TẠP CHÍ KHOA HỌC TRƯỜNG ĐẠI HỌC HỒNG ĐỨC **P-ISSN 3030-4628**
Hong Duc University Journal of Science **E-ISSN 3030-4636**

THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN KÍCH HOẠT SỰ KIỆN CHO LỚP HỆ VI PHÂN PHI TUYẾN

EVENT-TRIGGERED CONTROL DESIGN FOR A CLASS OF NONLINEAR DIFFERENTIAL SYSTEMS

Lê Huy Vũ[1*]
Trần Thị Hồng[1]
Nguyễn Thị Thơ[1]
Nguyễn Thị Thanh Thùy[1]
Hoàng Thị Thương Yến[1]
Hoàng Thị Việt Phương[1]

[1] Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức;
[*]Tác giả liên hệ; Email: lehuyvu@hdu.edu.vn

DOI: *https://doi.org/1*0.70117/hdujs.3030-4628.90.09.2026.1196

Ngày nộp bài: 01/05/2026; Ngày gửi phản biện: 06/05/2026; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

Từ khóa:
Sự ổn định, Điều khiển kích hoạt sự kiện, Hệ phi tuyến, Hàm Lyapunov.

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu vấn đề ổn định và đề xuất phương pháp xây dựng bộ điều khiển kích hoạt theo sự kiện cho một lớp hệ phương trình vi phân phi tuyến. Đầu tiên, một cơ chế kích hoạt sự kiện thích hợp được xây dựng cho lớp vi phân phi tuyến. Tiếp theo đó, thông qua việc lựa chọn hàm Lyapunov phù hợp kết hợp với các kỹ thuật ước lượng cần thiết, các điều kiện đủ được thiết lập dưới dạng bất đẳng thức ma trận tuyến tính (LMI) nhằm bảo đảm tính ổn định của hệ đóng. Trên cơ sở đó, luật điều khiển phản hồi trạng thái dựa trên kích hoạt sự kiện cho hệ thống được đưa ra. Cuối cùng, một số ví dụ minh họa bằng số liệu được trình bày chi tiết nhằm làm rõ cách thức áp dụng của phương pháp đề xuất, đồng thời qua đó đánh giá và khẳng định tính khả thi cũng như hiệu quả của phương pháp trong thực tiễn.

Keywords:
Stability, Event-triggered control, Nonlinear systems, Lyapunov function.

ABSTRACT

This paper investigates the stability problem and proposes an event-triggered control design method for a class of nonlinear differential systems. First, an appropriate event-triggering mechanism is constructed for the considered nonlinear differential systems. Subsequently, by selecting a suitable Lyapunov function and employing necessary estimation techniques, sufficient conditions are established in the form of linear matrix inequalities (LMIs) to guarantee the stability of the closed-loop system. Based on these conditions, a state-feedback event-triggered control law is developed for the system. Finally, several numerical examples are presented in detail to illustrate the application of the proposed method and to demonstrate its feasibility and effectiveness.

1. MỞ ĐẦU

Hệ phương trình vi phân đóng vai trò là một khuôn khổ toán học quan trọng trong việc mô tả sự biến thiên theo thời gian của các hiện tượng và quá trình trong thế giới thực. Chúng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau như vật lý, hóa học, sinh học, kinh tế, kỹ thuật hàng không vũ trụ và điều khiển học. Do vai trò trung tâm đó, việc phân tích tính ổn định của các lớp hệ vi phân luôn được xem là một bài toán cốt lõi, có ý nghĩa cả về mặt lý thuyết lẫn ứng dụng. Trong những năm gần đây, chủ đề này đã thu hút sự quan tâm mạnh mẽ của cộng đồng nghiên cứu, với nhiều kết quả quan trọng được công bố trong các công trình tiêu biểu [1][2][3][4]. Trong số các phương pháp được sử dụng để nghiên cứu tính ổn định, phương pháp hàm Lyapunov nổi bật nhờ tính đơn giản, trực quan và hiệu quả. Phương pháp này được giới thiệu lần đầu tiên bởi nhà toán học người Nga Aleksandr Lyapunov vào năm 1892, trong khuôn khổ luận án tiến sĩ của ông. Cho đến nay, phương pháp hàm Lyapunov không những vẫn giữ nguyên giá trị mà còn tiếp tục được mở rộng và phát triển mạnh mẽ trong nghiên cứu lý thuyết ổn định hiện đại [4][5][6].

Bên cạnh bài toán ổn định, vấn đề điều khiển hệ thống cũng giữ vai trò đặc biệt quan trọng trong cả lý thuyết lẫn ứng dụng. Không chỉ dừng lại ở việc đảm bảo hệ hoạt động theo mong muốn, thiết kế bộ điều khiển còn góp phần nâng cao hiệu suất, độ tin cậy và khả năng thích nghi của hệ thống trước các tác động từ môi trường. Mục tiêu chính của điều khiển là thiết kế tín hiệu điều khiển phù hợp nhằm dẫn dắt hệ thống vận hành theo quỹ đạo hoặc hành vi mong muốn. Cùng với sự phát triển nhanh chóng của khoa học và công nghệ, các kỹ thuật điều khiển ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như robot, phương tiện bay không người lái, ô tô tự hành và các hệ thống tự động hoá thông minh. Do đó, nghiên cứu điều khiển các hệ thống động lực đã và đang trở thành một hướng nghiên cứu sôi động, thu hút sự quan tâm của đông đảo các nhà toán học và kỹ sư trên toàn thế giới. Trong thời gian gần đây, nhiều kết quả nghiên cứu có giá trị trong lĩnh vực này đã được công bố, góp phần thúc đẩy sự phát triển của lý thuyết và ứng dụng điều khiển hiện đại [7][8][9][10][11].

Trong điều khiển hiện đại, điều khiển kích hoạt sự kiện (event-triggered control - ETC) đã nổi lên như một hướng nghiên cứu quan trọng nhằm giảm tải truyền thông, tiết kiệm tài nguyên tính toán và năng lượng trong các hệ thống điều khiển mạng mà vẫn đảm bảo các chỉ tiêu ổn định và hiệu năng. Khác với cơ chế điều khiển theo chu kỳ thời gian, ETC chỉ cập nhật tín hiệu điều khiển khi một điều kiện kích hoạt nhất định được thỏa mãn. Những nghiên cứu nền tảng về điều khiển dựa trên sự kiện có thể kể đến công trình của Lunze và cộng sự với tiếp cận phản hồi trạng thái [12]. Trên cơ sở đó, nhiều kết quả đã được phát triển cho các lớp hệ phức tạp như hệ suy biến, hệ mờ T-S, hệ có trễ và hệ nhảy Markov. Chẳng hạn, Li và cộng sự nghiên cứu điều khiển tiêu tán kích hoạt sự kiện cho hệ suy biến mờ T-S [13], Xing và cộng sự xem xét bài toán điều khiển kích hoạt sự kiện cho hệ suy biến ngẫu nhiên có trễ trạng thái [16], trong khi các mục tiêu H_∞, thụ động và điều khiển trượt cũng được tích hợp với cơ chế kích hoạt sự kiện trong [14][15][16][17]. Tuy nhiên, các kết quả hiện có chủ yếu tập trung

vào các hệ tuyến tính hoặc bán tuyến tính, và nghiên cứu cho lớp hệ phi tuyến còn tương đối hạn chế. Đặc biệt, đối với các hệ phi tuyến mà hàm phi tuyến phụ thuộc trực tiếp vào tín hiệu điều khiển, theo hiểu biết tốt nhất của các tác giả, chưa có công trình nào nghiên cứu điều khiển kích hoạt sự kiện một cách hệ thống cho lớp hệ này. Vì vậy, bài báo này tập trung vào việc phát triển một lược đồ điều khiển kích hoạt sự kiện cho lớp hệ phi tuyến có chứa điều khiển trong hàm phi tuyến, đồng thời đưa ra các điều kiện ổn định và/hoặc hiệu năng đủ dưới dạng bất đẳng thức ma trận tuyến tính, qua đó mở rộng và bổ sung các kết quả hiện có trong lĩnh vực điều khiển kích hoạt sự kiện.

2. CÁC KẾT QUẢ CHÍNH

Trong phần này, chúng ta nghiên cứu lớp hệ phi tuyến có chứa điều khiển được mô tả bởi phương trình vi phân sau đây:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(t, x(t), u(t)), t \geq 0, \\ x(0) = x_0, \end{cases} \tag{1}$$

trong đó $x(t) \in \mathbb{R}^n$ là các véc tơ trạng thái, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ véc tơ điều khiển đầu vào và $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$véc tơ độ đo đầu ra của hệ thống. Các ma trận hằng A, B được biết trước và có số chiều phù hợp. Ngoài ra, hàm $f(t, x(t), u(t))$ là phi tuyến và thoả mãn các điều kiện tăng trưởng sau:

$$\| f(t, x(t), u(t)) \|^2 \leq \alpha \| x(t) \|^2 + \beta \| u(t) \|^2, \tag{2}$$

trong đó α và β là các số dương.

Tiếp theo, chúng ta sẽ thiết kế một điều khiển kích hoạt sự kiện cho hệ (1) sẽ có dạng sau:

$$u(t) = Kx(t_p), \tag{3}$$

trong đó, $x(t_p)$ là trạng thái mới nhất được cập nhật tại các thời điểm t_p. Khi đó, véc tơ trạng thái lỗi $l(t)$ giữa trạng thái hệ thống $x(t)$ và trạng thái truyền mới nhất $x(t_p)$ được xác định như sau:

$$l(t) = x(t_p) - x(t). \tag{4}$$

Lúc này, từ trạng thái được truyền mới nhất t_p đến trạng thái tiếp theo t_{p+1} được xác định theo công thức sau:

$$t_{p+1} = t_p + \min_{s>0}\{s = t - t_p \big| l^\top(t) M_T l(t) > \tau_T x^\top(t) M_T x(t)\} \tag{5}$$

ở đây, M_T là ma trận đối xứng xác định dương được gọi là ma trận kích hoạt, τ_T là hằng số dương cho trước được gọi là hệ kích hoạt.

Chú ý rằng, trên toàn bộ nửa khoảng $\left[t_p, t_{p+1}\right)$ tín hiệu không được truyền đi. Trên vùng này, điều kiện sau là thỏa mãn:

$$l^\top(t) M_T l(t) \leq \tau_T x^\top(t) M_T x(t). \tag{6}$$

Kết hợp các phương trình (1), (3) và (4), ta có hệ đóng sau đây

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A+BK)x(t) + BKl(t) + f(t, x(t), K(l(t)+x(t))), t \geq 0 \\ x(0) = x_0. \end{cases} \quad (7)$$

Trước khi trình bày kết quả trọng tâm, chúng tôi nhắc lại một số khái niệm cơ bản cùng với các bổ đề cần thiết dưới đây.

Định nghĩa 2.1. Hệ đóng (7) được gọi là ổn định nếu với mỗi $\varepsilon > 0$ tồn tại $\delta(\varepsilon) > 0$ sao cho với mọi điều kiện ban đầu x_0 thỏa mãn $\|x_0\| \leq \delta$ thì ta luôn có

$$\|x(t, x_0)\| \leq \varepsilon, \forall t \geq 0.$$

Bổ đề 2.2 ([18]). *Giả sử X, Y là các ma trận có số chiều phù hợp và ma trận Y là đối xứng xác định dương. Khi đó,*

$$2x^\top Xy \leq y^\top Yy + x^\top X^\top Y^{-1} Xx$$

với mọi véc tơ (x, y).

Bổ đề 2.3 (Bổ đề phần bù Schur [18]). *Cho các ma trận bất kì M, N, P có số chiều thích hợp,* $M = M^\top, N = N^\top > 0$. *Khi đó,*

$$\begin{bmatrix} M & P^\top \\ P & -N \end{bmatrix} < 0 \text{ nếu và chỉ nếu } M + P^\top N^{-1} P < 0.$$

Bổ đề 2.4 ([18]). *Giả sử* L_1, L_2 *là các ma trận bất kỳ có số chiều phù hợp và S là ma trận xác định dương. Khi đó ta có bất đẳng thức sau:*

$$L_1{}^\top L_2 + L_2{}^\top L_1 \leq L_1{}^\top S L_1 + L_2{}^\top S^{-1} L_2.$$

Kết quả chính của nghiên cứu được trình bày trong định lý sau.

Định lý 2.5. *Hệ đóng (7) là ổn định nếu tồn tại các ma trận đối xứng xác định dương S,* N_T *và ma trận W bất kỳ có số chiều thích hợp sao cho bất đẳng thức ma trận tuyến tính sau được thoả mãn:*

$$\begin{bmatrix} AS + SA^\top + BW + W^\top B^\top + I + \tau_T N_T & BW & 0 & S & W^\top \\ * & -N_T & W^\top & 0 & 0 \\ * & * & -\frac{1}{2\beta} I & 0 & 0 \\ * & * & * & -\frac{1}{\alpha} I & 0 \\ * & * & * & * & -\frac{1}{2\beta} I \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

Khi đó, ma trận điều kiển ngược kích hoạt sự kiện được xác minh là $K = WS^{-1}$.

Chứng minh. Xét hàm Lyapunov có dạng sau đây

$$V(t, x(t)) = x^\top(t) S^{-1} x(t), \quad t \geq 0. \quad (9)$$

Với $V(t, x(t)) = x^\bullet(t) P^{-1} x(t)$. Khi đó, dọc theo quỹ đạo của hệ đóng (7), ta có

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, x(t)) &= 2x^\top(t) S^{-1} \dot{x}(t) \\ &= 2x^\top(t) S^{-1} \left[(A+BK)x(t) + BKl + f\left(t, x(t), K\big(l(t)+x(t)\big)\right) \right] \\ &= 2x^\top(t) S^{-1} (A+BK) x(t) \\ &\quad + 2x^\top(t) S^{-1} BKl(t) + 2x^\top(t) S^{-1} f(t, x(t), K(l(t)+x(t))), \ t \geq 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Sử dụng Bổ đề 2.2, ta có

$$\begin{aligned} &2x^\top(t)S^{-1}f\Big(t,x(t),K\big(l(t)+x(t)\big)\Big) \\ &\le x^\top(t)S^{-1}S^{-1}x(t)+\|f(t,x(t),K(l(t)+x(t)))\|^2. \end{aligned} \tag{11}$$

Ngoài ra, từ điều kiện của hàm phi tuyến trong (2), ta có đánh giá sau

$$\begin{aligned} &\|f\Big(t,x(t),K\big(l(t)+x(t)\big)\Big)\|^2 \\ &\le \alpha\|x(t)\|^2+\beta\|K(l(t)+x(t)))\|^2 \\ &\le \alpha\|x(t)\|^2+\beta\|K\|^2(\|l(t)\|+\|x(t)\|)^2 \\ &\le \alpha\|x(t)\|^2+2\beta\|K\|^2(\|l(t)\|^2+\|x(t)\|^2). \end{aligned} \tag{12}$$

Kết hợp các phương trình (6) và (10)-(12), ta thu được

$$\begin{aligned} \dot V\big(t,x(t)\big) \le\ & 2x^\top(t)S^{-1}(A+BK)x(t) \\ & +2x^\top(t)S^{-1}BKl(t) \\ & +x^\top(t)S^{-1}S^{-1}x(t) \\ & +(\alpha I+2\beta\|K\|^2)\|x(t)\|^2 \\ & +2\beta\|K\|^2\|l(t)\|^2 \\ & +\tau_T x^\top(t)M_T x(t)-l^\top(t)M_T l(t), \quad t\ge 0. \end{aligned} \tag{13}$$

Đặt $y(t)=S^{-1}x(t)$ và $e(t)=S^{-1}l(t)$. Từ (13), suy ra

$$\begin{aligned} \dot V\big(t,x(t)\big) \le\ & 2y^\top(t)(A+BK)Sy(t) \\ & +2y^\top(t)BKSe(t)+y^\top(t)y(t) \\ & +y^\top(t)S(\alpha I+2\beta K^\top K)Sy(t) \\ & +2\beta e^\top(t)SK^\top KSe(t) \quad +\tau_T y^\top(t)SM_T Sy(t)- \\ & -e^\top(t)SM_T Se(t) \\ \le\ & \begin{bmatrix} y(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathscr{M} & BKS \\ * & -SM_T S+2\beta SK^\top KS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ e(t) \end{bmatrix}, \quad t\ge 0, \end{aligned} \tag{14}$$

ở đây

$$\mathscr{M}=AS+SA^\top+BKS+SK^\top B^\top+I+S(\alpha I+2\beta K^\top K)S+\tau_T SM_T S.$$

Đặt $W=KS$ và $N_T=SM_T S$, thay vào (14) ta có

$$\dot V(t,x(t)) \le \begin{bmatrix} y(t) \\ e(t) \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathcal{N} & BW \\ * & -N_T+2\beta W^\top W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ e(t) \end{bmatrix}, \quad t\ge 0 \tag{15}$$

ở đây

$$\mathcal{N}=AS+SA^\top+BW+W^\top B^\top+I+\alpha SIS+2\beta W^\top W+\tau_T N_T.$$

Theo bổ đề 2.3 (Bổ đề phần bù Schur), điều kiện (8) thỏa mãn khi và chỉ khi

$$\begin{bmatrix} \mathcal{N} & BW \\ * & -N_T+2\beta W^\top W \end{bmatrix} < 0.$$

Do đó, từ phương trình (15) suy ra

$$\dot V(t,x(t)) \le 0, \quad t\ge 0. \tag{16}$$

Từ (16), suy ra

$$V(t,x(t)) \le V(0,x_0) \le \lambda_{\max}(S^{-1})\|x_0\|^2,\ t\ge 0. \tag{17}$$

Mặt khác, ta có:

$$V(t,x(t)) \geq \lambda_{\min}(S^{-1})\|x(t)\|^2,\ t \geq 0 \tag{18}$$

Kết hợp (17) và (18) ta được

$$\|x(t)\| = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(S^{-1})}{\lambda_{\min}(S^{-1})}}\|x_0\|,\ t \geq 0. \tag{19}$$

Vậy, với mọi $\varepsilon > 0$ cho trước, ta chọn $\delta = \varepsilon\sqrt{\frac{\lambda_{\max}(S^{-1})}{\lambda_{\min}(S^{-1})}}$, khi đó $\|x_0\| \leq \delta$ ta luôn có $\|x(t)\| \leq \varepsilon$. Điều này chứng minh hệ (7) là ổn định. Định lí được chứng minh.

Nhận xét 2.6. *Xét trường hợp hệ (1) là tuyến tính, tức là hàm $f(\cdot) = 0$. Khi đó, hệ đóng (7) trở thành hệ vi phân tuyến tính sau*

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= (A_x + B_u K)x(t), \quad t \geq 0 \\ x(0) &= x_0 \end{cases} \tag{20}$$

Trên cơ sở của định lí 2.5, chúng ta có hệ quả sau.

Hệ quả 2.7. *Hệ đóng (20) là ổn định nếu tồn tại các ma trận đối xứng xác định dương S, N_T và ma trận W bất kỳ có số chiều thích hợp sao cho bất đẳng thức ma trận tuyến tính sau được thỏa mãn*

$$\begin{bmatrix} AS + SA^\top + BW + W^\top B^\top + \tau_T N_T & BW \\ * & -N_T \end{bmatrix} < 0. \tag{21}$$

Khi đó, ma trận điều khiển ngược kích hoạt sự kiện được xác định là

$$K = WS^{-1}.$$

3. VÍ DỤ MINH HỌA

Trong phần này chúng tôi sẽ đưa ra một ví dụ cụ thể nhằm minh họa rõ ràng hơn các kết quả nghiên cứu đã được thiết lập ở trên. Thông qua ví dụ này, tính hiệu quả và khả năng áp dụng của phương pháp đề xuất sẽ được kiểm chứng, đồng thời giúp làm sáng tỏ các phân tích lí thyết đã trình bày trước đó.

Xét hệ phương trình vi phân phi tuyến (1) có các ma trận hệ số như sau

$$A = \begin{bmatrix} -0,8 & 0,4 & -0,1 \\ 0,3 & -0,9 & 0 \\ 0,3 & 0,3 & -0,5 \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} 0,3 \\ 0,5 \\ 0,8 \end{bmatrix}.$$

Ta chọn hệ số kích hoạt $\tau_T = 3$ và $\alpha = \beta = 0,05$. Khi đó giải bất đẳng thức ma trận tuyến tính (8) ta tìm được các ma trận sau

$$S = \begin{bmatrix} 17,1420 & -8,1349 & -1.6207 \\ -8,1349 & 17,1420 & -2,780 \\ -1.6207 & -2,780 & 13,0268 \end{bmatrix},\ N_T = \begin{bmatrix} 3,2800 & -2,6860 & -0,1754 \\ -2,6860 & 3,796 & -0,4981 \\ -0,1754 & -0,4981 & 1,3704 \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} -0,2136 & -0,3288 & -0.5172 \end{bmatrix}.$$

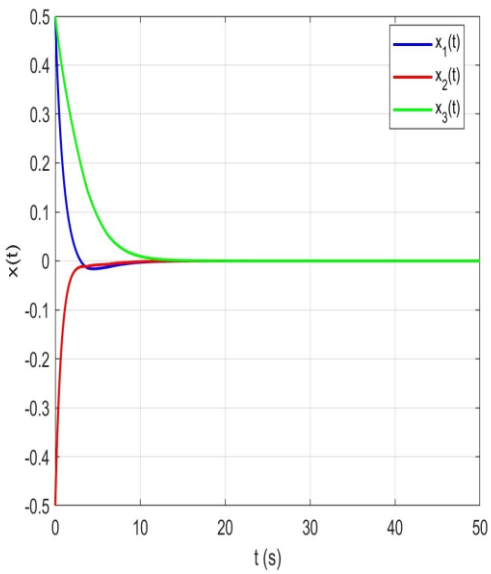
Khi đó, điều khiển ngược và ma trận kích hoạt sự kiện là

$$K = \begin{bmatrix} -0,0380 & -0,0435 & -0.0520 \end{bmatrix}, \quad M_T = \begin{bmatrix} 0,0087 & -0,0001 & 0,0003 \\ -0,0001 & 0,0103 & 0,0002 \\ 0,0003 & 0,0002 & 0,0078 \end{bmatrix}.$$

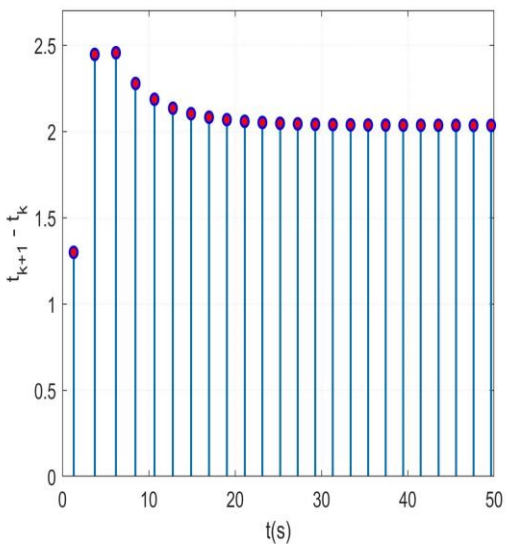
Để mô phỏng các quỹ đạo của đệ đóng dưới điều khiển kích hoạt và ma trận kích hoạt sự kiện giải ra ở trên chúng ta chọn điều kiện ban đầu $x_1(0) = 0.5, x_2(0) = -0.5, x_3(0) = 0.5$ và hàm phi tuyến tính xác định bởi

$$f(t, x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} \sqrt{0,05x_3^2(t) + \frac{0,05}{3}(0,0380x_1(t) + 0.0435x_2(t) + 0,0520x_3(t))^2} \\ \sqrt{0,05x_1^2(t) + \frac{0,05}{3}(0,0380x_1(t) + 0.0435x_2(t) + 0,0520x_3(t))^2} \\ \sqrt{0,05x_2^2(t) + \frac{0,05}{3}(0,0380x_1(t) + 0.0435x_2(t) + 0,0520x_3(t))^2} \end{bmatrix}.$$

Hình 1 là các quỹ dạo trạng thái $x_1(t), x_2(t)$ *và* $x_3(t)$ của hệ đóng (7) dưới điều khiển kích hoạt và ma trận kích hoạt sự kiện. Hình 1 ta thấy rằng các quỹ đạo của hệ là ổn định. Hình 2 là mô tả khoảng thời gian kích hoạt. Qua đó khẳng định được tính hiệu quả của phương pháp được đề xuất trong nghiên cứu này.



Hình 1. Các quỹ đạo trạng thái của hệ đóng điều khiển kích hoạt sự kiện (7)



Hình 2. Khoảng thời điểm kích hoạt sự kiện

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi tập trung nghiên cứu bài toán ổn định, đồng thời phát triển phương pháp thiết kế bộ điều khiển kích hoạt theo sự kiện cho một lớp hệ phương trình vi phân phi tuyến. Một lược đồ kích hoạt sự kiện phù hợp được đề xuất nhằm giảm tần suất cập nhật tín hiệu điều khiển mà vẫn bảo đảm tính ổn định của hệ đóng. Dựa trên việc xây dựng hàm Lyapunov thích hợp và áp dụng các kỹ thuật đánh giá hiệu quả, các điều kiện đủ để hệ đóng là ổn định đã được thiết lập dưới dạng bất đẳng thức ma trận tuyến tính, từ đó cho phép tổng hợp luật điều khiển phản hồi trạng thái kích hoạt sự kiện. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hướng phát triển có thể tập trung vào việc mở rộng kết quả cho các lớp hệ có trễ, nhiễu không chắc chắn hoặc ràng buộc truyền thông phức tạp hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] X. Li and P. Li, "Stability of time-delay systems with impulsive control involving stabilizing delays," *Automatica*, vol.124, pp.109336, 2021, DOI:10.1016/ j.automatica.2020.109336

[2] X. Zhang, H. Li, N. Zhao, and X. Wang, "Some novel necessary and sufficient conditions of exponential stability for discrete-time systems with multiple delays: A Lyapunov matrix approach," *Journal of the Franklin Institute*, 358(18):9890-9908, 2021, DOI:10.1016/j.jfranklin.2021.10.007

[3] S. I. Niculescu, *Delay Effects on Stability: A Robust Control Approach*. Berlin: Springer-Verlag, 2001, pp.1- 388.

[4] E. Fridman, "Stability of linear descriptor systems with delay: A Lyapunov-based approach," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol.273, pp.24-44, 2002, DOI:10.1016/S0022-247X(02)00202-0

[5] B. Yang, Z. Yan, X. Pan, and X. Zhao, "Improved stability criteria for linear systems with time-varying delays," *Journal of the Franklin Institute*, 358(15):7804-7824, 2021, DOI:10.1016/j.jfranklin.2021.07.045

[6] Y. Jia, C. Lin, and B. Chen, "Finite-time stability of singular time-delay systems based on a new weighted integral inequality," *Journal of the Franklin Institute*, 360(7):5092-5103, 2023, DOI:10.1016/j.jfranklin.2023.03.018

[7] V. B. Kolmanovskii and A. Myshkis, *Introduction to the Theory and Applications of Functional Differential Equations*. Netherlands: Springer, 1999, pp.1-648.

[8] L. G. Bushnell, "Networks and control," *IEEE Control Systems Magazine*, 21(1):22-23, 2001, DOI:10.1109/MCS.2001.898789

[9] D. Huang and S. K. Nguang, *Robust Control for Uncertain Networked Control Systems with Random Delays*. Berlin: Springer-Verlag, 2009, pp.1-168.

[10] H. Luo and Z. Hu, "Stability analysis of sampled-data control systems with multiple time-varying delays," *Journal of the Franklin Institute*, 357(11):6615-6634, 2020, DOI:10.1016/j.jfranklin.2020.04.021

[11] Z. Yin, X. Jiang, L. Tang, and L. Liu, "On stability and stabilization of T-S fuzzy systems with multiple random variables dependent time-varying delay," *Neurocomputing*, vol.412, pp.91-100, 2020, DOI:10.1016/j.neucom.2020. 06.073

[12] D. Lehmann and J. Lunze, "Event-based control: A state-feedback approach," in *Proc. European Control Conference*, Budapest, Hungary, 2009, pp.1716-1721.

[13] J. Li, C. Zhang, J. Shi, J. Chang, and Q. Xie, "Event-triggered dissipative control for discrete-time T-S fuzzy singular systems based on PQLF," in *Proc. 38th Chinese Control Conference*, Guangzhou, China, 2019, pp.2766-2771.

[14] M. R. Davoodi, N. Meskin, and K. Khorasani, "Event-triggered multi-objective control and fault diagnosis: A unified framework," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol.13, pp.298-311, 2017, DOI:10.1109/TII.2016.2541669

[15] Z. Wu, B. Jiang, M. Xie, J. Xie, and C. Gao, "Event-triggered observer-based H∞ sliding mode control of nonlinear systems," *ISA Transactions*, vol.124, pp. 365-373, 2020, DOI:10.1016/j.isatra.2020.10.015

[16] Q. Xu, Y. Zhang, W. Qi, and S. Xiao, "Event-triggered mixed H∞ and passive filtering for discrete-time networked singular Markovian jump systems," *Applied Mathematics and Computation*, vol.368, pp.124803, 2020, DOI:10.1016/ j.amc.2019.124803

[17] C. Peng, M. Yang, J. Zhang, M. Fei, and S. Hu, "Network-based H∞ control for T-S fuzzy systems with an adaptive event-triggered communication scheme," *Fuzzy Sets and Systems*, vol.329, pp.61-76, 2017, DOI:10.1016/j.fss.2016.12.011

[18] Z. Liu, C. Gao, and Y. Kao, "Robust H-infinity control for a class of neutral-type systems via sliding mode observer," *Applied Mathematics and Computation*, 271(15):669-681, 2015, DOI:10.1016/j.amc.2015.09.007

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.
Thông tin tài trợ (nếu có): Nghiên cứu này không nhận được tài trợ từ bên ngoài.