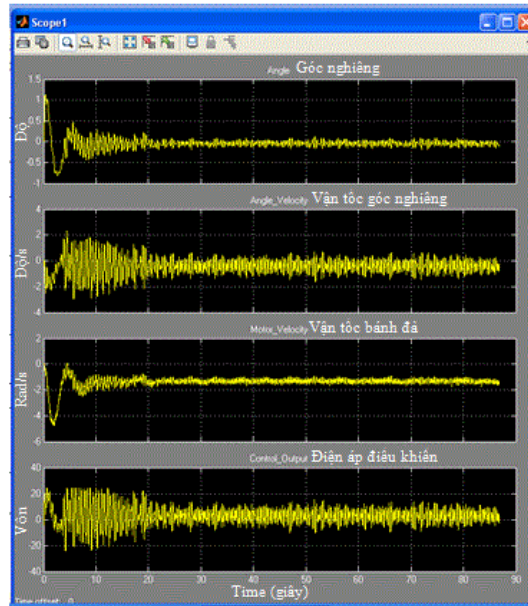
Hình 4.17. Đáp ứng của hệ thống xe hai bánh tự cân bằng khi không mang tải

- Hoạt động của xe hai bánh tự cân bằng khi chịu tác động của ngoại lực được thể hiện trong hình 4.18 như sau:

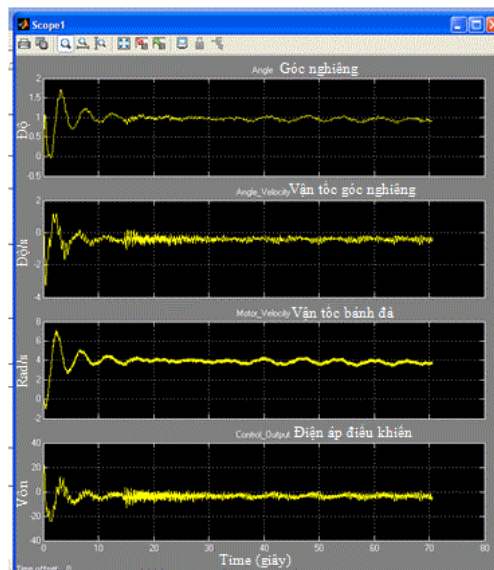


Hình 4.18. Đáp ứng của hệ thống xe hai bánh tự cân bằng khi tác động lực vào xe hai bánh

Đáp ứng của xe hai bánh khi mang tải được thể hiện trong hình 4.20 như sau:

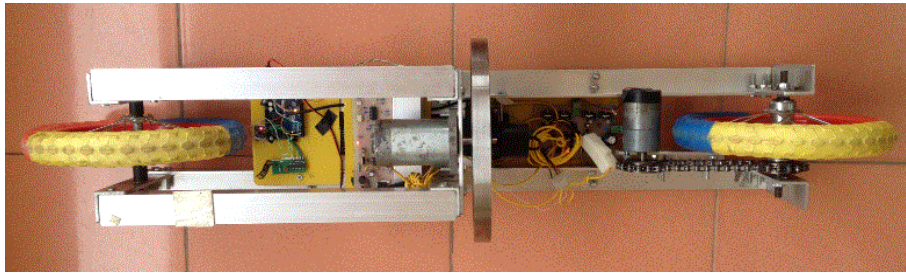


Hình 4.20. Đáp ứng của hệ thống xe hai bánh tự cân bằng khi xe mang tải
Đáp ứng của xe hai bánh khi mang tải được thể hiện trong hình 4.22 như sau:



Hình 4.22. Đáp ứng của hệ thống xe hai bánh tự cân bằng khi mang tải
lệch tâm

- Sau khi thực nghiệm điều khiển xe hai bánh bằng Matlab – Simulink qua kết nối trực tiếp với bo mạch Arduino, tác giả đã viết Code phần điều khiển và nạp trực tiếp vào Arduino để xe tự hoạt động (Phần phụ lục 12 *ABRB_alone.ino*). Kết quả thực nghiệm điều khiển xe hai bánh tự cân bằng được thể hiện trong hình 4.23 như sau:



Hình 4.23. Hình ảnh xe hai bánh tự cân bằng khi không mang tải

Nhận xét: Kết quả thực nghiệm khi nạp chương trình điều khiển vào Arduino để xe hoạt động độc lập cho thấy xe hai bánh có khả năng cân bằng ổn định khi xe đứng yên, khi xe chuyển động thẳng.

4.3. Kết luận chương 4

Trong nội dung chương 4 tác giả đã đạt được một số nội dung sau:

1. Xây dựng và kết nối hệ thống thực nghiệm điều khiển xe hai bánh tự cân bằng (mô hình xe được xây dựng trong phòng thí nghiệm) gồm mô hình xe hai bánh và máy tính bàn có cài đặt phần mềm Matlab – Simulink.
2. Thực nghiệm điều khiển xe hai bánh tự cân bằng (mô hình xe được xây dựng trong phòng thí nghiệm) sử dụng bộ điều khiển bền vững giảm bậc thông qua kết nối giữa bo mạch Arduino trên mô hình xe hai bánh với phần mềm Matlab – Simulink trên máy tính bàn cho thấy xe có khả năng cân bằng khi xe không mang tải, khi xe chịu tác động của ngoại lực, khi xe mang tải (cân bằng hai phía) và khi xe mang tải lệch tâm. Thực nghiệm khi nạp mã chương trình vào Arduino cho thấy xe hai bánh tự cân bằng có thể hoạt động độc lập (không kết nối bo mạch Arduino trên mô hình xe hai bánh với phần mềm Matlab – Simulink trên máy tính bàn) và đảm bảo cân bằng ổn định.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu của luận án đã có một số kết quả như sau:

1. Xây dựng một thuật toán giảm bậc mới có khả năng giảm bậc được hệ tuyến tính ổn định. Trong đó, tác giả đã đưa ra 3 tiêu chuẩn đánh giá (đo) tính quan trọng (tính trội) của các điểm cực và xây dựng thuật toán giảm bậc mới cho hệ ổn định bằng cách chuyển ma trận A của hệ gốc về dạng tam giác trên đồng thời đánh giá và sắp xếp các điểm cực theo tính quan trọng (tính trội) giảm dần trên đường chéo chính của ma trận A dựa trên 3 tiêu chuẩn đánh giá điểm cực, bằng cách này, tác giả có thể bảo toàn được các điểm cực quan trọng của hệ gốc trong hệ giảm bậc đồng thời thu được sai số giảm bậc nhỏ. Thuật toán mới này cũng được mở rộng áp dụng giảm bậc cho hệ không ổn định theo phương pháp gián tiếp. Song song với

đó, tác giả cũng đưa ra được một định lý mới xác định công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc, 5 bổ đề mới và các ví dụ minh họa (giảm bậc bộ lọc số, mô hình CD player và mô hình tuyến tính bậc cao không ổn định) để minh chứng tính đúng đắn và hiệu quả của thuật toán mới.

2. Xác định công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc cho thuật toán chặt cân bằng mở rộng trong nghiên cứu của Zilochian (1991) để giảm bậc hệ không ổn định giúp việc đánh giá sai số giảm bậc dễ dàng hơn cũng như giúp thuật toán có thể thực hiện giảm bậc tự động dựa vào công thức tính chặn trên của sai số giảm bậc. Đồng thời, tác giả cũng đưa ra được 2 định lý mới và một ví dụ giảm bậc mô hình tuyến tính không ổn định để chứng minh tính đúng đắn và hiệu quả của thuật toán.

3. Minh họa hiệu quả của hai thuật toán giảm bậc thông qua việc giảm bậc bộ điều khiển bậc cao cho kết quả:

+ Với bài toán thứ nhất: Giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc cao trong bài toán điều khiển bền vững góc tải của máy phát đồng bộ trong hệ thống điện (nghiên cứu của Trung (2012)) cho thấy có thể sử dụng bộ điều khiển bậc 4 thay thế bộ điều khiển góc bậc 28 mà chất lượng hệ thống điều khiển vẫn được đảm bảo, đồng thời bộ điều khiển bậc 4 theo các thuật toán mới đều có bậc *nhỏ hơn* bậc của bộ điều khiển giảm bậc (bậc 6) thu được trong nghiên cứu của Trung (2012). Các kết quả đã được kiểm chứng qua mô phỏng trên máy tính.

+ Với bài toán thứ hai: Giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc cao trong bài toán điều khiển xe hai bánh tự cân bằng (mô hình xe hai bánh được xây dựng trong phòng thí nghiệm) cho thấy có thể sử dụng bộ điều khiển bậc 5, bậc 4 thay thế bộ điều khiển bền vững bậc cao (bậc 30) mà chất lượng hệ thống điều khiển vẫn đảm bảo được yêu cầu ổn định bền vững của hệ thống. Và đương nhiên việc sử dụng bộ điều khiển bậc 4, bậc 5 sẽ giúp mã lập trình điều khiển đơn giản hơn, tăng tốc độ đáp ứng của hệ thống, đảm bảo được yêu cầu điều khiển thời gian thực. Các kết quả đã được kiểm chứng qua mô phỏng trên máy tính và thực nghiệm trên mô hình xe hai bánh.

2. Kiến nghị

1. Nghiên cứu ứng dụng hai thuật toán giảm bậc mô hình mới để giải quyết các bài toán giảm bậc mô hình khác trong lĩnh vực điều khiển như giảm bậc mô hình đối tượng bậc cao, ...

2. Xây dựng toolbox của hai thuật toán giảm bậc trong Matlab – Simulink.