

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN

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

NGUYỄN THỊ MAI HƯƠNG

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN
DỰ BÁO THEO MÔ HÌNH CHO ĐỐI TƯỢNG
PHI TUYẾN LIÊN TỤC**

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 – 2016

Công trình được hoàn thành tại:

Trường Đại học Kỹ Thuật Công nghiệp – ĐHTN

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS Lại Khắc Lãi

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 2016

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện quốc gia
- Trung Tâm học liệu - Đại học Thái Nguyên
- Thư viện Trường ĐH Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Điều khiển dự báo (ĐKDB) dựa trên mô hình cho hệ tuyến tính đã được phát triển, chấp nhận và ứng dụng cho các ngành công nghiệp quá trình và một số lĩnh vực khác. Đối với quá trình phi tuyến đặc biệt là vừa phi tuyến và vừa có nhiễu thì các phương pháp ĐKDB áp dụng cho hệ tuyến tính hoàn toàn không sử dụng được. Hai vấn đề khó khăn chính đối với ĐKDB dựa trên mô hình phi tuyến đó là:

- Nhận dạng đối tượng điều khiển hay xây dựng mô hình dự báo
- Giải một bài toán tối ưu phi tuyến với rất nhiều ràng buộc.

Bài toán tối ưu (BTTU) hóa với các điều kiện ràng buộc đôi khi không tìm được lời giải, những trường hợp như vậy thuật toán điều khiển trở nên không khả thi. Vì không có một giải pháp mang tính tổng quát cho nên trong các nghiên cứu thường dùng các phương pháp quy hoạch phi tuyến phổ biến như SQP, giải thuật di truyền (GA), v.v. Do vậy khối lượng tính toán của NMPC sử dụng phương pháp số cũng nặng hơn nhiều so với MPC tuyến tính.

Nếu sử dụng MHDB phi tuyến thì với BTND cho hệ phi tuyến, đặc biệt là cho hệ phi tuyến có tham số bất định sẽ gặp rất nhiều khó khăn vì phải đụng chạm đến vấn đề giải bài toán tối ưu phi tuyến với nhiều ràng buộc và hạn chế, do đó cần phải trả lời các câu hỏi:

- Bài toán tối ưu phi tuyến đó có giải được không? Hiện nay cũng chưa có phương pháp giải BTTU phi tuyến tổng quát, hiện tại mới chỉ có phương pháp điều khiển tối ưu là quy hoạch động Bellman, nguyên lý cực đại của Pontragin, phương pháp biến phân.
- Tầm dự báo của bộ ĐKDB là bao nhiêu để hệ thống kín còn đảm bảo tính ổn định?
- Tính ổn định của hệ kín ra sao khi cửa sổ dự báo tiến đến vô cùng?
- Hệ thống kín có đảm bảo về thời gian tính toán để thỏa mãn tính thời gian thực trong điều khiển công nghiệp?

Từ các phân tích ở trên, ta thấy rằng đối với ĐKDB hệ phi tuyến nói chung còn rất nhiều vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu, hoàn thiện:

- Xây dựng MHDB phản ánh trung thực đối tượng phi tuyến.

- Chọn phẩm hàm mục tiêu phù hợp cho từng đối tượng, đặc biệt khi các mục tiêu đối nghịch nhau cần phải có giải pháp "thỏa hiệp" giữa các mục tiêu để chọn được phẩm hàm mục tiêu phù hợp nhất;
- Tìm ra các phương pháp mới giải bài toán tối ưu phi tuyến và cài đặt chúng vào bộ ĐKDB.

2. Mục tiêu của đề tài nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu đề xuất thuật toán mới giải bài toán tối ưu trong hệ thống ĐKDB phi tuyến MIMO.

Mục tiêu cụ thể của luận án là:

- Nghiên cứu phương pháp luận nhằm xây dựng bộ ĐKDB cho hệ phi tuyến (nói chung) và hệ song tuyến (nói riêng).
- Đề xuất thuật toán mới giải BTTU trong hệ MPC phi tuyến. Trong đó: khối tối ưu hóa xây dựng trên nền quy hoạch phi tuyến được áp dụng cho mô hình không liên tục của đối tượng. Đề xuất một khối tối ưu hóa áp dụng PPBP để áp dụng cho mô hình liên tục. Cả hai khối tối ưu hóa này được mở rộng sang ĐKTU bám các quỹ đạo đặt cho trước, chứ không đơn thuần là ĐK ổn định. Đưa ra các TTĐK cho một lớp các đối tượng phi tuyến.
- Khảo sát hệ thống TRMS và cài đặt thuật toán ĐKDB trên vào đối tượng cụ thể là hệ TRMS và mô phỏng kiểm chứng.

3. Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu của luận án

- **Đối tượng nghiên cứu:** Hệ thống ĐKDB theo mô hình phi tuyến, các thuật toán giải bài toán tối ưu trong ĐKDB phi tuyến; hệ thống Twin Rotor Mimo System (TRMS).

- Phạm vi nghiên cứu:

+ Nghiên cứu, thiết kế bộ ĐKDB phản hồi trạng thái hệ phi tuyến bám theo tín hiệu đầu ra mẫu với cửa sổ dự báo hữu hạn sử dụng thuật toán SQP để giải bài toán tối ưu.

+ Nghiên cứu, thiết kế bộ ĐKDB phản hồi trạng thái để tín hiệu ra bám theo tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ phi tuyến liên tục với cửa sổ dự báo vô hạn sử dụng phương pháp biến phân để giải bài toán tối ưu.

+ Mô phỏng và thực nghiệm kiểm chứng kết quả nghiên cứu lý thuyết trên đối tượng TRMS (chưa kể đến tác động của nhiễu và xử lý tác động xen kênh).

- Phương pháp nghiên cứu:

+ Nghiên cứu lý thuyết: Phân tích, đánh giá các nghiên cứu đã được công bố trên các bài báo, tạp chí, các tài liệu tham khảo về ĐKDB cho hệ phi tuyến; Các phương pháp giải BTTU trong ĐKDB. Nghiên cứu, thiết kế bộ ĐKDB phản hồi trạng thái bám tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ phi tuyến không liên tục và liên tục khi cửa sổ DB hữu hạn và vô hạn.

+ Mô phỏng trên Matlab - Simulink để kiểm chứng lại lý thuyết.

+ Thực nghiệm trên hệ thống phi tuyến để kiểm chứng kết quả nghiên cứu lý thuyết.

4. Những đóng góp chính của luận án

- Xây dựng PP luận để thiết kế bộ ĐKDB cho hệ phi tuyến và đề xuất 1 giải pháp mới trong chiến lược tối ưu hóa của ĐKDB hệ phi tuyến, đó là: ĐKDB phi tuyến trên nền PPBP. Đã phát biểu và chứng minh định lý về tính bám ổn định theo tín hiệu ra mẫu cho hệ phi tuyến liên tục khi cửa sổ dự báo tiến đến vô cùng.

- Xây dựng mô hình toán hệ thống TRMS trên cơ sở định luật Newton 2, trong đó có kể đến biến dạng đàn hồi của các chi tiết cơ khí của hệ thống. Cài đặt bộ ĐKDB sử dụng thuật toán 2.1 và thuật toán 3.1 để điều khiển hệ thống TRMS và mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink.

- Cài đặt thuật toán mới mà luận án đưa ra và thực hiện điều khiển đối tượng thực tại phòng thí nghiệm Điện - Điện tử trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, thông qua đó đã kiểm chứng và khẳng định tính khả thi của thuật toán đề xuất.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

5.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án đưa ra phương pháp luận và đề xuất 1 thuật toán mới trong chiến lược tối ưu hóa bộ điều khiển dự báo hệ phi tuyến MIMO, góp phần bổ sung, làm phong phú thêm khối kiến thức về điều khiển hệ phi tuyến.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn

- Thuật toán mới đề xuất đã được kiểm nghiệm qua mô phỏng và thực nghiệm trên hệ thống thực, qua đó khẳng định tính khả thi của thuật toán mà luận án đề xuất.
- Kết quả nghiên cứu của luận án đã giảm được thời gian tính toán khi giải bài toán tối ưu trong chiến lược tối ưu hóa của điều khiển dự báo đã khẳng định tính khả thi của bộ điều khiển sử dụng trong các hệ thống công nghiệp;
- Kết quả nghiên cứu của luận án sẽ là tài liệu tham khảo cho sinh viên, học viên cao học và NCS ngành ĐK và tự động hóa quan tâm nghiên cứu về thiết kế bộ ĐKDB cho hệ phi tuyến. Có khả năng bổ sung phần cài đặt thuật toán về bộ ĐKDB cho cho hệ phi tuyến khi của số dự báo tiến ra vô cùng trong toolbox của Matlab – Simulink.

6. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và phụ lục nội dung của luận án được trình bày trong bốn chương:

Chương 1. Tổng quan về ĐKDB cho hệ phi tuyến

Chương 2. ĐKDB hệ phi tuyến trên nền các phương pháp quy hoạch phi tuyến

Chương 3. Đề xuất một phương pháp mới để ĐKDB hệ phi tuyến liên tục trên nền biến phân

Chương 4. Thực nghiệm kiểm chứng chất lượng phương pháp đã đề xuất trên đối tượng TRMS

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO CHO HỆ PHI TUYẾN

1.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu về ĐKDB hệ phi tuyến trên thế giới

Điều khiển dự báo dựa trên mô hình phi tuyến (Nonlinear Model Predictive Control - NMPC) trong thời gian qua đã thu hút những nghiên cứu của nhiều tác giả trong và ngoài nước. Ngày nay các

nghiên cứu về NMPC tập trung chính vào tính ổn định, tính bền vững trong khi các vấn đề về thời gian tính toán lại chưa được quan tâm đúng mức.

Những năm gần đây, điều khiển dự báo (MPC) là một trong các kỹ thuật tính toán điều khiển tối ưu hiện đại, đang phát triển mạnh cả lĩnh vực lý thuyết và ứng dụng, và đã có được vị trí quan trọng trong lĩnh vực điều khiển nói chung và trong điều khiển các quá trình công nghiệp nói riêng là do MPC có những ưu điểm nổi bật như:

- Phù hợp với một lớp rất rộng các bài toán điều khiển, từ quá trình có hằng số thời gian lớn và thời gian trễ lớn, đến những hệ phi tuyến biến đổi nhanh,
- Áp dụng được cho các quá trình có số lượng lớn các biến điều khiển và biến được điều khiển,
- Dễ dàng đáp ứng được các bài toán điều khiển có ràng buộc cả về trạng thái và tín hiệu điều khiển,
- Các đối tượng điều khiển thay đổi và sự cố thiết bị.
- Là bài toán dựa trên nền tối ưu nên có khả năng nâng cao tính bền vững của hệ thống đối với sai lệch mô hình và nhiễu.

Theo thống kê của Qin (2000) đã có hơn 3000 ứng dụng của MPC đã được thương mại hóa trong các lĩnh vực khác nhau bao gồm: công nghệ lọc hóa dầu, công nghệ chế biến thực phẩm, công nghệ ô tô, công nghệ không gian, công nghệ bột giấy và giấy v.v.

Hầu hết các đối tượng cần ĐK trong thực tế đều phi tuyến, để điều khiển đối tượng phi tuyến, việc trước tiên phải xây dựng mô hình, các mô hình phi tuyến cần phải tiến hành mô hình hóa bằng cách sử dụng giải tích xấp xỉ hoặc trí tuệ nhân tạo dựa trên kinh nghiệm như mạng *neuron* và *wavelet*. Mỗi một lớp mô hình có những ưu, nhược điểm riêng. Nhiều trường hợp các mô hình phi tuyến có thể được biểu diễn trọn vẹn khi sử dụng mô hình tuyến tính nhiều biến hoặc mô hình tuyến tính thích nghi.

Việc ĐKDB cho hệ phi tuyến cũng được các tác giả sử dụng các PP khác nhau như: ĐKDB có cửa sổ DB hữu hạn, ĐKDB có cửa sổ DB gần như vô hạn, ĐKDB dùng mô hình không gian trạng thái, ĐKDB thích nghi, ĐKDB min – max, ĐKDB bền vững, ĐKDB phản hồi đầu ra bền vững...

Tác giả Akabar Rahideh (2009) đã đề cập tương đối đầy đủ và chi tiết về hệ phi tuyến TRMS, khi xây dựng bộ ĐKDB để điều khiển đối tượng phi tuyến TRMS trong luận án trên còn giới hạn ở phạm vi nghiên cứu cụ thể sau:

- Mới sử dụng duy nhất phương pháp SQP giải bài toán tối ưu để tìm giá trị cực tiểu của hàm mục tiêu. Đây là một trong các phương pháp thuộc quy hoạch phi tuyến để giải bài toán tối ưu.
- Xét tính ổn định của hệ thống phi tuyến TRMS dựa trên phương pháp ràng buộc điểm cuối, đưa ra hàm phạt nhưng chưa chỉ ra quy luật tìm hàm phạt đó như thế nào.
- Cửa sổ dự báo hữu hạn ($N_p = 20$; $N_c = 15$).

Trong ĐKDB một trong hai công việc vô cùng quan trọng là phải giải BTTU phi tuyến với các ràng buộc. Ở hầu hết các công trình nghiên cứu về ĐKTU cho hệ phi tuyến các tác giả đã sử dụng 2 chiến lược giải BTTU cơ bản là: QHPT và ĐKTU.

1.2. Các phương pháp quy hoạch phi tuyến

1.2.1. Phi tuyến không bị ràng buộc

1.2.1.1. Các phương pháp Line search gồm: PP Gradient, PP Newton-Raphson (Quasi Newton), PP Gauss – Newton

+ *Ưu điểm:* đơn giản, dễ cài đặt...

+ *Nhược điểm:* có thể tìm được nghiệm tối ưu địa phương, không tìm được nghiệm tối ưu toàn cục.

1.2.1.2. Tìm không theo hướng gồm: Phương pháp Levenberg – marquardt, Phương pháp miền tin cậy

+ *Ưu điểm:* đơn giản, dễ cài đặt...

+ *Nhược điểm:* có thể tìm được nghiệm tối ưu địa phương, không tìm được nghiệm tối ưu toàn cục.

1.2.2. Bài toán tối ưu hóa phi tuyến bị ràng buộc gồm: Kỹ thuật hàm phạt và hàm chặn, Phương pháp SQP và GA

+ *Ưu điểm:* Dễ dàng xử lý được các điều kiện ràng buộc, kể cả các điều kiện ràng buộc về giá trị tín hiệu điều khiển, về số gia của tín hiệu điều khiển và về biến trạng thái của hệ thống.

+ *Nhược điểm*: Chỉ áp dụng được cho bộ ĐK được xây dựng từ mô hình không liên tục của đối tượng; Chỉ sử dụng được với cửa sổ dự báo hữu hạn, do đó để đảm bảo được chất lượng ổn định hoặc bám ổn định theo giá trị đặt trước cần phải chọn được một hàm phạt thích hợp.

1.3. Các phương pháp điều khiển tối ưu gồm: Phương pháp biến phân, nguyên lý cực đại, phương pháp quy hoạch động

+ *Ưu điểm*: Dễ dàng áp dụng được cho hệ phi tuyến liên tục và không dừng chứ không chỉ riêng hệ song tuyến; áp dụng được với CSDB vô hạn nên không cần có thêm hàm phạt, vốn rất khó, thậm chí chưa có gợi ý hữu ích nào cho việc xác định chúng. Thời gian tính toán khi giải BTTU trong chiến lược TUH được cải thiện đáng kể.

+ *Nhược điểm*: Khó xử lý các điều kiện ràng buộc phức tạp.

1.4. Các công trình nghiên cứu về điều khiển dự báo hệ phi tuyến trong nước

Tác giả Đỗ Thị Tú Anh (2015) không tập trung vào việc nghiên cứu về chiến lược tối ưu hóa trong ĐKDB mà chủ yếu đề cập đến việc xây dựng bộ ĐKDB phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách cho hệ phi tuyến để xét tính ổn định tiệm cận của hệ do đó chưa đề cập đến tính bám ổn định của hệ thống ĐKDB cho hệ phi tuyến, tác giả vẫn sử dụng mô hình dự báo không liên tục.

Tác giả Trần Quang Tuấn (2012) đã thực hiện xây dựng mô hình thích nghi tham số trực tuyến trên cơ sở ước lượng tham số mô hình mờ cho đối tượng phi tuyến có thành phần bất định là hàm số. Luận án này cũng không nghiên cứu chiến lược tối ưu hóa trong ĐKDB mà đi sâu vào việc xây dựng mô hình.

1.5. Những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu về điều khiển dự báo cho hệ phi tuyến và hướng nghiên cứu của luận án

ĐKDB vẫn còn một số vấn đề tồn tại cần được tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện:

- Nâng cao độ chính xác của mô hình dự báo, các mô hình dự báo càng chính xác thì chất lượng ĐKDB càng cao v.v...
- Chưa có công trình nào đề cập đến việc chọn và thỏa hiệp giữa các phép hàm mục tiêu đối nghịch nhau khi thực hiện thuật toán tối ưu hóa trong điều khiển dự báo phi tuyến.

- Tìm ra thuật toán mới để giải bài toán tối ưu nhằm cải thiện tốc độ tính toán và nâng cao độ chính xác, tính ổn định, mở rộng tầm dự báo của điều khiển dự báo phi tuyến, đặc biệt đối với hệ song tuyến.

Hướng nghiên cứu của luận án

Nghiên cứu, xây dựng thuật toán mới giải bài toán tối ưu của chiến lược tối ưu hóa trong điều khiển dự báo phi tuyến với mục đích mở rộng cửa sổ dự báo đến vô cùng nhằm nâng cao tính ổn định và chính xác của hệ thống. Đồng thời rút ngắn thời gian tính toán khi giải bài toán tối ưu so với các phương pháp đã đề cập trước đó.

Chương 2

ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO HỆ PHI TUYẾN TRÊN NỀN CÁC PHƯƠNG PHÁP QUY HOẠCH PHI TUYẾN

2.1. Nguyên lý làm việc của ĐKDB phi tuyến

Hệ thống ĐKDB làm việc theo nguyên lý:

- Thứ nhất, xây dựng mô hình đối tượng dự báo các đầu ra tương lai cho một phạm vi (tầm) xác định trước, gọi là tầm dự báo N_p , ở mỗi thời điểm lấy mẫu k . Những đầu ra dự báo này, ký hiệu bởi $\hat{\mathbf{y}}(k+i|k), i=1,2, \dots, N_p$, tính từ thời điểm k , sẽ phụ thuộc vào tín hiệu ĐK tương lai $\mathbf{u}(k+i|k), i=1,2, \dots, N_p-1$ và $\mathbf{u}(k+i|k) = \mathbf{u}(k+N_c|k)$, trong đó $i > N_c$ với N_c là tầm điều khiển.
- Thứ hai, các tín hiệu điều khiển tương lai được tính toán tối ưu để có đầu ra \mathbf{y} của quá trình bám quỹ đạo đặt \mathbf{y}_{ref} khi mà bản thân tín hiệu đặt hoặc đầu ra quá trình đều được xấp xỉ. Hàm mục tiêu thường sử dụng là hàm toàn phương sai lệch giữa tín hiệu đầu ra dự báo và quỹ đạo tham chiếu dự báo. Trong mọi trường hợp mục tiêu điều khiển là cực tiểu hóa hoặc cực đại hóa hàm mục tiêu.
- Thứ ba, dựa trên khái niệm chiến lược dịch dần về tương lai, phần đầu tiên của tín hiệu điều khiển, $\mathbf{u}(k|k)$, được gửi tới quá trình.

2.1.1. Cấu trúc bộ ĐKDB

Cấu trúc bộ ĐKDB gồm 3 khối: Khối MHDB, khối hàm mục tiêu và khối tối ưu hóa.

+ Khối MHDB là khối có chức năng sử dụng mô hình mô tả đối tượng để dự báo các tín hiệu đầu ra trong tương lai của nó.

+ Khối hàm mục tiêu: với mục đích là để tín hiệu ra y_k của hệ bám theo được tín hiệu mẫu y_{ref} nên trong ĐKDB, người ta thường sử dụng HMT có chứa thành phần sai lệch hoặc HMT có dạng toàn phương.

+ Khối tối ưu hóa: Nhiệm vụ của khối này tìm nghiệm tối ưu trong hàm mục tiêu sao cho hàm mục tiêu đạt giá trị cực tiểu (hoặc cực đại).

2.1.2. Kỹ thuật cài đặt bộ ĐKDB trên nền các phương pháp quy hoạch phi tuyến

Có rất nhiều các PPTU hóa phục vụ việc cài đặt thuật toán tìm nghiệm tối ưu cho bài toán $U^* = \arg \min_{U \in U} J(U)$ của bộ ĐKDB. Chẳng hạn:

1. Với BTTU không bị ràng buộc ($U = \mathbb{R}^{mN_p}$) sử dụng các thuật toán như Gradient, Newton hay Quasi Newton, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt

2. Khi có thêm điều kiện ràng buộc ($U \subset \mathbb{R}^{mN_p}$), những thuật toán thích hợp sẽ là kỹ thuật hàm chặn, hàm phạt, hay QP hoặc SQP hay giải thuật di truyền, phương pháp interior point,...

2.2. Áp dụng vào điều khiển dự báo lớp hệ song tuyến

2.2.1. Thuật toán ĐKDB phi tuyến cho hệ song tuyến

MHDB cho hệ song tuyến trong toàn bộ cửa sổ dự báo hiện tại $[k, k + N_p)$ như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+i+1|k) = \mathcal{A}(k+i)\mathbf{x}(k+i|k) + \mathcal{B}(k+i)\mathbf{u}(k+i|k) \\ \mathbf{y}(k+i|k) = \mathcal{C}(k+i)\mathbf{x}(k+i|k) \end{cases} \quad (2.16)$$

Dãy các giá trị đầu ra dự báo có được trong cửa sổ dự báo hiện tại:

$$\mathcal{Y} = M(U)\mathbf{x}(k|k) + N(U)U = M(U)\mathbf{x}_k + N(U)U \quad (2.20)$$

Hàm mục tiêu cho hệ sẽ là:

$$\begin{aligned}
J(u) &= \sum_{i=1}^{N_p} q_i |\mathbf{e}_{k+i}(u)|^2 + \sum_{j=0}^{N_C-1} r_j |\mathbf{u}(k+j|k)|^2 + s(\mathbf{x}(k+N_p|k)) \\
&= (\mathcal{Y}_{ref} - \mathcal{Y})^T Q (\mathcal{Y}_{ref} - \mathcal{Y}) + u^T R u + s(u) \\
&= [\mathcal{Y}_{ref} - (M(u)\mathbf{x}_k + N(u)u)]^T Q [\mathcal{Y}_{ref} - (M(u)\mathbf{x}_k + N(u)u)] + \\
&\quad + u^T R u + s(u)
\end{aligned} \tag{2.21}$$

2.2.2. ĐKDB trên nền tối ưu hóa theo sai lệch tín hiệu ĐK

Thuật toán 2.1: ĐKDB phản hồi trạng thái hệ song tuyến bám theo tín hiệu đầu ra mẫu với cửa sổ DB hữu hạn.

1. Chọn hàm phạt $s(\hat{\mathbf{x}}(k+N_p|k))$, cửa sổ dự báo N_p , cửa sổ ĐK N_C và hai ma trận trọng số Q, R đối xứng xác định dương. Chọn chu kỳ trích mẫu T . Gán $k=0$ và $\mathbf{u}_{-1} = (0, 0)^T$.
2. Đo $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k|k)$. Xác định $\hat{\mathbf{x}}_k = \text{col}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_{k-1})$, các ma trận $\hat{A}(\hat{\mathbf{x}}_k)$, $\hat{B}(\hat{\mathbf{x}}_k)$, $\hat{C}(\hat{\mathbf{x}}_k)$ từ mô hình không liên tục (2.14) của hệ song tuyến theo (2.26).
3. Xây dựng hàm mục tiêu $J(\hat{U})$ theo (2.25) và tập ràng buộc U theo (2.23).
4. Tìm nghiệm \hat{U}^* của bài toán tối ưu (2.30) nhờ phương pháp quy hoạch phi tuyến chẳng hạn như phương pháp SQP hoặc interior point.
5. Đưa $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_{k-1} + (1, 0, \dots, 0)\hat{U}^*$ vào điều khiển hệ song tuyến trong khoảng thời gian $kT \leq t < (k+1)T$, trong đó 1 là ma trận đơn vị. Gán $k := k+1$ và quay về bước 2.

Sẽ có khá nhiều phương án khác nhau phục vụ việc cài đặt thuật toán trên và chúng được phân biệt với nhau ở việc lựa chọn phương pháp quy hoạch phi tuyến cụ thể để tìm nghiệm tối ưu \hat{U}^* cho bài toán tối ưu có ràng buộc U (2.25), tức là thực hiện bước thứ 4 của thuật toán trên. Đây là bài toán tối ưu phi tuyến có ràng buộc, nên những PP

tương thích sẽ là SQP, hình chiếu gradient, kỹ thuật hàm chặn, hàm phạt, giải thuật di truyền.... Tuy nhiên, sau này luận án sẽ chỉ nhất quán chỉ sử dụng SQP.

Chương 3

ĐỀ XUẤT MỘT PHƯƠNG PHÁP MỚI ĐỂ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO HỆ PHI TUYẾN LIÊN TỤC TRÊN NỀN BIẾN PHÂN

3.1. Nội dung cơ bản của phương pháp biến phân

Bài toán ĐKTU cho ĐTĐK mô tả bởi mô hình liên tục (3.2) được hiểu là phải xác định được tín hiệu ĐKTU $\mathbf{u}^*(t)$, $0 \leq t \leq T$, thỏa mãn điều kiện ràng buộc $\mathbf{u} \in U$ để đưa hệ đi từ điểm trạng thái đầu $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$ đến điểm trạng thái cuối $\mathbf{x}_T = \mathbf{x}(T)$ trong khoảng thời gian T , gọi là khoảng thời gian xảy ra quá trình tối ưu, sao cho chi phí của quá trình chuyển đổi trạng thái đó, tính theo:

$$J(\mathbf{u}) = \int_0^T \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \quad (3.3)$$

đạt giá trị nhỏ nhất. Hàm chi phí (3.3) thường được gọi là HMT của BT ĐKTU.

3.1.1. Nguyên lý biến phân

Nguyên lý biến phân: Nếu \mathbf{u}^* là nghiệm bài toán tối ưu có \mathbf{x}_0 cho trước, T cũng cho trước và U là tập hờ, thì nghiệm đó phải thỏa mãn:

$$\left. \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}^*} = \mathbf{0}^T \quad (3.4)$$

(đạo hàm tại điểm tối ưu) trong đó:

- $\partial/\partial \mathbf{u}$ là ký hiệu đạo hàm Jacobi của một hàm nhiều biến.

- $\mathbf{0}^T = (0, \dots, 0)$

$H = \mathbf{p}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, có tên là hàm Hamilton, với \mathbf{p} là vector biến đồng trạng thái (costates), thỏa mãn quan hệ Euler-Lagrange:

$$\dot{\mathbf{p}} = - \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \quad (3.5)$$

và điều kiện biên $\mathbf{p}(T) = \mathbf{0}$ khi điểm trạng thái cuối là bất kỳ.

3.1.2. Bộ điều khiển LQR (Linear Quadratic Regulator)

Có thể thấy việc áp dụng nguyên lý 3 bước nêu trên của PPBP là hoàn toàn không đơn giản cho hệ phi tuyến vì cho tới nay ta vẫn chưa có được PP tìm nghiệm tường minh của hệ phương trình vi phân phi tuyến. Bởi vậy người ta thường chỉ áp dụng cho bài toán có hệ (3.2) ở dạng tuyến tính tham số hằng:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3.6)$$

có $T = \infty$, hàm mục tiêu (3.3) ở dạng toàn phương:

$$J(\mathbf{u}) = \int_0^{\infty} \left(\mathbf{x}^T \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R}\mathbf{u} \right) dt \quad (3.7)$$

và điểm cuối \mathbf{x}_T là bất kỳ, trong đó \mathbf{Q} là ma trận đối xứng bán xác định dương ($\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq 0$), \mathbf{R} là ma trận đối xứng xác định dương ($\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > 0$) cho trước.

Nghiệm tối ưu \mathbf{u}^* tìm được theo PPBP sẽ có dạng on-line [5]:

$$\mathbf{u}^* = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L}\mathbf{x} = \mathbf{R}_{LQR} \mathbf{x} \quad \text{với } \mathbf{R}_{LQR} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L} \quad (3.8)$$

trong đó \mathbf{L} là nghiệm đối xứng bán xác định dương của PT đại số Riccati:

$$\mathbf{L}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L} - \mathbf{A}^T \mathbf{L} - \mathbf{L}\mathbf{A} = \mathbf{Q} \quad (3.9)$$

Lúc này \mathbf{R}_{LQR} cho bởi công thức (3.9) sẽ được gọi là bộ ĐK phản hồi trạng thái tối ưu.

3.1.3. Điều kiện đủ cho tính ổn định của hệ LQR

Nếu một trong các điều kiện nêu sau đây được thỏa mãn (điều kiện đủ), thì ta luôn khẳng định được hệ LQR là ổn định:

- Bài toán có $Q = Q^T > 0$, tức là ma trận Q là xác định dương chứ không chỉ là bán xác định dương.
- Nghiệm L tìm được của phương trình Riccati (3.9) là xác định dương (chứ không chỉ là bán xác định dương)
- Cặp ma trận (A, Q) là quan sát được.

3.1.4. Áp dụng nguyên tắc điều khiển LQR để điều khiển tối ưu hệ tuyến tính bám ổn định theo giá trị đầu ra cho trước

Để tạo được khả năng sử dụng bộ điều khiển LQR như trên vào bài toán ĐKDB hệ song tuyến bám theo được giá trị đầu ra cho trước, luận án sẽ tiến hành biến đổi một chút ít bộ ĐK LQR (3.8) để có thể áp dụng được vào BTĐKTU hệ tuyến tính tham số hằng:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (3.10)$$

sao cho đầu ra \mathbf{y} của nó bám theo được giá trị đầu ra mẫu \mathbf{y}_r cho trước. Bài toán này sẽ được gọi là bài toán điều khiển bám tối ưu.

Trước tiên, do không phải bài toán ĐK bám nào cũng có nghiệm, nên ta cần có các giả thiết sau cho bài toán ĐK bám tối ưu:

- Bài toán bám tối ưu hệ tuyến tính tham số hằng (3.10) có nghiệm \mathbf{u}_e ở chế độ xác lập, trong đó ký hiệu chỉ số e để nói rằng đó là tín hiệu mà với nó có được $\mathbf{y} \rightarrow \mathbf{y}_r$
- Khi hệ đã bám theo được giá trị mẫu \mathbf{y}_r , tức là khi đã có $\mathbf{y} = \mathbf{y}_r$, thì hệ sẽ xác lập với trạng thái xác lập là \mathbf{x}_e .

Với hai giả thiết nêu trên, hiển nhiên phải có:

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}\mathbf{x}_e + \mathbf{B}\mathbf{u}_e \\ \mathbf{y}_r = \mathbf{C}\mathbf{x}_e + \mathbf{D}\mathbf{u}_e \end{cases} \quad (3.11)$$

và điều này tương đương với:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_e \\ \mathbf{u}_e \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbf{x}_e \\ \mathbf{u}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_r \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Tiếp theo ta đặt biến mới:

$$\boldsymbol{\delta} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_e \text{ và } \boldsymbol{\rho} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_e$$

thì khi trừ từng vế của (3.10) và (3.11) cho nhau, sẽ được (gọi là hệ sai số):

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = A\boldsymbol{\delta} + B\boldsymbol{\rho} \quad (3.13)$$

và bài toán ĐK bám theo giá trị đặt \mathbf{y}_r ở đầu ra cho hệ tuyến tính tham số hằng ban đầu là (3.10) nay đã trở thành bài toán ĐK ổn định cho hệ sai số (3.13).

Áp dụng PPĐK LQR cho hệ sai số ứng với hàm mục tiêu:

$$J(\boldsymbol{\rho}) = \int_0^{\infty} (\boldsymbol{\delta}^T Q \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\rho}^T R \boldsymbol{\rho}) dt \quad (3.14)$$

có Q, R đều là hai ma trận đối xứng xác định dương, ta sẽ được:

$$\boldsymbol{\rho}^* = -R^{-1}B^T L \boldsymbol{\delta} \text{ với } R_{LQR} = R^{-1}B^T L \quad (3.15)$$

trong đó $L = L^T > 0$ là nghiệm đối xứng xác định dương của phương trình Riccati (3.9). Tất nhiên bộ điều khiển LQR (3.15) này sẽ làm ổn định hệ sai số (3.13), vì ở đây có Q là ma trận xác định dương.

Từ bộ điều khiển LQR (3.15) của hệ sai số (3.13) ta cũng suy ra được bộ điều khiển bám tối ưu theo giá trị đầu ra đặt trước \mathbf{y}_r cho hệ tuyến tính tham số hằng ban đầu (3.10) như sau:

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}_e - R^{-1}B^T L(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) \quad (3.16)$$

3.2. Phương pháp đề xuất để điều khiển dự báo với cửa sổ dự báo vô hạn cho hệ song tuyến liên tục không dừng, bám theo được giá trị đầu ra cho trước

3.2.1 Tư tưởng chính của phương pháp

Xét hệ song tuyến MIMO, không dừng, có số tín hiệu đầu vào bằng số các tín hiệu đầu ra, mô tả bởi mô hình liên tục:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = A(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + B(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = C(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + D(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} \end{cases} \quad (3.17)$$

trong đó $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ là vector của m tín hiệu đầu vào, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ là vector của m các tín hiệu đầu ra và $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ là vector của n biến trạng thái trong hệ. Các ma trận $A(\mathbf{x}, t)$, $B(\mathbf{x}, t)$, $C(\mathbf{x}, t)$ và $D(\mathbf{x}, t)$ đều có những phần tử là hàm số phụ thuộc biến trạng thái \mathbf{x} cũng như thời gian t .

Giả sử tất cả các ma trận $A(\mathbf{x}, t)$, $B(\mathbf{x}, t)$, $C(\mathbf{x}, t)$, $D(\mathbf{x}, t)$ là liên tục theo \mathbf{x} và t . Khi đó, ở thời điểm t_k hiện tại và trong khoảng thời gian $t_k \leq t < t_k + T_k$ đủ nhỏ, hệ song tuyến (3.17) sẽ xấp xỉ được bởi mô hình tuyến tính tham số hằng:

$$H_k : \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = A_k \mathbf{x} + B_k \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = C_k \mathbf{x} + D_k \mathbf{u} \end{cases} \quad (3.18)$$

trong đó:

$$A(\mathbf{x}, t) \approx A_k, \quad B(\mathbf{x}, t) \approx B_k, \quad C(\mathbf{x}, t) \approx C_k, \quad D(\mathbf{x}, t) \approx D_k$$

khi $t_k \leq t < t_k + T_k$

Việc xấp xỉ trên là hoàn toàn chấp nhận được do từ giả thiết về tính liên tục của các ma trận tham số mô hình (3.17) luôn có:

$$\lim_{T_k \rightarrow 0} A(\mathbf{x}, t) = A_k, \quad \lim_{T_k \rightarrow 0} B(\mathbf{x}, t) = B_k, \quad \lim_{T_k \rightarrow 0} C(\mathbf{x}, t) = C_k, \quad \lim_{T_k \rightarrow 0} D(\mathbf{x}, t) = D_k$$

và T_k là thời gian tính toán cần thiết cho một vòng lặp của bộ ĐKDB, nên rất nhỏ. Nó cũng sẽ chính là khoảng dịch chuyển của cửa sổ dự báo. Các bước điều khiển trong một vòng lặp sẽ là:

Tư tưởng của phương pháp được đề xuất:

1. Tại thời điểm hiện tại t_k , đo giá trị $\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}_k$ xác định các ma trận hằng của mô hình LTI (3.18) gồm A_k, B_k, C_k, D_k , theo các công thức:

$$A_k = A(\mathbf{x}_k, t_k), B_k = B(\mathbf{x}_k, t_k), C_k = C(\mathbf{x}_k, t_k), D_k = D(\mathbf{x}_k, t_k) \quad (3.20)$$

2. Xác định tín hiệu điều khiển $\mathbf{u}(t)$ để hệ LTI (3.18) bám theo được giá trị tín hiệu đầu ra mẫu \mathbf{y}_r .

3. Đưa $\mathbf{u}(t)$ vừa tìm được vào điều khiển hệ song tuyến (3.17) rồi quay về bước 1 để thực hiện vòng lặp mới tại thời điểm tiếp theo là t_{k+1} .

3.2.2 Xây dựng thuật toán điều khiển

Thuật toán 3.1: Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái để tín hiệu ra bám theo tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ song tuyến liên tục với cửa sổ dự báo vô hạn.

1. Chọn quy luật thay đổi các ma trận trọng số Q_k, R_k đối xứng xác định dương. Gán $t_0 = 0$ và $k = 0$.

2. Đo $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(t_k)$ và tính xấp xỉ các ma trận hằng A_k, B_k, C_k, D_k của mô hình LTI (3.18) từ $A(\mathbf{x}, t), B(\mathbf{x}, t), C(\mathbf{x}, t), D(\mathbf{x}, t)$ theo công thức (3.20).

3. Xác định $(\mathbf{x}_e[k], \mathbf{u}_e[k])$ từ \mathbf{y}_r theo (3.22).

4. Tìm L_k là nghiệm đối xứng, bán xác định dương của phương trình đại số Riccati (3.25). Tính \mathbf{u}^* theo (3.26).

5. Đưa \mathbf{u}^* vào điều khiển đối tượng song tuyến liên tục không dừng (3.17) rồi gán $k := k + 1$ và quay về 2.

Chương 4

THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG CHẤT LƯỢNG PHƯƠNG PHÁP ĐÃ ĐỀ XUẤT TRÊN ĐỐI TƯỢNG TRMS

4.1. Mô hình toán của hệ TRMS

Mô hình toán của đối tượng TRMS với 6 tham số trạng thái được đưa ra trong (4.1):

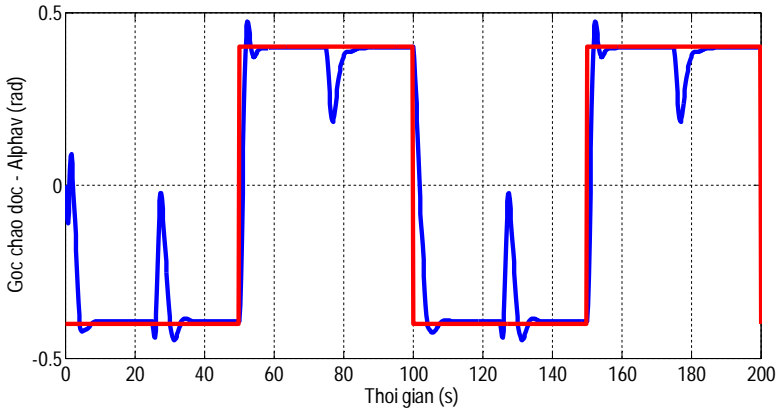
$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \omega_h \\ S_h \\ \alpha_h \\ \omega_v \\ S_v \\ \alpha_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{(k_{ah}\varphi_h)^2}{J_{tr}R_{ah}}\omega_h - \frac{B_{tr}}{J_{tr}}\omega_h - \frac{f_1(\omega_h)}{J_{tr}} + \frac{k_{ah}\varphi_h}{J_{tr}R_{ah}}f_6(U_h) \\ \frac{l_t\gamma_t f_2(\omega_h)\cos\alpha_v - f_7(\Omega_h) - f_3(\alpha_h)}{D\cos^2\omega_v + E\sin^2\alpha_v + F} \\ S_h + \frac{k_m\omega_v\cos\alpha_v}{D\cos^2\omega_v + E\sin^2\alpha_v + F} \\ -\frac{(k_{av}\varphi_v)^2}{J_{mr}R_{mr}}\omega_v - \frac{B_{mr}}{J_{mr}}\omega_v - \frac{f_4(\omega_v)}{J_{mr}} + \frac{k_{av}\varphi_v}{J_{mr}R_{av}}f_8(U_v) \\ \frac{f_5(\omega_v)(l_m\gamma_m + k_g\Omega_h\cos\alpha_v) - f_9(\Omega_v) + g[(A-B)\cos\alpha_v - C\sin\alpha_v] - 0.5\Omega_h^2 H \sin 2\alpha_v}{J_v} \\ S_v + \frac{k_t}{J_v}\omega_h \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

4.2. Thiết kế bộ điều khiển dự báo trên nền quy hoạch phi tuyến

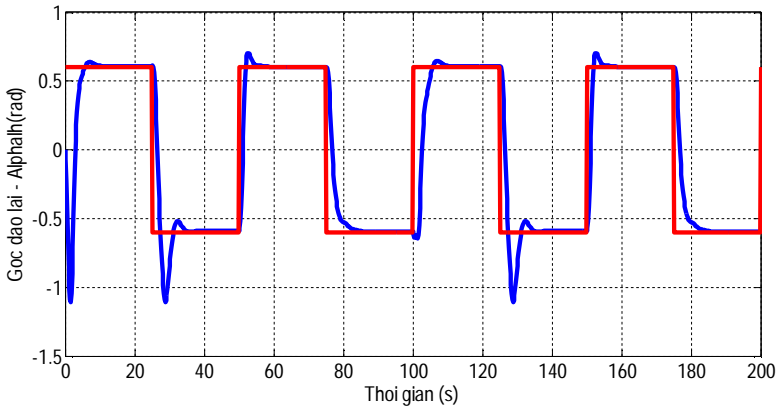
4.2.1. Thiết kế và cài đặt bộ điều khiển dự báo cho hệ TRMS

Cài đặt bộ điều khiển với thuật toán SQP

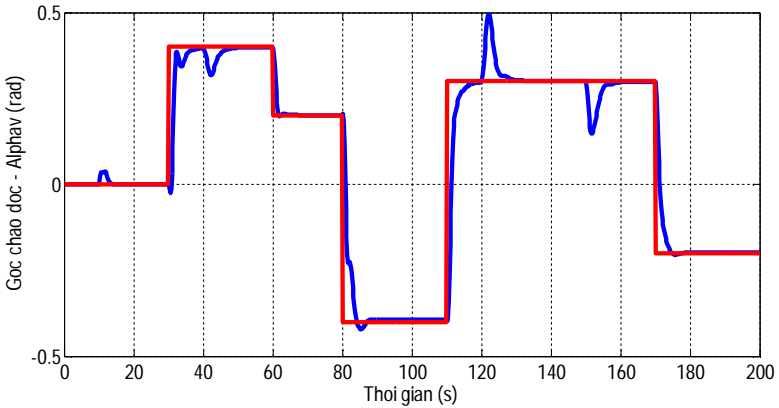
Khi cài đặt bộ điều khiển dự báo với thuật toán SQP cho đối tượng TRMS ứng với hàm mục tiêu $J(\hat{U})$ cho bởi (2.25) cùng các điều kiện ràng buộc U thu được các kết quả mô phỏng ứng với những dạng tín hiệu đặt khác nhau như trong hình vẽ từ 4.3 đến 4.6.



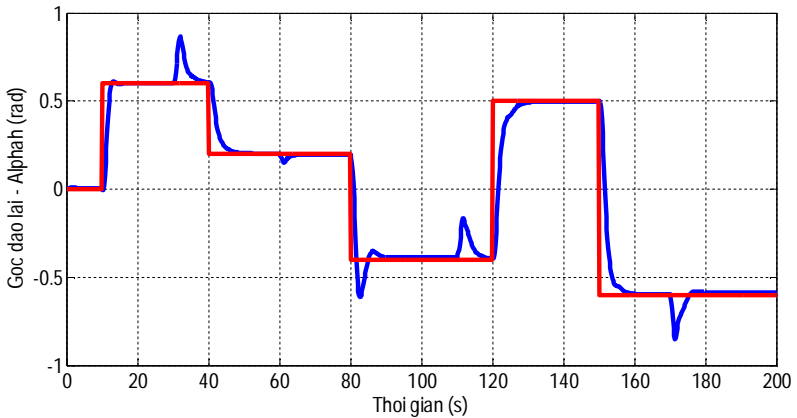
Hình 4.3: Đáp ứng của góc chao dọc khi tín hiệu đặt là xung vuông



Hình 4.4: Đáp ứng của góc đảo lái khi tín hiệu đặt là xung vuông



Hình 4.5: Đáp ứng của góc chao dọc khi tín hiệu đặt là substep



Hình 4.6: Đáp ứng của góc đảo lái khi tín hiệu đặt là substep

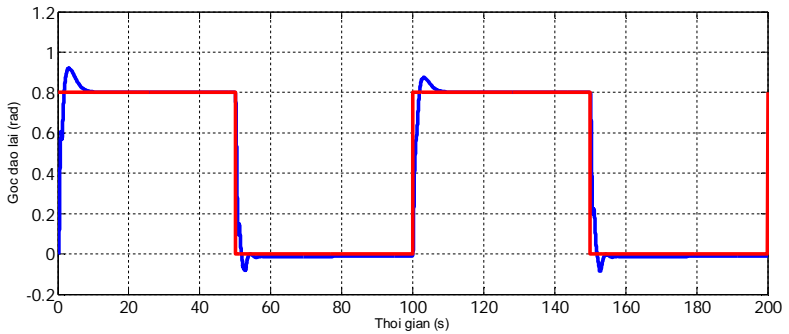
4.3. Thiết kế bộ điều khiển dự báo trên nền biến phân

4.3.2. Mô phỏng trên MatLab và so sánh, đánh giá chất lượng

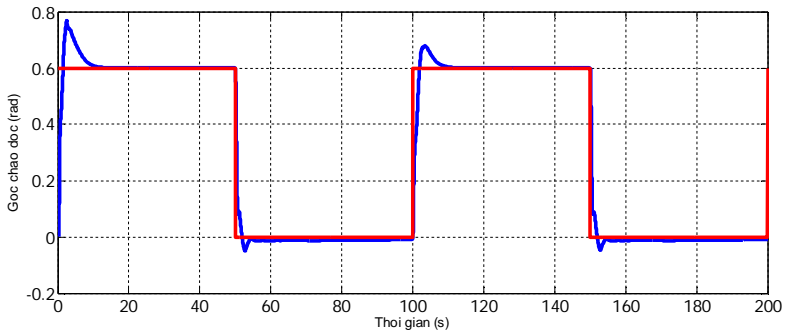
Mô phỏng trên matlab: Sử dụng thuật toán 3.1 đưa ra trong mục 3.2.2, cài đặt thuật toán cho đối tượng TRMS với các thông số Q_K, R_K và chu kì trích mẫu T như sau:

$$T = 0.1, R_k = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix}, Q_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000000 \end{pmatrix}$$

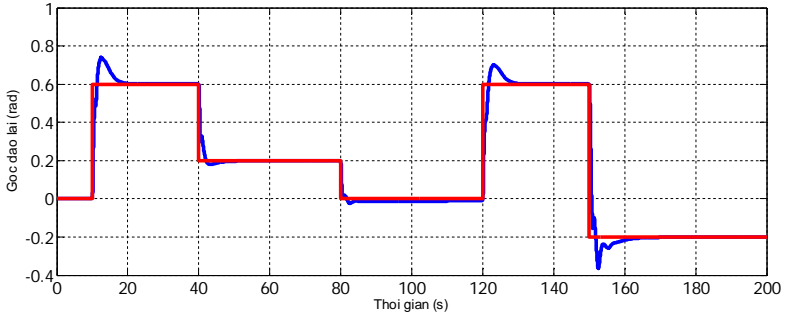
Tác giả thu được các kết quả mô phỏng từ H 4.8 đến H 4.11



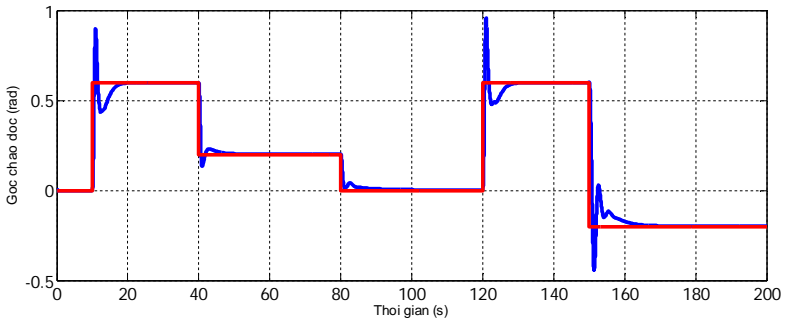
Hình 4.8: Đáp ứng đầu ra góc đảo lái khi tín hiệu đặt là xung vuông



Hình 4.9: Đáp ứng đầu ra góc chao dọc khi tín hiệu đặt là xung vuông



Hình 4.10: Đáp ứng đầu ra góc đảo lái khi tín hiệu đặt là substep



Hình 4.11: Đáp ứng đầu ra góc chao dọc khi tín hiệu đặt là substep

So sánh và đánh giá chất lượng

Ưu, nhược điểm của các phương pháp tối ưu dùng QHPT:

Ưu điểm: thoả mãn các điều kiện ràng buộc (kể cả ràng buộc trạng thái và ràng buộc đầu vào, ràng buộc đầu ra) trọn vẹn.

Nhược điểm: Thời gian tính toán lâu, khó đưa vào cài đặt, ứng dụng trong thực tế. Để khắc phục những hạn chế của các PP tối ưu QHPT luận án đề xuất sử dụng PPBP.

Ưu, nhược điểm của phương pháp biến phân:

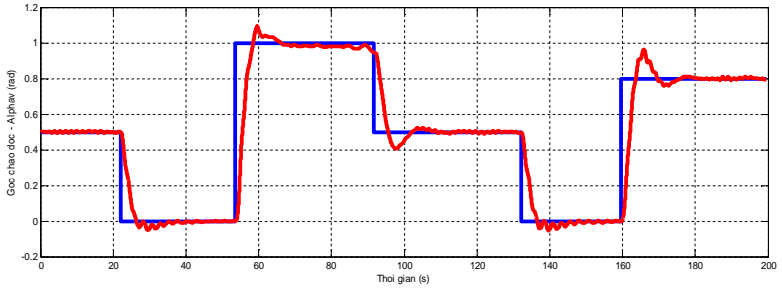
Ưu điểm: Thời gian tính toán rất nhanh, dễ dàng cài đặt, ứng dụng vào thực tế, dùng được với cửa sổ dự báo vô hạn, tính ổn định gần như được đảm bảo chắc chắn.

Nhược điểm: Chưa xử lý được trực tiếp các điều kiện ràng buộc.

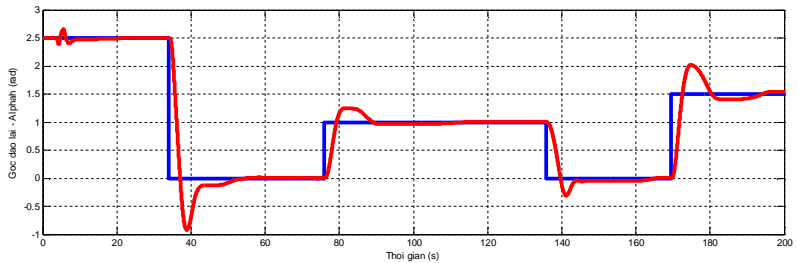
Để khắc phục hạn chế của phương pháp biến phân luận án đề xuất quy luật thay đổi các ma trận trọng số Q_k, R_k trong hàm mục tiêu thì các ĐKRB được thảo luận.

4.4. Thí nghiệm trên mô hình vật lý của hệ TRMS

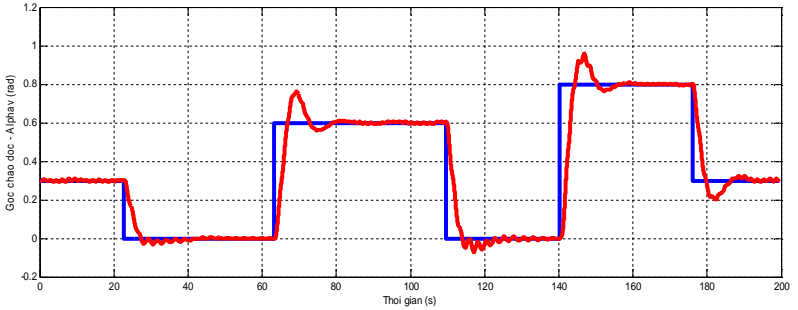
Các kết quả thực nghiệm được biểu diễn trên các hình từ Hình 4.23 đến Hình 4.26.



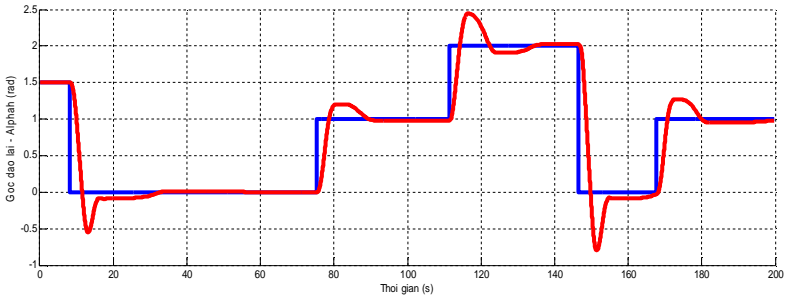
Hình 4.23. Đáp ứng đầu ra của góc chao dọc khi sử dụng bộ điều khiển dự báo tối ưu hóa trên nền qui hoạch phi tuyến



Hình 4.24: Đáp ứng đầu ra của góc đảo lái khi sử dụng bộ điều khiển dự báo tối ưu hóa trên nền qui hoạch phi tuyến



Hình 4.25. Đáp ứng đầu ra của góc chao dọc khi sử dụng bộ điều khiển dự báo bám ổn định theo tín hiệu mẫu ở đầu ra



Hình 4.26. Đáp ứng đầu ra của góc đảo lái khi sử dụng bộ điều khiển dự báo bám ổn định theo tín hiệu mẫu ở đầu ra

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án đã có một số kết quả mới sau:

1. Bổ sung hoàn thiện thuật toán thiết kế bộ ĐKDB sử dụng phương pháp quy hoạch phi tuyến để giải BTTU trong chiến lược TUH của ĐKDB, mở rộng khả năng ứng dụng ĐKDB vào điều khiển các đối tượng công nghiệp. Kết quả nghiên cứu được kiểm chứng bằng lập trình mô phỏng trên máy tính và thực nghiệm trên mô hình vật lý của hệ thống TRMS cụ thể.

2. Xây dựng phương pháp luận để thiết kế bộ ĐKDB cho hệ phi tuyến và đề xuất 1 giải pháp mới trong chiến lược TUH của ĐKDB hệ phi tuyến, cụ thể là: ĐKDB phi tuyến trên nền phương pháp biến phân, luận án đã phát biểu và chứng minh định lý về tính bám ổn định theo tín hiệu ra mẫu cho hệ phi tuyến liên tục khi cửa sổ dự báo tiến đến vô cùng. Kết quả nghiên cứu này đã khắc phục được các nhược điểm của các phương pháp giải BTTU trên nền quy hoạch phi tuyến và rút ngắn được thời gian tính toán, nâng cao chất lượng điều khiển, mở rộng khả năng ứng dụng và cài đặt bộ ĐKDB vào điều khiển các đối tượng thực.

3. Cài đặt thuật toán mới mà luận án đưa ra thông qua mô phỏng trên máy tính và thực hiện điều khiển trên mô hình vật lý tại phòng thí nghiệm Điện - Điện tử trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên, thông qua đó đã kiểm chứng và khẳng định tính khả thi của thuật toán đề xuất.

2. Kiến nghị và hướng nghiên cứu tiếp theo

Để nâng cao chất lượng bộ điều khiển, mở rộng khả năng ứng dụng của điều khiển dự báo vào điều khiển các đối tượng thực, tác giả sẽ tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện thêm các thuật toán đã đề xuất và triển khai ứng dụng điều khiển các hệ thống trong thực tế. Đồng thời nghiên cứu đề xuất thêm các thuật toán mới có thời gian tính toán nhanh hơn.

**DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CÓ
LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. Nguyễn Thị Mai Hương, Mai Trung Thái, Nguyễn Hữu Chinh, Lại Khắc Lãi (2014), "Nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số trạng thái trong hệ thống hai cánh quạt nhiều đầu vào nhiều đầu ra", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, Số 06, tập 120, tr. 87 - 92.
2. Nguyen Thi Mai Huong, Mai Trung Thai, Nguyen Huu Chinh, Tran Thien Dung, Lai Khac Lai (09-2014), "Model Predictive Control for Twin Rotor MIMO system", *The University of Da Nang Journal of science and Technology*, 12[85], pp. 39 - 42.
3. Nguyễn Thị Mai Hương, Mai Trung Thái, Lại Khắc Lãi, Đỗ Thị Tú Anh (2014), "Ổn định hóa hệ thống hai cánh quạt nhiều đầu vào nhiều đầu ra dựa trên phương pháp quy hoạch động của Bellman", *Tạp chí Khoa học và công nghệ Đại học Thái Nguyên*, Tập 128, số 14, tr. 161 - 165.
4. Nguyễn Thị Mai Hương, Mai Trung Thái, Lê Thị Huyền Linh, Lại Khắc Lãi (2013), "Nghiên cứu chiến lược tối ưu hóa trong điều khiển dự báo", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, Tập 113, số 13, tr. 115 - 121;
5. Huong Nguyen T. M., Thai Mai T., Lai Lai K. (2015), "Model Predictive Control to get Desired Output with Infinite Predictive Horizon for Bilinear Continuous Systems", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 4, No. 4, pp 299 - 303.