Tạp chí Tin học và Điều khiển học, T.24, S.3 (2008), 229–235

MỘT PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH BIBS THÍCH NGHI HỆ SONG TUYẾN (BILINEAR) VÀ ỨNG DỤNG VÀO ĐIỀU KHIỂN HỆ CÁC KHỚP NỐI CƠ KHÍ MỀM

NGUYỄN DOÃN PHƯỚC

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Abstract. The solvability of bounded inputs(bounded states (BIBS) stabilization problem of uncertain bilinear systems has been given in this paper. The BIBS controller is designed by combining of feedback exact linearization and disturbances rejection methods. It is showed that the contructed controller is guaranteed by the adaptive BIBS of the feedback systems. The paper also presents an application of this method to adaptive BIBS control of flexible link in mechanical systems.

Tóm tắt. Báo cáo này đề cập đến một phương pháp mới để thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái thích nghi kháng nhiễu cho đối tượng phi tuyến bất định dạng song tuyến (bilinear) sao cho hệ kín thu được (bao gồm đối tượng điều khiển và bộ điều khiển) là ổn định BIBS. Bài báo cũng trình bày một ứng dụng của phương pháp vào việc điều khiển thích nghi hệ khớp nối cơ khí mềm.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Lớp đối tượng phi tuyến bất định được quan tâm ở đây là hệ song tuyến (bilinear) có chứa thành phần bất định hằng số ở đầu vào, mô tả bởi

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = A(\underline{x})\underline{x} + B[\underline{u} + \Phi(\underline{x})\underline{\theta}], \tag{1}$$

trong đó $\underline{x} \in R^n$ là vector của các biến trạng thái (hệ có n biến trạng thái), $\underline{u} \in R^m$ là vector các tín hiệu đầu vào, $\underline{\theta} \in R^p$ là vector các tham số hằng bất định, được xem như các tham số mô hình không thể nhận dạng được của đối tượng, B là ma trận hằng và $A(\underline{x}), \Phi(\underline{x})$ là các ma trận hàm phụ thuộc trạng thái có số chiều phù hợp (với bậc của đối tượng, với số các tín hiệu vào và với số các tham số bất định của mô hình).

Đã có nhiều phương pháp điều khiển thích nghi cho lớp các đối tượng trên $[1, 7, 8]$. Tuy nhiên phần lớn các phương pháp này chỉ tập trung vào tính chất ổn định Lyapunov, tức là chỉ đặt ra nhiệm vụ điều khiển làm cho quỹ đạo trạng thái tự do của hệ kín (khi tín hiệu vào $\underline{w}$ của hệ kín đồng nhất bằng $\underline{0}$) của hệ tiến được tiệm cận về gốc tọa độ. Điều này sẽ không đảm bảo được tín hiệu đầu ra (hoặc trạng thái) của hệ sẽ bám theo được tín hiệu mong muốn ở đầu vào, thậm chí hệ còn có thể có quỹ đạo trạng thái tiến tới (khi tín hiệu vào khác không, nói cách khác nó sẽ không đảm bảo được khi tín hiệu vào tiến tới giá trị xác lập $|\underline{u}(t) \to k|$ (hằng số) thì hệ cũng sẽ có trạng thái tiến tiệm cận tới một vector hằng bị chặn $|\underline{x}(t)| \to k|\underline{x}_\infty|$, được gọi là tính ổn định BIBS. Rõ ràng nhược điểm này hạn chế rất nhiều khả năng ứng dụng của phương pháp, nhất là khi phải điều khiển hệ bám theo được quỹ đạo mong muốn cho trước.

Báo cáo này sẽ giới thiệu một phương pháp điều khiển thích nghi lớp hệ theo nghĩa hệ kín thu được sẽ ổn định BIBS và kháng được thành phần bất định $\underline{\theta}$, tức là hệ sẽ có quỹ đạo trạng thái $\underline{x}(t)$ bám tiệm cận theo được quỹ đạo trạng thái mong muốn $\underline{z}(t)$ bị chặn với mọi tham số hằng $\underline{\theta}$ không biết trước trong hệ. Để đạt được chất lượng động học đặt ra đó, phương pháp điều khiển giới thiệu ở đây hoàn toàn được xây dựng trên nền định hướng hệ tuyến tính, song khác hẳn với các phương pháp điều khiển tuyến tính hóa chính xác (exact linearization) giới thiệu trong [3] vốn đòi hỏi tính chính xác cao của mô hình cũng như tính khả vi vô hạn lần (thuộc không gian C^∞) của các ma trận hàm $A(\underline{x}), \Phi(\underline{x})$, phương pháp của bài báo chỉ yêu cầu tính đủ chính xác của chúng chứ không cần đến giả thiết các ma trận hàm $A(\underline{x}), \Phi(\underline{x})$ phải liên tục.

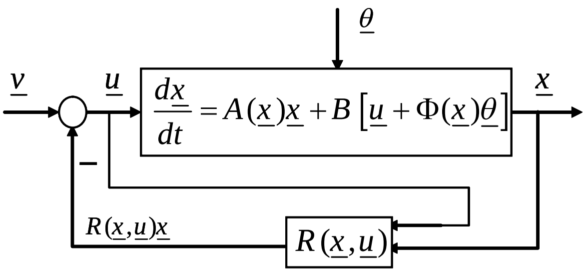
2. PHƯƠNG PHÁP

Bộ điều khiển thích nghi để điều khiển ổn định BIBS đối tượng song tuyến sẽ được thiết kế qua hai bước (nguyên tắc điều khiển cascade), bao gồm:

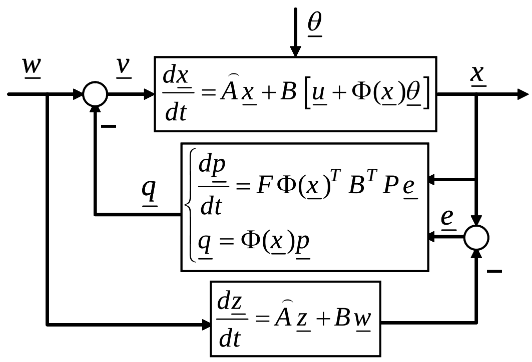
1. Bước thứ nhất là xác định bộ điều khiển phản hồi trạng thái $\underline{u} = \underline{v} - R(\underline{x}, \underline{u})\underline{x}$ để đưa hệ (1) về dạng (hình 1):

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = \widehat{A}(\underline{x})\underline{x} + B[\underline{v} + \Phi(\underline{x})\underline{\theta}], \tag{1}$$

trong đó $\widehat{A} = A(\underline{x}) - BR(\underline{x}, \underline{u})$ là ma trận hằng có các giá trị riêng nằm bên trái trục ảo (gọi là ma trận bền) ứng với chất lượng mong muốn của quỹ đạo trạng thái mẫu $\underline{z}(t)$.



Hình 1. Điều khiển vòng trong



Hình 2. Điều khiển vòng ngoài

2. Bước thứ hai (hình 2) là điều khiển kháng thành phần bất định $\underline{\theta}$ cho hệ để quỹ đạo trạng thái $\underline{x}(t)$ của nó bám tiệm cận theo được trạng thái $\underline{z}(t)$ của

$$\frac{d\underline{z}}{dt} = \widehat{A}\underline{z} + B\underline{w}, \tag{4}$$

theo nghĩa

$$\lim_{t\to\infty} \underline{e}(t) = \underline{0} \quad \text{với} \quad \underline{e} = \underline{x} - \underline{z}. \tag{5}$$

Rõ ràng hệ tuyến tính tham số hằng mẫu là ổn định vừa theo nghĩa Lyapunov, vừa theo nghĩa BIBS, do đó nếu đạt được yêu cầu , hệ cũng sẽ ổn định BIBS với mọi $\underline{\theta}$.

2.1. Thiết kế bộ điều khiển vòng trong

Công việc thiết kế bộ điều khiển thứ nhất thực chất là giải phương trình (3) để tìm $R(\underline{x}, \underline{u})$, trong đó $\widehat{A}$ là ma trận hằng có các giá trị riêng nằm bên trái trục ảo ứng với chất lượng mong muốn của tính ổn định BIBS, chẳng hạn như tốc độ ổn định, dạng quỹ đạo trạng thái ổn định $\underline{z}(t)$.

Đương nhiên, để xác định được nghiệm $R(\underline{x}, \underline{u})$ của phương trình thì việc đầu tiên cần bàn là dưới những điều kiện nào, phương trình đó sẽ có nghiệm, rồi sau đó mới có thể bàn về việc xác định nghiệm đó.

Công cụ toán học được sử dụng để trả lời câu hỏi về sự tồn tại nghiệm $R(\underline{x}, \underline{u})$ của phương trình (3) là tích Kronecker của hai ma trận A, B, ký hiệu bởi $A \otimes B$ và toán tử vector hóa ma trận A, B, ký hiệu bởi $vec(A)$.

Định lý 1. *Phương trình (3) có nghiệm $R(\underline{x}, \underline{u})$ khi và chỉ khi*

$$vec(A(\underline{x}) - \widehat{A}) \in Im(I_n \otimes B(\underline{x})),\ \forall \underline{x}, \underline{u}, \tag{6}$$

trong đó I_n là ma trận đơn vị có số chiều n và $Im(\bullet)$ là không gian tuyến tính chứa các điểm ảnh của ma trận (ánh xạ).

Chứng minh

Nhân cả hai vế của (3) với I_n về bên phải, sẽ được từ tính chất của toán tử hóa ma trận tích Kronecker

$$A(\underline{x}) - BR(\underline{x}, \underline{u})I_n = \widehat{A} \Leftrightarrow vec(A(\underline{x})) - vec(BRA(\underline{x}, \underline{u})I_n = vec(\widehat{A})$$

$$\Leftrightarrow vec(A(\underline{x} - \widehat{A}) = (I_n \otimes B)vec(R(\underline{x}, \underline{u})). \tag{7}$$

■

Ngoài ra, ta có thể thấy được rằng ứng với một chất lượng động học BIBS mong muốn của $\underline{z}(t)$ sẽ tồn tại vô số ma trận $\widehat{A}$, nên khả năng chọn được một ma trận bền, tham số hằng $\widehat{A}$ thỏa mãn (6) là rất cao.

Định lý 2. *Nếu đối tượng bậc n mô tả bởi (1) có m tín hiệu vào với $m \leq n$ và $Rank(B) = m$, trong đó ký hiệu $Rank(\bullet)$ chỉ hạng của ma trận (số chiều của không gian ảnh), cũng như ma trận $\widehat{A}$ ứng với chất lượng mong muốn của $\underline{z}(t)$ được chọn để thỏa mãn (6) thì nghiệm $R(\underline{x}, \underline{u})$ của phương trình (3) sẽ là*

$$vec(R(\underline{x}, \underline{u})) = ((I_n \otimes B)^T (I_n \otimes B))^{-1} (I_n \otimes B)^T vec(A(\underline{x}) - \widehat{A}). \tag{8}$$

Chứng minh

Khi $Rank(B) = m \leq n$ thì ma trận $((I_n \otimes B)^T (I_n \otimes B))$ sẽ không suy biến. Nhân cả hai vế của (7) với

$$((I_n \otimes B)^T(I_n \otimes B))^{-1}(I_n \otimes B)^T$$

ta được điều phải chứng minh. ■

2.2. Thiết kế bộ điều khiển vòng ngoài

Sau khi đã đưa đối tượng điều khiển (1) ban đầu về dạng (2) nhờ bộ điều khiển phản hồi trạng thái $R(\underline{x}, \underline{u})$, ta sẽ thực hiện tiếp bước thứ hai là điều khiển thích nghi hệ (2) sao cho nó luôn bám được theo mô hình mẫu (4) ổn định BIBS. Và để làm được điều này ta sẽ sử dụng cấu trúc điều khiển kháng bất định được mô tả ở hình 2.

Định lý 3. *Với $\frown{A}$ là ma trận bền (có các giá trị riêng nằm bên trái trục ảo) và bộ điều khiển*

$$\begin{cases} \dfrac{d\underline{p}}{dt} = F\Phi(\underline{x})^T B^T P\underline{e} \\ \underline{q} = \Phi(\underline{x})\underline{p} \end{cases}$$

hệ (2) sẽ bám được theo mô hình mẫu (4) ổn định BIBS theo nghĩa (5), trong đó P là nghiệm đối xứng xác định dương của phương trình Lyapunov

$$\frown{A}^T P + P\frown{A} = -Q \tag{10}$$

có Q là ma trận xác định dương tùy chọn và F cũng là một ma trận xác định dương tùy chọn.

Chứng minh

Với tín hiệu đầu ra $\underline{q}$ của bộ điều khiển $\underline{v} = \underline{w} =$, mô hình của hệ (2) và quan hệ $\underline{v}, \underline{w} - \underline{q} = \underline{w} - \Phi(\underline{x})\underline{p}$ ta có được phương trình mô tả sai lệch $\underline{e} = \underline{x} - \underline{z}$ như sau:

$$\begin{aligned} \frac{d\underline{e}}{dt} &= \frown{A}\underline{x} + B[\underline{v} + \Phi(\underline{x})\underline{\theta}] - (\frown{A}\underline{z} + B\underline{w}) = \frown{A}\underline{x} + B[\underline{w} - \Phi(\underline{x})\underline{p} + \Phi(\underline{x})\underline{\theta}] - (\frown{A}\underline{z} + B\underline{w}) \\ &= \frown{A}(\underline{x} - \underline{z}) - B\Phi(\underline{x})(\underline{p} - \underline{\theta}) = \frown{A}\underline{x} - B\Phi(\underline{x})(\underline{p} - \underline{\theta}) \end{aligned}$$

Sử dụng hàm hợp thức (proper), nên xác định dương:

$$V(\underline{e}, (\underline{p} - \underline{\theta})) = \underline{e}^T P\underline{e} + (\underline{p} - \underline{\theta})^T F^{-1}(\underline{p} - \underline{\theta})$$

trong đó P là nghiệm đối xứng xác định dương của (10) và F là ma trận đối xứng xác định dương tuỳ chọn, do đó ma trận nghịch đảo F^{-1} cũng đối xứng xác định dương, ta được:

$$\begin{aligned} \frac{V}{dt} &= (\frown{A}\underline{x} - B\Phi(\underline{x})(\underline{p} - \underline{\theta}))^T P\underline{e} + \underline{e}^T P(\frown{A}\underline{e} - B\Phi(\underline{x})(\underline{p} - \underline{\theta})) + 2(\underline{p} - \underline{\theta})^T F^{-1}\frac{d\underline{p}}{dt} \\ &= \underline{e}^T(\frown{A}^T P + P\frown{A})\underline{e}) + 2(\underline{p} - \underline{\theta})^T(F^{-1}\frac{d\underline{p}}{dt} - \Phi(\underline{x})^T B^T P\underline{e}) \end{aligned}$$

Từ đây, với phương trình trạng thái $\underline{p}$ của bộ điều khiển (9) và quan hệ (10) của phương trình Lyapunov, ta đi đến:

$$\frac{dV}{dt} = -\underline{e}^T Q \underline{e} \tag{11}$$

■

Về Định lý 3 ta thấy bộ điều khiển vòng ngoài (9) có hai tham số tự do được chọn là Q và F. Đẳng thức (11) chỉ rằng nếu chọn Q có $\|Q\|$ càng lớn, góc cắt của $\underline{e}(t)$ với đường đồng mức của $V(\underline{e}, (\underline{p} - \underline{\theta}))$ càng gần với $\pi/2$, nên $\underline{e}(t)$ sẽ càng tiến nhanh về gốc, tức là hệ (2) sẽ càng bám nhanh được theo mô hình mẫu (4). Cũng như vậy, nếu chọn F có $\|F^{-1}\|$ càng lớn, tức là $\|F\|$ càng nhỏ, tốc độ tăng giá trị của hàm $V(\underline{e}, (\underline{p} - \underline{\theta}))$ càng cao, nên $\underline{e}(t)$ cũng sẽ càng tiến nhanh về gốc.

3. ĐIỀU KHIỂN HỆ KHỚP NỐI CƠ KHÍ MỀM

Khớp nối mềm là hệ có mô hình [6]

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = \begin{bmatrix} x_1^3 x_2 + ax_1 + bx_2 + u \\ cx_1 + dx_2 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

trong đó $y = x_1$ là tốc độ tải, x_2 là tốc độ động cơ, $u(t)$ là tín hiệu điều khiển và a, b, c, d là các tham số mô hình (có thể là bất định). Một số phương pháp điều khiển thích nghi cơ bản hệ khớp nối mềm trên, như tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc và lọc liễu nhờ bộ lọc Kalman, điều khiển thích nghi theo tham số hằng bất định nhờ phương pháp cuốn chiếu (backstepping) để hệ là ổn định tiệm cận theo nghĩa Lyapunov, hoặc điều khiển bám thích nghi bù bất định ... đã được tổng kết lại trong tài liệu [6]. Tuy nhiên có thể thấy các phương pháp đó không thể đảm bảo được tính ổn định BIBS cho hệ, đặc biệt là khi các tham số a, b, c, d của hệ là không biết trước.

Nhằm minh họa phương pháp điều khiển ổn định BIBS đã đưa ra, bài báo sẽ giới thiệu một ứng dụng của phương pháp trong việc điều khiển ổn định BIBS thích nghi hệ khớp nối mềm trên, với giả thiết rằng các tham số b, c, d là đã biết và chỉ còn lại tham số a là bất định, chẳng hạn như $a = 1 + \theta, b = 2, c = 1, d = 3$. Từ những giả thiết đó, mô hình hệ khớp nối mềm sẽ được viết lại thành dạng chuẩn (1) của phương pháp như sau

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = \begin{bmatrix} x_1^2 x_2 + 1 & 2 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \underline{x} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left[(u + x_1\theta) \right],$$

tức là có

$$A(\underline{x}) = \begin{bmatrix} x_1^2 x_2 + 1 & 2 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \text{ và } B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Nếu ký hiệu

$$\widehat{A} = \begin{bmatrix} \widehat{a}_{11} & \widehat{a}_{12} \\ \widehat{a}_{21} & \widehat{a}_{22} \end{bmatrix}$$

thì

$$I_n \otimes B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

và

$$vec(A(x) - \widehat{A}) = \begin{bmatrix} x_1^2 x_2 + 1 - \widehat{a}_{11} \\ 1 - \widehat{a}_{21} \\ 2 - \widehat{a}_{12} \\ 3 - \widehat{a}_{22} \end{bmatrix}.$$

Vậy để có được (6) thì các phần tử thứ 2 và 4 của $vec(A(x) - \widehat{A})$ phải bằng 0, tức là phải có $\widehat{a}_{21} = 1$ và $\widehat{a}_{22} = 3$, hai phần tử $\widehat{a}_{11}, \widehat{a}_{12}$ là tuỳ chọn. Ta sẽ chọn hai phần tử tự do này sao cho $\widehat{A}$ có hai giá trị riêng $s_1 = s_2 = -3$ như sau

$$det(sI - \widehat{A}) = (s - s_1)(s - s_2) \forall s \Leftrightarrow (s - \widehat{a}_{11})(s - 3) - \widehat{a}_{12} = (s + 3)^2 \forall s$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} -3 - \widehat{a}_{11} = 6 \\ 3\widehat{a}_{11} - \widehat{a}_{12} = 9 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \widehat{a}_{11} = -9 \\ \widehat{a}_{12} = -36 \end{cases} \Leftrightarrow \widehat{A} = \begin{pmatrix} -9 & -36 \\ 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

Với ma trận $\widehat{A}$ này, bộ điều khiển vòng trong $R(\underline{x}, \underline{u}) = (r_1, r_2)$ sẽ được tìm theo (8) là

$$((I_n \otimes B)^T (I_n \otimes B)) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow vec(R) = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^2 x_2 + 10 \\ 0 \\ 38 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 x_2 + 10 \\ 38 \end{pmatrix}$$

$$R(\underline{x}, \underline{u}) = (x_1^2 x_2 + 10, 38)$$

và bộ điều khiển đó sẽ làm cho hệ (hình 1) trở thành

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = \begin{pmatrix} -9 & -36 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \underline{x} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \left(u + x_1 \theta \right), \text{ với } \Phi(\underline{x}) = (x_1, 0).$$

Bây giờ ta chuyển sang thiết kế bộ điều khiển vòng ngoài theo công thức (9). Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương Q, F có $\|Q\|$ đủ lớn và $\|F\|$ đủ nhỏ, chẳng hạn như

$$Q = \begin{pmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}, \; F = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

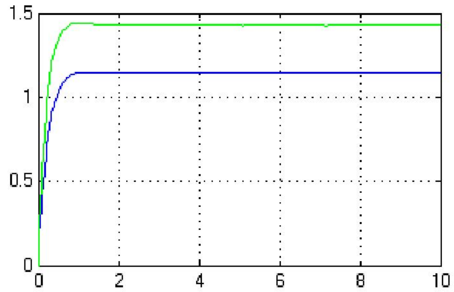
Khi đó, từ phương trình Lyapunov ta được

$$P \approx \begin{pmatrix} 1217 & -302 \\ -302 & 85 \end{pmatrix}.$$

Vậy bộ điều khiển vòng ngoài sẽ là (hình 2)

$$\begin{cases} \dfrac{d\underline{p}}{dt} = \begin{pmatrix} 121,7x_1 & -30,2x_1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \underline{e} \\ q = (x_1, 0)\underline{p} \end{cases}$$

Hình 3. Kết quả mô phỏng với $\theta = \sin t$ (thậm chí không cần phải là hằng số bất định)



Hình 3 mô tả quỹ đạo trạng thái của hệ khi có tín hiệu bị chặn $w = 1(t)$ ở đầu vào. Ta còn thấy thêm từ kết quả mô phỏng là quỹ đạo trạng thái tiến tiệm cận tới hằng số ngay cả khi thành phần bất định không phảo là hằng số.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] K. J. Astrm, P. Alberto, M. Blanke, A. Isidori, W. Schaufelberger, and R. Sanz, *Control of Complex Systems,* (Eds.) Springer, Verlag. 2001.

[2] D. N. Cyrot, and A. J. Fossard, *Nonlinear Systems. Chapman & Hall,* (Eds.) London, Weinheim, New York, Paris, Tokyo, Melbourge, Madras, 1997.

[3] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems 1, 2,* Springer Verlag, 1999.

[4] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design,* John Wiley & Sohn Inc., 1995.

[5] V. T. Long, and N. D. Phuoc, Global output feedback stabilization of a class of MIMO nonlinear control systems, *Proceeding of ETCI-Conf.*, Thailand, 5 - 2008 (593–596).

[6] B. C. Minh, "Điều khiển thích nghi bền vững hệ phi tuyến có khớp nối mềm", Luận án tiến sỹ, 2008.

[7] L. Praly, An introduction to some lyapunov designs of global asymptotic stabilizers, "Lecture Notes. Banach Center Summer School", Poland, 2-20/9/2002.

[8] N. D. Phước, *Lý thuyết điều khiển nâng cao: Điều khiển tối ưu; Điều khiển bền vững; Điều khiển thích nghi*, Nhà xuất bản KH&KT Hà Nội 2004.

[9] N. D. Phuoc, Combining exact linearization and model reference techniques for design of adaptive global asymptotic stabilizer and application to adaptive control of induction motor, *EPE Conference*, Germany, 9/2005 (612–617).

[10] N. D. Phuoc, Einige aktuelle entwurfsmethoden nichtlinearer regler und deren anwendungsperspektive in der praxis, *Seminarmanuscript an der TU,* Dresden, 9/2005.

[11] E. D. Sontag, On the input-to-state stability property, *European J. Control* (1) (1995) 24–36.

[12] R. Unbehauen, *Systemtheorie*, R. Oldenbourg Verlag Mnchen Wien, 1993.

Nhận bài ngày 19 - 2 - 2009