

XÂY DỰNG THUẬT TOÁN THÍCH NGHI THEO MÔ HÌNH MẪU TRONG VÒNG ĐIỀU KHIỂN TÊN LỬA TỪ XA

AN ALGORITHM OF REFERENCE MODEL ADAPTIVE CONTROL FOR MISSILE REMOTE CONTROL LOOP

Nguyễn Văn Bằng^{1*}, Đoàn Thế Tuấn¹,
Nguyễn Quang Hùng², Vũ Hữu Thích³

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu, phân tích, cách thức xây dựng thuật toán thích nghi theo mô hình mẫu trong vòng điều khiển tên lửa từ xa. Luật điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu áp dụng lý thuyết ổn định Lyapunov có dạng đơn giản, bền vững và hội tụ nhanh. Các kết quả mô phỏng đã cho thấy những ưu điểm khi sử dụng thuật toán. Đây là những luận cứ quan trọng để phục vụ việc nghiên cứu, cải tiến, tổng hợp vòng điều khiển từ xa thiết bị bay.

Từ khóa: Tên lửa, điều khiển, thích nghi, mô hình mẫu.

ABSTRACT

The paper presents the results of research, analysis and construction of adaptive algorithms based on reference model within the missile remote control loop. Law on adaptive control obtained by applying stability theory Lyapunov has a simple, sustainable form and rapid convergence. The simulation results showed the advantages when using the algorithm. These are important arguments for research, improvement, and synthesis of remote control devices.

Keywords: Missile, control, adaptive, model reference.

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Viện Tự động hóa Kỹ thuật Quân sự

³Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: banghvpkkq@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/12/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/01/2019

Ngày chấp nhận đăng: 25/02/2019

1. MỞ ĐẦU

Hệ thống điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu là một trong những hướng tiếp cận chính đối với điều khiển thích nghi. Đặc tính mong muốn của hệ thống được diễn tả bởi mô hình mẫu. Mô hình mẫu miêu tả các tính chất vào ra như mong muốn của hệ thống kín [1]. Khi đáp ứng đầu ra của đối tượng điều khiển sai khác so với đầu ra mong đợi do mô hình mẫu tạo ra, thì đối tượng điều khiển sẽ được chỉnh định bằng cách thay đổi các tham số của bộ điều khiển hoặc bằng cách tạo ra thêm tín hiệu nhằm loại bỏ sự thay đổi đó dựa trên sai số giữa đầu ra của mô hình mẫu và đầu ra của hệ thống.

Bản chất của việc áp dụng hệ thống điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu là thiết kế bộ điều khiển sao cho hệ thống đạt được những đặc tính mong muốn được đưa ra bởi một mô hình toán (mô hình mẫu) [2, 4]. Khi đặc tính của hệ thống thực khác so với đặc tính lý tưởng của mô hình mẫu, hệ thống được thay đổi bằng cách điều chỉnh các thông số của bộ điều khiển hoặc tạo thêm tín hiệu phụ.

Tên lửa trong vòng điều khiển tên lửa từ xa là khâu động học có tham số thay đổi. Sự thay đổi gia tốc pháp tuyến của tên lửa phụ thuộc vào góc lệch cánh lái trong rãnh gặt được

mô tả bởi hàm số truyền:
$$K_{TL}(s) = \frac{K_{TL} \frac{V}{T_V}}{T_{TL}^2 s^2 + 2\xi_{TL} T_{TL} s + 1}$$
 trong

đó: K_{TL} là hệ số truyền của tên lửa, V là vận tốc của tên lửa, ξ_{TL} là hệ số suy giảm dao động riêng của tên lửa, hằng số thời gian T_{TL} và hằng số thời gian khí động T_V phụ thuộc vào sự bố trí khí động của tên lửa, vào các đặc trưng hình học và khí động học của các phần tử của tên lửa và chúng thay đổi theo điều kiện bay (độ cao bay, vận tốc bay). Đặc biệt hệ số V/T_V thay đổi rất nhiều phụ thuộc vào áp suất động và làm cho hệ số khuếch đại của hệ thống điều khiển cũng thay đổi trong một giới hạn rộng.

Vi vậy khi tổng hợp luật điều khiển tên lửa từ xa cần phải xét đầy đủ tính chất động lực học của tên lửa và sự thay đổi các tham số K_{TL} , T_{TL} , ξ_{TL} của bản thân tên lửa. Do đó, trong phạm vi bài báo này, các tác giả trình bày cách thức xây dựng luật điều khiển thích nghi tên lửa trong vòng điều khiển tên lửa từ xa theo mô hình mẫu, với giả thiết hàm số truyền của tên lửa là khâu dao động bậc 2, tên lửa đã có hệ thống ổn định trên khoang, hệ lập lệnh sử dụng phương pháp tạo lệnh theo phương pháp dẫn 3 điểm. Tên lửa có các hệ số K_{TL} , T_{TL} , ξ_{TL} là thay đổi.

2. THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI THEO MÔ HÌNH MẪU TRÊN CƠ SỞ ĐIỀU KHIỂN PD

Cấu trúc được mô tả trong hình 1 có thể được sử dụng như một hệ thống điều khiển PD thích nghi [1, 2]. Một đối tượng điều khiển có mô hình toán là khâu bậc hai được điều khiển với sự trợ giúp của một bộ điều khiển PD. Các tham số của bộ điều khiển này là K_p và K_d . Các tham số thay

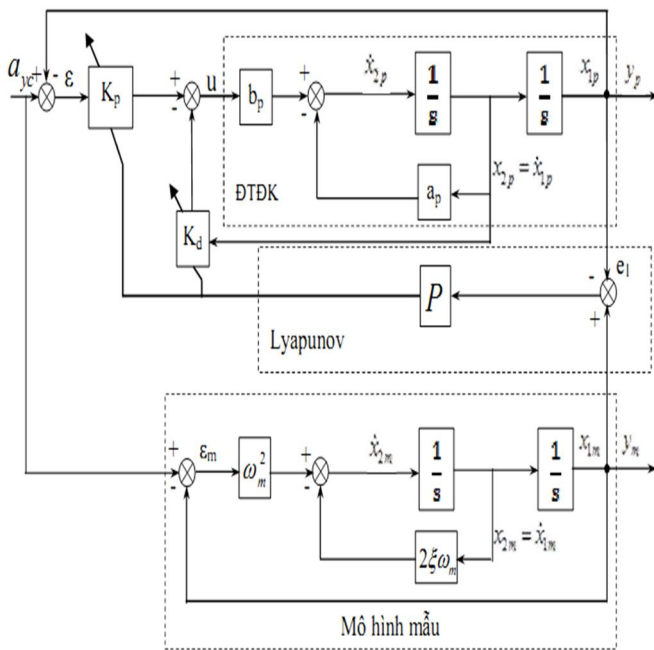
đổi của đối tượng điều khiển (tên lửa) là a_p và b_p có thể được bù trừ bằng cách thay đổi các tham số K_p và K_d . Sau đây, ta sẽ tìm luật điều chỉnh cho K_p và K_d dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov [1, 3].

Bước 1: Xác định phương trình vi phân cho e

Mô hình mẫu của hệ thống có phản hồi đầy đủ có hàm truyền đạt như sau:

$$\frac{x_{1m}}{a_{yc}} = \frac{K}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1} \tag{1}$$

$$= \frac{K \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^2}{s^2 + 2\xi \cdot \left(\frac{1}{T}\right) \cdot s + \left(\frac{1}{T}\right)^2} = \frac{K\omega_m^2}{s^2 + 2\xi\omega_m s + \omega_m^2}$$



Hình 1. Cấu trúc hệ thống điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu với bộ điều khiển PD

Phương trình trạng thái của đối tượng điều khiển:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1p} = x_{2p} \\ \dot{x}_{2p} = -b_p \cdot K_p \cdot x_{1p} - (a_p + b_p \cdot K_d) x_{2p} + b_p \cdot K_p \cdot a_{yc} \end{cases} \tag{2}$$

Biểu diễn lại dưới dạng các biến trạng thái:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{1p} \\ \dot{x}_{2p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -b_p \cdot K_p & -(a_p + b_p \cdot K_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1p} \\ x_{2p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_p \cdot K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{yc} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Với: $\varepsilon = a_{yc} - x_{1p} \rightarrow \dot{\varepsilon} = \dot{a}_{yc} - \dot{x}_{1p} = -x_{2p}$ (4)

$\dot{x}_{2p} = b_p K_p \varepsilon - (a_p + b_p K_d) x_{2p}$ (5)

Đối tượng điều khiển trong hình 1 có thể mô tả dưới dạng dưới các biến trạng thái như sau: $\dot{x}_p = A_p x_p + B_p u$

Trong đó:

$$x_p = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ x_{2p} \end{bmatrix}; \quad A_p = \begin{bmatrix} 0 & -I \\ b_p \cdot K_p & -(a_p + b_p \cdot K_d) \end{bmatrix}; \quad B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Tương tự với mô hình mẫu:

$$\varepsilon_m = a_{yc} - x_{1m} \rightarrow \dot{\varepsilon}_m = \dot{a}_{yc} - \dot{x}_{1m} = -x_{2m} \tag{6}$$

$$\dot{x}_{2m} = \omega_m^2 \cdot \varepsilon_m - 2\xi\omega_m \cdot x_{2m} \tag{7}$$

$$\rightarrow \dot{x}_m = A_m x_m + B_m u \tag{8}$$

Trong đó: $x_m = \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ x_{2m} \end{bmatrix}; \quad A_m = \begin{bmatrix} 0 & -I \\ \omega_m^2 & -2\xi\omega_m \end{bmatrix}; \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Sai lệch e được xác định theo (5) và (8):

$$e = x_m - x_p \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}_m - \dot{x}_p = A_m x_m + B_m u - A_p x_p - B_p u \\ &= A_m (x_m - x_p) + (A_m - A_p) x_p + (B_m - B_p) u \end{aligned} \tag{10}$$

$$\leftrightarrow \dot{e} = A_m \cdot e + A \cdot x_p + B u$$

Với:

$$\begin{aligned} A &= (A_m - A_p) = \begin{bmatrix} 0 & -I \\ \omega_m^2 & -2\xi\omega_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -I \\ b_p \cdot K_p & -(a_p + b_p \cdot K_d) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ (\omega_m^2 - b_p \cdot K_p) & -2\xi\omega_m + (a_p + b_p \cdot K_d) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{11}$$

$$B = B_m - B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \dot{e}_1 = e_2; \quad e^T = [e_1 \quad e_2]; \tag{12}$$

$$e_1 = x_{1m} - x_{1p}; \quad e_2 = x_{2m} - x_{2p}$$

Bước 2: Chọn hàm Lyapunov V(e) [3, 4]

$$V(e) = e^T P e + a^T \alpha a + b^T \beta b$$

P là ma trận đối xứng xác định dương tùy chọn.

a và b là các vector chứa các thành phần khác 0 của các ma trận A và B.

α và β là các ma trận đường chéo với các phần tử dương có chức năng xác định tốc độ của quá trình thích nghi.

Với sự lựa chọn P, α và β như trên thì V(e) là một hàm xác định dương.

Bước 3: Xác định các điều kiện sao cho $\dot{V}(e)$ là một hàm xác định âm

Đạo hàm của $\dot{V}(e)$ có dạng:

$$\dot{V} = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} + 2\dot{a} \alpha a^T + 2\dot{b} \beta b^T$$

$$\leftrightarrow \dot{V} = (A_m \cdot e + A \cdot x_p + B u)^T P e + e^T P (A_m \cdot e + A \cdot x_p + B u) + 2\dot{a} \alpha a^T + 2\dot{b} \beta b^T$$

$$\leftrightarrow \dot{V} = (A_m \cdot e)^T P e + (A \cdot x_p)^T P e + (B u)^T P e + e^T P (A_m \cdot e) + e^T P (A \cdot x_p) + e^T P (B u) + 2\dot{a} \alpha a^T + 2\dot{b} \beta b^T$$

$$\leftrightarrow \dot{V} = \underbrace{(A_m e)^T P e + e^T P (A_m e)}_{(*)} + \underbrace{2e^T P (A x_p) + 2\dot{\alpha} \alpha^T + 2e^T P (B u) + 2\dot{b} \beta b^T}_{(**)} \quad (13)$$

$$\text{Đặt } A_m^T P + P A_m = -Q \quad (14)$$

Phần (*) của $\dot{V}(e)$ được viết lại thành:

$$e^T (A_m^T P + P A_m) e = -e^T Q e \quad (15)$$

Theo định lý Malkin [1, 4], Q là ma trận xác định dương. Điều này có nghĩa giá trị của phần (*) là luôn âm. Như vậy, sự ổn định của hệ thống sẽ được đảm bảo nếu phần (**) có giá trị 0, tức là: $e^T P A x_p + \dot{\alpha} \alpha^T = 0$ và $e^T P B u + \dot{b} \beta b^T = 0$

$$\text{Với } e^T = [e_1 \quad e_2]; \quad \dot{e}_1 = e_2; \quad a = [a_{21} \quad a_{22}]; \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 \\ 0 & \alpha_{22} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \quad x_p = \begin{bmatrix} \varepsilon \\ x_{2p} \end{bmatrix}$$

Sau khi tính toán, ta được:

$$\dot{a}_{21} = -\frac{1}{a_{21}} (P_{21} \cdot e_1 + P_{22} \cdot e_2) \cdot \varepsilon \quad (16)$$

$$\dot{a}_{22} = -\frac{1}{a_{22}} (P_{12} \cdot e_1 + P_{22} \cdot e_2) \cdot x_{2p} \quad (17)$$

$$\text{Từ công thức (11): } a_{21} = \omega_m^2 - b_p \cdot K_p \rightarrow \dot{a}_{21} = -b_p \cdot \dot{K}_p \quad (18)$$

$$a_{22} = -2\xi\omega_m + (a_p + b_p \cdot K_d) \rightarrow \dot{a}_{22} = b_p \cdot \dot{K}_d \quad (19)$$

Từ công thức (16, 17, 18, 19) ta được:

$$K_p = \frac{1}{a_{21} b_p} \int (P_{21} \cdot e_1 + P_{22} \cdot e_2) \cdot \varepsilon \cdot dt + K_p(0) \quad (20)$$

$$K_d = \frac{-1}{a_{22} b_p} \int (P_{21} \cdot e_1 + P_{22} \cdot e_2) \cdot x_{2p} \cdot dt + K_d(0) \quad (21)$$

Bước 4: Tìm P từ $A_m^T P + P A_m = -Q$ Với $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}$

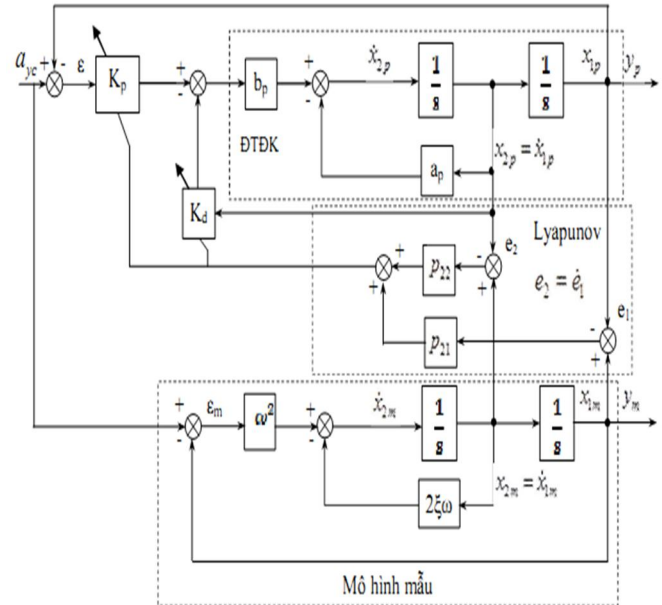
$$A_m^T P + P A_m = -Q$$

$$\leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 & \omega_m^2 \\ -1 & -2\xi\omega_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \omega_m^2 & -2\xi\omega_m \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\leftrightarrow \begin{bmatrix} \omega_m^2 \cdot (p_{21} + p_{12}) & (-p_{11} - 2\xi\omega_m p_{12} + \omega_m^2 p_{22}) \\ (-p_{11} - 2\xi\omega_m p_{21} + \omega_m^2 p_{22}) & (-p_{12} - p_{21} - 4\xi\omega_m p_{22}) \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\rightarrow p_{21} = \frac{-q_{11}}{2\omega_m^2}; \quad p_{22} = \frac{q_{11} + q_{22} \cdot \omega_m^2}{4\xi\omega_m^3} \quad (24)$$

Dựa trên công thức (20, 21) thì thiết kế hệ thống thích nghi với bộ điều khiển PD theo lý thuyết ổn định Lyapunov trên hình 1 được vẽ lại như hình 2.



Hình 2. Sơ đồ hệ thống điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu với bộ điều khiển PD theo lý thuyết ổn định Lyapunov

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Việc mô phỏng, khảo sát luật điều khiển thích nghi tên lửa theo mô hình mẫu được xem xét trong vòng điều khiển tên lửa từ xa [5].

Trong mục này trình bày các kết quả mô phỏng các phương pháp điều khiển bằng phần mềm Matlab từ đó đưa ra những đánh giá, nhận xét cho từng trường hợp cụ thể:

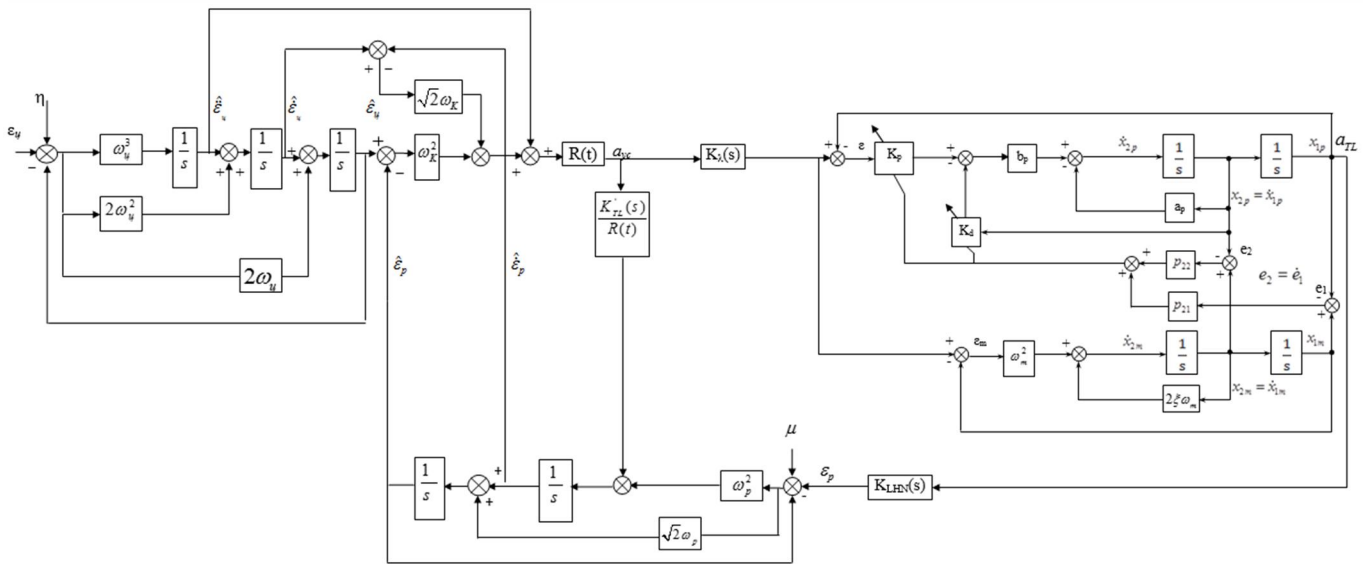
+ Để khảo sát PPD 3 điểm ta chọn bộ tham số mô phỏng như sau: $\omega_m = 1, \xi = 0,7, a_p = 15, b_p = 102, Q = \begin{bmatrix} 2 & 5 \\ 5 & 2 \end{bmatrix}$,

$$\frac{1}{a_{21}} = 5, \quad \frac{1}{a_{22}} = 10 \text{ thì } p_{21} = 0,01, p_{22} = 0,07.$$

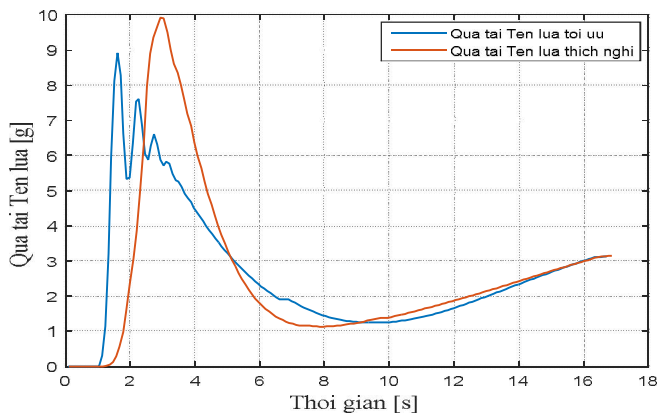
+ Mục tiêu có vận tốc $V_{mt} = 350\text{m/s}$, cự ly ngang $D_{bn} = 19\text{km}$, bay ở độ cao $H = 8,1\text{km}$, thời gian bắt đầu cơ động $t_{cd} = 5\text{s}$, thời gian kết thúc cơ động $t_{ocd} = 8\text{s}$, cơ động $3g$.

+ Tên lửa có vận tốc $V_{TL} = 900\text{m/s}$

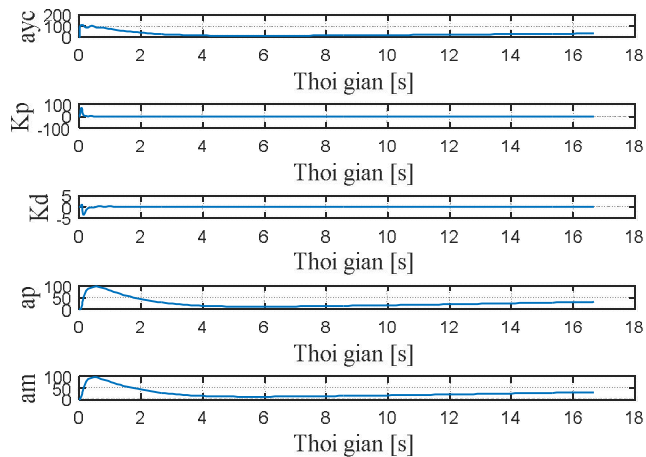
Trường hợp các tham số của tên lửa thay đổi $\xi_{TL} = 0,5, T_{TL} = 0,06\text{s}, K_{TL} = 0,8$



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc VDK từ xa với hệ thống điều khiển thích nghi



Hình 4. Đồ thị quá tải tên lửa



Hình 5. Đồ thị tín hiệu a_{yc} , K_p , K_d tên lửa, mô hình mẫu

Nhận xét: Trong quá trình bay của tên lửa, các tham số động học của bản thân tên lửa thay đổi, khi đó luật dẫn tối ưu không đáp ứng được. Sử dụng luật điều khiển thích nghi sẽ cải thiện hiệu quả điều khiển, nâng cao độ chính xác tiêu diệt mục tiêu.

4. KẾT LUẬN

Luật điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu áp dụng lý thuyết ổn định Lyapunov có dạng đơn giản, bền vững và hội tụ nhanh. Các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng bộ điều khiển PD thích nghi theo mô hình mẫu trong vòng điều khiển tên lửa từ xa có chất lượng tốt hơn khi so sánh với luật dẫn tên lửa tối ưu tại thời điểm các tham số của tên lửa (K_{TL} , T_{TL} , ξ_{TL}) thay đổi. Đây là cơ sở để nâng cao độ chính xác tiêu diệt mục tiêu, đáp ứng được trong điều kiện thực tế khi các điều kiện bay của tên lửa thay đổi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Amerongen, J. van (March, 2004). *Intelligent Control (part 1)-MRAS, Lecture notes*. University of Twente, The Netherlands.
- [2]. Landau, Y. D. (1979). *Control and Systems Theory - Adaptive Control - The Model Reference Approach*. Marcel Dekker.
- [3]. Pankaj, K., Kumar, J.S. and Nema, R.K. (2011). "Comparative Analysis of MIT Rule and Lyapunov Rule in Model Reference Adaptive Control Scheme". *Innovative Systems Design and Engineering*, Vol.2, pp. 154-162.
- [4]. Nguyen Duy Cuong, (2008). *Advanced Controllers for Electromechanical Motion Systems*. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- [5]. Е.А. Федосов, В.Т. Бобронников, М.Н. Красильщиков, В.И. Кухтенко, А.А. Лебедев, В.В. Малышев, Е.В. Орлов, Б.В. Пучков, А.И. Силаев, В.А. Стефанов, (1997) "Динамическое проектирование систем управления автоматических маневренных летательных аппаратов", *Машиностроение*, Москва, стр. 49-336