

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP**

**HOÀNG ĐỨC QUỲNH**

**ỨNG DỤNG LỘC KALMAN MỞ RỘNG (EKF)  
TRONG ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO CHO MỘT LỚP  
ĐỐI TƯỢNG PHI TUYẾN**

**CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA**

**MÃ SỐ: 62.52.02.16**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SỸ KỸ THUẬT**

**THÁI NGUYÊN - 2017**

Công trình được hoàn thành tại:

**Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên.**

Người hướng dẫn khoa học 1: **GS.TS Nguyễn Doãn Phước**

Người hướng dẫn khoa học 2: **PGS.TS Nguyễn Như Hiến**

Phản biện độc lập 1:.....

Phản biện độc lập 2:.....

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 hợp tại:.....

Vào hồi giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại các thư viện:

Thư viện Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐHTN

Trung tâm Học liệu – Đại học Thái Nguyên

Thư viện Quốc gia

### **Các công trình khoa học đã công bố**

1. Hoàng Đức Quỳnh, Nguyễn Thị Việt Hương và Nguyễn Doãn Phước(2013), “Nhận dạng trạng thái hệ cầu treo 2 chiều bằng bộ quan sát Kalman rời rạc”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Thái Nguyên*, tập 106(số 06), tr.15-21.
2. Hoàng Đức Quỳnh và Nguyễn Doãn Phước(2013), “Xây dựng mô hình phi tuyến cho hệ điều khiển mức-nhiệt độ và phân tích hệ thống”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Thái Nguyên*, tập 110(số 10), tr. 15-26.
3. Hoàng Đức Quỳnh, Nguyễn Doãn Phước và Nguyễn Quang Hùng(2014), “Thiết kế bộ điều khiển dự báo cho đối tượng van công nghiệp”, *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự, Viện Khoa học Công nghệ Quân sự*, đặc san tự động hóa, tr.12-18.
4. Hoàng Đức Quỳnh, Nguyễn Đình Hòa và Nguyễn Doãn Phước(2014), “Một số phương pháp thiết kế bộ điều khiển dự báo cho đối tượng van mở nhanh”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Thái Nguyên*, tập 122(số 08), tr.167-171.
5. Hoàng Đức Quỳnh, Nguyễn Văn Chí, Nguyễn Như Hiến và Nguyễn Doãn Phước(2016), “Ứng dụng lọc Kalman mở rộng trong thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra cho đối tượng con lắc ngược quay (Rotary Inverted Pendulum)”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Thái Nguyên*, tập 151(số 06), tr.185-191.
6. Nguyễn Doãn Phước, Nguyễn Đức Anh, Vũ Tiến Thành, Phạm Văn Hùng và Hoàng Đức Quỳnh(2016), “Robust output tracking control with constraints for nonlinear system base on piecewise linear quadratic optimization and its perspective for practical application”, *Workshop on Vietnamese – German Technology Cooperation and Cultural Exchange*, pp.57-67.
7. Hoàng Đức Quỳnh, Nguyễn Như Hiến và Nguyễn Doãn Phước(2016), “Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra để điều khiển bền vững động cơ không đồng bộ ba pha”, *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự, Viện Khoa học Công nghệ Quân sự*, số 44, tháng 8-2016, tr.13-22.

thí nghiệm đã kiểm chứng tính đúng đắn của các thuật toán đề xuất trong luận án đồng thời khẳng định tính khả dụng vào thực tế của phương pháp đề xuất và hoàn toàn phù hợp với nhận định lý thuyết.

### Các vấn đề còn tồn tại và hướng nghiên cứu tiếp theo

Có ba vấn đề còn tồn tại của luận án và cũng sẽ là hướng nghiên cứu tiếp theo của tác giả luận án trong tương lai. Đó là:

- 1) Mặc dù chất lượng bám ổn định tốt của những bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra trên cơ sở sử dụng lọc Kalman mở rộng và bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái nhờ tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dự báo phi tuyến đã được khẳng định thông qua thực nghiệm mô phỏng với một số đối tượng phi tuyến, song vẫn còn thiếu phần chứng minh lý thuyết chặt chẽ cho nó. Bởi vậy vấn đề tồn tại này sẽ là một trong các hướng nghiên cứu tiếp theo của tác giả luận án.
- 2) Từ kết quả của Thuật toán 2.5 và Thuật toán 2.6 cho lớp đối tượng phi tuyến (2.39), (2.43), tác giả nhận thấy hai thuật toán này hoàn toàn có thể mở rộng được cho cả lớp đối tượng phi tuyến trễ đầu vào  $u_{k-\tau}$ . Đó cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo nữa của tác giả luận án trong tương lai.
- 3) Lớp đối tượng phi tuyến mà luận án đề cập đều là không liên tục (4.1) có nhiều  $\xi_k, \zeta_k$  cộng tính trong mô hình, trong khi đối tượng công nghiệp luôn tồn tại ở dạng liên tục theo thời gian. Việc lượng tử hóa mô hình liên tục theo thời gian để có mô hình không liên tục tương ứng phục vụ việc thiết kế bộ điều khiển không thể tránh khỏi sự ảnh hưởng của sai lệch mô hình đối với chất lượng điều khiển. Vì vậy trong tương lai, tác giả sẽ nghiên cứu phát triển tiếp các thuật toán điều khiển đã được luận án xây dựng để có thể áp dụng trực tiếp được cho hệ liên tục có nhiễu  $\xi, \zeta$  lan truyền phi tuyến trong mô hình dạng tổng quát:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \underline{f}(x, u, \underline{\xi}) \\ y = \underline{g}(x, u, \underline{\zeta}) \end{cases} \quad (4.2)$$

nhằm nâng cao được hơn nữa chất lượng điều khiển trong thực tế công nghiệp.

## PHẦN MỞ ĐẦU

### Tính cấp thiết của đề tài luận án

Điều khiển dự báo (MPC-Model Predictive Control), còn được biết dưới tên gọi là điều khiển trượt dọc trên trục thời gian (RHC-Receding Horizon Control), là một kỹ thuật điều khiển dựa trên nền tối ưu hóa mang tính ứng dụng cao trong thực tế, nhất là đối với các quá trình nhiều biến phức tạp, có thêm điều kiện ràng buộc cho bài toán điều khiển. Điều này đã được chứng minh qua hơn 3000 ứng dụng thành công của kỹ thuật này trong điều khiển quá trình, công nghiệp hóa chất, dầu khí, chế biến... Tuy nhiên, nếu so sánh với số lượng các ứng dụng thành công cho các quá trình mang tính tuyến tính thuần túy thì khi áp dụng vào điều khiển các đối tượng công nghiệp mang tính phi tuyến, bị tác động bởi nhiễu, cả ở bên trong hệ thống và đầu ra của hệ, tỷ lệ số lượng ứng dụng của kỹ thuật này còn khá khiêm tốn. Điều này có nhiều nguyên nhân của nó mà chủ yếu có thể kể đến như:

Thứ nhất: các biến trạng thái của quá trình phi tuyến bị nhiễu tác động phần lớn, thậm chí là không thể đo được một cách đủ chính xác, để đảm bảo có được một chất lượng điều khiển tốt.

Thứ hai: với các quá trình phi tuyến, khi sử dụng trực tiếp mô hình phi tuyến cho công việc dự báo tín hiệu đầu ra, công thức dự báo rất phức tạp với độ phức tạp tăng theo tỷ lệ cấp lũy thừa với độ rộng cửa sổ dự báo, trong khi cửa sổ dự báo càng nhỏ, chất lượng điều khiển càng kém.

Thứ ba: với cửa sổ dự báo hữu hạn, kỹ thuật điều khiển dự báo luôn phải đòi hỏi có thêm hàm chặn trong hàm mục tiêu, vì chỉ có như vậy, chất lượng ổn định mới được đảm bảo. Song với quá trình phi tuyến thì câu hỏi cần phải lựa chọn hàm chặn như thế nào mới hợp lý, cho tới nay vẫn còn bỏ ngõ.

Chính những nguyên nhân cũng như khó khăn cơ bản nêu trên đã cho thấy được tính cấp thiết của đề tài luận án liên quan tới việc nghiên cứu phát triển bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra mang tính khả dụng cao với những đối tượng phi tuyến trong công nghiệp.

### **Mục tiêu và nhiệm vụ của luận án**

Để vượt qua được khó khăn thứ nhất, luận án đặt ra nhiệm vụ sẽ sử dụng lọc Kalman để quan sát trạng thái của quá trình, thay vì dùng cảm biến đo mà thường đối với nhiều biến trạng thái là không thể. Đối với các quá trình phi tuyến thì đó sẽ là lọc Kalman mở rộng, viết tắt là EKF (Extended Kalman Filter).

Với khó khăn thứ hai, luận án đề xuất sử dụng mô hình dự báo tuyến tính thay cho việc sử dụng trực tiếp mô hình phi tuyến của quá trình vào dự báo tín hiệu ra. Cùng với việc sử dụng mô hình dự báo tuyến tính này, khó khăn thứ ba cũng sẽ được giải quyết, vì khi đó hàm mục tiêu trở nên thuần túy là một hàm toàn phương theo tín hiệu điều khiển, do đó dạng hàm phạt thích hợp tương ứng, nếu cần phải bổ sung, thì theo lý thuyết hàm Bellman, cũng sẽ chỉ là một hàm toàn phương.

### **Phạm vi, đối tượng và phương pháp nghiên cứu của luận án**

Để thực hiện nhiệm vụ đề tài yêu cầu cho đối tượng công nghiệp và các quá trình phi tuyến, luận án đặt ra mục tiêu nghiên cứu trước mắt là phát triển lọc Kalman và điều khiển dự báo cho đối tượng song tuyến (bilinear), rồi từ đó mới mở rộng cho đối tượng phi tuyến tổng quát. Bên cạnh đó luận án cũng sẽ nghiên cứu chất lượng của bộ điều khiển dự báo phi tuyến phản hồi đầu ra trên cơ sở ghép chung bộ quan sát trạng thái, mà ở đây là bộ lọc Kalman, cùng với bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái với mô hình dự báo tuyến tính rời rạc hóa từng đoạn. Bộ điều khiển đó sẽ được luận án gọi là bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách.

Để thực hiện được nhiệm vụ nghiên cứu và đạt được mục tiêu nghiên cứu của đề tài, Luận án sử dụng các phương pháp nghiên cứu: Nghiên cứu lý thuyết, nghiên cứu mô phỏng, nghiên cứu thực nghiệm.

### **Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài**

#### **Ý nghĩa khoa học**

Ý tưởng tuyến tính rời rạc hóa từng đoạn mô hình phi tuyến phục vụ cho công việc điều khiển dự báo là không mới, song điểm khác biệt

b) Thuật toán 2.2 để quan sát trạng thái hệ phi tuyến.

Khả năng áp dụng của hai thuật toán trên vào thực tế cũng đã được luận án thử nghiệm mô phỏng trên hệ song tuyến theo tín hiệu vào (2.14), (2.15) ở ví dụ 2.1 và ví dụ 2.2

và kết quả mô phỏng thu được đã xác nhận chất lượng tốt của bộ quan sát này.

2) Xây dựng được phương pháp điều khiển dự báo phản hồi trạng thái hệ phi tuyến trên cơ sở sử dụng mô hình dự báo tuyến tính từng đoạn với cửa sổ dự báo hữu hạn, mà cụ thể là đã xây dựng được các thuật toán:

a) Thuật toán 2.3 và Thuật toán 2.4 để điều khiển phản hồi trạng thái hệ song tuyến.

b) Thuật toán 2.5 và Thuật toán 2.6 để điều khiển phản hồi trạng thái hệ phi tuyến.

Khả năng áp dụng của các thuật toán trên vào thực tế cũng đã được luận án thử nghiệm mô phỏng với: Hệ con lắc ngược và con lắc ngược quay.

Kết quả mô phỏng thu được đã xác nhận chất lượng tốt của bộ điều khiển dự báo phi tuyến sử dụng mô hình dự báo tuyến tính từng đoạn này, đúng như nhận định từ lý thuyết.

3) Xây dựng được bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách trên cơ sở ghép chung bộ quan sát trạng thái Kalman và bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái do luận án đề xuất. Chi tiết các bước làm việc của bộ điều khiển này đã được luận án thể hiện ở Thuật toán 2.7 và phiên bản chỉnh sửa của nó dành riêng cho hệ song tuyến.

Khả năng áp dụng của thuật toán trên vào thực tế cũng đã được luận án thử nghiệm mô phỏng thành công trên: Hệ con lắc ngược và con lắc ngược quay.

Kết quả mô phỏng thu được cũng đã khẳng định tính khả dụng cao của phương pháp vào thực tế công nghiệp.

4) Tiến hành thí nghiệm kiểm chứng lý thuyết trên mô hình thực: đối tượng con lắc ngược quay tại Phòng thí nghiệm Đo lường – Điều khiển của Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp. Kết quả

thông qua mô phỏng trên các đối tượng: con lắc ngược và con lắc ngược quay.

- 3) Tiến hành thí nghiệm kiểm chứng lý thuyết trên mô hình thực: Đối tượng con lắc ngược quay tại Phòng thí nghiệm Đo lường – Điều khiển của Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp có mô hình cho ở công thức (3.41). Kết quả thí nghiệm đã kiểm chứng tính đúng đắn của các thuật toán đề xuất trong luận án. Các kết quả thực nghiệm thu được xác nhận tính khả dụng vào thực tế của phương pháp như mong muốn và hoàn toàn phù hợp với nhận định lý thuyết.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Những vấn đề đã làm được

Đề tài luận án liên quan tới bài toán điều khiển phản hồi đầu ra cho các đối tượng có mô hình phi tuyến không liên tục:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = \underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) + \underline{\xi}_k \\ \underline{y}_k = \underline{g}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) + \underline{\zeta}_k \end{cases} \quad (4.2)$$

thỏa mãn điều kiện ràng buộc  $\underline{u}_k \in U$ , sao cho đầu ra  $\underline{y}_k$  của hệ bám ổn định được giá trị mẫu đặt trước, trong đó hệ (4.1) còn bị nhiễu tác động cả ở bên trong hệ thống bởi  $\underline{\xi}_k$  (nhiều quá trình) và  $\underline{\zeta}_k$  ở tín hiệu ra (nhiều đo).

Đề giải quyết được bài toán trên, luận án đã đặt ra hướng đi là sử dụng lọc Kalman mở rộng (EKF, UKF) để lọc nhiễu, đồng thời quan sát trạng thái hệ thống để cung cấp giá trị trạng thái quan sát được cho bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái, tạo ra bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách.

Với hướng đi như trên, luận án đã đạt được những kết quả như sau:

- 1) Trình bày lại được các phương pháp lọc Kalman mở rộng (EKF) và lọc UKF cho hệ phi tuyến dưới dạng thuật toán chi tiết. Thêm nữa luận án cũng đã bổ sung phương pháp ứng dụng Kalman tuyến tính (KF) để quan sát từng đoạn hệ phi tuyến theo nguyên lý tối ưu. Phương pháp đề xuất thêm này đã được luận án xây dựng chi tiết thành:

- a) Thuật toán 2.1 để quan sát trạng thái hệ song tuyến.

trong luận án này, là tác giả sẽ sử dụng cửa sổ dự báo hữu hạn thay vì vô hạn như một số công trình đã làm. Điều đó sẽ tạo ra thêm khả năng cho bộ điều khiển thu được các tính chất sau:

Có thể dễ dàng xử lý được các điều kiện ràng buộc nhờ các thuật toán tối ưu hóa.

Điều khiển được tín hiệu ra bám trực tiếp theo tín hiệu đặt cho trước mà không cần phải chuyển qua bài toán điều khiển ổn định, giống như đã làm khi sử dụng bộ điều khiển tối ưu LQR.

Bằng việc đề xuất kỹ thuật mới trong thiết kế bộ điều khiển dự báo phi tuyến, tổng kết lại bằng các thuật toán khả thi và dễ cài đặt, luận án có những ý nghĩa lý thuyết khoa học như sau:

Khẳng định được chất lượng và tính ứng dụng cao vào thực tế của các bộ điều khiển (các thuật toán) vào thực tế điều khiển các đối tượng công nghiệp.

Đóng góp thêm các ứng dụng của các bộ lọc Kalman mở rộng trong các bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra được thiết kế theo nguyên lý tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dự báo.

Đề xuất và chứng minh định lý ổn định, qua đó khẳng định được tính triệt để của các bộ điều khiển dự báo đề xuất.

### Ý nghĩa thực tiễn

Nhu cầu vận dụng các kiến thức của khoa học điều khiển luôn luôn hiện hữu trong mọi quá trình sản xuất. Chính vì vậy, mục tiêu ban đầu của luận án đó là ứng dụng được các bộ điều khiển dự báo mới được cho nhiều đối tượng trong công nghiệp. Luận án đã đáp ứng được nhu cầu thực tiễn trên, với các ý nghĩa thực tiễn cụ thể như sau:

Cung cấp được các bộ điều khiển dự báo (cụ thể bằng các thuật toán) cho các đối tượng phi tuyến trong công nghiệp.

Thiết kế và kiểm chứng chất lượng các bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra trên cơ sở ứng dụng các bộ lọc Kalman mở rộng cho các đối tượng: Con lắc ngược và con lắc ngược quay.

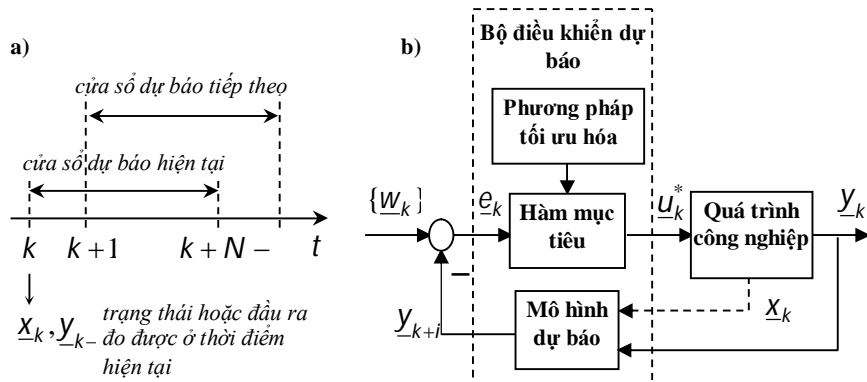
### Cấu trúc của luận án

Luận án có bố cục gồm 3 chương, trình bày trong 129 trang. Sau chương 1 trình bày về những kết quả đã có của kỹ thuật điều khiển dự báo phản hồi đầu ra với các ý kiến nhận xét phân tích riêng của

tác giả về từng phương pháp cụ thể, trong chương 2 luận án trình bày chi tiết các kỹ thuật cải tiến của tác giả để nâng cao khả năng ứng dụng của kỹ thuật này cho các đối tượng phi tuyến trong công nghiệp. Trong chương 3 luận án sẽ chứng minh tính khả dụng của các đề xuất cải tiến này trên một số đối tượng phi tuyến cụ thể thông qua thực nghiệm mô phỏng và thí nghiệm trên hệ thống thực. Cuối cùng, tác giả sẽ tổng kết lại các kết quả cơ bản mà luận án đã đạt được, những vấn đề còn tồn tại, các phương hướng khắc phục và những vấn đề cần được nghiên cứu tiếp sau này để hoàn thiện.

## CHƯƠNG 1

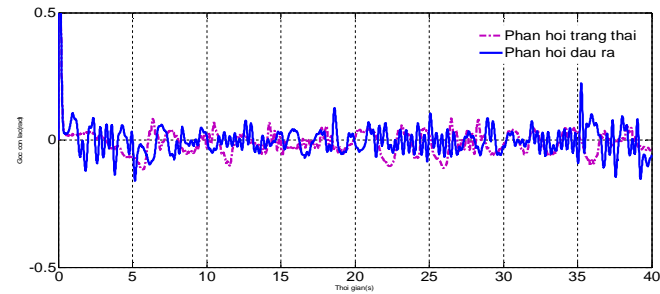
### TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO PHẢN HỒI ĐẦU RA



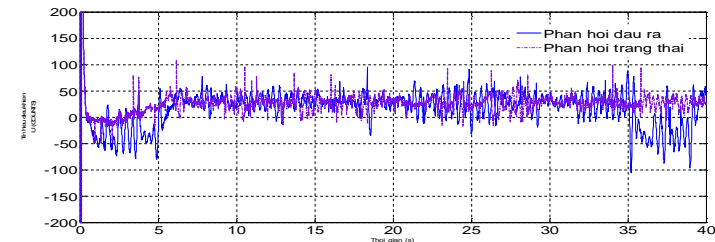
**Hình 1.1:** Cấu trúc hệ điều khiển dự báo

#### 1.1 Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra hệ có mô hình tuyến tính

Về mặt ứng dụng thực tế điều khiển dự báo đã được nghiên cứu, phát triển rất nhanh trong thời gian qua. Kể từ thời điểm xuất hiện bộ điều khiển dự báo đầu tiên do các kỹ sư công ty dầu khí Shell giới thiệu năm 1977, cho tới nay đã có khá nhiều phiên bản khác nhau của điều



**Hình 3.10:** So sánh góc con lắc được điều khiển trong hai trường hợp phản hồi đầu ra và phản hồi trạng thái



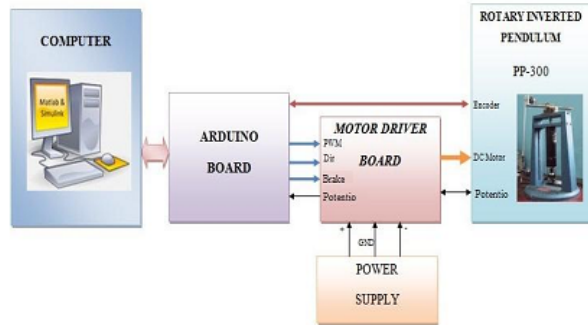
**Hình 3.11:** So sánh tín hiệu điều khiển trong hai trường hợp phản hồi đầu ra và phản hồi trạng thái

### 3.3 Kết luận chương 3

Trong chương 3 luận án đã trình bày các nội dung sau:

- 1) Áp dụng phương pháp điều khiển dự báo phản hồi trạng thái hệ phi tuyến trên cơ sở sử dụng mô hình dự báo tuyến tính từng đoạn do luận án đề xuất (Thuật toán 2.3 - Thuật toán 2.6) vào điều khiển bám tín hiệu ra mẫu cho các đối tượng: con lắc ngược và con lắc ngược quay cho chất lượng điều khiển như mong muốn.
- 2) Bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách trên cơ sở ghép chung bộ quan sát trạng thái Kalman và bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái do luận án đề xuất. Chi tiết các bước làm việc của bộ điều khiển này đã được luận án thể hiện ở Thuật toán 2.7. Chất lượng làm việc tốt, đạt yêu cầu mong muốn của bộ điều khiển phản hồi đầu ra này cũng đã được luận án khẳng định

### 3.2.3.2 Kết quả thí nghiệm



**Hình 3.8:** Sơ đồ kết nối thiết bị thí nghiệm



**Hình 3.9:** Hình ảnh tại bàn thí nghiệm khi điều khiển con lắc ở vị trí thẳng đứng hướng lên trên (góc con lắc bám theo giá trị 0) bằng bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo Thuật toán 2.7

kiểu dự báo phản hồi đầu ra được ra đời, khẳng định được vị trí trong ứng dụng vào điều khiển nhiều đối tượng công nghiệp khác nhau. Tuy vậy chúng vẫn chỉ mới dừng lại chủ yếu ở các đối tượng tuyến tính. Các phương pháp này bao gồm:

- Thuật toán điều khiển theo mô hình MAC (Model Algorithmic Control).
- Phương pháp ma trận động học điều khiển DMC (Dynamic Matrix Control)
- Phương pháp điều khiển dự báo tổng quát GPC (Generalized Predictive Control).
- Điều khiển dự báo tuyến tính phản hồi trạng thái.

Ngoài ra, để có thể biến đổi một bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái thành bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra, một xu hướng rất tự nhiên là sử dụng thêm bộ quan sát trạng thái. Bộ quan sát trạng thái được luận án quan tâm là bộ lọc Kalman. Do đó ở phần tổng quan này luận án cũng sẽ trình bày thêm về khả năng điều khiển dự báo phản hồi đầu ra hệ tuyến tính trên cơ sở ghép nối bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái và bộ lọc Kalman tuyến tính, được gọi ngắn gọn là bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách.

#### 1.1.1 Phương pháp MAC (Model algorithmic control)

#### Thuật toán 1.1(MAC)

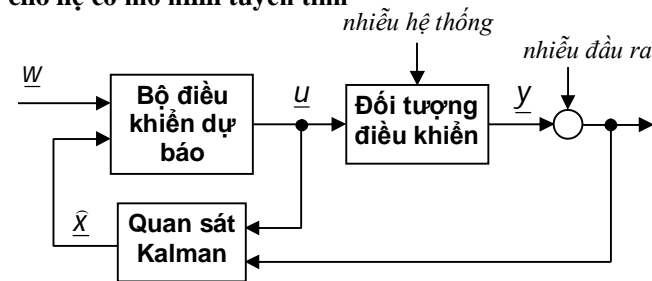
#### 1.1.2 Phương pháp DMC (Dynamic matrix control)

#### Thuật toán 1.2 (DMC)

#### 1.1.3 Phương pháp GPC (Generalized predictive control)

#### Thuật toán 1.3 (GPC)

#### 1.1.4 Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách cho hệ có mô hình tuyến tính



**Hình 1.2:** Điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách

## Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái

Thuật toán 1.4 (điều khiển dự báo phản hồi trạng thái hệ tuyến tính)

### Quan sát trạng thái hệ tuyến tính với lọc Kalman

Thuật toán 1.5 (KF)

## 1.2 Phương pháp điều khiển dự báo phản hồi đầu ra cho hệ có mô hình phi tuyến

### 1.2.1 Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái

Thuật toán 1.6 (điều khiển dự báo phản hồi trạng thái hệ phi tuyến)

#### 1.2.2 Lọc Kalman mở rộng (EKF-extended Kalman filter)

A) EKF loại 1: Tuyến tính hóa nhờ phép đổi biến vi phân

Thuật toán 1.7 (EKF loại 1)

B) EKF loại 2: Tuyến tính hóa xung quanh quỹ đạo tiền định

Thuật toán 1.8 (EKF loại 2)

C) EKF loại 3: Tuyến tính hóa các bước tính bên trong thuật toán 1.5

Thuật toán 1.9 (EKF loại 3)

### 1.2.3 UKF - Unscented Kalman Filter

Thuật toán 1.10 (UKF)

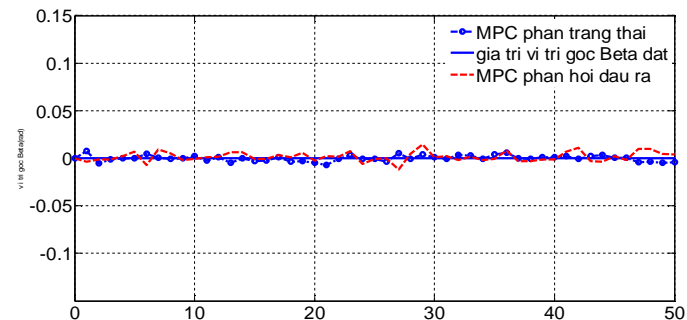
### 1.2.4 Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách với bộ lọc Kalman phi tuyến

1.3 Một số công trình của các tác giả trong và ngoài nước thời gian gần đây nghiên cứu về điều khiển dự báo phản hồi đầu ra

### 1.4 Định hướng nghiên cứu của luận án

### 1.5 Kết luận chương 1

Trong chương I luận án đã trình bày tổng quan những phương pháp điều khiển dự báo phản hồi đầu ra, bao gồm cả những phương pháp phản hồi đầu ra trực tiếp đơn giản như MAC, DMC, GPC (Thuật



**Hình 3.6:** Kết quả mô phỏng bộ điều khiển phản hồi đầu ra so sánh với bộ điều khiển MPC phản hồi trạng thái cho đối tượng con lắc ngược quay (đầu ra là vị trí góc con lắc theo trục z)

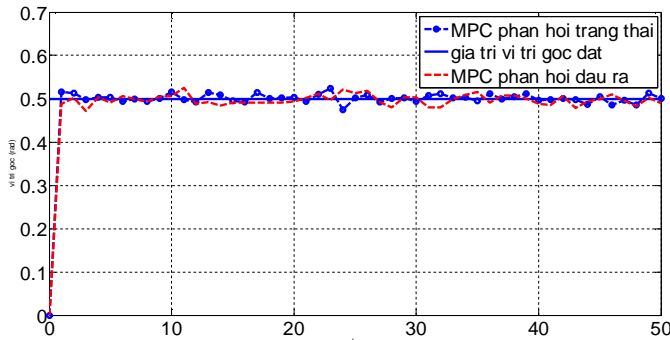
### 3.2.3 Mô tả hệ thống và kết quả thí nghiệm



**Hình 3.7:** Mô hình thí nghiệm con lắc ngược quay Kri PP-300 tại Phòng thí nghiệm Đo lường – Điều khiển, Trường ĐH KTCN Thái Nguyên



### 3.1.3 Điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách



**Hình 3.5:** Góc lắc thực  $y_2 = \varphi$  so sánh với góc lắc đặt thu được nhờ bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra khi có nhiễu hệ thống và nhiễu đầu ra ở dạng ồn trắng

### 3.2 Kiểm chứng chất lượng trên mô hình thí nghiệm con lắc ngược quay

#### 3.2.1 Mô hình toán của đối tượng con lắc ngược quay

Xuất phát từ các phương trình Lagrange mô tả chuyển động của con lắc ngược quay, các phương trình mô tả động cơ điện một chiều, sau khi biến đổi toán học, ta có mô hình toán của đối tượng con lắc ngược quay khi con lắc ở vị trí thẳng đứng như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = K_1 x_2 - K_2 x_4 + K_3 + K_4 u \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = K_5 x_2 - K_6 x_4 + K_7 + K_8 u \end{cases} \quad (3.46)$$

#### 3.2.2 Kết quả mô phỏng bộ điều khiển phản hồi đầu ra cho đối tượng con lắc ngược quay

toán 1.1 - Thuật toán 1.3), chủ yếu cho hệ SISO, cho đến phương pháp phản hồi đầu ra gián tiếp, hay còn gọi là phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, dùng được cho cả hệ MIMO.

Tất cả các phương pháp điều khiển đầu ra được trình bày trên đều chủ yếu là xây dựng cho hệ tuyến tính (Thuật toán 1.4), còn đối với hệ phi tuyến, nó mới chỉ dừng lại ở phương hướng. Lý do là vì thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (Thuật toán 1.6) rất khó được cài đặt và nếu như cài đặt được, sai số tính toán lớn của nó là không tránh khỏi bởi tính phi tuyến cao của hàm mục tiêu (1.36) tính theo tín hiệu điều khiển  $\underline{u}$  xác định theo các công thức (1.34) và (1.35).

Do mục tiêu của luận án là sử dụng lọc Kalman như một bộ quan trạng thái, phục vụ bài toán điều khiển dự báo hệ phi tuyến bằng phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, nên ở chương I, luận án cũng đã trình bày tóm tắt nội dung về bộ lọc Kalman tuyến tính (KF - Thuật toán 1.5) cũng như các dạng mở rộng của nó (EKF - Thuật toán 1.7 - Thuật toán 1.9) và UKF (Thuật toán 1.10) cho hệ phi tuyến. Mỗi dạng mở rộng này của lọc Kalman đều có những ưu nhược điểm riêng và cũng chỉ nên áp dụng cho một lớp các hệ phi tuyến đặc biệt.

Thông qua việc tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước, phân tích những điểm hạn chế cần tiếp tục được nghiên cứu, tác giả cũng đã đưa ra định hướng nghiên cứu của luận án trong phần cuối chương.

Trên cơ sở kết quả phân tích về khả năng cài đặt ít thành công của Thuật toán 1.6 dùng cho điều khiển dự báo hệ phi tuyến, nên sau đây, trong chương 2, luận án sẽ đề xuất một phương pháp điều khiển dự báo phản hồi trạng thái khác mang tính khả thi cao hơn, dùng được cho hệ phi tuyến MIMO nói chung và hệ song tuyến nói riêng. Tất nhiên, cùng với phương pháp điều khiển dự báo phản hồi trạng thái phi tuyến được đề xuất mới này, bộ lọc Kalman mở rộng cũng sẽ được cải tiến một cách phù hợp hơn để có thể tương thích với phương pháp đó trong điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách.

## CHƯƠNG 2

### THIẾT KẾ LỌC KALMAN ĐỂ QUAN SÁT TỪNG ĐOẠN TRẠNG THÁI THEO NGUYÊN LÝ TỐI ƯU VÀ ỨNG DỤNG

## VÀO ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO PHẦN HỒI ĐẦU RA HỆ PHI TUYẾN THEO NGUYÊN LÝ TÁCH

### 2.1 Xây dựng bộ quan sát Kalman từng đoạn cho hệ phi tuyến

#### 2.1.1 Quan sát Kalman từng đoạn cho hệ song tuyến

Thuật toán 2.1: *Quan sát Kalman từng đoạn hệ song tuyến* (2.5).

- 1) Chọn cửa sổ quan sát khởi phát  $M \geq 2$  và ma trận trọng số  $\Lambda$  theo (2.11).
- 2) Đo các giá trị vào ra  $\underline{u}_i, \underline{y}_i, i = 0, 1, \dots, M$ .
- a) Xác định tất cả các ma trận  $\hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i, \hat{D}_i, i = 0, 1, \dots, M$  từ mô hình (2.5) của hệ theo công thức (2.6).
- b) Tính  $M$  các vector  $\underline{d}_i, i = 0, 1, \dots, M-1$  theo (2.7) và  $\underline{g}_i, i = 1, 2, \dots, M$  theo (2.8). Xây dựng vector hợp  $\underline{g}$  và ma trận  $G$  theo (2.9).
- c) Tính  $\underline{x}_M^*$  theo (2.12). Gán  $\hat{\underline{x}}_M = \underline{x}_M^*, A_M = \hat{A}_M, B_M = \hat{B}_M$  và xuất  $\hat{\underline{x}}_M$  làm giá trị trạng thái quan sát được của hệ (2.5) ở thời điểm  $M$ .
- 3) Gán  $\underline{x}_M(+)=\hat{\underline{x}}_M$  và chọn  $P_M(+)$  tùy ý. Gán  $k = M + 1$ .
- 4) Đo  $\underline{u}_k, \underline{y}_k$ . Xác định  $C_k = C(\underline{u}_k, k), D_k = D(\underline{u}_k, k)$ .
- 5) Tính:

$$\underline{x}_k(-) = A_{k-1}\underline{x}_{k-1}(+) + B_{k-1}\underline{u}_{k-1}$$

$$P_k(-) = A_{k-1}P_{k-1}(+)A_{k-1}^T + \Psi_{k-1}$$

$$K_k = P_k(-)C_k^T(C_kP_k(-)C_k^T + \Phi_k)^{-1}$$

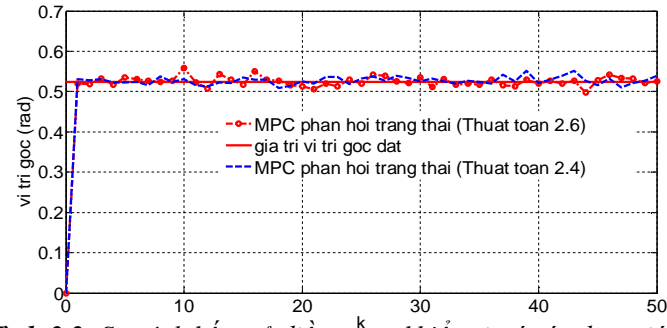
$$P_k(+) = (I - K_kC_k)P_k(-)$$

$$\underline{x}_k(+) = \underline{x}_k(-) + K_k(\underline{y}_k - C_k\underline{x}_k(-) - D_k\underline{u}_k)$$

- 6) Xuất  $\hat{\underline{x}}_k = \underline{x}_k(+)$  làm giá trị trạng thái quan sát được của hệ (2.5) ở thời điểm  $k$ .

Tính  $A_k = A(\underline{u}_k, k), B_k = B(\underline{u}_k, k)$ . Gán  $k := k + 1$  và quay về 4).

**Ví dụ 2.1 và Ví dụ 2.2:** Minh họa bộ quan sát Kalman từng đoạn

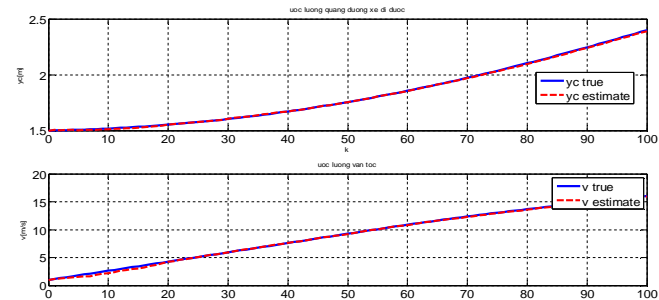


**Hình 3.3:** So sánh kết quả điều khiển vị trí góc theo giá trị đặt khi sử dụng 2 bộ điều khiển theo Thuật toán 2.4 và Thuật toán 2.6

#### Nhận xét:

Qua việc thiết kế điều khiển và so sánh chất lượng điều khiển với 2 bộ điều khiển theo Thuật toán 2.4 (sử dụng mô hình song tuyến) và Thuật toán 2.6 (sử dụng mô hình phi tuyến), có thể thấy ngay rằng, với các đối tượng phi tuyến có mô hình có thể chuyển đổi về dạng song tuyến thì ta nên sử dụng Thuật toán 2.4 để thiết kế điều khiển do việc cài đặt theo Thuật toán 2.4 là đơn giản hơn và khối lượng tính toán ít hơn so với Thuật toán 2.6, đồng thời chất lượng điều khiển cũng tốt hơn so với việc sử dụng Thuật toán 2.6, do trong Thuật toán 2.6 có sử dụng công thức xấp xỉ có thể dẫn đến sai lệch mô hình. Chính vì vậy, với những đối tượng phi tuyến có mô hình biến đổi được về dạng song tuyến thì ta nên sử dụng mô hình song tuyến để thiết kế điều khiển theo Thuật toán 2.4.

#### 3.1.2 Quan sát trạng thái với lọc Kalman mở rộng



**Hình 3.4:** Giá trị trạng thái  $x_3, x_4$  quan sát được so sánh với giá trị thực khi có nhiễu hệ thống và nhiễu đầu ra là nhiễu Gauss

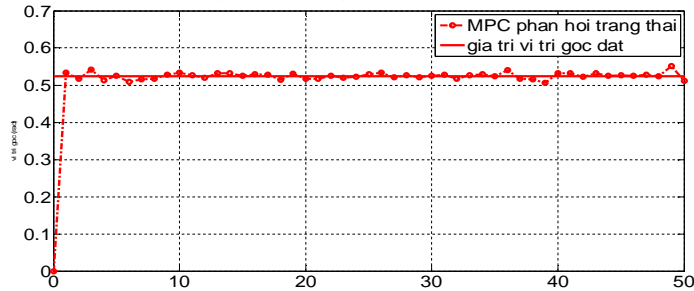
### CHƯƠNG 3

## THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG CHẤT LƯỢNG CỦA BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐÁ ĐỀ XUẤT

### 3.1 Điều khiển đối tượng con lắc ngược

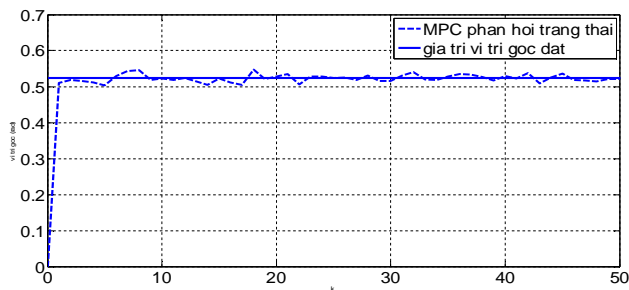
#### 3.1.1 Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái

Sử dụng trực tiếp mô hình phi tuyến để thiết kế bộ điều khiển DBPHTT đối tượng con lắc ngược theo Thuật toán 2.6

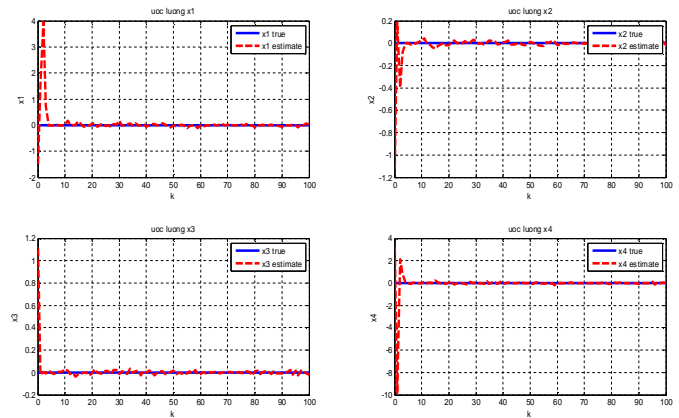


**Hình 3.1:** So sánh góc lắc thực có với góc lắc đặt trước khi sử dụng trực tiếp mô hình phi tuyến để thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái theo Thuật toán 2.6

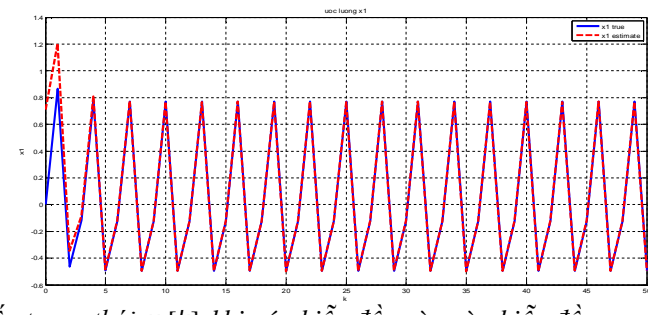
Sử dụng mô hình song tuyến để thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái cho đối tượng con lắc ngược theo Thuật toán 2.4



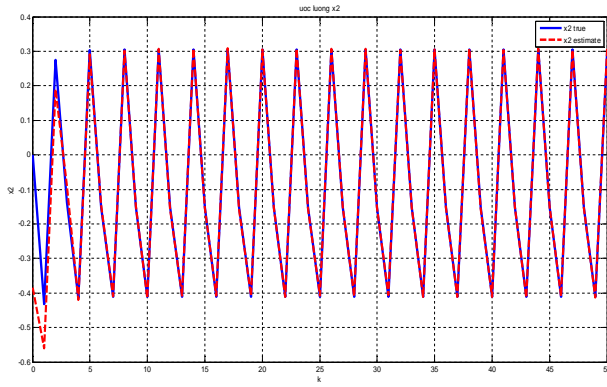
**Hình 3.2:** So sánh góc lắc thực có với góc lắc đặt trước khi sử dụng mô hình song tuyến



**Hình 2.1:** Trạng thái quan sát được và trạng thái thực của đối tượng khi có nhiễu đầu vào và nhiễu đầu ra có giá trị kỳ vọng  $\mu = 0$



**Hình 2.2:** Biến trạng thái  $x_1[k]$  khi có nhiễu đầu vào và nhiễu đầu ra có giá trị kỳ vọng  $\mu = 0$



**Hình 2.3:** Biến trạng thái  $x_2[k]$  khi có nhiễu đầu vào và nhiễu đầu ra có giá trị kỳ vọng  $\mu = 0$

### 2.1.2 Thiết kế bộ quan sát Kalman từng đoạn cho hệ phi tuyến Quan sát trạng thái hệ phi tuyến khi đã biết trạng thái đầu

**Thuật toán 2.2a:** Xác định trạng thái hệ phi tuyến khi đã có trạng thái đầu  $\underline{x}_0$ .

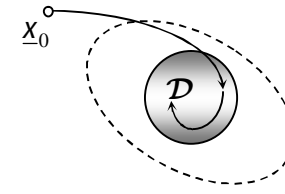
**Xác định xấp xỉ trạng thái đầu theo tiêu chuẩn tối ưu**

**Thuật toán 2.2b:** Xác định trạng thái đầu  $\underline{x}_0$ .

**Thuật toán quan sát từng đoạn trạng thái cho hệ phi tuyến**

**Thuật toán 2.2:** *Quan sát trạng thái hệ phi tuyến.*

- 1) Chọn cửa sổ quan sát  $M \geq 2$ .
  - a) Đo  $M+1$  các giá trị vào ra  $\underline{u}_j, \underline{y}_j, j = 0, 1, \dots, M$ .
  - b) Xây dựng các vector hàm hợp  $f^i(\cdot), g \circ f^i(\cdot), i = 1, \dots, M$  theo (2.22) và (2.23). Từ đó lập hàm mục tiêu  $J(\underline{x}_0)$  theo (2.24), (2.25) và (2.26).
  - c) Tìm nghiệm tối ưu  $\underline{x}_0^*$  của bài toán (2.26) nhờ phương pháp quy hoạch phi tuyến.
  - d) Xác định các giá trị trạng thái  $\underline{x}_j, j = 1, 2, \dots, M$  từ  $\underline{x}_0^*$  theo (2.27).
- 2) Gán  $\underline{e}_M(+)=\underline{0}, k=M+1$ .



**Hình 2.6:** Tính ổn định ISS của hệ kín phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách

## 2.4 Kết luận chương 2

Trong chương 2 luận án đã trình bày các nội dung sau:

- 1) Mở rộng lọc Kalman tuyến tính (KF) để áp dụng cho hệ phi tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến của hệ dọc theo trục thời gian và được dịch chuyển trên trục thời gian cùng với cửa sổ dự báo của bộ điều khiển dự báo. Cụ thể, luận án đã xây dựng được:
    - a) Thuật toán 2.1 để quan sát trạng thái hệ song tuyến.
    - b) Thuật toán 2.2 để quan sát trạng thái hệ phi tuyến.
- Khả năng áp dụng của hai thuật toán trên cũng đã được luận án thử nghiệm mô phỏng với trên đối tượng song tuyến theo tín hiệu vào (2.14), (2.15) ở ví dụ 2.1 và ví dụ 2.2.
- 2) Phương pháp điều khiển dự báo phản hồi trạng thái hệ phi tuyến trên cơ sở sử dụng mô hình dự báo tuyến tính từng đoạn mà cụ thể là hai thuật toán:
    - a) Thuật toán 2.3 và Thuật toán 2.4 để điều khiển phản hồi trạng thái hệ song tuyến.
    - b) Thuật toán 2.5 hoặc Thuật toán 2.6 để điều khiển phản hồi trạng thái hệ phi tuyến.
  - 3) Bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách trên cơ sở ghép chung bộ quan sát trạng thái Kalman và bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái do luận án đề xuất. Chi tiết các bước làm việc của bộ điều khiển này đã được luận án thể hiện ở Thuật toán 2.7.
  - 4) Một điều kiện đủ để bộ điều khiển phản hồi đầu ra là Thuật toán 2.7 làm hệ ổn định ISS (ổn định thực tế).

1) Tùy chọn điều kiện đầu  $\bar{x}_0 = \underline{x}_0(+)$  và  $P_0(+)$ . Đo  $\underline{u}_0, \underline{y}_0$ . Gán  $k = 1$ .

2) Đo  $\underline{y}_k$ . Chọn hai ma trận trọng số  $\Lambda_k, L_k$  đối xứng xác định dương.

3) Tính:  $\underline{x}_k(-) = \underline{f}_{-k}(\underline{x}_{k-1}(+), \underline{u}_{k-1})$ ,  $G_k$  theo (1.47),

trong đó  $\underline{g}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + D(\underline{x}_k)\underline{u}_k$  khi đối tượng điều khiển là hệ (2.44) hoặc  $\underline{g}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k$  khi đối tượng điều khiển là (2.45). Tính  $\bar{F}_{k-1}$  theo (1.45) và:

$$\begin{aligned} P_k(-) &= F_{k-1}P_{k-1}(+)F_{k-1}^T + \Psi_{k-1} \\ K_k &= P_k(-)G_k^T(G_kP_k(-)G_k^T + \Phi_k)^{-1} \\ P_k(+) &= (I - K_kG_k)P_k(-) \\ \underline{x}_k(+) &= \underline{x}_k(-) + K_k(\underline{y}_k - G_k\underline{x}_k(-)) \end{aligned}$$

4) Gán  $\underline{x}_k = \underline{x}_k(+)$  và xác định các ma trận  $A_k, B_k$  theo (2.40),  $C_k, D_k$  theo công thức tương tự như (2.42) nhưng bây giờ được sửa đổi thành  $C_k = C(\underline{x}_k)$ ,  $D_k = D(\underline{x}_k)$ , hai ma trận  $E, F$  theo (2.45) nếu đối tượng điều khiển là (2.52) hoặc theo (2.50) nếu đối tượng điều khiển là (2.53) và vector  $\mathbf{z}$  theo (2.48) hoặc theo (2.51).

5) Gán  $k := k + 1$ .

Tính  $\underline{u}_k$  theo (2.35) rồi đưa vào điều khiển hệ (2.52) hoặc (2.53) trong khoảng thời gian đúng bằng chu kỳ trích mẫu  $T_a$  rồi quay về bước 2).

### 2.3.2 Tính ổn định ISS của bộ điều khiển phản hồi đầu ra

**Định lý:** Nếu các bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái cho ở Thuật toán 2.3 - Thuật toán 2.6, ký hiệu bởi (2.54), là hàm Lipschitz, hệ phi tuyến (2.1) có vector hàm  $\underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k)$  cũng là hàm Lipschitz, thì bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra của luận án (Thuật toán 2.7) sẽ làm hệ ổn định ISS.

Tùy chọn  $P_M(+)$  và tính  $\bar{y}_M = \underline{g}(\bar{x}_M, \underline{u}_M)$ .

3) Đo  $\underline{u}_{k-1}, \underline{u}_k, \underline{y}_k$ . Tính:

$$\begin{aligned} A_k &= \left. \frac{\partial f}{\partial \underline{x}} \right|_{\bar{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}}, B_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \underline{u}} \right|_{\bar{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}}, \\ C_k &= \left. \frac{\partial g}{\partial \underline{x}} \right|_{\bar{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}}, D_k = \left. \frac{\partial g}{\partial \underline{u}} \right|_{\bar{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}} \quad \text{và } \Delta \underline{y}_k = \underline{y}_k - \bar{y}_{k-1} \end{aligned}$$

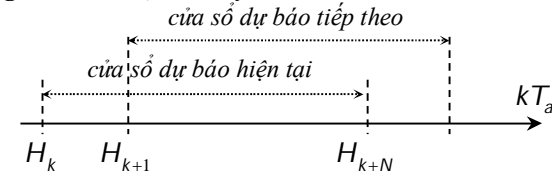
4) Tính:

$$\begin{aligned} \underline{e}_k(-) &= A_k \underline{e}_{k-1}(+) + B_k \underline{v}_{k-1} \\ P_k(-) &= A_k P_{k-1}(+) A_k^T + \Psi_{k-1} \\ K_k &= P_k(-) C_k^T (C_k P_k(-) C_k^T + \Phi_k)^{-1} \\ P_k(+) &= (I - K_k C_k) P_k(-) \\ \underline{e}_k(+) &= \underline{e}_k(-) + K_k (\Delta \underline{y}_k - C_k \underline{e}_k(-) - D_k \underline{v}_k) \end{aligned}$$

5) Tính  $\bar{x}_k = \underline{e}_k(+) + \bar{x}_{k-1}$  và xuất ra làm giá trị trạng thái quan sát được của hệ.

6) Tính  $\bar{y}_k = \underline{g}(\bar{x}_k, \underline{u}_k)$ . Gán  $k := k + 1$  và quay về 3).

### 2.2 Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái hệ phi tuyến trên cơ sở sử dụng mô hình dự báo tuyến tính



**Hình 2.4:** Nguyên lý điều khiển dự báo phản hồi trạng thái phi tuyến trên cơ sở sử dụng mô hình dự báo tuyến tính

### 2.2.1 Điều khiển hệ song tuyến

#### Điều khiển hệ hợp thức không chặt

Thuật toán 2.3: Điều khiển bám tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ song tuyến (2.28) bằng bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái.

- 1) Gán  $k = 0$ . Chọn độ rộng cửa sổ dự báo  $N > 2$ .
- 2) Đo trạng thái  $\underline{x}_k$  (hoặc quan sát) và từ đó xác định các ma trận  $A_k, B_k, C_k, D_k$  theo (2.30),  $E, F$  theo (2.33), vector  $\mathbf{z}$  theo (2.34). Chọn hai ma trận trọng số  $\Lambda_k, L_k$  đối xứng xác định dương.
- 3) Tính  $\underline{u}_k$  theo (2.35) rồi đưa vào điều khiển hệ (2.28) trong khoảng thời gian đúng bằng chu kỳ trích mẫu  $T_a$ .
- 4) Gán  $k := k + 1$  rồi quay về bước 2).

#### Điều khiển hệ hợp thức chặt

Thuật toán 2.4: Điều khiển bám tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ song tuyến (2.36) bằng bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái.

- 1) Gán  $k = 0$ . Chọn độ rộng cửa sổ dự báo  $N > 2$ .
- 2) Đo trạng thái  $\underline{x}_k$  (hoặc quan sát) và từ đó xác định các ma trận  $A_k, B_k, C_k, D_k$  theo (2.30),  $E, F$  theo (2.37), vector  $\mathbf{z}$  theo (2.38). Chọn hai ma trận trọng số  $\Lambda_k, L_k$  đối xứng xác định dương.
- 3) Tính  $\underline{u}_k$  theo (2.35) rồi đưa vào điều khiển hệ (2.36) trong khoảng thời gian đúng bằng chu kỳ trích mẫu  $T_a$ .
- 4) Gán  $k := k + 1$  rồi quay về bước 2).

### 2.2.2 Điều khiển hệ phi tuyến

#### Điều khiển hệ hợp thức không chặt

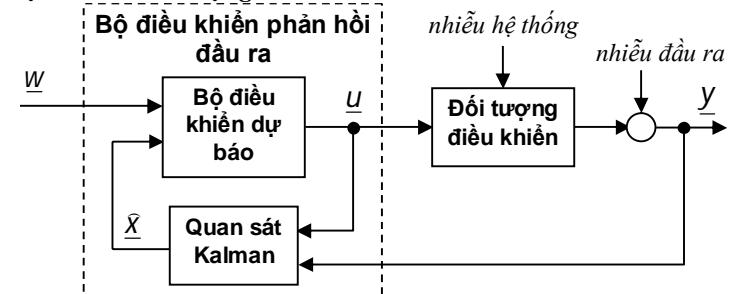
Thuật toán 2.5: Điều khiển bám tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ phi tuyến (2.39) bằng bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái.

- 1) Gán  $\underline{u}_{-1} = \underline{0}, \underline{x}_{-1} = \underline{0}, k = 0$ . Chọn độ rộng cửa sổ dự báo  $N > 2$ .
- 2) Đo trạng thái  $\underline{x}_k$  (hoặc quan sát) và từ đó xác định các ma trận  $A_k, B_k$  theo (2.40),  $C_k, D_k$  theo (2.42),  $E, F$  theo (2.45) và vector  $\mathbf{z}$  theo (2.48). Chọn hai ma trận trọng số  $\Lambda_k, L_k$  đối xứng xác định dương.
- 3) Tính  $\underline{u}_k$  theo (2.35) rồi đưa vào điều khiển hệ (2.39) trong khoảng thời gian đúng bằng chu kỳ trích mẫu  $T_a$ .
- 4) Gán  $k := k + 1$  rồi quay về bước 2).

#### Điều khiển hệ hợp thức chặt

Thuật toán 2.6: Điều khiển bám tín hiệu đầu ra mẫu cho hệ phi tuyến (2.43) bằng bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái.

### 2.3 Điều khiển dự báo phân hồi đầu ra hệ phi tuyến với các bộ lọc Kalman mở rộng



Hình 2.5: Cấu trúc hệ điều khiển phân hồi đầu ra theo nguyên lý tách

Thuật toán 2.7: Điều khiển dự báo phân hồi đầu ra theo nguyên lý tách cho hệ phi tuyến (2.44) hoặc (2.45) với bộ lọc Kalman EKF loại 3.