

Tổng hợp vòng ổn định góc trên thiết bị bay hai kênh trên âm

Nguyễn Văn Khôi^{1*}, Nguyễn Sỹ Long¹, Tô Bá Thành¹,
Nguyễn Ngọc Điền², Bùi Văn Thụ²

¹Viện Khoa học và Công nghệ quân sự (17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội);

²Học viện Kỹ thuật quân sự (234 Hoàng Quốc Việt, Cổ Nhuế 1, Bắc Từ Liêm, Hà Nội).

*Email: vankhoi2603@gmail.com

Nhận bài: 11/9/2023; Hoàn thiện: 08/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.29-34>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tổng hợp sơ đồ cấu trúc vòng ổn định góc và xác định các tham số bộ lọc hiệu chỉnh trên thiết bị bay (TBB) hai kênh trên âm. Trên cơ sở các tham số đặc trưng về hình học, khối lượng, quán tính và khí động của TBB hai kênh trên âm, nhóm tác giả tiến hành tuyến tính hóa và xác định cấu trúc vòng ổn định góc, từ đó, trên cơ sở phương pháp Solodovnikov (Солодовников) xác định các tham số của bộ lọc hiệu chỉnh theo các chỉ tiêu chất lượng cho trước. Kết quả mô phỏng trên cơ sở hệ thống đã xây dựng ứng với các dạng cơ động điển hình của mục tiêu khẳng định tính đúng đắn của phương pháp đề xuất.

Từ khoá: Vòng ổn định góc; Bộ lọc hiệu chỉnh; Phương pháp Solodovnikov.

1. MỞ ĐẦU

Tổng hợp vòng ổn định góc theo phương pháp Solodovnikov là bài toán tổng hợp cấu trúc vòng ổn định và xác định các tham số của bộ lọc hiệu chỉnh trong miền tần số theo các chỉ tiêu chất lượng cho trước (thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh, độ dự trữ ổn định về biên độ và pha). Ưu điểm của phương pháp này là có thể xác định trực tiếp cấu trúc và các tham số của bộ lọc hiệu chỉnh và khả năng hiện thực hóa về mặt kỹ thuật đáp ứng yêu cầu thời gian thực. Do đó, phương pháp này được sử dụng nhiều trong kỹ thuật thiết kế vòng ổn định góc trên TBB có tốc độ trên âm của Liên Xô và Liên bang Nga. Tuy nhiên, do tính chất bảo mật nên các kết quả nghiên cứu không được công bố, chỉ có tài liệu chuyên khảo trình bày cách xác định chung các tham số của bộ lọc hiệu chỉnh [1, 2].

TBB trên âm trong trang bị của quân đội ta phần lớn được chuyển giao từ Liên Xô và Liên bang Nga. Do đó, việc phân tích, bóc tách thiết kế làm cơ sở cho nhiệm vụ làm chủ, cải tiến nâng cao đặc tính chiến – kỹ thuật của vũ khí trang bị trong biên chế là nhiệm vụ cần thiết. Tuy nhiên, hiện chưa có công bố trong nước nghiên cứu phương pháp Solodovnikov tổng hợp vòng ổn định cho TBB bay trên âm.

Với đối tượng điều khiển là TBB hai kênh trên âm, bài báo tập trung làm rõ phương pháp tổng hợp cấu trúc và xác định các tham số của các thành phần trong vòng điều khiển theo Solodovnikov. Đồng thời, trên cơ sở cấu trúc và tham số vòng điều khiển thu được, tiến hành mô phỏng mô hình chuyển động sáu bậc tự do dẫn TBB hai kênh trên âm theo các dạng cơ động điển hình của mục tiêu trong vùng phóng để kiểm chứng kết quả tính toán các tham số vòng ổn định góc trên TBB hai kênh trên âm.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

2.1. Sơ đồ cấu trúc vòng ổn định

Hệ thống ổn định góc trên TBB trên âm thông thường gồm khối tự động lái, máy lái và TBB tạo thành vòng phản hồi kín. Khối tự động lái bao gồm khâu khuếch đại, khâu hiệu chỉnh và con quay phản hồi chuyển động quay của TBB quanh tâm khối.

Đối tượng là TBB điều khiển hai kênh (kênh chúc góc và kênh góc hướng), trên TBB bố trí các cánh rolleron sau cánh nâng để hãm chuyển động kênh góc xoắn. Do vòng ổn định góc trên

hai kênh điều khiển là tương đồng, do đó, bài báo chỉ trình bày phương pháp tổng hợp vòng ổn định cho kênh chức góc, kênh còn lại tương tự.

Yêu cầu đặt ra là cần xác định cấu trúc và các tham số của các thành phần để hệ thống ổn định góc TBB đạt được các chỉ tiêu chất lượng cho trước như thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh và độ dự trữ ổn định của hệ thống về biên độ và pha.

Đối với TBB trên âm, bộ lọc hiệu chỉnh trên vòng phản hồi ít phụ thuộc vào các thành phần của hệ thống ổn định góc và tác động nhiễu do bộ lọc hiệu chỉnh lúc này còn đóng vai trò là bộ lọc tần số thấp [3]. Do đó, cấu trúc vòng ổn định được xác định theo hình 1, trong đó:

Hàm truyền TBB sau khi tuyến tính hóa (W_s^g), hàm truyền bộ khuếch đại tín hiệu (W_{kd}), hàm truyền của máy lái (W_{ml}), hàm truyền cảm biến vận tốc góc (W_{cq}) được mô tả như sau [4]:

$$W_s^g(s) = \frac{\Delta \dot{\theta}}{\Delta \delta_B} = \frac{K(T_1 s + 1)}{p(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)} \quad (1)$$

$$W_{kd}(s) = \frac{K_{kd}}{T_{kd} s + 1} \quad (2)$$

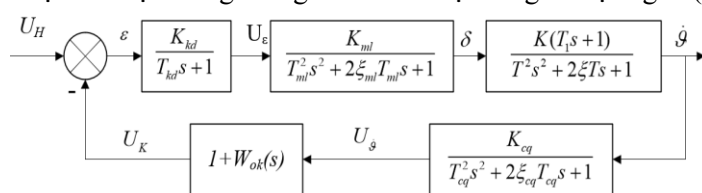
$$W_{ml}(s) = \frac{K_{ml}}{T_{ml}^2 s^2 + 2\xi_{ml} T_{ml} s + 1} \quad (3)$$

$$W_{cq}(s) = \frac{K_{cq}}{T_{cq}^2 s^2 + 2\xi_{cq} T_{cq} s + 1} \quad (4)$$

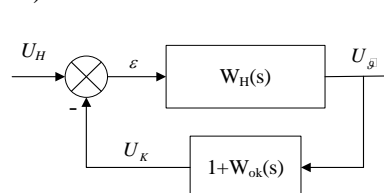
Trong đó: ξ_{ml} - Hệ số giảm chấn; K_{ml} - Hệ số khuếch đại; T_{ml} - Hằng số thời gian máy lái.

Trong đó: $\xi_{cq} = 0,6 \div 0,7$ - Hệ số giảm chấn; K_{cq} - Hệ số khuếch đại; T_{cq} - Hằng số thời gian con quay.

Như vậy, vòng ổn định TBB gồm hai phần: Phần không đổi bao gồm toàn bộ các thành phần cấu thành hệ thống ổn định trừ bộ lọc hiệu chỉnh, phần hiệu chỉnh là bộ lọc hiệu chỉnh mạch phản hồi (OK) với thành phần và cấu trúc cần được xác định trong quá trình tổng hợp để đạt được các đặc trưng mong muốn của hệ thống ổn định góc (hình 2).



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc vòng ổn định.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc vòng ổn định rút gọn.

2.2. Tổng hợp vòng ổn định góc

2.2.1. Dữ liệu đầu vào

- Các tham số động lực học TBB hai kênh trên âm kiểu R-60 ở giai đoạn bay hành trình như sau: $M = 1,87$; $P = 287$ N; $qS = 1495$ kgm²/s²; $m = 32,68$ kg; $I = 13,894$ kgm²; $C_y^\alpha = 27,96$ rad⁻¹; $C_y^\delta = 2,72$ rad⁻¹; $m_z^\alpha = -34,3$ rad⁻¹; $m_y^\alpha = 13,22$ rad⁻¹; $m_y^{\sigma_z} = -2472,8$.

Quá trình quá độ của tên lửa theo tín hiệu điều khiển lúc này được tính theo biểu thức sau:

$$W_s^g(p) = \frac{\Delta \dot{\theta}}{\Delta \delta_B} = \frac{K(T_1 s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1} = \frac{0.3795s + 0.816}{0.0022s^2 + 0.0129s + 1} \quad (5)$$

- Tham số khâu máy lái: $T_{ml} = 0,012$ s; $\xi_{ml} = 0,65$. Tham số khâu con quay: $T_{cq} = 0,005$ s; $\xi_{cq} = 0,65$. Tham số khâu khuếch đại: $T_{kd} = 0,0005$ s.

2.2.2. Xác định đặc trưng biên tần mong muốn

Để xác định đặc trưng mong muốn của hệ thống, sử dụng phương pháp theo đề xuất của tác giả Solodovnikov[1]. Khi đó, để đảm bảo quá độ điều chỉnh $\sigma = 30\%$, độ dự trữ ổn định và thời gian quá độ cần thỏa mãn các điều kiện sau (hình 3):

- Độ dự trữ ổn định về biên độ: $L \geq 16$ dB;
- Thời gian quá trình quá độ: $t_{qd} = (4,7 \cdot \pi) / \omega_{qd}$ (s).

Đối tượng nghiên cứu là TBB trên âm có thời gian bay nhỏ nhất tương ứng với bán cầu trước và tâm bắn nhỏ nhất (600 m) là khoảng 2 s, tức là $t_{min} = 2$ s. Để đảm bảo độ chính xác quá trình dẫn TBB, thời gian quá độ của hệ thống dẫn cần đảm bảo $t_{dan} \ll t_{min}$, còn thời gian quá độ của hệ thống ổn định cần đảm bảo t_{qd} nhỏ hơn nhiều so với thời gian quá độ của hệ thống dẫn.

Chọn $t_{dan} = 0,2t_{min}$; $t_{qd} = 0,3t_{dan}$ thu được:

$$t_{qd} = 0,12s; \omega_{qd} = \frac{4,7\pi}{t_{qd}} = 123,05(rad / s) . \quad (6)$$

Tần số cắt ω_c được xác định từ biểu thức:

$$\omega_c = (0,6 \div 0,9)\omega_{qd} = (73,83 \div 110,74)[s^{-1}] \quad (7)$$

Để đảm bảo độ dự trữ ổn định theo biên độ và pha mong muốn, theo phương pháp Solodovnikov đặc trưng biên tần mong muốn được xây dựng theo trình tự sau (hình 4):

- Đầu tiên, dựng hai đường song song với trục hoành ở phía trên và dưới sao cho khoảng cách của chúng so với trục hoành bằng độ dự trữ ổn định theo biên độ $L_1 = L_2 = L$; Đường phía dưới cắt đường đặc trưng biên tần phần không đổi ở điểm D.

- Qua giao điểm D, dựng đường thẳng song trái với góc lệch $+20$ dB/dec. Đường này cắt đường song song phía trên ở điểm C.

- Từ điểm C, dựng đường thẳng song trái với góc lệch từ $+40$ dB/dec trở lên. Đường này cắt đường đặc trưng biên tần phần không đổi ở điểm B.

Từ đồ thị hình 4 thu được biểu thức đặc trưng biên tần mong muốn:

$$W_m(s) = W_1(s) \cdot W_2^2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_4^4(s) \cdot W_5(s) \quad (8)$$

Trong đó:

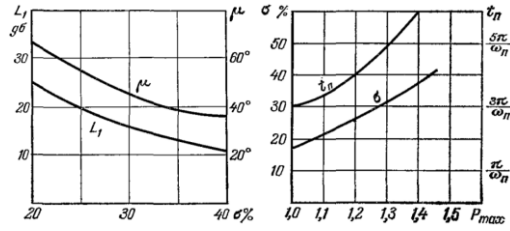
$$W_1(s) = \frac{T_1s + 1}{T_Bs + 1}; W_2(s) = \frac{T_Cs + 1}{T_Bs + 1}; W_3(s) = \frac{K_{CC}}{T_Bs + 1}; W_4(s) = \frac{1}{T_Ds + 1}; W_5(s) = \frac{1}{T_{us}s + 1} \quad (9)$$

Từ các đồ thị hình 5 và 6 nhận thấy:

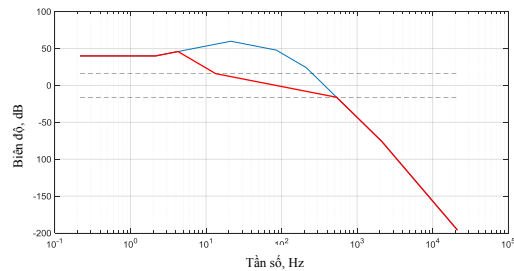
- Hệ mong muốn theo đặc trưng quá độ đáp ứng yêu cầu về độ quá điều chỉnh (30%), thời gian quá độ (0,102 s) và sai số xác lập (1%).

- Hệ mong muốn theo đặc trưng biên tần đáp ứng yêu cầu về độ dự trữ ổn định pha (45°), độ dự trữ ổn định về biên độ (10,1 dB).

Khi thiết kế hệ thống tự động điều khiển, giá trị độ dự trữ ổn định theo biên độ được lựa chọn sao cho $\Delta L \geq 6$ dB (sai lệch cho phép của hệ số khuếch đại hàm truyền dạng hở lớn gấp hai lần), độ dự trữ ổn định theo pha $\Delta\phi \geq 30^\circ$, và trong trường hợp có thể: $\Delta\phi \geq 45^\circ$ [3]. Do đó, hệ mong

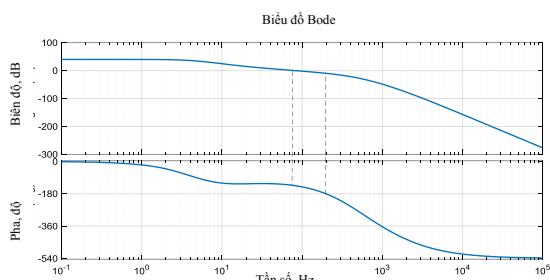


Hình 3. Đồ thị phụ thuộc độ dự trữ ổn định và thời gian quá độ vào độ quá chỉnh.

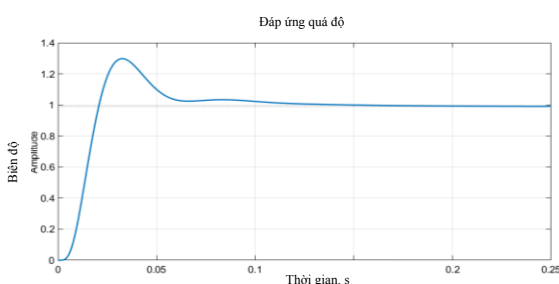


Hình 4. Đặc trưng biên tần mong muốn theo phương pháp Solodovnikov.

muốn thỏa mãn yêu cầu.



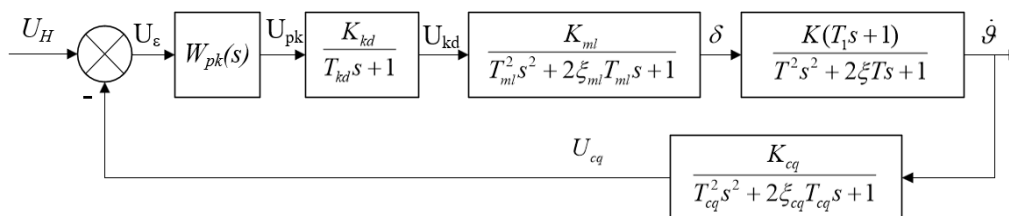
Hình 5. Biểu đồ Bode.



Hình 6. Đồ thị quá độ hệ kín mong muốn.

2.2.3. Tổng hợp bộ lọc hiệu chỉnh vòng ổn định góc

Để xác định cấu trúc và thành phần bộ lọc hiệu chỉnh trên mạch phản hồi $W_{ok}(s)$, đầu tiên cần tổng hợp cấu trúc và thành phần bộ lọc hiệu chỉnh trên mạch chính $W_{pk}(s)$.



Hình 7. Sơ đồ cấu trúc hệ thống ổn định với bộ lọc hiệu chỉnh nối tiếp.

Từ sơ đồ cấu trúc hệ thống ổn định thu được hàm truyền ở trạng thái hở sau:

$$W_m(s) = W_H(s) \cdot W_{pk}(s) \tag{10}$$

$$\Rightarrow L_{pk}(s) = L_m(s) - L_H(s) \tag{11}$$

Từ (11) thu được biểu thức hàm truyền của bộ lọc hiệu chỉnh có dạng sau:

$$W_{pk}(s) = W_1^2(s)W_2^2(s)W_3^2(s)W_4^2(s) \tag{12}$$

$$\text{Trong đó, } W_1(s) = \frac{T_C s + 1}{T_B s + 1}; W_2(s) = \frac{T s + 1}{T_B s + 1}; W_3(s) = \frac{T_{mi} s + 1}{T_D s + 1}; W_4(s) = \frac{T_{cq} s + 1}{T_D s + 1} \tag{13}$$

Giả sử khi đặt bộ lọc hiệu chỉnh trên mạch phản hồi thu được đặc trưng biên độ mong muốn $W_m(s)$. Khi đó, dễ dàng nhận thấy:

$$W_m(s) = W_H(s) W_{pk}(s) = \frac{W_H(s)}{1 + W_H(s) W_{ok}(s)} \Rightarrow W_{pk}(s) = \frac{1}{1 + W_H(s) W_{ok}(s)} \tag{14}$$

$$\text{Từ đó ta có, } W_H(s) W_{ok}(s) = \frac{1 - W_{pk}(s)}{W_{pk}(s)} \tag{15}$$

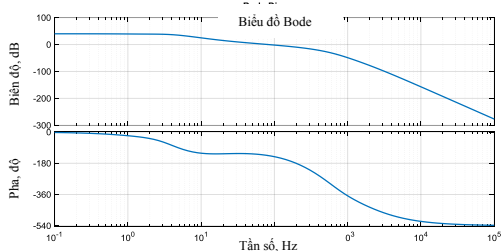
Hàm truyền của bộ lọc hiệu chỉnh trên mạch phản hồi được xác định theo biểu thức sau.

$$W_{ok}(s) = \frac{1 - W_{pk}(s)}{W_m(s)} = \frac{W_{bk}(s)}{W_m(s)} \tag{16}$$

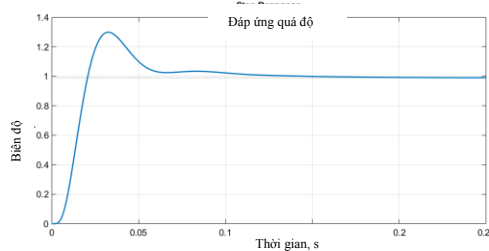
Đặt bộ lọc hiệu chỉnh vào mạch phản hồi của vòng ổn định góc và tiến hành khảo sát hệ thống ổn định góc. Kết quả thu được đặc trưng tần số (hình 8) và đồ thị quá trình quá độ (hình 9) của hệ thống ổn định góc với cấu trúc bộ lọc hiệu chỉnh trên mạch phản hồi.

- Độ dự trữ ổn định về biên độ: $L = 9,6 \text{ dB}$;
- Độ dự trữ ổn định về pha: $\psi = 45^\circ$;
- Độ quá điều chỉnh $\sigma = 29,8\%$;

- Thời gian xác lập $t_{x1} = 0,103$ s.



Hình 8. Đặc trưng tần số của hệ thống ổn định với bộ lọc mạch phản hồi.



Hình 9. Đồ thị quá độ hệ thống ổn định góc với bộ lọc mạch phản hồi.

3. MÔ PHỎNG, THẢO LUẬN

3.1. Kịch bản mô phỏng với TBB hai kênh trên âm có cấu trúc vòng ổn định đã xây dựng

TH1: Bắn mục tiêu chuyển động đều trong mặt phẳng ngang với vận tốc lớn ($V = 550$ m/s);

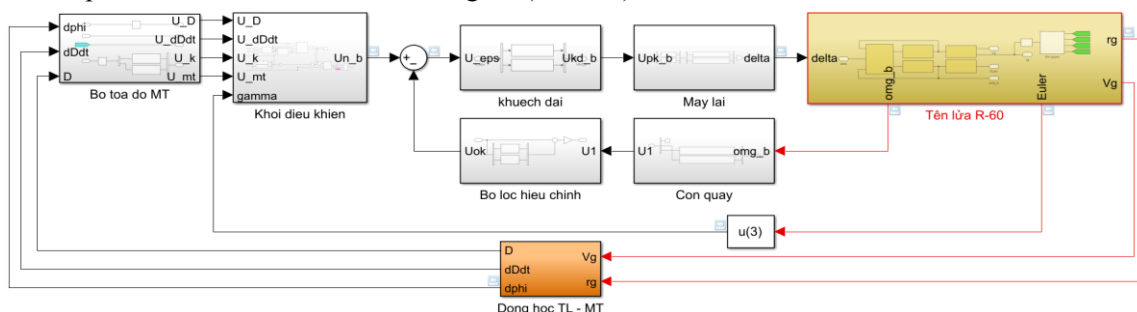
TH2: Bắn mục tiêu cơ động trong một mặt phẳng với vận tốc lớn ($V = 550$ m/s) và quá tải lớn ($n_{y_{mt}} = 8$ g);

TH3: Bắn mục tiêu cơ động kiểu “rắn bò” với quá tải lớn $n_{z_{mt}} = 8$ g và chu kỳ cơ động $T_{cd} = 3$ s;

TH4: Bắn mục tiêu cơ động kiểu “xoắn ốc không gian” với quá tải lớn ($n_{y_{mt}} = 8$ g; $n_{z_{mt}} = 8$ g) và chu kỳ cơ động $T_{cd} = 3$ s;

3.2. Phương pháp, công cụ mô phỏng

Sử dụng phần mềm Matlab/Simulink 2022b để xây dựng chương trình mô phỏng chuyển động sáu bậc tự do của TBB hai kênh trên âm, ba bậc tự do của mục tiêu, bộ tọa độ mục tiêu, khối lập lệnh điều khiển và khối tự động lái (hình 10).



Hình 10. Sơ đồ khối chương trình mô phỏng.

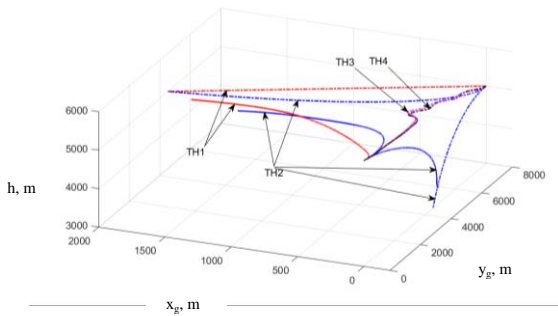
3.3. Kết quả mô phỏng và bình luận

Từ các kết quả mô phỏng nhận thấy:

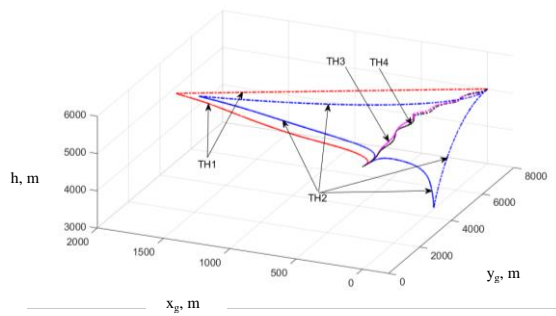
- Sử dụng phương pháp Solodovnikov có thể tổng hợp trực tiếp cấu trúc và tham số của vòng ổn định góc trên TBB theo các chỉ tiêu chất lượng cho trước về dạng quá trình quá độ (t_{x1} , σ) và độ dự trữ ổn định của hệ thống theo biên độ và pha (L , ψ).

- Quỹ đạo TBB khi không sử dụng khâu hiệu chỉnh không đảm bảo dẫn TBB đến mục tiêu (hình 11) trong điều kiện mục tiêu cơ động mạnh. Khi đặt bộ lọc đã xây dựng vào vòng ổn định góc, hệ thống điều khiển trên khoang đảm bảo dẫn TBB đến mục tiêu với độ chính xác cho trước (< 5 m) trong tất cả các kịch bản mô phỏng (hình 12). Các kết quả mô phỏng này phù hợp với đặc tính chiến – kỹ thuật của TBB R-60.

- Các kết quả tính toán là cơ sở cho nhiệm vụ phân tích, bóc tách thiết kế, từ đó, tiến tới làm chủ, cải tiến nâng cao đặc tính chiến – kỹ thuật của vũ khí trang bị trong biên chế.



Hình 11. Quỹ đạo dẫn TBB đến mục tiêu không sử dụng bộ lọc hiệu chỉnh.



Hình 12. Quỹ đạo dẫn TBB đến mục tiêu sử dụng bộ lọc hiệu chỉnh.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở phương pháp Solodovnikov, nhóm tác giả đã tiến hành tổng hợp cấu trúc và xác định các tham số vòng ổn định góc trên TBB hai kênh trên âm. Cấu trúc và tham số của bộ lọc hiệu chỉnh đã được kiểm chứng bằng chương trình mô phỏng theo các điều kiện chiến – kỹ thuật của TBB R-60.

Phương pháp tổng hợp cấu trúc vòng ổn định góc trên được sử dụng nhiều nhiệm vụ kỹ thuật thiết kế hệ thống ổn định trên đối tượng TBB trên âm do ưu điểm có thể xác định trực tiếp các tham số hệ thống từ các chỉ tiêu chất lượng mong muốn.

Ngày nay, với sự phát triển của khoa học công nghệ cho phép thay đổi linh hoạt các tham số của vòng ổn định góc theo các tham số động lực học của TBB. Do đó, để nâng cao chất lượng vòng ổn định, cần sử dụng bộ lọc hiệu chỉnh với cấu trúc và các tham số thích nghi theo tham số mô hình vòng điều khiển. Vấn đề này sẽ được trình bày trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Солодовников В.В.б Плотников В.Н., Яковлев А.В., “Теория автоматического управления техническими системами,” Изд-во МГТУ, 492с, (1993).
- [2]. Пупков К.А., Егупов Н.Д., “Методы классической и современной теории автоматического управления: Том 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления,” Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 616с, (2004).
- [3]. Лебедев А.А., “Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами,” М., “Машиностроение”, 528с, (1965).
- [4]. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С., “Динамика полета беспилотных летательных аппаратов,” М., “Машиностроение”, 616с, (1973).

ABSTRACT

Synthesis of angular stability loop on two-channel aircraft equipment in supersonic conditions

This paper presents a methodology for synthesizing the angular stability loop structure and determining the parameters of the fine-tuning filter on two-channel aircraft equipment in supersonic conditions. Based on distinctive parameters related to the geometry, mass, inertia, and aerodynamics of two-channel aircraft equipment in supersonic conditions, the authoring group conducted linearization and identified the structure of the angular stability loop. Subsequently, based on the Solodovnikov method, the parameters of the fine-tuning filter are determined according to predefined quality criteria. The simulation results, based on the constructed stability system, correspond to typical maneuvers of the target that affirm the accuracy of the proposed method.

Keywords: Angular stability loop; Fine-tuning filter; Solodovnikov method.