

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO VỚI TẦM DỰ BÁO VÔ HẠN TRÊN CƠ SỞ NGUYÊN LÝ RHSDC CHO ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG SI

STUDY OF PREDICTION CONTROL WITH INFINITE PREDICTION BASED ON RHSDC PRINCIPLE FOR SI INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Đào Quang Khanh,
Lưu Kim Thành, Trần Anh Dũng

TÓM TẮT

Trong bài báo này, một bộ điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn trên nền nguyên lý RHSDC (*Receding Horizon Sample Data Control*) được thiết kế để điều khiển tốc độ cho động cơ đốt trong đánh lửa SI (*Spark Ignition*). Bộ điều khiển SD (*Sample Data*) điều khiển đối tượng phi tuyến liên tục bằng bộ điều khiển không liên tục phản hồi trạng thái kết hợp với tín hiệu ra và bộ điều khiển SD sẽ được triển khai theo phương pháp điều khiển dịch về tương lai RHC (*Receding Horizon Control*) dọc theo trục thời gian. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra bộ điều khiển dự báo mô hình theo nguyên lý RHSDC đáp ứng được yêu cầu điều khiển bám theo tốc độ đặt cho động cơ đốt trong.

Từ khóa: Bộ chuyển dịch dần về tương lai, dữ liệu mẫu, động cơ đánh lửa, bộ điều khiển mô hình dự báo.

ABSTRACT

In this paper a prediction controller with infinite prediction based on the RHSDC principle is designed to control the speed of the SI engine. A SD controller (*Sample Data*) that controls a continuous nonlinear object with a non-continuous state and output feedback controller and a SD controller will be deployed according to the RHC (*Receding Horizon Control*) along the time axis. The simulation results indicate that the RHSDC (*Receding Horizon Sample Data Control*) model predictive control controller responds to the need for speed control of the internal combustion engine.

Keywords: *Receding Horizon Control, Sample Data, Spark Ignition Engine, Model Predictive Control.*

Đào Quang Khanh, Lưu Kim Thành, Trần Anh Dũng

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: khanhdq@viettronics.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/08/2017

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 03/10/2017

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2017

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

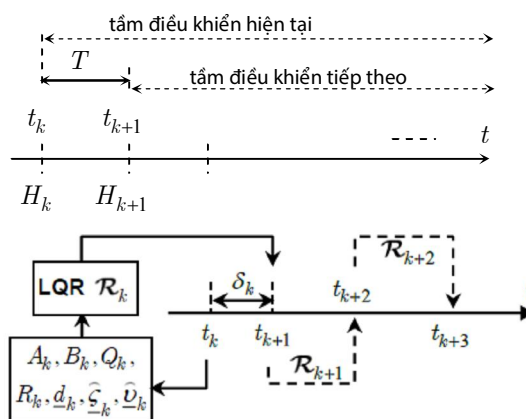
Điều khiển tốc độ động cơ đốt trong là phương pháp điều khiển phổ biến ứng dụng trong nhiều loại xe hiện đại. Mục đích của phương pháp điều khiển tốc độ động cơ là duy trì tốc độ động cơ bám theo tốc độ đặt, khi tốc độ đặt thay đổi. Chúng ta có thể dùng phương pháp điều khiển tốc độ

động cơ đốt trong bằng bộ điều khiển PID, LQR, nhưng nếu dùng phương pháp điều khiển tốc độ động cơ này chỉ áp dụng cho những hệ có mô hình tuyến tính, hệ dừng. Nếu tham số của mô hình thay đổi, tồn tại thành phần bất định (hệ không dừng), thì các phương pháp PID, LQR không đáp ứng được yêu cầu [2, 5, 6, 7]. Để giải quyết vấn đề đó, có nhiều tác giả áp dụng phương pháp điều khiển dự báo [4, 8, 9, 10], trong bài báo này đề xuất phương pháp điều khiển dự báo mô hình theo nguyên lý RHSDC, nhiệm vụ điều khiển được đặt ra là xây dựng bộ điều khiển để đầu ra của hệ bám theo được tín hiệu điều khiển và chất lượng bám đó không phụ thuộc vào các thành phần bất định.

2. NỘI DUNG

2.1. Phương pháp điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn theo nguyên lý RHSDC

2.1.1. Nguyên lý RHSDC



Hình 1. Cấu trúc hệ điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn RHSDC

Một mô hình đối tượng điều khiển liên tục, có tham số hằng tác động ở trạng thái và tín hiệu ra:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) + \zeta \\ y = g(x) + v \end{cases} \quad (1)$$

trong đó: $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ là vector các trạng thái, $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ là vector các tín hiệu vào, $y = (y_1, \dots, y_m)^T$

là vector các tín hiệu ra (giả sử số đầu vào bằng số đầu ra), \underline{z} , \underline{v} là các thành phần bất định của mô hình. Bộ điều khiển sample data sẽ được ta triển khai theo phương pháp điều khiển receding horizon dọc theo trục thời gian [4], tức là đối tượng liên tục sẽ được điều khiển bằng bộ điều khiển không liên tục, phản hồi trạng thái với chu kỳ điều khiển là $T > 0$, phương pháp điều khiển này vẫn áp dụng điều khiển cơ bản là LQR nhưng thêm vào đó bộ điều khiển theo dõi hay dự báo sự thay đổi tham số của mô hình trong suốt quá trình điều khiển bằng việc trích mẫu dữ liệu trạng thái (T nhỏ hơn tốc độ xử lý của bộ điều khiển), từ đó tính toán lại tín hiệu điều khiển trong bộ điều khiển LQR tại thời điểm lấy mẫu cho đối tượng điều khiển. Trong nguyên lý điều khiển kết hợp này, trước tiên giả sử tại thời điểm t_k hiện tại giá trị vector trạng thái $\underline{x}(t_k)$ của hệ là đo được. Tuy nhiên, cũng ở thời điểm hiện tại t_k này thì các thông tin quá khứ của hệ bao gồm tín hiệu vào, ra và trạng thái đều đã biết. Nhiệm vụ điều khiển là phải xác định giá trị tín hiệu điều khiển $\underline{u}(t_k)$ để điều khiển hệ trong khoảng thời gian của một chu kỳ điều khiển $t_k \leq t < t_{k+1}$ với $t_{k+1} = t_k + T$ sao cho tín hiệu ra $\underline{y}(t)$ bám theo được tín hiệu mẫu đặt trước $\underline{w}(t)$ chất lượng bám đó không phụ thuộc vào các thành phần bất định \underline{z} , \underline{v} [1], đồng thời chi phí điều khiển tính theo hàm mục tiêu tổng quát:

$$J = \int_0^{\infty} q(\underline{g}(\underline{x}) - \underline{w}, \underline{u}) dt \quad (2)$$

(2) đạt giá trị nhỏ nhất (điều khiển tối ưu được trình bày trong phần b). Tiếp theo, tại thời điểm t_{k+1} ta lại xác định $\underline{u}(t_{k+1})$ thỏa mãn (2) để điều khiển hệ trong khoảng thời gian kế tiếp là $t_{k+1} \leq t < t_{k+2}$. Cứ tiếp tục như vậy cho $k = 0, 1, \dots$ sẽ có được bộ điều khiển Receding Horizon-Sample Data như mong muốn [4].

2.1.2. Thuật toán điều khiển

Việc xác định $\underline{u}(t_k)$ ở thời điểm t_k thỏa mãn (2) là ta sẽ dựa vào các thông tin quá khứ của hệ phi tuyến (1) để xấp xỉ tuyến tính nó thành H_k . Hiển nhiên nếu tất cả các hệ H_k , $k = 0, 1, \dots$ đều bám theo được tín hiệu mẫu $\underline{w}(t)$ thì hệ phi tuyến (1) ban đầu cũng bám theo được tín hiệu mẫu đó. Khi đó, từ giá trị quá khứ $\underline{u}(t_{k-1})$ mà sau đây sẽ được ký hiệu là $\underline{u}_{k-1} = \underline{u}(t_{k-1})$ và nếu như vector hàm $\underline{f}(\underline{x}, \underline{u})$ là trơn, nó sẽ luôn xấp xỉ được trong lân cận $(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1})$ thành: $\underline{f}(\underline{x}, \underline{u}) \approx \underline{f}(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}) + A_k(\underline{x} - \underline{x}_{k-1}) + B_k(\underline{u} - \underline{u}_{k-1})$

trong đó $\underline{x}_k = \underline{x}(t_k)$ là đo được và:

$$A_k = \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}}, \quad B_k = \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}} \quad (3)$$

là các đạo hàm Jacobi của $\underline{f}(\underline{x}, \underline{u})$ tại $(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1})$. Do $\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}$ đã biết nên A_k, B_k là hai ma trận hằng xác định được. Ký hiệu:

$$\bar{\underline{z}}_k = \underline{f}(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}) - A_k \underline{x}_{k-1} - B_k \underline{u}_{k-1} + \underline{z}(t_k) \quad (4)$$

trong đó thành phần bất định $\bar{\underline{z}}_k = \bar{\underline{z}}(t_k)$ sẽ được ước lượng xấp xỉ từ mô hình phi tuyến (1) như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_k &= \underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) + \bar{\underline{z}}_k \\ \Leftrightarrow \bar{\underline{z}}_k &= \dot{\underline{x}}_k - \underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) \approx \frac{\underline{x}_k - \underline{x}_{k-1}}{T} - \underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

Khi đó phương trình thứ nhất trong (1) sẽ trở thành:

$$\dot{\underline{x}} = A_k \underline{x} + B_k \underline{u} + \bar{\underline{z}}_k \quad (6)$$

Tương tự, phương trình thứ hai của hệ phi tuyến (1) là:

$$\underline{y} = C_k \underline{x} + \bar{\underline{v}}_k \quad (7)$$

$$\text{với } C_k = \left. \frac{\partial \underline{g}}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}_{k-1}} \quad \text{và } \bar{\underline{v}}_k = \underline{g}(\underline{x}_{k-1}) - C_k \underline{x}_{k-1} + \underline{v}(t_k) \quad (8)$$

trong đó $\bar{\underline{v}}_k = \bar{\underline{v}}(t_k)$ được ước lượng xấp xỉ từ (1) bởi:

$$\bar{\underline{v}}_k = \underline{y}_k - \underline{g}(\underline{x}_k) \approx \underline{y}_{k-1} - \underline{g}(\underline{x}_k) \quad (9)$$

Cuối cùng, ghép chung (6) và (7) với nhau sẽ có mô hình xấp xỉ tuyến tính H_k của hệ (1) ban đầu tại $(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})$ như

$$\text{sau: } H_k : \begin{cases} \dot{\underline{x}} = A_k \underline{x} + B_k \underline{u} + \bar{\underline{z}}_k \\ \underline{y} = C_k \underline{x} + \bar{\underline{v}}_k \end{cases} \quad (10)$$

Gọi các giá trị trạng thái và điều khiển của hệ H_k ở chế độ xác lập lần lượt là \underline{x}_s , \underline{u}_s thì khi tín hiệu mẫu \underline{w} là hằng số từng đoạn, ta sẽ có [1]:

$$\begin{aligned} \begin{cases} \underline{0} = A_k \underline{x}_s + B_k \underline{u}_s + \bar{\underline{z}}_k \\ \underline{w} = C_k \underline{x}_s + \bar{\underline{v}}_k \end{cases} &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} -\bar{\underline{z}}_k \\ \underline{w} - \bar{\underline{v}}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x}_s \\ \underline{u}_s \end{pmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \underline{x}_s \\ \underline{u}_s \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & \Theta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -\bar{\underline{z}}_k \\ \underline{w} - \bar{\underline{v}}_k \end{pmatrix} = F_k^{-1} \begin{pmatrix} -\bar{\underline{z}}_k \\ \underline{w} - \bar{\underline{v}}_k \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

trong đó Θ , $\underline{0}$ là ký hiệu ma trận và vector có tất cả các phần tử 0, cũng như ma trận F_k được định nghĩa là:

$$F_k = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & \Theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

Suy ra, với ký hiệu sai lệch: $\underline{e} = \underline{x} - \underline{x}_s$, $\underline{z} = \underline{u} - \underline{u}_s$ có từ (10), (11) mô hình H_k' mô tả sai lệch giữa H_k với giá trị xác lập \underline{x}_s , \underline{u}_s như sau $H_k' : \dot{\underline{e}} = A_k \underline{e} + B_k \underline{z}$ (13)

và cùng với nó, bài toán điều khiển bám tối ưu cho hệ H_k sẽ được thay bằng điều khiển ổn định tối ưu cho hệ H_k' . Tương ứng, hàm mục tiêu (2) ban đầu cũng phải được chuyển về theo các biến mới là $(\underline{e}, \underline{z})$. Không mất tính tổng quát giả sử hàm mục tiêu (2) cho riêng hệ H_k , sau khi viết theo biến mới $(\underline{e}, \underline{z})$ sẽ có dạng toàn phương [1]:

$$J = \int_0^{\infty} [\underline{e}^T Q_k \underline{e} + \underline{z}^T R_k \underline{z}] dt \quad (14)$$

trong đó Q_k, R_k là hai ma trận đối xứng xác định dương. Trong trường hợp như vậy, tín hiệu điều khiển \underline{z} làm ổn định hệ H'_k theo tiêu chuẩn tối ưu (15) cho toàn bộ tầm điều khiển vô hạn $[t_k, \infty]$ sẽ là: $\underline{z} = -R_k^{-1}B_k^T L e = \mathfrak{R}_k e$. Với $L = L^T > 0$ là nghiệm của phương trình đại số Riccati [1]:

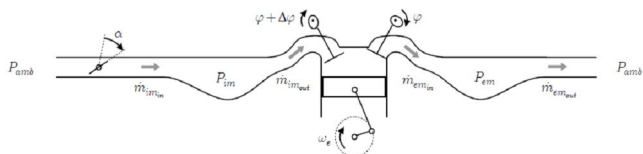
$$LB_k R_k^{-1} B_k^T L - A_k^T L - L A_k = Q_k \quad (15)$$

Từ đó ta có được tín hiệu điều khiển bám tối ưu \underline{u}_k trong một chu kỳ thời gian (t_k, t_{k+1}) cho hệ phi tuyến (1) ban đầu như sau:

$$\underline{u}_k = \underline{z}_k + \underline{u}_s = -R_k^{-1} B_k^T L (\underline{x}_k - \underline{x}_s) + \underline{u}_s \quad (16)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển RHSDC cho động cơ đốt trong SI

Xét một động cơ bốn kỳ sử dụng phương pháp đánh lửa đốt cháy nhiên liệu SI, không xét đến quá trình làm mát, turbo tăng áp mà chỉ khảo sát động cơ theo hai mặt: đường nhiên liệu vào xi lanh và đường khí thải từ xi lanh ra ngoài. Hình 2 thể hiện mô hình dòng chảy phân phối khí trong động cơ đốt trong [7].



Hình 2. Mô hình dòng chảy phân phối khí trong động cơ đốt trong

Trong đó, α : Góc mở chân ga, [rad], φ : Góc mở sớm trên trục cam, [rad], P_{amb} : áp suất môi trường xung quanh, [Pa], P_{im} : áp suất đường hút, [Pa], P_{em} : áp suất đường xả, [Pa], m_{imin} : lượng nhiên liệu vào ống nạp, [mm³], m_{imout} : lượng nhiên liệu ra khỏi ống nạp [mm³], m_{emin} : lượng nhiên liệu vào ống nạp [mm³], m_{emout} : lượng nhiên liệu ra khỏi ống nạp [mm³], ω_e tốc độ góc của động cơ [rad/s], τ_e mô men trên trục động cơ [Nm], τ_i mô men cản [Nm].

Theo [7] có hệ phương trình vi phân đầy đủ như sau:

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_{im}(t) &= \left(\frac{\lambda RT_{im,o}}{V_{im}} \right) \left[C_{ath} A_{th} \left(1 - \frac{\cos(\alpha + \alpha_{cl})}{\cos(\alpha_{cl})} \right) \frac{P_{amb}}{\sqrt{RT_{amb}}} \right. \\ &\quad \left. - 0.685 \left(1 - \exp\left(9 \frac{P_{im}}{P_{amb}} - 9 \right) \right) - \eta_{vol}(\gamma) \frac{P_{im} V_d \omega_e n_{cyl}}{RT_{im,o} 4\pi} \right] \\ \dot{P}_{em}(t) &= \left(\frac{\lambda RT_{em,o}}{V_{em}} \right) \left[\eta_{vol}(\gamma) \frac{P_{im} V_d \omega_e n_{cyl}}{RT_{im,o} 4\pi} \left(1 + \frac{1}{\lambda \left(\frac{A}{F} \right)_s} \right) \right. \\ &\quad \left. - C_{dexh} A_{dexh} \frac{P_{em}}{\sqrt{RT_{em,o}}} 0.685 \left(1 - \exp\left(9 \frac{P_{im}}{P_{amb}} - 9 \right) \right) \right] \\ \dot{\omega}_e(t) &= \frac{1}{J_e} \left[\eta_i(P_{im}, \omega_e) \frac{1}{\mu \left(\frac{A}{F} \right)_s} \frac{H_i}{\omega_e} \eta_{vol}(\gamma) \frac{P_{im} V_d \omega_e n_{cyl}}{RT_{im,o} 4\pi} \left(1 + \frac{1}{\lambda \left(\frac{A}{F} \right)_s} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{V_d n_{cyl}}{4\pi} (P_{em} - P_{im} + f_{mep}) - \tau_i \right] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

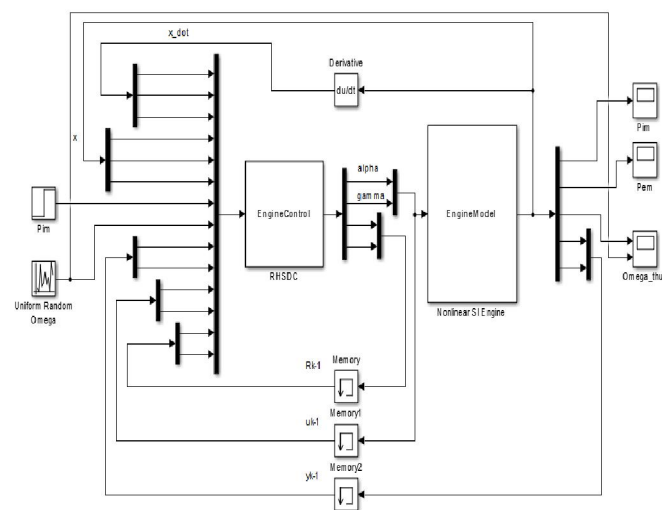
Hệ có các tín hiệu vào, ra và trạng thái lần lượt là:

$$\underline{u} = (\alpha, \gamma)^T, \quad \underline{y} = (P_{im}, \omega_e), \quad \underline{x} = (P_{im}, P_{em}, \omega_e)^T$$

Trên cơ sở thuật toán điều khiển RHSDC được trình bày trong mục 2.1, sử dụng mô hình phi tuyến (17), có hệ điều khiển RHSDC cho động cơ đốt trong như hình 3.

Bảng 1. Thông số của động cơ đốt trong hãng Ford 2.0L

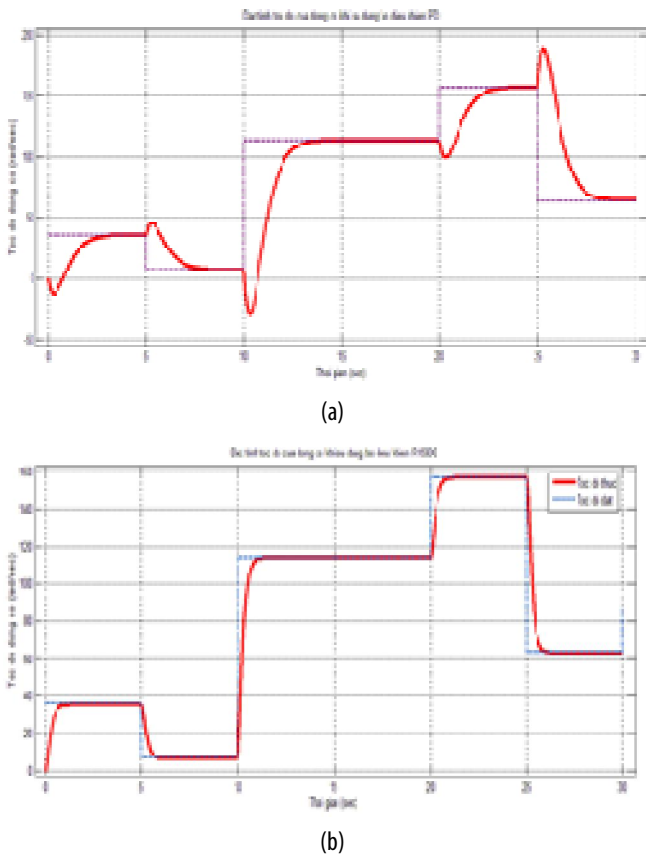
Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị
(A/F)	Tỷ lệ hòa khí	14,64	T _{amb}	Nhiệt độ không khí môi trường	288,15 [K]
A _{exh}	Tiết diện đường xả	0,00385 [m ²]	T _{im}	Nhiệt độ không khí trong đường hút	288,15 [K]
A _{th}	Tiết diện đường hút	0,00385 [m ²]	T _{em}	Nhiệt độ không khí trong đường xả	593 [K]
C _{dth}	Hằng số đường hút	0,85	V _{im}	Thể tích đường hút	0,004 [m ³]
C _{dexh}	Hằng số đường xả	0,7	V _{em}	Thể tích đường xả	0,004 [m ³]
H _i	Nhiệt trị thấp	44,106 [J/kg]	V _d	Thể tích buồng đốt	0,0006638 [m ³]
J _e	Mô men quán tính	0,15 [kg m ²]	α_{cl}	Góc mở α trung bình	7 ^o
η_{cyl}	Số xi lanh	6	η_i	Hiệu suất chỉ thị	f(P _{im} , ω_e)
P _{amb}	Áp suất không khí	101325 [Pa]	η_{vol}	Hàm thể tích hiệu quả	f(γ)
R	Hằng số khí	287,327 [J/kgK]	λ	Tỷ lệ nhiệt dung	1,4
α	Tín hiệu điều khiển		γ	Tín hiệu điều khiển	



Hình 3. Cấu trúc mô phỏng hệ điều khiển dự báo RHSDC cho động cơ đốt trong SI

Bộ điều khiển RHSDC được thiết kế bằng SFunction trong Matlab/Simulink [3], RHSDC có nhiệm vụ đo $\underline{x}_k = \underline{x}(t_k)$ từ hệ thống ($t_0 = 0$ và $t_k = t_{k-1} + T$, $T = 0,01s$, xác định ma trận A_{kr}, B_{kr}, C_{kr} , các vector $\underline{z}_k, \underline{v}_k$ theo (3), (4), (5), (8) và (9), tính F_k theo (12), tính $\underline{x}_s, \underline{u}_s$ theo (11), tính \underline{u}_k theo (15) và (16) đưa \underline{u}_k vào

điều khiển đối tượng (17) trong một khoảng thời gian điều khiển T. Chọn hai ma trận trọng số xác định dương $Q_k = [1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$, $R_k = [1 \ 0; 0 \ 1]$, kết quả mô phỏng điều khiển cho động cơ đốt trong hãng Ford 2.0L thông số như bảng 1 được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Đặc tính tốc độ động cơ dùng bộ điều khiển PID (a) và dùng bộ điều khiển RHSDC (b)

Nhận xét: Kết quả mô phỏng trong hình 4 cho thấy tốc độ động cơ đốt trong SI khi được điều khiển bằng bộ điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn theo nguyên lý RHSDC có chất lượng động học tốt hơn việc sử dụng bộ điều khiển PID khi cho tốc độ đặt thay đổi nhanh và tác động liên tục vào hệ.

3. KẾT LUẬN

Điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn là một kỹ thuật điều khiển dựa trên cơ sở 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. Trong bài báo này, tốc độ của động cơ đốt trong SI được xét đến, mô hình phi tuyến của động cơ đốt trong với nhiều điều kiện ràng buộc được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn theo nguyên lý RHSDC bằng công cụ S-function-Level1 trong Matlab/Simulink. Bộ điều khiển RHSDC được thiết kế điều khiển trên toàn dải tốc độ động cơ đốt trong đang xét. Kết quả cho thấy động cơ đốt trong SI bám theo tốc độ đặt yêu cầu nhanh và chính xác, có chất lượng động học tốt hơn

khi sử dụng bộ điều khiển PID. Hiệu quả của phương pháp điều khiển dự báo với tầm dự báo vô hạn theo nguyên lý RHSDC là cơ sở nghiên cứu điều khiển tiết kiệm nhiên liệu cho động cơ đốt trong.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1], Nguyễn Doãn Phước, 2009. *Lý thuyết điều khiển nâng cao*. NXB KHKT Hà Nội.
- [2]. Lưu Kim Thành, Trần Anh Dũng, Đào Quang Khanh, 2015. *Điều khiển lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ xăng áp dụng phương pháp điều khiển tối ưu LQR*. Tạp chí KHCN Hàng Hải, số 43.
- [3]. The MathWorks, 1998. *Writing S-Function, Dynamic Systems Simulation for Matlab*.
- [4]. Dinh Van Nghiep, Nguyen Nhu Hien, Nguyen Thu Ha and Nguyen Doan Phuoc, 2017. *Input Constrained Hover Control with Receding Horizon LQR for Disturbed TRMS*. Chalmers IEEE International Conference on System Science and Engineering.
- [5]. Juila Buckland, J.W.Grizzle, 2005. *Idle speed control of a lean Burn Direct Injection Spark Ignition Engine*. University of Michigan - USA.
- [6]. Jose David Lopez, Jairo Jose Espinosa, 2011. *John Ramiro Agudelo, LQR control for speed and torque of Internal combustion engines*, University International, Colombia.
- [7]. J.P.R. Jongeneel, 2009. *Input redundant internal combustion engine with linear quadratic Gaussian control and dynamic control allocation*, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [8]. Mingxin Kang, Fatima Tahir, Tielong Shen, Toshiyuki Ohtsuka, 2015. *MPC-Based Speed Tracking Control Design for Spark Ignition Engines*, Sophia University, Tokyo, Japan, University of Tsukuba.
- [9]. Mingxin Kang, Fatima Tahir, Tielong Shen, 2016. *Nonlinear Constrained Torque Control For Gasoline Engines*, Sophia University, Tokyo, Japan, University of Tsukuba.
- [10]. Stefano Di Cairano, Diana Yanakiev, Alberto Bemporad, 2012. *Model Predictive Idle Speed Control: Design, Analysis, and Experimental Evaluation*. IEEE.
- [11]. Akira Ohata, 2017. *Comparison of generalized engine control and MPC based on maximum principle*. Technova Inc, Tokyo, Japan.