

PHÁT TRIỂN GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN LỰC CHO THIẾT BỊ BAY MỘT KÊNH VỚI MÁY LÁI TUYẾN TÍNH

Phạm Văn May^{1,*}, Vũ Mạnh Tuấn¹, Trần Đức Thuận², Hà Văn Nghị³

¹*Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự*

²*Đại học Công nghệ Đông Á*

³*Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng*

Tóm tắt

Bài báo trình bày cơ sở toán học cho việc tổng hợp lệnh điều khiển và xây dựng giàn đồ lực điều khiển đối với thiết bị bay một kênh sử dụng máy lái tuyến tính. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất giải pháp tối ưu hóa hiệu suất sử dụng lực điều khiển cho thiết bị bay một kênh sử dụng máy lái tuyến tính. Giải pháp sử dụng tín hiệu hình sin giới hạn biên độ đã được chứng minh có thể tăng lực điều khiển lên trên 0,5 trong khi vẫn đảm bảo độ méo phi tuyến. Đây là một cải tiến định lượng trực tiếp ảnh hưởng đến khả năng cơ động của thiết bị bay. Chứng minh toán học làm rõ tính đúng đắn và hiệu quả của giải pháp. Kết quả này có ý nghĩa thực tiễn cao trong việc chuẩn bị nền tảng cho việc thiết kế hệ thống điều khiển thiết bị bay một kênh với máy lái tuyến tính.

Từ khóa: Thiết bị bay một kênh; lệnh điều khiển; máy lái tuyến tính.

1. Đặt vấn đề

Thiết bị bay một kênh (TBBMK) là loại khí tài được trang bị chủ yếu cho lực lượng phòng không tầm thấp nhờ vào tính cơ động cao và hiệu quả tác chiến. Hai hướng nghiên cứu chính hiện nay gồm: Cải tiến hệ thống xử lý thông tin của bộ định hướng đầu tự dẫn hồng ngoại, dựa trên các phương pháp điều khiển và xử lý tín hiệu truyền thống nhằm nâng cao khả năng phát hiện và bám sát mục tiêu [1]-[6]; tối ưu quỹ đạo bay tự dẫn trong môi trường tác thiết bị bay - mục tiêu (TBB-MT) nâng cao hiệu quả tiêu diệt mục tiêu. Một số giải pháp công nghệ tiên tiến đã được áp dụng trong các dòng TBBMK thế hệ mới như Iгла-S, Verba, Grom-M, Stringer..., bao gồm: đĩa điều chế đa kênh, mạch xử lý tín hiệu tốc độ cao, thuật toán điều khiển số hiện đại, hệ thống điều khiển nâng cấp. Những cải tiến này đã khắc phục nhiều hạn chế của TBBMK thế hệ trước. TBBMK tầm bắn ngắn thường sử dụng hai loại máy lái: khí nén và điện. Máy lái khí nén sử dụng thuật toán điều khiển kiểu rơ le theo nguyên lý điều chế độ rộng xung đã được làm sáng tỏ và nghiên cứu chuyên sâu trong [1], [3]-[7]. Máy lái điện sử dụng thuật toán điều khiển tuyến tính trong [5] đã đề cập đến dạng tín hiệu điều khiển, nhưng ưu nhược điểm của loại máy lái này chưa

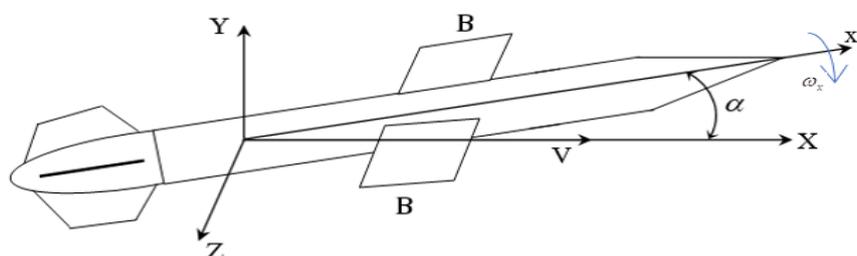
* Tác giả liên hệ, email: phamvanmaymta1989@gmail.com

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n03.1032

được chứng minh. Các công trình [8]-[10] là nghiên cứu tổng quan chuyên sâu về các thiết kế hệ thống máy lái trong ngành hàng không hiện đại, khảo sát các mô hình động lực học máy lái, bao gồm truyền động điện, thủy lực, khí nén cho đối tượng cỡ nhỏ UAV tốc độ cao, tập trung vào các hệ thống động cơ điện đảm bảo tối ưu về năng lượng và hiệu suất thay thế cho các hệ thống truyền động thủy lực, khí nén; nhưng UAV là một thiết bị bay đa kênh có sự khác biệt về nguyên lý điều khiển với TBBMK. Hiệu suất làm việc của TBBMK quay quanh trục dọc với tần số không đổi với máy lái kiểu rơ le và máy lái tuyến tính thông qua nghiên cứu, phân tích và tìm hệ số sử dụng lệnh điều khiển trình bày trong bài báo. Một số công bố quốc tế và tài liệu liên quan trình bày tổng quan và sơ lược chưa đầy đủ và chi tiết [11]-[13]. Bài báo này đề xuất một phương pháp tổng hợp lệnh điều khiển dựa trên phân tích lực điều khiển sinh ra trong TBBMK sử dụng máy lái tuyến tính. Từ đó, xây dựng bộ đề và phát biểu nhằm mô tả rõ quá trình hình thành lực điều khiển. Tối ưu hóa hiệu suất sử dụng lực điều khiển (K) cho TBBMK máy lái tuyến tính lên mức $K \approx (0,553 \sim 0,572)$ trong khi vẫn đảm bảo độ méo phi tuyến dưới 5% so với hệ số $K \approx 0,4777$ với TBBMK máy lái rơ le trong [5], [7], [12].

2. Xây dựng cơ sở toán học tổng hợp lệnh điều khiển thiết bị bay một kênh máy lái tuyến tính

Thiết bị bay một kênh là loại thiết bị bay (TBB) chỉ có một cơ cấu điều khiển tạo ra góc tấn hoặc góc trượt cạnh. Trong loại TBB này, cơ cấu cánh lái khí động quay một góc trong hệ tọa độ liên kết OXYZ (Hình 1). Đối với TBBMK sử dụng hiệu ứng khí động, sự quay cơ cấu lái tạo ra lực khí động, lực khí động tạo ra mô men lực làm quay TBB. Khi TBB quay, góc tấn thay đổi, xuất hiện lực pháp tuyến làm thay đổi hướng bay.



Hình 1. Dạng thiết bị bay một kênh.

$$\text{Biểu thức lực điều khiển TBBMK và sai số dẫn như sau: } \vec{F} = k_1 \cdot \vec{\varepsilon}_n \quad (1)$$

trong đó: \vec{F} - lực điều khiển tức thời thiết bị bay; $\vec{\varepsilon}_n$ - tốc độ góc đường ngắm thiết bị bay - mục tiêu; k_1 - hệ số tỉ lệ.

Để điều khiển TBBMK theo phương pháp tiệm cận tỉ lệ với máy lái khí - động hoặc điện: Tín hiệu dẫn với thông tin về sai số dẫn $\dot{\varepsilon}_d$ dưới dạng tín hiệu vector biến đổi với tần số bằng với tần số quay của TBB. Giá trị tức thời của lực điều khiển được xác định:

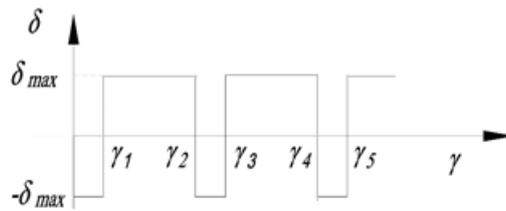
$$\vec{F} = |\vec{F}| \exp(i\omega_x t) \quad (2)$$

trong đó: $|\vec{F}|$ - độ lớn của vector lực điều khiển; ω_x - tốc độ quay của TBB.

$$|\vec{F}| = k |\delta| \quad (3)$$

trong đó: k - hệ số tỉ lệ, đặc trưng cho tính chất khí động học của TBB; $\delta = \pm \delta_{\max}$ - góc lệch của cánh lái từ vị trí giữa, rad.

Theo [1]-[5], luật điều khiển TBBMK với máy lái khí nén làm việc theo nguyên lý cực đại có dạng hàm dấu: $\delta(t) = \delta_{\max} \text{sign}[U_{\text{JI}} \sin(\omega_x t - \varphi) + U_{\text{rJI}} \sin(2(\omega_x t - \varphi))]$ được biểu diễn trên Hình 2. Trong đó: U_{JI} - biên độ tín hiệu điều khiển; U_{rJI} - biên độ máy phát tuyến tính.



Hình 2. Luật điều khiển TBBMK với máy lái khí nén.

Lực điều khiển được tính:

$$F_{dk} = F_{\max} \text{sign}[\sin(\gamma - \varphi)] = \begin{cases} F_{\max} & \gamma \in [\gamma_1, \gamma_2] \cup [\gamma_3, \gamma_4] \\ -F_{\max} & \gamma \in [\gamma_2, \gamma_3] \cup [\gamma_4, \gamma_5] \end{cases} \quad (4)$$

Lực điều khiển trung bình trong một chu kỳ quay là:

$$F_{dkb} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} F_{dk} \sin(\gamma - \varphi) d\gamma = \frac{F_{\max}}{\pi} \cdot \frac{U_{\text{JI}}(t)}{U_{\text{rJI}}} \quad (5)$$

Lực điều khiển trung bình kênh tầm:

$$F_{dkb_Yg} = \frac{F_{\max}}{\pi} \left(\frac{U_{\text{JI}}(t)}{U_{\text{rJI}}} \right) \cos \varphi \quad (6)$$

Lực điều khiển trung bình kênh hướng:

$$F_{dktb_z\grave{e}} = -\frac{F_{\max}}{\pi} \cdot \left(\frac{U_{\text{II}}(t)}{U_{\text{II}}}\right) \sin \varphi \quad (7)$$

Nhận xét: Lực điều khiển trung bình cực đại xảy ra khi $U_{\text{II}}(t)$ lớn nhất, $\frac{U_{\text{II}}(t)}{U_{\text{II}}}$ đạt giá trị lớn nhất khả dĩ thỏa mãn $\frac{U_{\text{II}}(t)}{U_{\text{II}}} \leq 2$. Theo [10], để lực và mô men điều khiển tỉ lệ thuận với sai số điều khiển thì $\frac{U_{\text{II}}(t)}{U_{\text{II}}} \leq 1,5$. Khi đó: $F_{dktb_max} = \frac{F_{\max}}{\pi} \cdot 1,5 = 0,4777 \cdot F_{\max}$

Hệ số sử dụng lực điều khiển của TBBMK máy lái khí nén:

$$K = \frac{F_{dktb_max}}{F_{\max}} = 0,4777 \quad (8)$$

Theo (2), các lực tác dụng trong hệ thống điều khiển một kênh lên các trục của hệ tọa độ cố định được mô tả bằng các phương trình sau:

$$\begin{cases} F_y(t) = F \cos(\omega_x t) \\ F_z(t) = F \sin(\omega_x t) \end{cases} \quad (9)$$

$F_y(t)$ - hình chiếu của lực điều khiển lên mặt phẳng thẳng đứng; $F_z(t)$ - hình chiếu của lực điều khiển lên mặt phẳng nằm ngang.

Lực trung bình theo thời gian T (trên mỗi vòng quay của TBB):

$$\begin{cases} F_{ycp} = \frac{1}{T} \int_0^T F \cos(\omega_x t) dt \\ F_{zcp} = \frac{1}{T} \int_0^T F \sin(\omega_x t) dt \end{cases} \quad (10)$$

Bổ đề 1: Nếu lực điều khiển dạng $F(t) = F_A \sin(\omega t + \varphi)$ với tần số ω khác tần số quay của TBB ω_x thì giá trị trung bình của lực đó trong một chu kỳ ($T = \frac{2\pi}{\omega_x}$) bằng 0.

Thật vậy:

$$F_{ycp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega t + \varphi) \cos(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{2T} \left[\int_0^T \sin((\omega + \omega_x)t + \varphi) dt + \int_0^T \sin((\omega - \omega_x)t + \varphi) dt \right] \quad (11)$$

$$\text{Xét } \begin{cases} I_1 = \int_0^T \sin((\omega + \omega_x)t + \varphi) dt = 0 \\ I_2 = \int_0^T \sin((\omega - \omega_x)t + \varphi) dt = 0 \end{cases}$$

Do sin là hàm tuần hoàn, nếu $\omega \neq \omega_x$, cả hai tích phân I_1 và I_2 đều dao động quanh trục hoành và giá trị trung bình của chúng trên khoảng một chu kỳ T bằng 0.

Suy ra:

$$F_{ycp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega t + \varphi) \cos(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{2T} \left[\int_0^T \sin((\omega + \omega_x)t + \varphi) dt + \int_0^T \sin((\omega - \omega_x)t + \varphi) dt \right] \quad (12)$$

$$\text{Biến đổi tương tự: } F_{zcp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega t + \varphi) \sin(\omega_x t) dt = 0 \quad (13)$$

Nhận xét: Chỉ khi tần số của lực điều khiển trùng với tần số quay của TBB, mới xuất hiện lực trung bình khác không để điều khiển quỹ đạo.

Phát biểu 1: Khi tín hiệu đầu vào máy lái không đổi, bánh lái lệch một góc cố định, tạo ra lực khí động thay đổi theo vòng quay nhưng không sinh lực trung bình theo hướng xác định.

Thật vậy: Nếu $F = F_A = \text{const}$

Khi đó:

$$F_{ycp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \cos(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{T} \int_0^T \cos(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{T} \left(\frac{\sin(\omega_x t)}{\omega_x} \right) \Bigg|_0^T = 0 \quad (14)$$

$$F_{zcp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{T} \int_0^T \sin(\omega_x t) dt = -\frac{F_A}{T} \left(\frac{\cos(\omega_x t)}{\omega_x} \right) \Bigg|_0^T = 0 \quad (15)$$

Điều này có nghĩa: Nếu lực điều khiển không biến thiên cùng tần số quay của TBB, thì lực trung bình tạo ra sẽ bằng không. Kết quả minh họa trên Hình 3.

Phát biểu 2: Nếu tín hiệu điều khiển biến thiên hình sin với tần số đúng bằng tần số quay của TBB, thì lực khí động học sinh ra cũng sẽ biến thiên hình sin theo và tạo ra lực trung bình khác không để điều khiển quỹ đạo.

Theo [1], tín hiệu điều khiển được tìm dưới dạng: $\delta_B(t) = A \sin(\omega_x t + \varphi)$ thì lực điều khiển F thay đổi theo định luật hình sin $F = F_A \sin(\omega_x t + \varphi)$, phương trình lực trung bình sẽ có dạng:

$$F_{ycp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega_x t + \varphi) \cos(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{2T} \left[\int_0^T \sin(2\omega_x t + \varphi) dt + \int_0^T \sin(\varphi) dt \right] \quad (16)$$

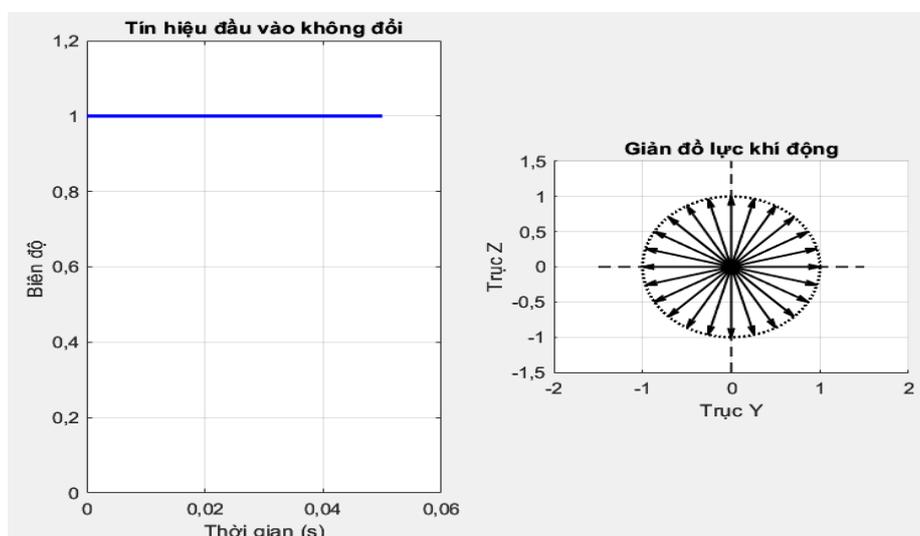
$$\int_0^T \sin(\varphi) dt = T \sin(\varphi)$$

$$\int_0^T \sin(2\omega_x t + \varphi) dt = \left[-\frac{\cos(2\omega_x t + \varphi)}{2\omega_x} \right]_0^T = \frac{1}{2\omega_x} (\cos \varphi - \cos(4\pi + \varphi)) = 0$$

Suy ra: $F_{zcp} = \frac{F_A}{2} \sin(\varphi)$ (17)

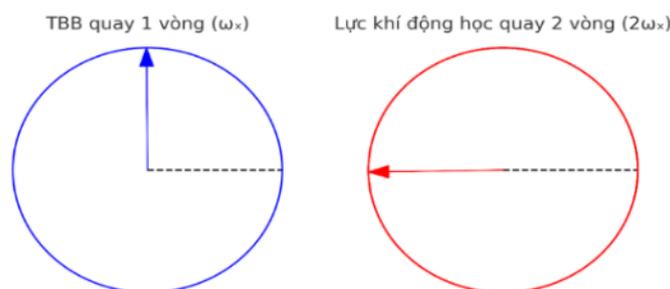
Biến đổi tương tự: $F_{zcp} = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega_x t + \varphi) \sin(\omega_x t) dt = \frac{F_A}{2} \cos(\varphi)$ (18)

Nhận xét: Trong hệ thống điều khiển một kênh, lực điều khiển trung bình có độ lớn bằng một nửa biên độ của tín hiệu hình sin tại tần số quay của TBB, và hướng của lực phụ thuộc vào pha của tín hiệu điều khiển đầu vào.



Hình 3. Giản đồ lực điều khiển khi tín hiệu vào không đổi.

Bổ đề 2: Vì bánh lái gắn cứng với TBB và trục quay của TBB quay với tốc độ ω_x , nên lực điều khiển biến thiên cả về độ lớn lẫn hướng theo quỹ đạo vòng tròn hai lần trong mỗi vòng quay. Do đó, TBB chịu một lực trung bình ở tâm vòng tròn và một lực dao động có tần số gấp đôi tần số quay của TBB thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Hình minh họa động học quay.

Giả sử lực khí động học tại mỗi thời điểm là: $F(t) = F_A \sin(\omega_x t + \varphi)n(t)$ với $n(t)$ là vectơ đơn vị chỉ phương lực khí động và thay đổi khi TBB quay.

Lực điều khiển trung bình trong một chu kỳ:

$$F_{dktb} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T F_A \sin(\omega_x t + \varphi) dt \quad (19)$$

$$\Leftrightarrow F_{dktb} = \frac{F_A}{T} \left[-\frac{1}{\omega_x} \cos(\omega_x t + \varphi) \right]_0^T = \frac{F_A}{T} \left[-\frac{1}{\omega_x} (\cos(T\omega_x + \varphi) + \cos \varphi) \right] = 0$$

Nếu lực điều khiển chỉ biến thiên theo quy luật hình sin, thì lực trung bình trong một chu kỳ bằng 0 ($F_{dktb} = 0$); nếu xét lực tổng hợp trong hệ tọa độ quay, lực trung bình có độ lớn bằng một nửa biên độ lực điều khiển hình sin: $F_{dktb} = \sqrt{F_{yep}^2 + F_{zep}^2} = \frac{F_A}{2}$ và hướng của lực này phụ thuộc vào pha của tín hiệu điều khiển φ .

$$\text{Hệ số sử dụng lực điều khiển: } K = \frac{F_{dktb-\max}}{F_{\max}} = \frac{\frac{F_A}{2}}{F_A} = \frac{1}{2} = 0,5 \quad (20)$$

$$\text{Hệ số lệnh theo kênh hướng: } K_y = \frac{F_{dktb-y}}{F_{dktb-\max}} = \frac{\frac{F_A}{2} \sin(\varphi)}{\frac{F_A}{2}} = \sin(\varphi) \quad (21)$$

$$\text{Hệ số lệnh theo kênh tầm: } K_z = \frac{F_{dktb-z}}{F_{dktb-\max}} = \frac{\frac{F_A}{2} \cos(\varphi)}{\frac{F_A}{2}} = \cos(\varphi) \quad (22)$$

TBB quay quanh trục dọc của nó với tốc độ góc ω_x và bánh lái gắn cứng với TBB. Lực khí động tác động lên bánh lái luôn vuông góc với mặt phẳng của nó và quay cùng với TBB trong mặt phẳng vuông góc với trục dọc. Do đó, trong hệ tọa độ liên kết, lực này được phân tách thành hai thành phần theo phương y và z:

$$\begin{cases} F_y(t) = F_A \sin(\omega_x t + \varphi) \cos(\omega_x t) = \frac{F_A}{2} \sin \varphi + \frac{F_A}{2} \sin(2\omega_x t + \varphi) \\ F_z(t) = F_A \sin(\omega_x t + \varphi) \sin(\omega_x t) = \frac{F_A}{2} \cos \varphi - \frac{F_A}{2} \cos(2\omega_x t + \varphi) \end{cases} \quad (23)$$

Lực điều khiển tức thời $F_y(t), F_z(t)$ đều có thành phần dao động với tần số $2\omega_x$. Lực dao động tại tần số $2\omega_x$ không ảnh hưởng đáng kể đến quỹ đạo do TBB có tần số dao động tự nhiên thấp hơn nhiều.

Nhận xét: Lực điều khiển trung bình trong hệ tọa độ cố định có giá trị bằng một

nửa biên độ của lực điều khiển hình sin. Hệ số lệnh kênh tâm và kênh hướng phụ thuộc vào pha điều khiển φ .

- Nếu $\varphi = 0 \Rightarrow K_z = 1, K_y = 0, F_{ycp} = 0, F_{zcp} = \frac{F_A}{2}$: Lực điều khiển nằm trên trục z và điều khiển TBB lệch lên trên (Hình 5).

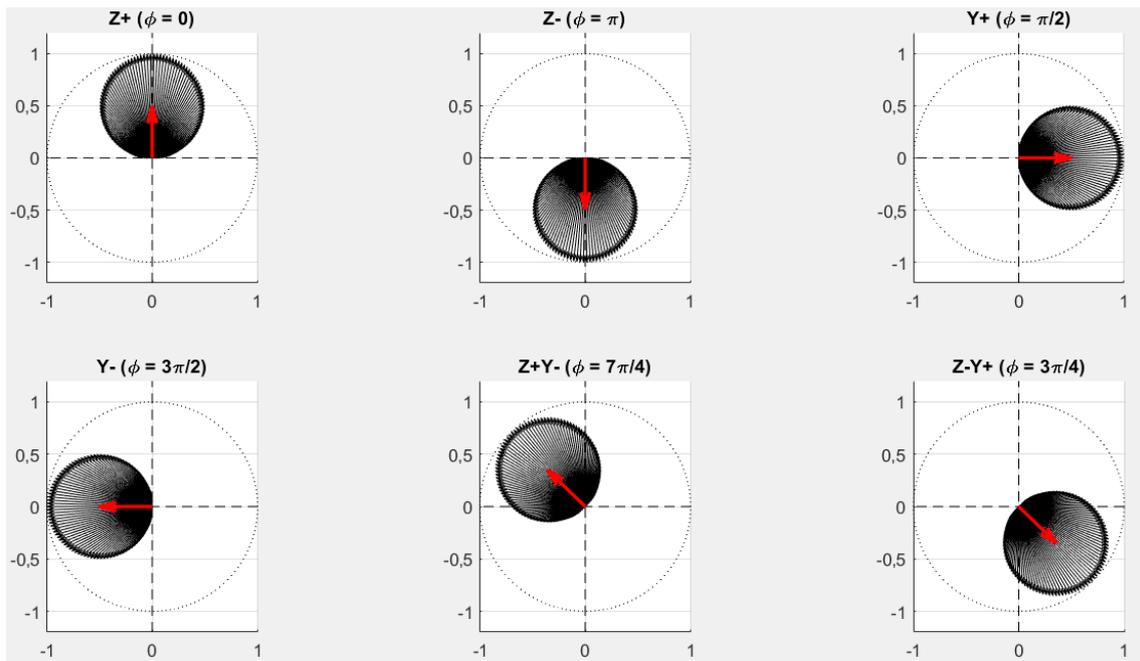
- Nếu $\varphi = \pi \Rightarrow K_z = -1, K_y = 0, F_{ycp} = 0, F_{zcp} = -\frac{F_A}{2}$: Lực điều khiển nằm trên trục z và điều khiển TBB lệch xuống dưới (Hình 5).

- Nếu $\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow K_z = 0, K_y = 1, F_{ycp} = \frac{F_A}{2}, F_{zcp} = 0$: Lực điều khiển nằm trên trục y và điều khiển TBB lệch sang trái (Hình 5).

- Nếu $\varphi = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow K_z = 0, K_y = -1, F_{ycp} = -\frac{F_A}{2}, F_{zcp} = 0$: Lực điều khiển nằm trên trục y và điều khiển TBB lệch sang phải (Hình 5).

- Nếu $\varphi \neq 0 \Rightarrow K_z \neq 0, K_y \neq 0, F_{ycp} = \frac{F_A}{2} \sin(\varphi), F_{zcp} = \frac{F_A}{2} \cos(\varphi)$. Lực tổng hợp

lên hai trục ngang và đứng vuông góc với nhau thì cả hai thành phần lực đều khác 0 và TBBMK chịu tác động của các lực theo cả hai phương vuông góc với nhau. Với lực tác động đó có thể làm thay đổi hướng quỹ đạo của TBBMK theo quỹ đạo mong muốn.



Hình 5. Giảm độ lực điều khiển với các pha điều khiển.

Trên Hình 5 nhận thấy: Vòng tròn nhỏ phía trong biểu diễn tập hợp các lực khí động tức thời quay quanh trục quay của TBB trong hệ tọa độ cố định với trục ngang và trục đứng. Mỗi tên biểu diễn lực trung bình tổng hợp sau một chu kỳ.

3. Giải pháp nâng cao lực điều khiển đối với thiết bị bay một kênh máy lái tuyến tính

Đối với máy lái khí nén, biểu thức (8) hệ số sử dụng lực điều khiển là 0,4777; máy lái tuyến tính sử dụng động cơ điện với tín hiệu điều khiển dạng điều hòa theo biểu thức (20) hệ số sử dụng lực điều khiển là 0,5. Như vậy, máy lái điện dùng động cơ điện, tín hiệu điều khiển thường là dạng điều hòa. Để bảo vệ cơ cấu lái, cần có khâu bão hòa nhằm ngăn tín hiệu điều khiển quá lớn gây hỏng hóc. Vấn đề đặt ra là: Giới hạn bão hòa nên chọn lớn nhất bao nhiêu để vừa tận dụng tối đa khả năng điều khiển, vừa giữ được tính tuyến tính giữa tín hiệu điều khiển đầu vào và góc quay cánh lái đầu ra.

Bài toán: Để tăng giá trị hệ số sử dụng lực điều khiển trên 0,5 và tín hiệu điều khiển đầu vào cực đại tới cơ cấu lái được cung cấp dưới dạng hình sin giới hạn. Giả sử lực điều khiển $F(t) = F \sin(\omega_x t + \varphi)$ được giới hạn có dạng sau:

$$F(t) = \begin{cases} F_{\max}; F \sin(\omega_x t + \varphi) > F_{\max} \\ F \sin(\omega_x t + \varphi); |F \sin(\omega_x t + \varphi)| \leq F_{\max} \\ -F_{\max}; F \sin(\omega_x t + \varphi) < -F_{\max} \end{cases} \quad (24)$$

F_{\max} - biên độ cực đại của lực điều khiển. Tìm giá trị $m = \frac{F_{\max}}{F} \in (0; 1]$ thỏa mãn bài toán.

Tín hiệu bị cắt đỉnh khi: $|\sin(\omega_x t + \varphi)| > m$, nên $(\omega_x t + \varphi) \in [\theta_c; \pi - \theta_c] \cup [\pi + \theta_c; 2\pi - \theta_c]$

$$\Leftrightarrow t \in [t_1 = \frac{\theta_c - \varphi}{\omega_x}, t_2 = \frac{\pi - \theta_c - \varphi}{\omega_x}] \cup [t_3 = \frac{\pi + \theta_c - \varphi}{\omega_x}, t_4 = \frac{2\pi - \theta_c - \varphi}{\omega_x}]; \theta_c = \arcsin(m)$$

Lực điều khiển trung bình trong một chu kỳ:

$$F_{dktb} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{\text{Vùng 1}} F \sin(\omega_x t + \varphi) dt + \int_{\text{Vùng 2}} F_{\max} dt \right] \quad (25)$$

$$F_{ycp} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) \cos(\omega_x t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{\text{Vùng 1}} F \sin(\omega_x t + \varphi) \cos(\omega_x t) dt + \int_{\text{Vùng 2}} F_{\max} \cos(\omega_x t) dt \right] \quad (26)$$

$$F_{zcp} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) \sin(\omega_x t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{\text{Vùng 1}} F \sin(\omega_x t + \varphi) \sin(\omega_x t) dt + \int_{\text{Vùng 2}} F_{\max} \sin(\omega_x t) dt \right] \quad (27)$$

Vùng 1: Không cắt đỉnh $|\sin(\omega_x t + \varphi)| \leq m$;

Vùng 2: Bị cắt đỉnh $|\sin(\omega_x t + \varphi)| > m$;

Xét $|\sin(\omega_x t + \varphi)| = m$ suy ra:

$$\begin{cases} \omega_x t_1 + \varphi = \arcsin(m) \\ \omega_x t_2 + \varphi = \pi - \arcsin(m) \\ \omega_x t_3 + \varphi = \pi + \arcsin(m) \\ \omega_x t_4 + \varphi = 2\pi - \arcsin(m) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} t_1 = \frac{\arcsin(m) - \varphi}{\omega_x} \\ t_2 = \frac{\pi - \arcsin(m) - \varphi}{\omega_x} \\ t_3 = \frac{\pi + \arcsin(m) - \varphi}{\omega_x} \\ t_4 = \frac{2\pi - \arcsin(m) - \varphi}{\omega_x} \end{cases}$$

$$t_1 + t_3 - t_2 + T - t_4 = \frac{1}{\omega_x} (\theta_c - \varphi + \pi + \theta_c - \varphi - \pi + \theta_c + \varphi + 2\pi - 2\pi + \theta_c + \varphi) = \frac{1}{\omega_x} 4\theta_c$$

Biến đổi biểu thức (26): $F_{ycp} = F_{y1} + F_{y2}$. Lực điều khiển trung bình kênh hướng:

$$F_{ycp} = \frac{F}{\pi} \sin(\varphi)\theta_c + \frac{2F_{\max}}{\pi} \cos(\theta_c) \cos(\varphi) \quad (28)$$

Biến đổi biểu thức (27): $F_{zcp} = F_{z1} + F_{z2}$. Lực điều khiển trung bình kênh tâm:

$$F_{zcp} = \frac{F}{\pi} \theta_c \cos \varphi + \frac{2F_{\max}}{\pi} \cos(\theta_c) \cos \varphi \quad (29)$$

Biến đổi biểu thức (25), lực điều khiển trung bình:

$$F_{dktb} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{\text{Vùng 1}} F \sin(\omega_x t + \varphi) dt + \int_{\text{Vùng 2}} F_{\max} dt \right] = 0 \quad (30)$$

Nhận xét: Nếu lấy trung bình lực điều khiển theo phương pháp toán học thông thường $F_{dktb} = 0$; nhưng nếu xét lực tổng hợp trong hệ tọa độ quay thì độ lớn lực:

$$F_{tb}^2 = F_{ycp}^2 + F_{zcp}^2 = \left(\frac{F}{\pi} \theta_c\right)^2 + 2\left(\frac{2F_{\max}}{\pi} \cos \theta_c \cos \varphi\right)^2 + \frac{FF_{\max}}{\pi^2} \sin(2\varphi)\theta_c \cos \theta_c + \frac{FF_{\max}}{\pi^2} \cos^2(\varphi)\theta_c \cos \theta_c$$

$$F_{tb} = \left(\frac{F}{\pi}\right) \sqrt{[\theta_c^2 + 2(2m \cos \theta_c \cos \varphi)^2 + m \sin(2\varphi)\theta_c \cos \theta_c + m \cos^2(\varphi)\theta_c \cos \theta_c]} \quad (31)$$

trong đó: $\theta_c = \arcsin(m) \Rightarrow \cos(\theta_c) = \cos(\arcsin(m)) = \sqrt{1 - m^2}$; $\varphi \in [0; 2\pi]$

$$\text{Xét biểu thức tương đương với: } f(\varphi) = C_0 + C_1 \cos^2 \varphi + C_2 \sin(2\varphi) \quad (32)$$

$$C_0 = (\arcsin(m))^2, C_1 = 8m^2(1-m^2) + m \cdot \arcsin(m)\sqrt{1-m^2} \quad C_2 = m \cdot \arcsin(m)\sqrt{1-m^2}$$

Hàm số $f(\varphi)$ có dạng tổng của $\cos^2 \varphi$ và $\sin(2\varphi)$ là dạng hàm điều hòa.

Đạo hàm biểu thức (32):

$$\frac{df}{d\varphi} = -2C_1 \cos \varphi \sin \varphi + 2C_2 \cos(2\varphi) = 2C_2 \cos(2\varphi) - C_1 \sin(2\varphi) \quad (33)$$

Cần tìm giá trị của m để $F_{tb} \rightarrow \max$ sao cho giá trị hệ số $0,5 < K = \frac{F_{tb_{\max}}}{F_{\max}} \leq 1$

Khảo sát hàm số $f(\varphi)$ với $\varphi \in [0; \pi]$ sao cho $f(\varphi)$ đạt giá trị cực đại:

$$\frac{df}{d\varphi} = 2C_2 \cos(2\varphi) - C_1 \sin(2\varphi) = 0 \quad (34)$$

Trường hợp 1: Nếu $\cos(2\varphi) = 0$ suy ra: $2\varphi = \frac{\pi}{2} + k\pi \Leftrightarrow \varphi = \frac{\pi}{4} + k\pi$ (35)

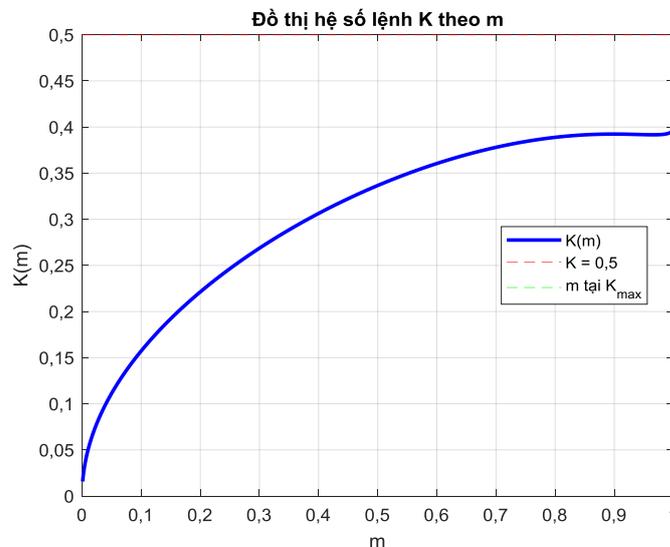
Thay (35) vào biểu thức (32) nhận được:

$$f(\varphi) = (\arcsin(m))^2 + 4m^2(1-m^2) + m \arcsin(m)\sqrt{1-m^2} \quad (36)$$

Thay biểu thức (36) vào biểu thức (31):

$$F_{tb} = \left(\frac{F}{\pi}\right) \sqrt{[(\arcsin(m))^2 + 4m^2(1-m^2) + m \arcsin(m)\sqrt{1-m^2}]} \quad (37)$$

$$K = \frac{F_{tb_{\max}}}{F} = \frac{F_{tb}}{F} = \frac{1}{\pi} \sqrt{[(\arcsin(m))^2 + 4m^2(1-m^2) + m \arcsin(m)\sqrt{1-m^2}]} \quad (38)$$



Hình 6. Đồ thị hệ số K theo m với $\varphi = \frac{\pi}{4} + k\pi$.

Trên Hình 6 nhận thấy: $K < 0,5$ với mọi $m \in (0; 1]$; $K_{\max} = 0,3964$ khi $m = 0,9990$.

Trường hợp 2: Nếu $\cos(2\varphi) \neq 0$, chia cả 2 vế phương trình (27) cho $\cos(2\varphi)$:

$$K = \frac{F_{tb_max}}{F} = \frac{F_{tb}}{F} = \frac{1}{\pi} \sqrt{[(\arcsin(m))^2 + 4m^2(1-m^2) + m \arcsin(m)\sqrt{1-m^2}]} \quad (39)$$

Vì $\varphi \in [0; \pi]$ nên:
$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right) \\ \varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

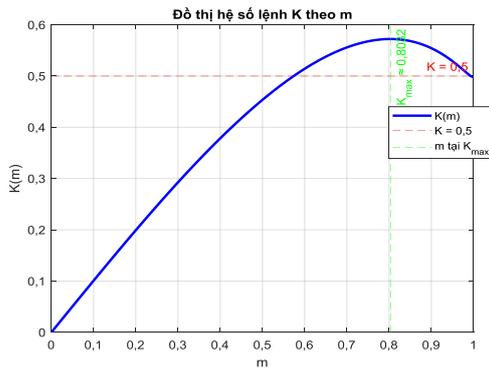
Thay các giá trị φ vào hàm $f(\varphi)$ so sánh các giá trị và tìm cực đại của hàm $f(\varphi)$

* Với $\varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right)$ thay vào biểu thức (32):

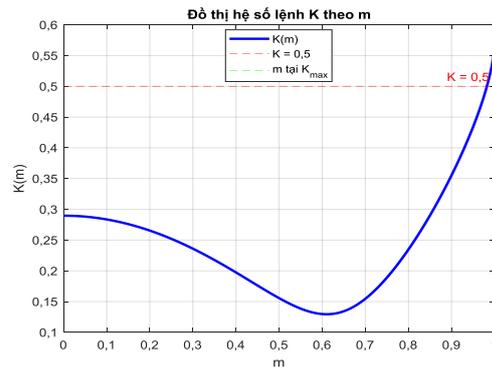
$$f(\varphi_1) = C_0 + \frac{C_1^2 + 4C_2^2 + C_1\sqrt{C_1^2 + 4C_2^2}}{2\sqrt{C_1^2 + 4C_2^2}} = C_0 + \frac{1}{2} \sqrt{C_1^2 + 4C_2^2} + \frac{C_1}{2} \quad (40)$$

* Với $\varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right) + \frac{\pi}{2}$:

$$f(\varphi_1) = C_0 + C_1 \cos^2 \varphi_1 + C_2 \sin(2\varphi_1) = C_0 + C_1 \frac{1 - \sqrt{1+x^2}}{2\sqrt{1+x^2}} - C_2 \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \quad (41)$$



$$a) \varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right)$$



$$b) \varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right) + \frac{\pi}{2}$$

Hình 7. Đồ thị hệ số K theo m với giá trị của φ_1 .

Trên Hình 7a: $K > 0,5$ khi $m \in [0,5744; 0,9930]$ và khi $m = 0,8032$. Trên Hình 7b: $K > 0,5$ khi $m \in [0,9820; 0,9990]$ và $K_{\max} = 0,5618$.

4. Thảo luận và nhận xét

Từ các kết quả mô phỏng nhận thấy:

- Tín hiệu điều khiển: $\delta_b(t) = A \sin(\omega_x t + \varphi)$ thì lực điều khiển F thay đổi theo định luật hình sin $F = F_A \sin(\omega_x t + \varphi)$. Hệ số sử dụng lực điều khiển tối đa đạt 0,5.

- Hình 7 là đồ thị của hệ số K theo m , hàm số $f(\varphi) = C_0 + C_1 \cos^2 \varphi + C_2 \sin(2\varphi)$ có điểm cực đại $\varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right)$ và điểm yên ngựa $\varphi_1 = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2C_2}{C_1}\right) + \frac{\pi}{2}$

- Để nâng cao hệ số sử dụng lực điều khiển lên trên 0,5; tín hiệu điều khiển đầu vào tới máy lái được định dạng dưới dạng hàm sin bị giới hạn biên độ nên lực điều khiển khi đó bị giới hạn có dạng sau:

$$F(t) = \begin{cases} F_{\max}; F \sin(\omega_x t + \varphi) > F_{\max} \\ F \sin(\omega_x t + \varphi); |F \sin(\omega_x t + \varphi)| \leq F_{\max} \\ -F_{\max}; F \sin(\omega_x t + \varphi) < -F_{\max} \end{cases} \text{ với } m = \frac{F_{\max}}{F} \in [0,5744; 0,9930]$$

- Kết quả mô phỏng như Hình 8a, khi đó hệ số sử dụng lực điều khiển $K = 0,57224$ và lực điều khiển trung bình theo kênh tâm và kênh hướng lần lượt $F_{tb_y} = 0,08344$, $F_{tb_z} = 0,4411$ và lực trung bình $F_{tb} = 0,449$. Trên Hình 8b, khi $m = 0,5744$ và lân cận giá trị đó thì tín hiệu hình sin bị cắt đỉnh và lực điều khiển có dạng gần giống xung hình chữ nhật, thì mối quan hệ tuyến tính tỉ lệ giữa đầu vào và đầu ra bị phá vỡ và đặc tính của máy lái tuyến tính gần với máy lái rơ le.

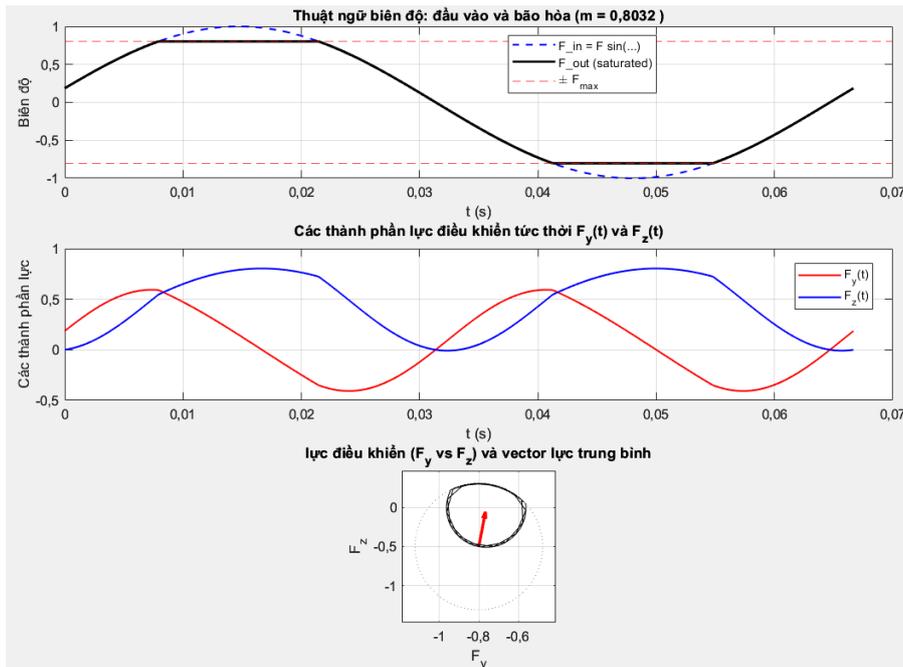
- Để biết được độ méo phi tuyến cũng như đáp ứng của máy lái tuyến tính sử dụng động cơ điện có thể đáp ứng được khi tín hiệu điều khiển bị giới hạn. Xét ba tiêu chí: TDH% (độ méo hài tổng thể), PRD% (phần trăm chênh lệch RMS), sai số biên độ - pha của thành phần cơ bản. Kết quả khi máy lái tuyến tính (sử dụng động cơ điện) có độ trễ máy lái $\tau = 0,005$ s và tần số quay quanh trục dọc TBB $f = 15$ Hz được trình bày ở Bảng 1.

+ Khi $m < 0,75$ thì $TDH\% > 10\%$ và $|A1-1|\% > 15\%$ nên không chấp nhận.

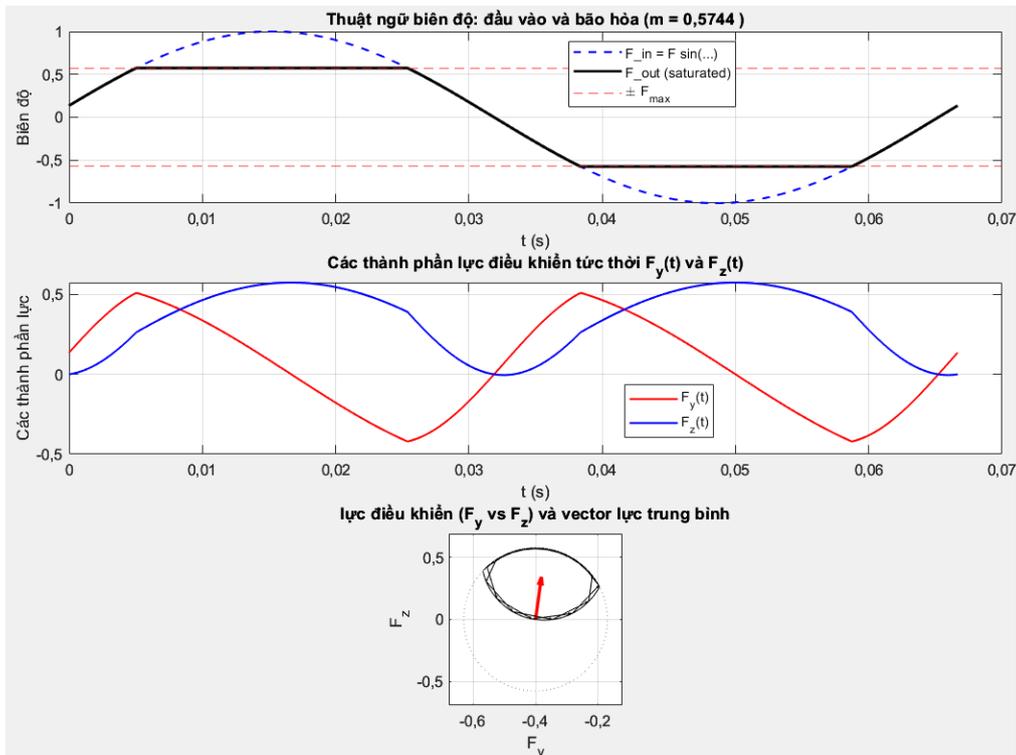
+ Khi $m \approx 0,80$ ($K \approx 0,54$) thì $TDH\% \approx 5\%$ và $|A1-1|\% \sim 11\%$ nên bắt đầu tiệm cận vùng chấp nhận được.

+ Khi $m \geq 0,88$ ($K \approx 0,55 \div 0,56$) thì $TDH\% \approx 9\%$ và $|A1-1|\% \leq 5\%$ đây là khoảng chấp nhận được.

+ Khi $m = 0,90 \div 0,993$ ($K \approx 0,557 \div 0,572$) thì méo rất thấp, biên độ chính xác, an toàn cho máy lái.



a) $m = 0,8032$



b) $m = 0,5744$

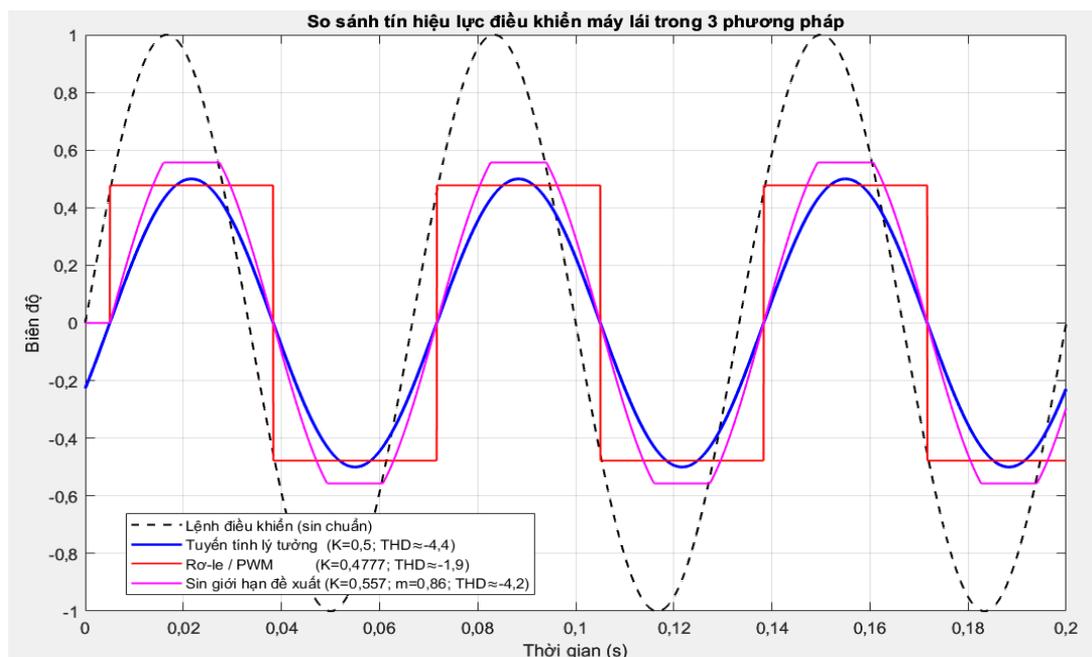
Hình 8. Kết quả mô phỏng khi tín hiệu điều khiển bị giới hạn với giá trị của m .

Bảng 1. Kết quả phân tích các chỉ số đánh giá độ méo phi tuyến

STT	K	m	TDH% (dB)	PRD%	A1-1 %
1	0,5000	0,5744	-14,2166	142,8155	31,1854
2	0,5038	0,5964	-14,7016	142,6749	28,9113
3	0,5076	0,6185	-15,2107	142,5417	26,6831
4	0,5114	0,6405	-15,7465	142,4160	24,5036
5	0,5152	0,6625	-16,3126	142,2977	22,3756
6	0,5190	0,6846	-16,9142	142,1870	20,3023
7	0,5228	0,7066	-17,5578	142,0839	18,2871
8	0,5266	0,7286	-18,2522	141,9883	16,3337
9	0,5304	0,7507	-19,0094	141,9004	14,4460
10	0,5342	0,7727	-19,8446	141,8201	12,6286
11	0,5380	0,7947	-20,7789	141,7476	10,8864
12	0,5418	0,8167	-21,8404	141,6829	9,2253
13	0,5456	0,8388	-23,0684	141,6260	7,6517
14	0,5494	0,8608	-24,5195	141,5770	6,1734
15	0,5532	0,8828	-26,2794	141,5360	4,7999
16	0,5570	0,9049	-28,4875	141,5029	3,5429
17	0,5608	0,9269	-31,3935	141,4778	2,4177
18	0,5646	0,9489	-35,5200	141,4603	1,4461
19	0,5646	0,9710	-42,3088	141,4503	0,6628
20	0,5722	0,9930	-60,2475	141,4467	0,1418

Như vậy: Khoảng $m \in [0,88; 0,993]$ tương ứng $K \in [0,553; 0,572]$ là chấp nhận được đối với máy lái tuyến tính sử dụng động cơ điện có độ trễ máy lái $\tau = 0,005$ s và tần số $f = 15$ Hz có $TDH\% < 5\%$ và sai số biên độ $|A1-1|\% \leq 5\%$, tổng sai lệch pha vẫn trong ngưỡng máy lái cho phép.

- Kết quả mô phỏng Hình 9: Máy lái rơ le/PWM có tín hiệu dạng xung vuông, biên độ bị giới hạn mạnh, THD rất cao ($TDH\% \approx -1,9$). Máy lái tuyến tính: Tín hiệu sin thuần, méo gần như bằng 0 ($TDH\% \approx -4,4$), chỉ có trễ pha của máy lái. Máy lái có tín hiệu sin giới hạn đầu vào (tín hiệu sin giới hạn đề xuất), tín hiệu gần sin nhưng cắt đỉnh nhẹ, THD thấp ($TDH\% \approx -4,2$) biên độ khuếch đại hiệu quả hơn. Vậy, giải pháp đề xuất tín hiệu đầu vào dạng sin giới hạn đạt cân bằng tốt giữa độ tuyến tính và khả năng khuếch đại lực điều khiển so với các công trình [3]-[7], [11]-[13].



Hình 9. Đồ thị tín hiệu lệnh điều khiển đầu vào và lực điều khiển đầu ra trong các trường hợp máy lái có độ trễ máy lái $\tau = 0,005$ s và quay quanh trục dọc $f = 15$ Hz.

5. Kết luận

Mặc dù mô hình phân tích chỉ tập trung vào lực pháp tuyến do cơ cấu lái tạo ra, các thành phần lực khác (lực cản, lực nâng, trọng lực) được coi là đầu vào của bộ điều khiển cấp cao, chúng được bù trừ để tạo ra lực pháp tuyến yêu cầu. Nhiệm vụ của giải pháp đề xuất là đảm bảo máy lái có khả năng sinh ra lực pháp tuyến yêu cầu một cách tối ưu và gần tuyến tính nhất. Trên cơ sở đó, chứng minh giải pháp nâng cao hệ số lệnh điều khiển cho mô hình máy lái tuyến tính. Cụ thể: Để nâng cao hệ số sử dụng lực điều khiển lên trên 0,5 tín hiệu điều khiển đầu vào cấp tới cơ cấu lái được định dạng dưới dạng hàm sin bị giới hạn biên độ. Các kết quả mô phỏng với máy lái tuyến tính sử dụng động cơ điện có độ trễ máy lái $\tau = 0,005$ s và tần số $f = 15$ Hz cho thấy: Hệ số sử dụng lực điều khiển K có thể đạt giá trị trong khoảng 0,553 đến 0,572 vượt trội so với các phương án điều khiển xung hình chữ nhật hoặc bão hòa cứng, đảm bảo méo phi tuyến nhỏ cho động cơ chấp hành chấp nhận và đáp ứng được; khi đó giá trị $m \in [0,88; 0,993]$. Các dẫn giải của bài báo là cơ sở để nghiên cứu tổng hợp hệ bám, thử nghiệm trên mô hình phần cứng thực và tích hợp vào thuật toán điều khiển thích nghi/phi tuyến, hệ thống tự động điều khiển bay TBBMK có máy lái tuyến tính.

Tài liệu tham khảo

- [1] N. Đ. Cương và T. Đ. Thuận, *Thiết bị bay có điều khiển và tên lửa hành trình đối hải*, Nxb Quân đội Nhân dân, 2015.
- [2] T. V. Dực, *Hệ thống xử lý tín hiệu tên lửa tự dẫn hồng ngoại*, Nxb Quân đội Nhân dân, 2003.
- [3] N. V. Sơn, “Về bài toán điều khiển thiết bị bay điều khiển một kênh”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 2007.
- [4] N. V. Nam, “Nghiên cứu tổng hợp hệ thống điều khiển thích nghi cho một lớp tên lửa tự dẫn hồng ngoại”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 2009.
- [5] P. V. Từ, “Xây dựng phương pháp và thuật toán điều khiển cho lớp TBB 1 kênh”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 2010.
- [6] Đ. V. Thúy, “Nghiên cứu nâng cao chất lượng hoạt động của đầu tự dẫn hồng ngoại cho thiết bị bay có điều khiển trên cơ sở hoàn thiện bộ định hướng và luật dẫn tiếp cận tỉ lệ tăng cường”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 2021.
- [7] T. H. Phương, “Về một giải pháp đo hệ số lệnh từ đài điều khiển khí cụ bay tầm gần ứng dụng vi mạch tích hợp”, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự*, Số Đặc san Hội thảo Quốc gia FEE, 12/2022.
- [8] F. Y. Annaz and M. M. Kaluarachchi, “Progress in redundant electromechanical actuators for aerospace applications”, *Aerospace*, Vol. 787, No. 10, 2023. DOI: 10.3390/aerospace10090787
- [9] R. Kowalski and P. Juchmann, “Sensorless motor control for electro-mechanical flight control actuators”, *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 14, pp. 1007-1018, 2023. DOI: 10.1007/s13272-023-00682-x
- [10] M. Maaruf *et al.*, “A survey of control methods for quadrotor UAV”, *International Journal of Robotics and Control Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 652-665, 2022. DOI: 10.31763/ijrcs.v2i4.743
- [11] А. А. Лебедев и В. А. Карабанов, *Динамика систем управления БПЛА*, Машиностроение, Москва, 1965.
- [12] М. Кот, Д. Н. Романенко, и А. С. Дубовик, *Военно-техническая, военно-специальная подготовка и тактика войсковой противовоздушной обороны подразделений, вооруженных ПЗРК 9К38 «ИГЛА»*. Гродно ГрГУ им. Я. Купал, Москва, 2012.
- [13] Г. Д. Викторович, Д. А. Алексеевич, и Е. А. Федорович, “Вращающаяся самонаводящаяся ракета”, Патент РФ No. 2018118707 от 22.05.2018.г

DEVELOPMENT OF A FORCE CONTROL SOLUTION FOR SINGLE-CHANNEL AERIAL VEHICLES WITH A LINEAR ACTUATOR

Abstract: *This paper presents the development of a mathematical foundation for synthesizing control commands and constructing the control force diagram for single-channel flying equipment (SCFV) equipped with linear actuators. A solution is proposed to enhance the control command gain for SCFV using linear actuators, along with a mathematical proof of its validity. The control force utilization coefficient can exceed 0.5 when the input control signal supplied to the actuator is shaped as a sinusoidal function with amplitude limitation. The research results extend existing domestic academic works and provide a foundational basis for the synthesis of autonomous flight control systems.*

Keywords: Single-channel flying equipment; control command; linear steering.

Nhận bài: 11/06/2025; Hoàn thiện: 19/09/2025; Chấp nhận đăng: 15/10/2025

