

Tổng hợp bộ lọc đồng bộ cho hệ thống bám sát mục tiêu của thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại

Trần Đức Anh, Trần Hữu Phương*, Vũ Anh Hiền, Hà Kiên Trung

Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: tranhuuphuong83@gmail.com

Nhận bài: 07/9/2024; Hoàn thiện: 08/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.79-84>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các nghiên cứu trong lĩnh vực xử lý tín hiệu của hệ thống bám sát mục tiêu trên thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại. Bài báo tiến hành phân tích lý thuyết, xây dựng sơ đồ cấu trúc và mô tả nguyên lý hoạt động của bộ lọc đồng bộ trong miền tần số thấp và miền tần số cao, đưa ra mô hình toán học thực hiện tổng hợp bộ lọc này. Các kết quả mô phỏng, được thực hiện trong môi trường Matlab/Simulink và Altium là cơ sở thiết kế mạch điện của bộ lọc đồng bộ phục vụ thiết kế bảng mạch hiệu chỉnh bám sát trong cơ cấu phóng mặt đất của thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại.

Từ khóa: Lọc đồng bộ; Thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại; Xử lý tín hiệu.

1. MỞ ĐẦU

Trong khối điện tử cơ cấu phóng mặt đất của thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại, bộ lọc đồng bộ nằm trong thành phần tuyến tạo tín hiệu dẫn Увод chế độ "I" (tín hiệu bám sát mục tiêu) có chức năng lọc lấy phần tín hiệu hình sin 100 Hz từ tín hiệu hiệu chỉnh CK [1, 2]. Tín hiệu dẫn Увод sẽ được cấp lên thiết bị bay để đất con quay đầu tự dẫn lệch khỏi hướng đang bám sát. Nếu tuyến bám sát của con quay chế áp được tín hiệu dẫn Увод được thì các bộ ngưỡng sẽ bắt đầu đánh giá các điều kiện phóng được cho thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại.

Khi giải quyết bài toán tách (lọc) tín hiệu bám sát có chu kỳ biết trước ra khỏi tổ hợp tín hiệu và nhiễu, một trong những giải pháp tối ưu là ứng dụng bộ lọc đồng bộ (Synchronous Filter). Bộ lọc này hoạt động dựa trên nguyên lý đồng bộ hóa tín hiệu vào với một tín hiệu tham chiếu (Reference Signal), giúp lọc ra các thành phần tín hiệu có cùng tần số và pha với tín hiệu tham chiếu, đồng thời loại bỏ các thành phần không mong muốn. Nguyên lý lọc đồng bộ được xây dựng bởi V.P. Tepin [3], D. Frey [4] và một số tác giả khác [5, 6]. Trên cơ sở nghiên cứu một nguyên mẫu bộ lọc đồng bộ trên khối điện tử của cơ cấu phóng mặt đất [2], nhóm tác giả đã tiến hành thiết kế "ngược" để xác định thuật toán xử lý lọc tín hiệu. Từ đó làm chủ thiết kế, chế tạo mẫu bộ lọc đồng bộ tương đương. Bài báo này trình bày tóm tắt cơ sở lý thuyết, phân tích nguyên lý, xây dựng mô hình và mô phỏng một bộ lọc đồng bộ trong hệ thống bám sát mục tiêu của cơ cấu phóng mặt đất và một số kết quả thiết kế mạch điện thực tế đã đạt được.

2. TỔNG QUAN VỀ LỌC ĐỒNG BỘ

2.1. Nguyên lý hoạt động của bộ lọc đồng bộ

Bộ lọc đồng bộ sử dụng một tín hiệu tham chiếu với tần số và pha nhất định để đồng bộ với tín hiệu đầu vào. Chỉ những tín hiệu có cùng tần số và pha với tín hiệu tham chiếu sẽ được lọc và giữ lại, trong khi các tín hiệu khác sẽ bị loại bỏ. Bộ lọc đồng bộ có nguồn gốc từ bộ lọc N-kênh [7]. Các bộ lọc đồng bộ loại này hoạt động trong dải tần số rộng và có hệ số phẩm chất Q cao hơn và ổn định hơn so với bộ lọc LC hoặc bộ lọc RC tích cực, bộ lọc thạch anh. Tần số cộng hưởng của bộ lọc đồng bộ có thể dễ dàng thay đổi trong một phạm vi dải rộng [4].

Sau đây, ta sẽ khảo sát nguyên lý xây dựng một bộ lọc đồng bộ. Hình 1.a thể hiện sơ đồ một bộ lọc đồng bộ các tụ điện C_1, C_2, \dots, C_n nối với các khóa K_1, K_2, \dots, K_n . Mỗi tụ điện được kết

nối với điện trở tích phân R trong khoảng thời gian Δt tương ứng với xung chuyển mạch đồng bộ tần số f_k để điều khiển mở khóa K_1, K_2, \dots, K_n . Điều kiện tiên quyết để bộ lọc đồng bộ hoạt động chính xác là tín hiệu đồng bộ có tần số đóng mở f_k của các khóa K_1, K_2, \dots, K_n bằng n lần tần số trung tâm của tín hiệu tham chiếu f_0 , tức là:

$$f_0 = \frac{f_k}{n} \quad (1)$$

Giả thiết điện dung của các tụ điện bằng nhau $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$; chu kỳ của các xung điều khiển bằng nhau $f_1 = f_2 = \dots = f_k$. Trong đó: n là số tụ của mạch lọc; f_k là tần số lặp lại của xung đồng bộ.

Khi cấp tín hiệu điều hòa dạng hình sin tần số thấp đến đầu vào bộ lọc, tại một thời điểm bất kỳ chỉ có một tụ điện được kết nối với dây chung nên tín hiệu đầu ra của bộ lọc chính là điện áp trên tụ điện này (hình 1.b). Trong trường hợp tín hiệu vào bộ lọc có kèm theo nhiễu tần số cao thì nhiễu này sẽ bị chế áp do sự lệch pha của xung nhiễu với xung đồng bộ đóng mở khóa K . Từ đó cải thiện hệ số tín/tạp của bộ lọc. Dựa trên cơ sở này, có thể thu được đáp ứng biên độ tần số của bộ lọc được thể hiện trên hình 1.c. Đáp ứng biên độ theo tần số của bộ lọc đồng bộ tại tần số thấp giống như đáp ứng của bộ lọc thông thấp RC bậc nhất nhưng với hằng số thời gian lớn hơn ($\tau = nRC$) và dải thông hẹp hơn.

Dải thông của bộ lọc đồng bộ được tính theo công thức [3]:

$$\Delta f = \frac{1}{\pi nRC} \quad (2)$$

Hàm truyền đạt của bộ lọc đồng bộ được tính theo công thức:

$$K(\omega T) = \frac{1 - \beta}{1 - \beta e^{-j\omega T_k}} \quad (3)$$

Trong đó: $\beta = e^{-\frac{\Delta t}{RC}}$ là hệ số trọng lượng; ω là tần số góc của tín hiệu đầu vào; $T_k = \frac{1}{f_k}$ là chu kỳ của tín hiệu đồng bộ. Viết lại (3) dưới dạng:

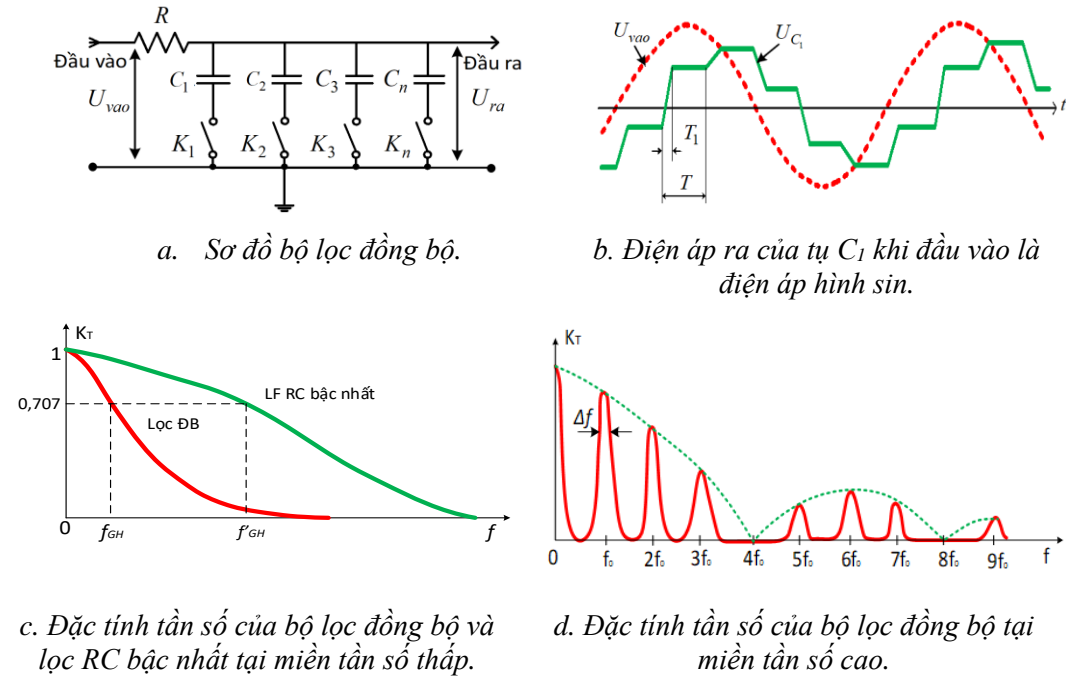
$$K(\omega T) = \frac{1 - \beta}{1 - \beta(\cos \omega T_k + j \sin \omega T_k)} \quad (4)$$

Từ (4), nhận thấy rằng hệ số khuếch đại $K(\omega T)$ sẽ đạt cực đại tại miền tần số cao là bội của tần số trung tâm f_0 của tín hiệu tham chiếu, tức là:

$$\omega_{\max} = \frac{2m\pi}{\omega_0}; \text{ với } m = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Tại các tần số cao không phải là bội của tần số trung tâm f_0 thì hệ số khuếch đại $K(\omega T) \approx 0$. Do hình dạng đặc trưng của đặc tính tần số của bộ lọc đồng bộ tại miền tần số có dạng "răng lược" như trong hình 1.d và được sử dụng để cô lập hoặc chế áp nhiễu của tín hiệu tuần hoàn. Hệ số phẩm chất của bộ lọc đồng bộ ở tần số trung tâm f_0 được tính theo công thức:

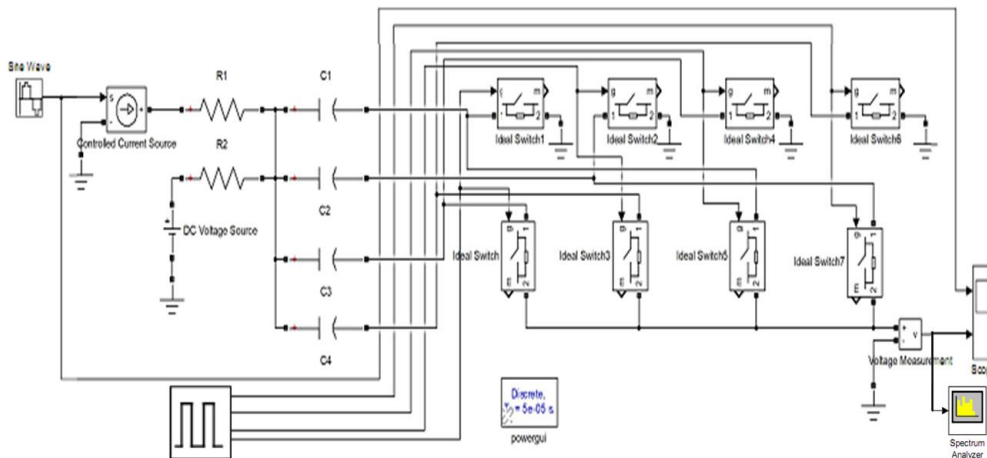
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \pi nRCf_0 \quad (6)$$



Hình 1. Sơ đồ bộ lọc đồng bộ.

2.2. Xây dựng mô hình bộ lọc đồng bộ và mô phỏng

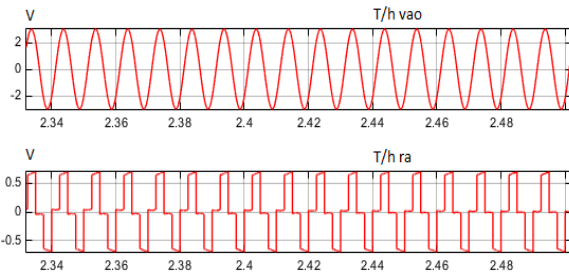
Trên cơ sở phân tích lý thuyết và khảo sát thực tế, nhóm tác giả đã thực hiện xây dựng mô hình mô phỏng bộ lọc đồng bộ trên môi trường Matlab/Simulink như mô tả trong hình 2. Bộ lọc đồng bộ được xây dựng với tín hiệu tham chiếu có tần số mong muốn $f_0 = 100 \text{ Hz}$. Bộ lọc được xây dựng trên các phần tử $R_1, C_1, C_2, C_3, C_4 (n=4)$; các khóa chuyển mạch lý tưởng (Ideal switch) với 4 nhánh song song tạo thành bộ đếm vòng; 4 tín hiệu đồng bộ hóa có tần số $f_c = 400 \text{ Hz}$ lệch pha 90° . Các thư viện được sử dụng để xây dựng mô hình mô phỏng bộ lọc đồng bộ là DSP System Toolbox, Simscape, Simulink.



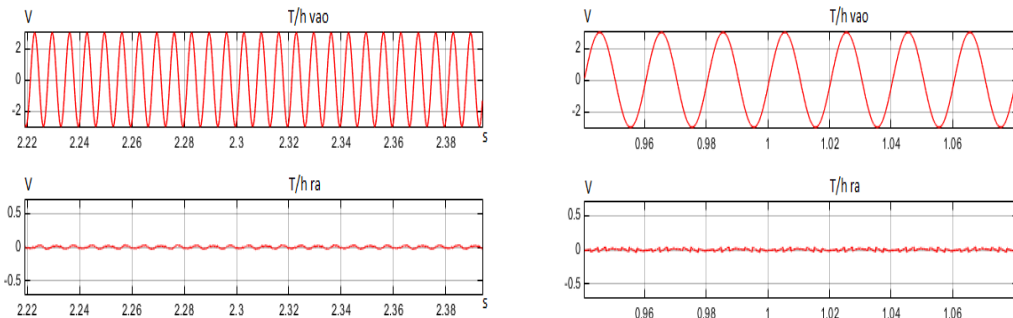
Hình 2. Mô hình Matlab/Simulink của bộ lọc đồng bộ.

Để khảo sát khả năng chế áp của bộ lọc đồng bộ với các tần số xung quanh 100 Hz , nhóm tác giả tiến hành khảo sát phản ứng của bộ lọc khi tín hiệu vào có tần số lần lượt $\sin 50 \text{ Hz}$; $\sin 100 \text{ Hz}$ và $\sin 150 \text{ Hz}$ và tiến hành phân tích phổ với dải tần số đầu vào đến $1,0 \text{ kHz}$. Kết quả mô

phông được thể hiện trên hình 3 và hình 4.



a. Dạng sóng vào/ra khi tín hiệu đầu vào dạng hình sin 100 Hz.

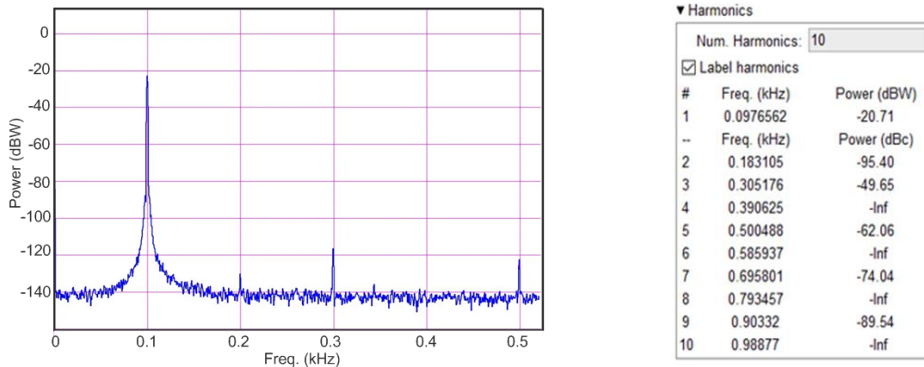


b. Dạng sóng vào/ra khi tín hiệu đầu vào dạng hình sin 150 Hz.

c. Dạng sóng vào/ra khi tín hiệu đầu vào dạng hình sin 50 Hz.

Hình 3. Dạng tín hiệu đầu vào và tín hiệu đầu ra của bộ lọc đồng bộ.

Khảo sát trong miền tần số, ta thu được đặc tuyến phổ tín hiệu đầu ra của bộ lọc đồng bộ như trong hình 4.



a. Phổ tín hiệu đầu ra bộ lọc.

b. Độ lợi của tín hiệu đầu ra.

Hình 4. Phân tích phổ của tín hiệu đầu ra bộ lọc đồng bộ.

Khi khảo sát các hài lân cận tần số $f_0 = 100 \text{ Hz}$ trong hình 4.a, và bảng tham chiếu độ lợi của bộ lọc ở hình 4.b, ta thấy các hài lân cận tần số trung tâm $f_0 = 100 \text{ Hz}$ đều bị chế áp mạnh. Với bộ lọc đồng bộ có cấu trúc và tham số đã mô phỏng (hình 3), ta có thể lọc được tín hiệu tham chiếu hình sin 100 Hz có độ tin cậy cao với dải thông hẹp.

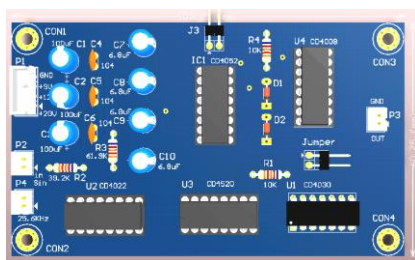
Nhận xét:

- Bằng cách chọn n , R và giá trị điện dung C , có thể thu được hệ số phẩm chất Q mong muốn. Trong các mạch thực tế, số n tụ điện chuyển mạch thường được chọn từ 3 tới 5.

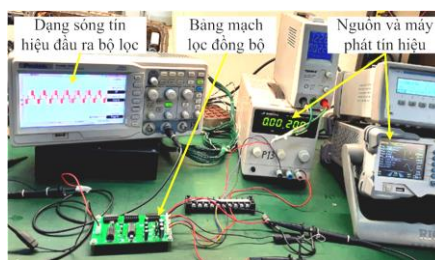
- Bộ tạo xung chuyển mạch được thực hiện nhờ bộ đếm vòng (thanh ghi dịch có phản hồi) hoặc bộ đếm nhị phân với bộ giải mã.

- Bằng cách thay đổi tần số của các xung chuyển mạch, ta có thể thay đổi tần số cộng hưởng của bộ lọc và giữ băng thông cố định không đổi. Bằng cách thay đổi điện trở của điện trở R hoặc điện dung C của tụ điện chuyển mạch, ta có thể thay đổi dải thông trong khi tần số cộng hưởng không đổi.

3. THỬ NGHIỆM, ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG MẠCH LỌC ĐỒNG BỘ



a. Mạch lọc đồng bộ trên Altium.

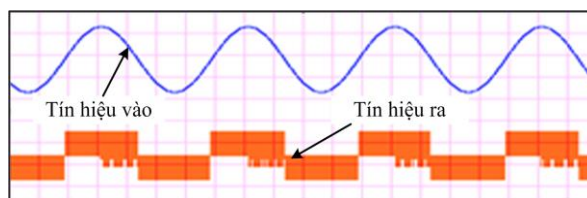


b. Thử nghiệm mạch lọc đồng bộ.

Hình 5. Thiết kế và thử nghiệm mạch lọc đồng bộ.

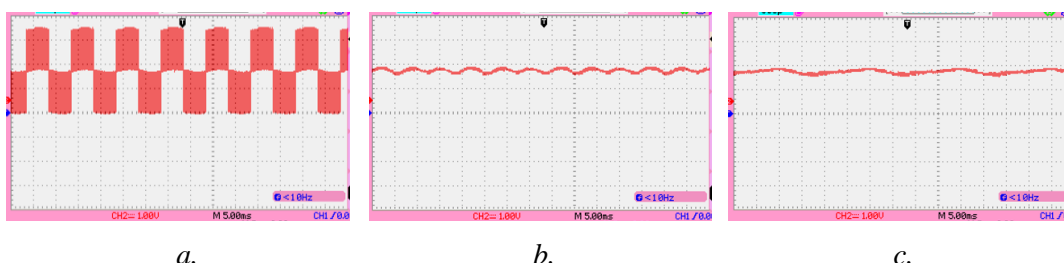
Trên cơ sở phân tích và khảo sát bộ lọc đồng bộ thông qua các mô hình Matlab/Simulink và kết hợp với nghiên cứu khảo sát nguyên mẫu bộ lọc đồng bộ trên bảng mạch tín hiệu hiệu chỉnh CK thể hệ cũ của liên bang Nga sử dụng linh kiện thụ động bóng bán dẫn transistor [2], nhóm tác giả đã tiến hành thiết kế ngược, chế tạo bảng mạch điện chức năng của bộ lọc đồng bộ sử dụng các vi mạch thuật toán trên phần mềm thiết kế mạch Altium (hình 5.a).

Dạng sóng tín hiệu vào-ra của bộ lọc đồng bộ sử dụng linh kiện thụ động bóng bán dẫn transistor thể hệ cũ [2] với tín hiệu tham chiếu có tần số $f_0 = 100 \text{ Hz}$ được mô tả trên hình 6. Tín hiệu đầu ra của bộ lọc có tần số trung tâm là 100 Hz với dải thông đo được đạt $1 \pm 0,35 \text{ Hz}$.



Hình 6. Dạng sóng tín hiệu vào- ra của bộ lọc đồng bộ thể hệ cũ.

Quá trình triển khai thử nghiệm, đánh giá khả năng làm việc của bảng mạch lọc đồng bộ thể hệ mới sử dụng vi mạch thuật toán thể hiện trong hình 5.b. Kết quả thử nghiệm các dạng sóng Oxylo tín hiệu tại đầu ra của mạch lọc đồng bộ này được thể hiện trong hình 7.



Hình 7. Tín hiệu đầu ra bộ lọc đồng bộ khi: a. Tín hiệu vào dạng hình sin 100 Hz; b. Tín hiệu vào dạng hình sin 150 Hz; c. Tín hiệu vào dạng hình sin 50 Hz.

Nhận xét: Kết quả đo đạc và dạng sóng thực tế trên Oxylo của tín hiệu đầu ra mạch lọc đồng bộ trong hình 7 cho thấy kết quả tương tự với kết quả mô phỏng. Tín hiệu đầu ra của bộ lọc đồng bộ này có tần số trung tâm là 100 Hz , dải thông đo được trên thực tế đạt $1\pm 0,02\text{ Hz}$. Khi tín hiệu đầu vào là hình sin 100 Hz thì biên độ tín hiệu đầu ra của bộ lọc là lớn nhất. Khi tín hiệu đầu vào dạng sin 150 Hz hoặc sin 50 Hz thì biên độ tín hiệu đầu ra của bộ lọc có độ suy giảm lớn. Điều này thể hiện khả năng chế áp của bộ lọc với dải tần số ngoài dải thông được thiết kế và phù hợp với kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink.

Kết quả so sánh dải thông của hai bộ lọc đồng bộ ở tần số trung tâm $f_0 = 100\text{ Hz}$ (hình 6 và hình 7.a) cho thấy rằng bộ lọc đồng bộ sử dụng vi mạch thuật toán thể hệ mới cho chất lượng lọc tốt hơn với dải thông hẹp hơn và lọc nhiễu cao tần tốt hơn so với bộ lọc đồng bộ thể hệ cũ.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tiến hành phân tích lý thuyết, sơ đồ cấu trúc và mô tả nguyên lý hoạt động của bộ lọc đồng bộ trong tuyến bám sát mục tiêu của thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại. Các kết quả mô phỏng và thử nghiệm thực tế khẳng định bộ lọc đồng bộ thể hệ mới đáp ứng được yêu cầu và mang nhiều đặc điểm ưu việt hơn. Số lượng linh kiện thụ động ít hơn từ đó giảm được sai số do linh kiện gây ra, việc tinh chỉnh đỡ tốn kém thời gian đồng thời có thể thay đổi tần số trung tâm một cách linh hoạt. Qua nghiên cứu này, nhóm tác giả đã làm chủ được thiết kế, chủ động linh kiện vật tư thay thế để sửa chữa khôi phục, thay thế mới cơ cấu phóng mặt đất của thiết bị bay tự dẫn hồng ngoại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tô Văn Dục, “Hệ thống xử lý tín hiệu tên lửa tự dẫn hồng ngoại”, NXB Quân đội Nhân dân, (2003).
- [2]. *Техническая документация на изделие 9П516*, Технические условия, Часть 1, 9П516.00.000 ТУ.
- [3]. Тепин В.П., Христич В.В., “Принципы построения синхронных фильтров”, Избирательные системы с обратной связью. Межвузовский сборник. Таганрог. Вып. 4. С. 131-141, (1978).
- [4]. Frey Douglas, "Synchronous filtering." IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 53.8, pp. 1772-1782, (2006).
- [5]. Braun S., "The synchronous (time domain) average revisited." Mechanical Systems and Signal Processing 25.4: 1087-1102, (2011).
- [6]. Гузов Е.С., Слепцов П.Н., "Синхронные детекторы." Актуальные проблемы энергетики. С. 411-418, (2023).

ABSTRACT

Synthesis of synchronous filter for target tracking system of the self-guided infrared flying vehicle

This article deals with research in the field of noise-based signal processing for target tracking systems of the self-guided infrared flying vehicle. The article conducts theoretical analysis, builds block diagrams, structural diagrams and describes the operating principle of the synchronous filter in low and high input frequency, and proposes a mathematical model of this filter. The simulation results, carried out in Matlab/Simulink and Atium environments, are the basis for designing the synchronous filter electrical circuit of the correction circuit board attached to the launch mechanism of the self-guided infrared flying vehicle.

Keywords: Synchronous filter; Self-guided infrared flying vehicle; Signal Processing.