e-ISSN: 3093 – 3145
Tạp chí Khoa học và Công nghệ Y khoa, 2026, 05, 016-020

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN NỀN TẢNG ĐƯỢC ỔN ĐỊNH BẰNG CON QUAY HỒI CHUYỂN VÀ THUẬT TOÁN XỬ LÝ TÍN HIỆU SỐ TRONG CẢM BIẾN QUÁN TÍNH

Nguyễn Sỹ Hồng Đức[1], Denisenko K. D.[2], Nguyễn Tiến Dũng[3*]
[1]*Đại học Bách khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Phường Bạch Mai, thành phố Hà Nội, Việt Nam*
[2]*Đại học kỹ thuật Quốc gia Moskva Bauman, số 5/1 đường Baumanskaya số 2, Moskva 105005, Liên bang Nga*
[3]*Trường Đại học Lương Thế Vinh. Số 9 Đường Cầu Đông, Phường Nam Định, tỉnh Ninh Bình, Việt Nam*
* Tác giả liên hệ: nguyentiendung@ltvu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO
Ngày nhận: 20/06/2026
Ngày hoàn thiện: 29/06/2026
Ngày chấp nhận: 17/07/2026
Ngày đăng: 31/07/2026
TỪ KHÓA
Module đo lường quán tính,
Con quay hồi chuyển ba bậc,
Gia tốc kế ba trục,
Từ kế ba trục,
Sai số bình phương trung bình RMSE.

TÓM TẮT
Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phát triển một loại nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển ba trục để có thể tích hợp các thiết bị đo lường và được sử dụng trên đối tượng di chuyển. Một mô hình vật lý của nền tảng được thiết lập bằng cách sử dụng: một hệ treo gimbal; một module đo lường quán tính BMX055; các truyền động servo; và bộ mã hóa từ tính. Trong quá trình di chuyển của đối tượng, nền tảng sẽ chịu tác động của lắc dọc; rung động của động cơ; va chạm vật cản; gia tốc tịnh tiến và ảnh hưởng của các tác động này lên nền tảng được phân tích. Trước khi thử nghiệm thực tế, một thuật toán cơ sở để xử lý các phép đo lường dựa trên mô phỏng MATLAB được đề xuất. Việc tích hợp các tín hiệu của: con quay; bộ lọc bổ sung; bộ lọc mahoney; và bộ lọc Kalman mở rộng, được nghiên cứu.

RESEARCH DEVELOPING A PLATFORM STABILIZED BY GYROSCOPES AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS IN INERTIAL SENSORS

Sy Hong Duc Nguyen[1], Denisenko K. D.[2], Tien Dung Nguyen[3*]
[1]*Hanoi University of Science and Technology, No. 1 Dai Co Viet Street, Bach Mai Ward, Hanoi, Vietnam*
[2]*Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya St., 5/1, Moscow 105005, Russian Federation*
[3]*Luong The Vinh University, 9 Cau Dong Street, Nam Dinh Ward, Ninh Binh Province, Viet Nam*
*Corresponding Author: nguyentiendung@ltvu.edu.vn

ARTICLE INFO
Received: Jun 20, 2026
Revised: Jun 29, 2026
Accepted: Jul 17, 2026
Published: Jul 31, 2026
KEYWORDS
Inertial measurement module,
Three-axis gyroscope,
Three-axis accelerometer,
Three-axis magnetometer,
Mean square error RMSE.

ABSTRACT
This paper presents the results of research on the development of diagnostic methods and the integration of these methods into a combined approach for diagnosing the reliability of asynchronous electric drive systems. The reliability indicators of asynchronous electric drive systems are calculated and verified in practice. Characteristic faults of electric motors, inverters, and mechanical drive elements are considered and developed. Diagnostic methods are proposed and experimentally proven. The research develops the RULL algorithm based on the proposed Weibull model. An experiment to diagnose the reliability of an asynchronous electric drive system with an AIR160S4 electric motor and a Schneider Altivar 320 inverter with a centrifugal water pump as the load was studied, yielding results including reliability indicators and economic efficiency when using the combined diagnostic method.

1. Đặt vấn đề

Nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển được sử dụng trong các hệ thống: quan sát (ổn định trường nhìn); dẫn đường mặt đất [1, tr. 12] và đường thủy; ghi video; robot; và hệ thống thiết bị đo đạc của các đối tượng (phương tiện) di động. Chức năng chính của nền tảng được hiểu là duy trì hướng mong muốn, hoặc của một hệ thống chuyên dụng lắp trên đối tượng; (thí dụ, kính quan sát trên và nòng pháo trên xe chuyên dụng, tàu chuyên dụng; …) hoặc của bản thân đối tượng, trong điều kiện di chuyển (các góc xoay theo các trục tọa độ không gian sẽ bị biến thiên bởi tác động của nguồn động lực cơ học của đối tượng và của các loại nhiễu loạn bên ngoài xuất hiện khi đối tượng di chuyển (thí dụ, bề mặt di chuyển không phẳng; chướng ngại vật; gió; …).

Về mặt tổng quát, bài toán ổn định được hiểu là xác định các giá trị của các tham số của các vị trí góc của nền tảng và tạo ra các tín hiệu điều khiển đảm bảo được vị trí (hướng) mong muốn của nền tảng trong hệ tọa độ không gian ba chiều [1, tr. 23].

Các nhiễu loạn điển hình, gồm: rung động cơ học; cấu trúc không cân bằng của các phần tử; khớp nối; ma sát trong ổ trục quay; sự thay đổi của mômen quán tính của tải (đối tượng) được yêu cầu ổn định hướng; và các dao động cơ bản khác. Đối với đối tượng di động trên mặt đất và mặt nước thì các tác động bên ngoài, chủ yếu là sự gồ ghề của mặt đường; sóng nước; rung động của động cơ tác động lên thân phương tiện di chuyển; tải trọng gió; thêm nữa là các tác động xung lực khác (như đạn pháo khi được bắn) của các trang thiết bị động lực chuyên dụng được lắp trên phương tiện di chuyển [1, tr. 35] và [4, tr. 152].

Để bù trừ các yếu tố này, một hệ thống điều khiển vòng kín được thiết lập, bao gồm: các cảm biến định hướng; thiết bị tính toán; truyền động (cơ điện; điện thủy lực; điện khí nén).

Với các đối tượng hiện đại thì hướng của nó thường được xác định bằng cách sử dụng module đo lường quán tính (Inertial Measurement Unit – IMU), kết hợp với gia tốc ba trục; con quay hồi chuyển ba trục; và từ kế ba trục. Tuy nhiên, mỗi cảm biến lại có những hạn chế riêng của nó, thí dụ, gia tốc kế nhạy cảm với gia tốc tuyến tính và rung động; từ kế dễ bị ảnh hưởng bởi các trường từ cục bộ của động cơ điện và của các kết cấu kim loại nhiễm từ. Việc tích hợp các tín hiệu của con quay hồi chuyển dẫn đến tích lũy sai số.

Như vậy, vấn đề đặt ra: cần phát triển các thuật toán để tích hợp các dữ liệu đo lường; xác định một phương pháp bảo đảm được sự cân bằng cho phép giữa độ chính xác-tốc độ-độ tính toán phức tạp.

Sự phát triển mạnh của công nghệ tính toán đã mở rộng đáng kể khả năng sử dụng các mô hình toán học áp cho các cảm biến và sai số của chúng, qua đó cải thiện độ chính xác của các thông tin được tạo ra. Trong các hệ thống điều hướng tiên tiến, thiết bị tính toán được sử dụng không chỉ để xử lý tín hiệu, mà còn để lọc tín hiệu từ cảm biến tạo ra [3, tr. 4].

2. Mục tiêu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mục tiêu nghiên cứu

Phát triển một nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển ba trục và thuật toán số xử lý dữ liệu của IMU.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu nghiên cứu này, cần thực hiện tuần tự các nhiệm vụ sau:

+ Phát triển thiết kế cơ khí của gimbal ba trục;
+ Thiết kế mới một cấu trúc cho hệ thống điều khiển điện tử;
+ Thiết lập mô hình toán học cho các phép đo lường và tiêu chí chất lượng;
+ Thực hiện một vài thuật toán để đánh giá định hướng không gian;
+ So sánh các thuật toán trong các chế độ di chuyển khác nhau;
+ Xác định một thuật toán hợp lý để sử dụng trong mạch ổn định.

Sử dụng môi trường MATLAB cho mô hình hóa nền tảng được phát triển và dựa trên kết quả mô phỏng nghiên cứu đề xuất thuật toán xử lý tín hiệu số và sai số trung bình bình phương RMSE trong xác định vị trí góc của ba trục xoay của con quay hồi chuyển để phân tích so sánh các thuật toán với nhau.

3. Nội dung và kết quả nghiên cứu:

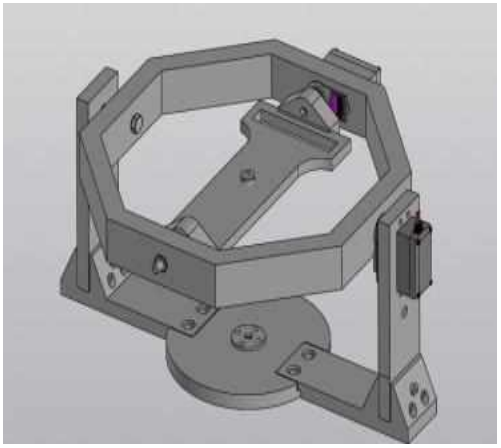
3.1. Phát triển một thiết kế nền tảng ổn định bằng con quay hồi chuyển ba trục

3.1.1. Phần cơ khí

Nền tảng được phát triển là hệ thống treo gimbal ba trục (three-axis gimbal suspension). Việc sử dụng hệ thống treo ba trục được quyết định là bởi các phương tiện di chuyển, thực tế sẽ bao gồm các di chuyển: xoay; nghiêng; và lăn. Để loại trừ khả năng khung bị gập thì các trục treo phải vuông góc với nhau [1, tr. 152]. Nền tảng gồm ba khung: khung ngoài; khung trung gian; khung trong, các trục quay của khung là vuông góc nhau. Trục quay của khung ngoài cung cấp chuyển động xoay với góc xoay ψ,grad.,trục quay khung trung gian – quay quanh theo góc nghiêng θ,grad., trục quay của khung trong – quay quanh theo góc lăn φ,grad. Các phần tử của nền tảng được in 3D từ nhựa PET với tỷ lệ lấp đầy 90%. H. 1. trình bày một mô hình 3D của nền tảng có kích thước 30x30x15cm.

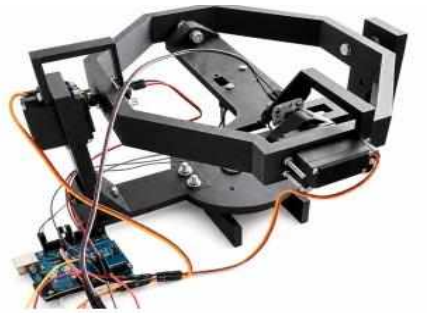
Khung trong của module được lắp payload và module đo lường quán tính IMU BMX055. Trên mỗi trục của module nền tảng được lắp:

+ bộ truyền động cơ điện;
+ cảm biến vị trí góc;
+ cụm ổ trục quay;
+ các chi tiết kẹp cơ khí;
+ cáp và dây dẫn kết nối.



H. 1. Module nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển

H. 2. trình bày hình ảnh của một nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển được phát triển.



H.2. Nền tảng ổn định bằng con quay hồi chuyển được nghiên cứu

Hệ thống điện tử của nền tảng nghiên cứu, gồm:
+ vi điều khiển Atmel MEGA328P;
+ module IMU BMX055 với chín bậc tự do;
+ gia tốc kế ba trục;
+ con quay hồi chuyển ba trục;
+ từ kế ba trục;
+ cảm biến góc xoay (phần tử mã hóa từ) AS5600;
+ bộ truyền động servo MG996R;
+ các bộ điều khiển các động cơ điện.

3.1.2. Module mô phỏng

Module mô phỏng được hiện thực hóa trong môi trường MATLAB. Module mô phỏng cơ sở cho phép tái tạo nghiên cứu ảnh hưởng của tác động bên ngoài lên nền tảng nghiên cứu trước khi thử nghiệm ở mức đầy đủ. Cụ thể, khi mô hình hóa nền tảng đặt trên đối tượng di chuyển thì chuyển động lắc có thể được coi là lực dao động điều hòa với biên độ và tần số xác định [4, tr. 153]. Chuyển động của nền tảng được xác định bởi sự kết hợp của các thành phần điều hòa theo các góc lăn; góc lắc; và góc xoay. Chế độ này được sử dụng như là một mô tả gần đúng về chuyển động lắc của đối tượng khi di chuyển. Để tính toán, các tín hiệu ảo được tạo ra từ con quay hồi chuyển; từ gia tốc kế; và từ kế.

Tín hiệu có được từ con quay hồi chuyển chứa thông tin: các vận tốc góc xoay thực; độ lệch 0; nhiễu loạn. Tín hiệu có từ gia tốc kế chứa thông tin; phép chiếu của gia tốc trọng trường g; gia tốc tịnh tiến; các thành phần rung động và nhiễu loạn. Tín hiệu từ từ kế chứa thông tin: từ trường trái đất; nhiễu loạn cục bộ và nhiễu loạn khác. Sai số trung bình bình phương trong xác định vị trí góc được sử dụng để so sánh các thuật toán với nhau.

Cấu trúc của mô hình mô phỏng được sử dụng để nghiên cứu sẽ tương đồng với mô tả được chấp nhận rộng rãi về MEMS-IMU, đó là các phép đo lường của con quay hồi chuyển bao gồm vận tốc của góc xoay thực; nhiễu cộng thêm và độ lệch 0 được diễn ra chậm; các phép đo của từ kế có thể bị méo do ảnh hưởng bởi các từ trường cục bộ [7, tr. 1205].

3.2. Các thuật toán nghiên cứu

Các thuật toán phát triển sẽ được xem xét về độ phức tạp trong tính toán và khả năng chống chịu ảnh hưởng của các tác động nội tai và bên ngoài.

Thuật toán tích hợp con quay hồi chuyển được sử dụng như là một phương án cơ sở. Thuật toán này cho khả năng tốt về tính tác động nhanh, nhưng dễ tích lũy lỗi do độ lệch 0 của con quay hồi chuyển. Việc tích hợp các lỗi của phép đo lường của con quay hồi chuyển dẫn đến tích lũy lỗi trong tính toán ổn định hướng, vì thế con quay hồi chuyển không nên dùng như là một cách duy nhất để đo lường vị trí góc tuyệt đối [5, tr. 3].

Với con quay có sử dụng thuật toán để tăng tính tác động nhanh nêu trên, để khắc phục nhược điểm của nó, sử dụng bộ lọc bổ sung và hiệu chỉnh chậm từ gia tốc kế và từ kế. Thuật toán sử dụng bộ lọc bổ sung này có ưu điểm là tính phức tạp tính toán thấp, nhưng lại yêu cầu phải điều chỉnh hệ số lọc.

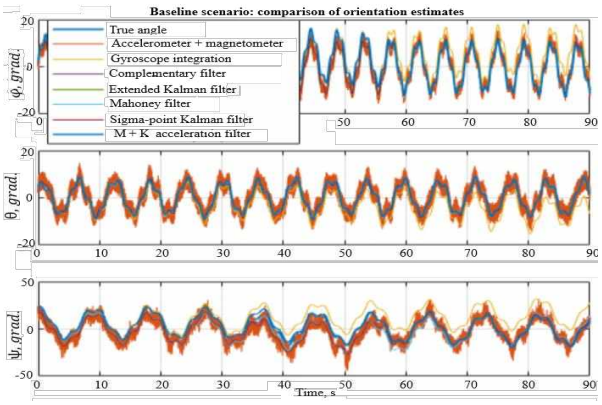
Thuật toán bộ lọc Mahoney là bộ lọc quan sát phụ phi tuyến tính cho ra kết quả biểu thị hướng ở hình thức quaternion. Thuật toán này cho phép thực hiện hiệu chỉnh theo vector hỗ trợ và ước tính sự thay đổi chậm của độ lệch 0 của con quay hồi chuyển.

Thuật toán bộ lọc Kalman mở rộng sử dụng module trạng thái phi tuyến tính và thống kê đặc tính nhiễu loạn. Thuật toán này đảm bảo độ chính xác cao của các phép đo lường, nhưng lại đòi hỏi phải điều chỉnh ma trận hiệp phương sai và thiết bị tính toán mạnh hơn. Trong thuật toán bộ lọc Kalman mở rộng thích ứng thì ma trận hiệp phương sai của nhiễu loạn đo lường có thể được hiệu chỉnh trong quá trình hoạt động để giảm ảnh hưởng của sự chuyển động của đối tượng và của nhiễu từ thời gian (nhiễu từ tạm thời) [4, tr. 1346-1347].

3.3. Kết quả nghiên cứu

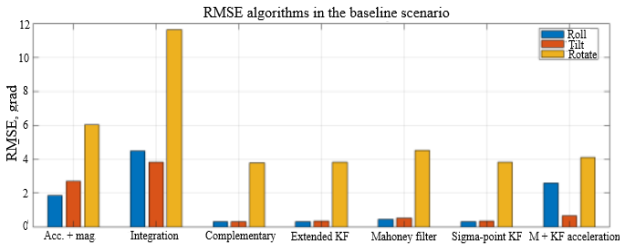
3.3.1. Kịch bản cơ sở

Hình 3 trình bày sự phụ thuộc theo thời gian của các góc hướng và ước tính góc hướng ở các dao động cơ bản của sự di chuyển của đối tượng. Sử dụng thuật toán tích hợp con quay hồi chuyển sẽ cung cấp được các tín hiệu mượt mà, nhưng theo thời gian sẽ lệch khỏi các giá trị tham chiếu. Thuật toán bộ lọc bổ sung; các bộ lọc Mahoney và Kalman mở rộng cho phép tái tạo chuyển động của nền tảng một cách ổn định.



H. 3. So sánh các ước tính hướng ở quá trình mô phỏng cơ sở

H. 4. Trình bày kết quả sai số bình phương trung bình của các thuật toán. Bộ lọc bổ sung và bộ lọc Kalman mở rộng cho sai số nhỏ nhất. Bộ lọc Mahoney cho kết quả chấp nhận được với tính toán ít phức tạp hơn bộ lọc Kalman mở rộng.



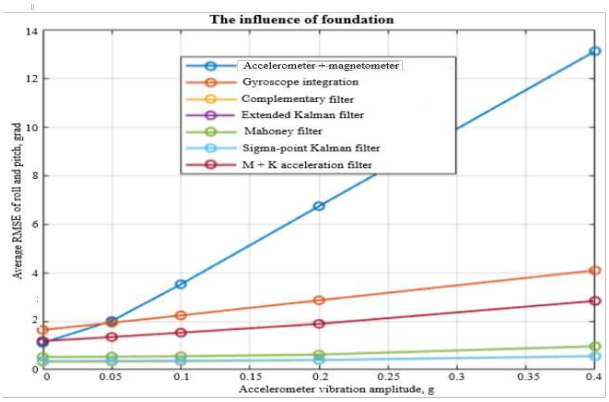
H. 4. Sai số bình phương trung bình của các thuật toán trong kịch bản cơ sở

3.3.2. Ảnh hưởng của dao-rung động

Hình 5 biểu thị sự phụ thuộc của sai số lăn và sai số nghiêng vào biên độ và tần số của các rung động của đối tượng khi di chuyển, Những tác động như vậy là điển hình cho hoạt động của động cơ kết hợp đối tượng di chuyển sẽ truyền rung động qua thân khung gầm của đối tượng lên nền tảng.

Khi rung động tăng lên thì các ước tính trực tiếp từ gia tốc kế sẽ xấu đi đáng kể, nhưng các bộ lọc bổ sung; Mahoney;

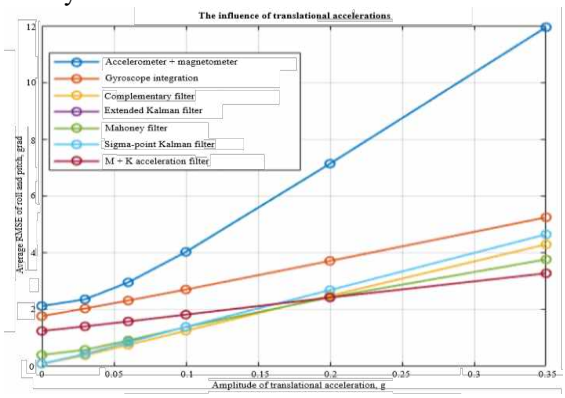
Kalman mở rộng, vẫn bảo toàn khả năng làm việc. Trong thực tế, để giảm sự xấu đi do gia tốc kế thì phải giảm sự phụ thuộc vào gia tốc kế khi module gia tốc đo cho ra tin hiệu sai lệch đáng kể so với gia tốc trọng trường *g*. Một cách tiếp cận tương tự được sử dụng trong các thuật toán định hướng thích nghi: khi module gia tốc lệch đáng kể so với *g* thì các phép đo của gia tốc kế sẽ được gán trọng số thấp hơn [5, tr. 1347].



H. 5. Ảnh hưởng của dao động lên độ chính xác của các ước lượng hướng

3.3.3. Ảnh hưởng của gia tốc tịnh tiến

Hình 6 minh họa tác động của gia tốc tịnh tiến xảy ra trong quá trình tăng tốc; giảm tốc; và va chạm vật cản khi đối tượng di chuyển.



H. 6. Ảnh hưởng của gia tốc tịnh tiến lên độ chính xác của ước tính góc lăn và góc nghiêng

Khi đối tượng di chuyển thì gia tốc kế phát đồng thời gia tốc trọng trường tham chiếu và thành phần động học. Do đó, khi gia tốc tịnh tiến tăng thì độ chính xác của việc xác định độ nghiêng sẽ giảm xuống [5, tr. 1346].

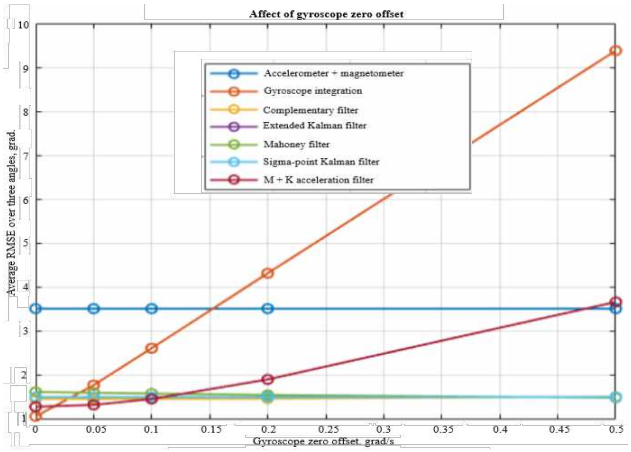
Như thế là khi gia tốc tịnh tiến tăng lên thì độ chính xác của các thuật toán dựa trên gia tốc kế sẽ giảm xuống. Bộ lọc Mahoney bảo toàn tính ổn định mong muốn và có thể sử dụng nó như là một thuật toán cơ sở của một nền tảng phiên bản đầy đủ.

Ngoài ra, một thuật toán lai cũng được nghiên cứu, trong đó, bộ lọc Mahoney được dùng kết hợp với ước tính Kalman cơ sở về thành phần gia tốc động. Không như việc áp dụng tuần tự hai thuật toán ước tính hướng hoàn chỉnh, bộ lọc Kalman trong thuật toán lai này chỉ được dùng để ước tính thành phần nhiễu của tín hiệu từ gia tốc kế. Sau khi bù gia tốc động, dữ liệu được hiệu chỉnh sẽ đưa vào bộ lọc Mahoney.

Các kết quả của mô hình hóa cho thấy rằng, ở gia tốc tịnh tiến thấp, thuật toán lai không mang lại lợi thế đáng kể nào so với bộ lọc Mahoney thông thường. Tuy nhiên, hiệu quả của thuật toán lai sẽ tăng lên khi biên độ gia tốc tịnh tiến tăng. Đối với biên độ của gia tốc lớn hơn 0.2g thì thuật toán lai sẽ cho biết sai số bình phương trung bình (RMSE) là thấp nhất trong tất cả các thuật toán được xem xét. Điều này làm cho thuật toán lai trở thành một lựa chọn đầy hứa hẹn cho hoạt động của đối tượng chịu tác động mạnh của vật cản bên ngoài.

3.3.4. Ảnh hưởng của độ lệch 0 của con quay hồi chuyển

Hình 7 biểu thị sự thay đổi của sai số khi độ lệch 0 của con quay hồi chuyển tăng lên.



H. 7. Ảnh hưởng của độ lệch 0 của con quay hồi chuyển

Sai số khi tích phân trực tiếp vận tốc góc (để có giá trị góc) sẽ tăng nhanh. Các thuật toán với hiệu chỉnh bên ngoài có tính ổn định đáng kể đối với độ lệch 0. Kết quả thu được khẳng định sự cần thiết sử dụng tổ hợp dữ liệu IMU BMX055 khi nền tảng hoạt động liên tục và lâu dài.

4. Thảo luận về kết quả

Qua trình bày kết quả nghiên cứu phát triển nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển ba trục và nghiên cứu so sánh các thuật toán xử lý kỹ thuật số các dữ liệu của cảm biến quán tính, có thể thấy:

Kết quả mô hình hóa chỉ ra rằng, việc tích hợp trực tiếp con quay hồi chuyển không thể được sử dụng làm phương pháp chính để ước tính hướng trong điều kiện nền tảng hoạt động lâu dài;

Bộ lọc bổ sung bảo đảm bảo độ chính xác cao và tối thiểu hóa khối lượng tính toán. Nó có thể được sử dụng như một tùy chọn cơ bản khi tài nguyên của bộ vi điều khiển bị hạn chế;

Bộ lọc Kalman mở rộng cung cấp độ chính xác cao và cho phép điều chỉnh độ tin cậy thích ứng với cảm biến. Tuy nhiên, việc sử dụng bộ lọc Kalman đòi hỏi triển khai phức tạp hơn và khối lượng tính toán lớn.

Đối với phiên bản đầu tiên của nền tảng với quy mô đầy đủ thì bộ lọc Mahoney được chọn làm thuật toán cơ sở. Bộ lọc Mahoney được chọn vì tính khả thi của nó trong việc triển khai trên thiết bị tính toán nhúng và sự sẵn có của cơ chế ước tính độ lệch 0 của con quay hồi chuyển trong quá trình hoạt động σ7, tr. 1203-1204]. Thuật toán này kết hợp được khối lượng tính toán vừa phải với mô tả quaternion về hướng không gian và cho phép bù sự thay đổi chậm của độ lệch 0 của con quay hồi chuyển. Điều này dễ hiện thực hóa trong vi điều khiển và thực hiện thử nghiệm tiếp theo trên đối tượng nhỏ.

Kết quả mô hình hóa cũng cho thấy rằng, trong chế độ có gia tốc tịnh tiến đáng kể của đối tượng di chuyển thì thuật toán lai dựa trên bộ lọc Mahoney và ước tính gia tốc động học tỏ ra có nhiều hứa hẹn tốt. Thuật toán lai có khả năng bổ sung các cách bù trừ khi phát hiện các tác động động học đáng kể.

Việc thử nghiệm toàn diện sẽ cho phép tinh chỉnh các giá trị của các tham số của bộ lọc; đánh giá tác động của chuyển động của đối tượng; và độ rung động thực tế của động cơ; cuối cùng là xác định xem có cần thiết phải chuyển sang

các thuật toán phức tạp hơn hay không.

5. Kết luận

Bài viết đã nêu bật được kết quả phát triển một nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển ba trục, gồm: phát triển phần cơ khí, thiết lập một module mô phỏng trong môi trường MATLAB; trình bày kết quả là kịch bản cơ sở dưới tác động của các rung động điều hòa; kết quả về tác dụng của các thuật toán tích hợp; bộ lọc Kalman; bộ lọc Mahoney; và thuật toán lai dưới tác động của: rung động; gia tốc tịnh tiến; và của độ lệch 0 của con quay hồi chuyển ba trục.

Phân tích kết quả và khuyến nghị sử dụng thuật toán sao cho hợp lý tương ứng với điều kiện thực.

Hướng đi tiếp của nghiên cứu phát triển này là tùy chọn một đối tượng di chuyển cụ thể để hiện thực hóa nền tảng được ổn định bằng con quay hồi chuyển ba trục với mục tiêu cụ thể hơn, thí dụ, ổn định hướng di chuyển của tàu thuyền trên biển hoặc ổn định nòng pháo khi khóa mục tiêu hoặc ổn định trường nhìn (thí dụ, với xe tăng thiết giáp tác chiến trên địa hình phức tạp làm trường nhìn của kíp tác chiến bị ảnh hưởng nghiêm trọng đến quan sát trận địa).

6. Tài liệu tham khảo

[1] Nguyễn Tiến Dũng. Hệ tự động dẫn đường mặt đất КВАРАД. - Đồ án tốt nghiệp. Học viện Kỹ thuật Quân sự - 1983.

[2] Лысов А. Н., Лысова А. А. Теория гироскопических стабилизаторов: учебное пособие. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. — 117 с.

[3] Серегин В. В. Прикладная теория и принципы построения гироскопических систем: учебное пособие. — Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2007. — 78 с.

[4] Гогорев И. Р., Соколов П. В. Моделирование палубной адаптивной гиростабилизированной приборной платформы. — С. 152–154.

[5] Sabatini A. M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2006. — Vol. 53. — No. 7. — P. 1346–1356.

[6] Madgwick S. O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. — University of Bristol, 2010.

[7] Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2008. — Vol. 53. — No. 5. — P. 1203–1218.