

Phát triển thuật toán điều khiển để kiểm soát chủ động chuyển động lăn của tàu bằng

Bộ ổn định con quay hồi chuyển

Ki-Seok Song<sup>1</sup> , Soo-Min Kim<sup>1</sup> , Moon K. Kwak<sup>1</sup> , Vệ Đông Chu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật Cơ khí, Robot và Năng lượng,

Đại học Dongguk-Seoul, 30 Pildong-ro 1gil, Jung-gu, Seoul 04620, Hàn Quốc

<sup>2</sup>Khoa Kỹ thuật Cơ khí,

Đại học Baltimore thuộc Quận Maryland, 1000 Hilltop Circle, Baltimore, MD 21250

Tổng số trang = 33

Số lượng hình = 9

Số lượng bảng = 0

Số lượng Phụ lục = 0

Tác giả liên hệ:

Giáo sư Moon K. Kwak

Khoa Kỹ thuật Cơ khí, Robot và Năng lượng

Đại học Dongguk-Seoul

Pildong-ro 1gil 30, Jung-gu,

Seoul 04620, HÀN QUỐC

Số fax: +82-2-2263-9379

Điện thoại: +82-2-2260-3705

Email: kwakm@dongguk.edu

## Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, một thuật toán mới cho bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động đã được phát triển và áp dụng cho tàu.

mô hình. Bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động bao gồm một cảm biến con quay hồi chuyển đo vận tốc góc

của chuyển động lăn của một con tàu, một bộ điều khiển thực hiện thuật toán điều khiển chủ động và một

Bộ truyền động được kết nối với trục tiến động. Thuật toán điều khiển mới nhận được chuyển động lăn

tốc độ của tàu và đưa ra góc tiến động mong muốn. Một bộ truyền động phù hợp cho loại này

Nhiệm vụ có thể là một động cơ servo. Đầu tiên, một mô hình lý thuyết với bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động đã được

đã được nghiên cứu để chỉ ra cơ chế hoạt động của bộ ổn định con quay hồi chuyển. Người ta thấy rằng

Bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động hoạt động như một độ cứng bổ sung. Dựa trên các phương trình chuyển động của

tàu có bộ ổn định con quay hồi chuyển, một chiến lược điều khiển mới cho bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động đã được phát triển.

Về mặt lý thuyết, người ta thấy rằng thay vì tăng độ cứng, sự giảm chấn của chuyển động lăn

của tàu có thể được tăng lên bằng cách điều chỉnh tần số lọc của thuật toán điều khiển thành

tần số lăn. Cả kết quả số và kết quả thực nghiệm đều cho thấy rằng biện pháp kiểm soát được đề xuất

thuật toán có giá trị và hiệu quả về mặt chi phí, vì nó không yêu cầu tốc độ cao và nặng

bánh xe quay.

Từ khóa: Bộ ổn định con quay hồi chuyển, Thuật toán điều khiển chủ động, giảm chấn lăn chủ động.

## Bản in trực

## 1. Giới thiệu

Bởi vì tàu thuyền chạy trên mặt nước nên chúng liên tục di chuyển nhờ sóng hoặc gió. Sự chuyển động của tàu bao gồm sáu bậc tự do, đó là ba loại chuyển động tịnh tiến: dăng trào, lắc lư, nhô lên và ba loại chuyển động quay: lăn, nghiêng và lắc. Trong số đó, chuyển động quay quanh trục tăng được gọi là lăn, và chuyển động lăn có thể dẫn đến các vấn đề như say sóng và sự an toàn của thủy thủ, cũng như tai nạn lật tàu. Đối với vì lý do này, những nỗ lực đã được thực hiện để ngăn ngừa hoặc giảm thiểu việc lăn bằng cách lắp đặt thêm các thiết bị trên tàu.

Các thiết bị giảm độ nghiêng điển hình được sử dụng để kiểm soát độ nghiêng bao gồm sóng tàu, bể chống nghiêng, ổn định cánh và ổn định con quay hồi chuyển (Perez, 2005). Phần sóng tàu có dạng một tấm mỏng giống như một vảy, và được lắp đặt ở cả hai bên ở đầu dưới của tàu. Khi thân tàu nghiêng, sức cản thủy động được tăng lên bởi sóng tàu (Lewis, 1989). Tuy nhiên, việc lăn không thể có thể được kiểm soát hiệu quả chỉ bằng sóng tàu.

Bể chống lật là một loại bể lớn được lắp bên trong tàu và chứa đầy nước. Bình chống lăn có thể được coi như một bộ giảm chấn khối lượng được điều chỉnh cho chuyển động lăn, sử dụng lắc lư như một bộ hấp thụ động. Tùy thuộc vào hình dạng của bể, nó được chia thành một bể tự do bể chứa bề mặt, bể chứa hình chữ U và bể chứa bên ngoài; và trong số đó, loại được sử dụng phổ biến nhất là bể ống chữ U. Thiết bị này lại được chia thành loại thụ động và chủ động tùy thuộc vào cơ chế hoạt động. Loại thụ động cho phép chất lỏng bên trong bể di chuyển tự do khi tàu thực hiện chuyển động lắc lư và tần số lắc lư được điều chỉnh theo tần số lắc lư. Mặc dù thiết bị thụ động cho thấy hiệu suất tốt trong băng tần lăn của tàu,

biên độ tăng trong vùng tần số thấp, dẫn đến độ ổn định kém (Perez, 2005). Để cải thiện sự ổn định trong vùng tần số thấp, thay vì loại thụ động, loại chủ động chủ yếu là được sử dụng để điều khiển nhân tạo lưu lượng và độ lệch pha bên trong bể bằng cách lắp đặt một máy bơm hoặc van ở giữa. Tuy nhiên, vì bình chống lặn phải được lắp đặt bên trong tàu, có nhược điểm là phải sử dụng không gian bên trong của tàu. Ngoài ra, như cần một lực điều khiển lớn, kích thước của bể nên được tăng lên, nhưng vì bên trong do hạn chế về không gian, điều đó có thể không thực hiện được.

Có hai loại bộ ổn định chính để kiểm soát sự lặn: vây và con quay hồi chuyển. Vây bộ ổn định là một thiết bị điều khiển việc lặn bằng lực nâng và lực hạ được tạo ra bởi vây xoay, là những cấu trúc giống như vây được gắn vào cả hai bên thân tàu chìm. Thiết bị này được sử dụng như một thiết bị giảm lặn chủ động cơ bản như một hệ thống để xoay các cánh bằng cách phát hiện độ nghiêng của thân tàu. Tuy nhiên, cấu trúc của bộ ổn định cánh rất phức tạp, do đó chi phí lắp đặt đắt đỏ và việc bảo trì khó khăn. Ngoài ra, còn có một bất lợi là trong khi tàu neo đậu, lực nâng và lực hạ không được tạo ra, do đó Việc lặn chỉ có thể được kiểm soát trong khi bay. Gần đây, một bộ ổn định cánh sử dụng cánh cong thay vì một mặt phẳng đã được phát triển, giúp kiểm soát lặn có thể thực hiện được ngay cả khi tàu được neo đậu (Perez và Blanke, 2012). Tuy nhiên, so với bộ ổn định con quay hồi chuyển, hiệu ứng kiểm soát tại thời điểm neo đậu là không đáng kể.

Bộ ổn định con quay hồi chuyển là một thiết bị ngăn chặn sự lặn của một cấu trúc bằng cách sử dụng mô-men xoắn được tạo ra sử dụng nguyên lý con quay hồi chuyển. Khi thân tàu bị sóng hoặc gió lặn, thiết bị kiểm soát chuyển động lặn qua tiến động, tạo ra mô-men xoắn theo hướng ngược lại.

Mặc dù bộ ổn định con quay hồi chuyển được lắp đặt trong thân tàu, nhưng nó mang lại khả năng sử dụng không gian cao hơn các loại khác.

thiết bị và dễ bảo trì. Ngoài ra, còn có lợi thế là việc lắp có thể

được kiểm soát hiệu quả ngay cả trong quá trình neo đậu. Nghiên cứu này liên quan đến con quay hồi chuyển chủ động

chất ổn định có thể thể hiện hiệu suất tuyệt vời bất kể điều kiện vận hành.

Nghiên cứu để kiểm soát sự lắc của tàu bằng cách sử dụng bộ ổn định con quay hồi chuyển đã được nghiên cứu trong

cuối thế kỷ 19 và đầu thế kỷ 20. Năm 1904, Schlick lần đầu tiên thử lắp đặt bộ ổn định con quay hồi chuyển trên

một con tàu để kiểm soát sự lắc của nó (Schlick, 1904a, 1904b). Bộ ổn định con quay hồi chuyển ban đầu là một

loại thiết bị, có vấn đề trong việc điều chỉnh mô men tiến động theo độ lớn

của sóng. Bộ ổn định con quay hồi chuyển hoạt động tốt trên tàu Schlick sử dụng, nhưng nó không hoạt động

như mong đợi ở các tàu khác (Chalmers, 1931). Năm 1915, Sperry đã phát triển một con quay hồi chuyển chủ động

bộ ổn định khắc phục được những thiếu sót của bộ ổn định con quay hồi chuyển của Schlick (Sperry, 1915; Perez,

2005). Bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động tại thời điểm này làm cho vận tốc góc tiến động tỷ lệ thuận

với tốc độ lắc. Bộ ổn định con quay hồi chuyển của Sperry thực sự được sử dụng cho tàu chiến và phà với

hiệu ứng giảm lắc tuyệt vời. Nhưng bộ ổn định con quay hồi chuyển đã bị tránh xa vì những vấn đề

chẳng hạn như trọng lượng và chi phí, và sự ra đời của bộ ổn định cánh. Sau đó, vào những năm 1990, nhờ

sự phát triển của động cơ, vật liệu và kỹ thuật điều khiển, bộ ổn định con quay hồi chuyển, thể hiện

khả năng kiểm soát lắc tuyệt vời ngay cả khi tàu neo đậu, bắt đầu thu hút trở lại

chú ý. Jones (1967) đã mô tả thực tế rằng tần số phản cộng hưởng của con quay hồi chuyển

bộ hấp thụ rung động (GVA) là một hàm tuyến tính tỷ lệ thuận với tốc độ quay của

rôto, để GVA có thể dễ dàng đồng bộ hóa và áp dụng cho xe cộ và máy móc

có sự kích thích rung động tần số thay đổi và các kết quả phân tích đã được chứng minh

thông qua các thí nghiệm. Perez và Steinmann (2009) đã thiết kế một đạo hàm tỷ lệ

bộ điều khiển, giả sử rằng mô-men xoắn điều khiển của góc tiến động xuất hiện dưới dạng tuyến tính

sự kết hợp của góc tiến động và vận tốc góc tiến động, sử dụng động lực học

mô hình của cấu trúc được trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động. Ngoài ra, lý thuyết

mô phỏng được tiến hành bằng cách sử dụng phổ sóng JONSWAP cho hệ thống bao gồm

bộ điều khiển được thiết kế. Townsend và Shenoi (2014) đã giới thiệu một mô hình động cho loại đôi

hệ thống ổn định con quay hồi chuyển có trục tiến động thẳng đứng và trình bày bốn phương pháp điều khiển:

điều khiển thụ động, điều khiển dựa trên đạo hàm, điều khiển bánh xe phản ứng và gimbal không bị hạn chế

kiểm soát. Hơn nữa, mô phỏng lý thuyết sử dụng phổ sóng JONSWAP đã được

được thực hiện cho từng phương pháp kiểm soát. Poh et al. (2017) đã sử dụng một mô hình động như Perez và

Steinmann (2009), nhưng đã thiết kế bộ điều khiển tích phân tỷ lệ sao cho sự tiến động

mô-men xoắn là sự kết hợp tuyến tính của góc lặn và tích phân của góc lặn của

thân tàu. Ngoài ra, một số công ty, như SeaKeeper ở Hoa Kỳ và Mitsubishi Heavy

Các ngành công nghiệp (MHI) tại Nhật Bản đã phát triển bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động và ứng dụng chúng vào du thuyền

có kích thước khác nhau. Bộ ổn định con quay hồi chuyển của SeaKeeper giảm thiểu ma sát và sinh nhiệt bằng cách

cho phép rôto quay với tốc độ cao trong môi trường chân không và loại bỏ hiện tượng lặn từ

(70 đến 98)% tùy thuộc vào một số điều kiện (Seakeeper, 2022). Trong trường hợp của MHI, chống

Con quay hồi chuyển lặn (ARG) có khả năng giảm 70% độ lặn ở tốc độ bằng không (Takeuchi và cộng sự, 2011).

Bộ ổn định con quay hồi chuyển cũng đã được áp dụng cho nhiều cấu trúc khác nhau. Ünker và Çuvalcı (2015)

sử dụng bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động để ổn định cấu trúc kiểu con lắc ngược. Lagrange

phương trình được sử dụng để có được các phương trình chuyển động và các phép tính số đã được

được thực hiện để tính toán phản ứng của hệ thống theo tốc độ quay của rôto.

Hơn nữa, một thí nghiệm đã được tiến hành để chứng minh tính hợp lệ của hệ thống cảm ứng

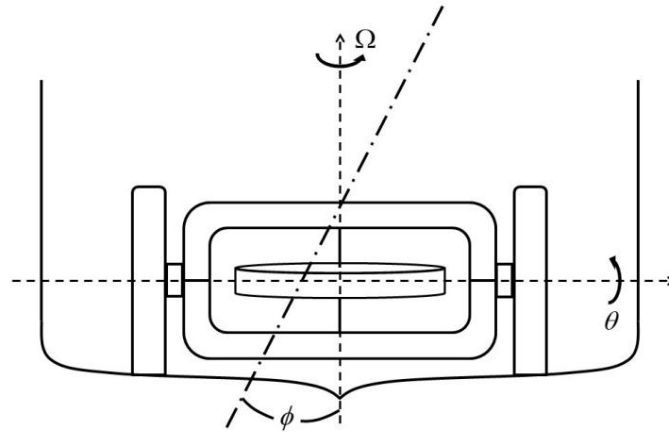
thông qua so sánh với kết quả tính toán số (Ünker và Çuvalcı, 2016).

Manmathakrishnan và Pannerseivam (2021) đã bổ sung một bộ ổn định con quay hồi chuyển vào một sà lan được trang bị một tuabin gió ngoài khơi và tiến hành mô hình hóa động. Sau đó, các thí nghiệm đã được thực hiện bằng cách sử dụng mô hình tỷ lệ 1:50 trong ba điều kiện với tốc độ quay khác nhau của rotor của tua bin.

Trong nghiên cứu này, một mô hình động lực học đơn giản với bộ ổn định con quay hồi chuyển lần đầu tiên được giới thiệu để phát triển một thuật toán điều khiển cho bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động. Dựa trên các phương trình chuyển động được ghép nối, các đặc điểm và hiệu ứng mong đợi của bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động đã được mô tả. Sau đó, một thuật toán điều khiển mới cho bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động dựa trên cơ chế servomotor đã được phát triển. Để xác minh tính hợp lệ của thuật toán điều khiển mới, các thí nghiệm đã được tiến hành sử dụng mô hình tàu quy mô nhỏ được sản xuất bằng máy in 3D. Mô hình tàu là một vỏ hình trụ tròn được trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động bao gồm một rô-tô được kết nối với động cơ BLDC, cảm biến con quay hồi chuyển loại MEMS và động cơ servo RC có thể điều khiển góc tiến động. Kết quả thực nghiệm cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất thuật toán.

Bản in trực

## 2. Mô hình động của một con tàu đợc trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động



Hình 1. Mô hình động của một con tàu đợc trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển.

Hình 1 cho thấy một mô hình tàu đợc trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động. Trong Hình 1, , , và

đại diện cho góc tiến động của bộ ổn định con quay hồi chuyển, góc lặn của thân tàu và

tốc độ quay của rôto, tương ứng. Góc lặn và góc tiến động đợc cho là

nhỏ, và trục tiến động của bộ ổn định con quay hồi chuyển đợc cố định vào trục của trục cao độ,

vuông góc với trục lặn (Townsend và cộng sự, 2007). Sau đó, các phương trình nổi tiếng của

chuyển động mô tả chuyển động lặn kết hợp của tàu và chuyển động tiến động của

con quay hồi chuyển có thể đợc suy ra bằng cách sử dụng phương trình Lagrange với động năng và thế năng của

hệ thống (Harris và Piersol, 2002):

$$T = \frac{1}{2} m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} C_s \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} k_s \phi^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} c_g \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} k_g \theta^2 \quad (2)$$

Ở đây  $T$  là mômen quán tính khối lượng của tàu,  $C_s$  là hệ số giảm chấn của tàu,



$k_s$  là hệ số độ cứng của tàu,  $J_g$  là mômen quán tính khối lượng của con quay hồi chuyển

bộ ổn định liên quan đến chuyển động của con lắc đơn,  $c_g$  là hệ số giảm chấn

của bộ ổn định con quay hồi chuyển mới được thêm vào,  $k_g$  là hệ số độ cứng của bộ ổn định con quay hồi chuyển,  $J_s$  là

mômen quán tính khối lượng của rôto ổn định con quay hồi chuyển và  $MW$  là sự nhiễu loạn bên ngoài

mô men của sóng. Chia phương trình (1) cho  $J_s$  và phương trình (2) bởi  $J_g$  mang lại kết quả sau

phương trình chuyển động:

$$\ddot{\theta}_s + 2\zeta_s \omega_s \dot{\theta}_s + \omega_s^2 \theta_s = \frac{1}{J_s} MW \quad (3)$$

$$\ddot{\theta}_g + 2\zeta_g \omega_g \dot{\theta}_g + \omega_g^2 \theta_g = 0 \quad (4)$$

ở đây,

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{J_s}}, \quad \omega_g = \sqrt{\frac{k_g}{J_g}}, \quad \zeta_s = \frac{c_s}{2J_s \omega_s}, \quad \zeta_g = \frac{c_g}{2J_g \omega_g} \quad (5a-d)$$

$$\frac{J_g}{J_s}, \quad \frac{\omega_g}{\omega_s}, \quad \frac{\zeta_g}{\zeta_s} = \frac{J_g \omega_g^2}{J_s \omega_s^2} \quad (5e-g)$$

trong đó,  $\omega_s$  là tần số lắc tự nhiên của tàu,  $\omega_g$  sự tiến động có tự nhiên không

tần số của con quay hồi chuyển,  $\zeta_s$  và  $\zeta_g$  là tỷ số giảm chấn của chuyển động lắc của tàu

và sự tiến động của con quay hồi chuyển, tương ứng,  $\frac{J_g}{J_s}$  là tỷ số của mômen động lượng của

rotor của con quay hồi chuyển theo mômen động lượng của con tàu,  $\frac{\omega_g}{\omega_s}$  là tỷ số của mômen khối lượng của

quán tính của tàu đối với con quay hồi chuyển, và  $\frac{\zeta_g}{\zeta_s}$  là mômen kích thích bên ngoài không có chiều

của sóng.

Nếu bộ ổn định con quay hồi chuyển không được lắp đặt thì chỉ còn lại phương trình chuyển động của tàu và có thể giảm xuống còn:

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = \ddot{\theta}_0 \quad (6)$$

Do đó, hàm truyền của chuyển động lắc của tàu khi không có con quay hồi chuyển trở thành:

$$\frac{\Theta(s)}{\ddot{\theta}_0(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

Chèn  $\ddot{\theta}_0$  vào Phương trình (7), tỷ lệ khuếch đại cực đại của chuyển động lắc của tàu

không có con quay hồi chuyển có thể được viết như sau:

$$PG_{\text{max}} = \frac{1}{2\zeta} \quad (8)$$

ở đâu,  $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ .

Cách dễ nhất để sử dụng bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động là đặt trọng tâm của con quay hồi chuyển lên trục tiến động, do đó  $\zeta = 0$ , và để làm giảm độ nhớt của sự tiến động như

nhỏ nhất có thể, do đó làm cho  $\zeta = 0$ . Theo cách này, mối quan hệ đơn giản giữa cuộn

tốc độ và góc tiến động có thể được suy ra từ Phương trình (4):

$$\dot{\theta} = \frac{1}{s} \ddot{\theta}_0 \quad (9)$$

Thay thế phương trình (9) vào phương trình (3) sẽ cho ra phương trình chuyển động đơn giản cho chuyển động lăn của

tàu với con quay hồi chuyển thụ động, có thể được suy ra như sau:

$$2_{ss} \quad 2_s \quad 1 \quad \overset{2}{\text{---}} \quad 2_{s \text{ mw}} \quad (10)$$

Do đó, hàm truyền gần đúng của chuyển động lắc của tàu với con quay hồi chuyển thụ động trở thành:

$$\frac{\overline{S}}{\overline{B\ddot{e}n h \dot{d}\acute{a} x\grave{o} \dot{l}\acute{u}ng}}(S) \quad G_{pa}(S) \quad \frac{\overset{2}{S}}{\underset{sn \quad sn}{\overset{2}{2}} S \overset{2}{S}} \quad (11)$$

ở đâu,

$$\text{sn} \sqrt{1 - \frac{s^2}{s_n^2}}, \quad \text{sn} \frac{s}{s_n} \sqrt{1 - \frac{s^2}{s_n^2}} \quad (12)$$

Điều dễ thấy ngay từ Phương trình (10) là một bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động được thiết kế tốt có thể

tăng độ cứng chống lật của tàu trước tác động của sóng. Khi kích thước của rotor

con quay hồi chuyển được xác định và cấu trúc để hỗ trợ con quay hồi chuyển được thiết kế, <sup>tôi</sup> Và <sup>tôi</sup> là

đã được xác định. Nên làm càng nhỏ và càng lớn càng tốt. Tuy nhiên, do

những hạn chế về cấu trúc của tàu và con quay hồi chuyển, không dễ để đưa ra các giá trị của  $\tau_{0g}$  và

Tôi như đợc mong muốn. Thay vào đó, vận tốc góc càng lớn của rotor của con quay hồi chuyển, càng nhiều

có lợi. Nghĩa là, bằng cách tăng hiệu suất của động cơ được kết nối với trục

của rôto và quay ở tốc độ cao, chuyển động lăn có thể được giảm đi bởi mômen khối lượng

quán tính của rôto nhỏ. Điều này có nghĩa là có thể làm cho độ cứng lăn lớn, do đó

rằng nó có thể chống lại mô men kích thích bên ngoài. Tuy nhiên, một động cơ đất tiên phải đư ợc

được sử dụng để thực hiện vòng quay tốc độ cao và có nhiều điều cần xem xét, chẳng hạn như cân bằng

rôto con quay hồi chuyển và giảm thiểu sự mài mòn của ổ trục con quay hồi chuyển do tốc độ quay cao. Khi

độ cứng lặn của tàu tăng lên, phản ứng lặn của tàu đối với tác động bên ngoài một cách tự nhiên

mô men kích thích giảm. Tuy nhiên, khi tần số lặn tự nhiên tăng lên, tàu có thể

trải nghiệm sự lặn với tần số cao.

Tỷ lệ khuếch đại cực đại của chuyển động lặn của tàu với con quay hồi chuyển thụ động có thể được viết

như sau bằng cách chèn  $\omega_j$  vào Phương trình (11):

$$P_{pa} = |G_{pa}(\omega_j)| \frac{1}{2 \sqrt{\frac{\omega_j^2}{\omega_n^2} + 1}} \quad (13)$$

Rõ ràng từ các phương trình (12) và (13) rằng việc đưa con quay hồi chuyển thụ động vào làm tăng

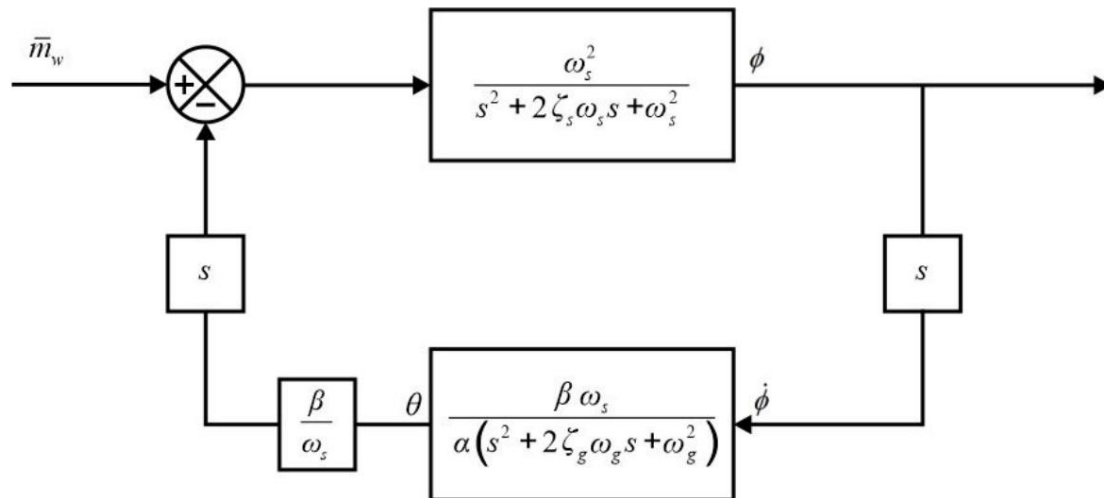
độ cứng lặn, dẫn đến tần số tự nhiên cao và giảm chấn thấp, nhưng biên độ cực đại

của con tàu có con quay hồi chuyển thụ động vẫn nhỏ hơn biên độ đỉnh của con tàu không có

con quay hồi chuyển thụ động.

Sử dụng các phương trình chuyển động được ghép nối đầy đủ được đưa ra bởi các phương trình (3) và (4), sơ đồ khối của

Hệ thống với con quay hồi chuyển thụ động có thể được vẽ như Hình 2:



Hình 2. Sơ đồ khối vòng kín của tàu có bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động.

Hàm truyền vòng kín có thể được suy ra dựa trên sơ đồ khối được đưa ra trong Hình 2:

$$\frac{\bar{\phi}(s)}{\bar{\ddot{m}}_w(s)} = G_P(s) \frac{N_P(s)}{D_P(s)} \quad (14)$$

Ở đây,

$$G_P(s) = \frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \quad (15a)$$

$$D_P(s) = \alpha(s^2 + 2\zeta_g \omega_g s + \omega_g^2) \left( s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2 \right) + \beta \omega_s^2 \quad (15b)$$

Tất nhiên, nếu chúng ta thiết lập  $\beta = 0$ , sau đó  $G_P(s)$  giảm xuống  $\frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2}$  của phương trình (11). Vòng kín

hệ thống được đưa ra bởi Công thức (14) là ổn định theo tiêu chuẩn Routh-Hurwitz.

Để xác nhận các kết luận dựa trên mô hình lý thuyết, các tính toán số đã được thực hiện

được thực hiện bằng cách sử dụng các phương trình chuyển động được ghép nối đầy đủ, các phương trình (7) và (14). Để đạt được mục đích này,

các giá trị tham số sau đã được sử dụng:

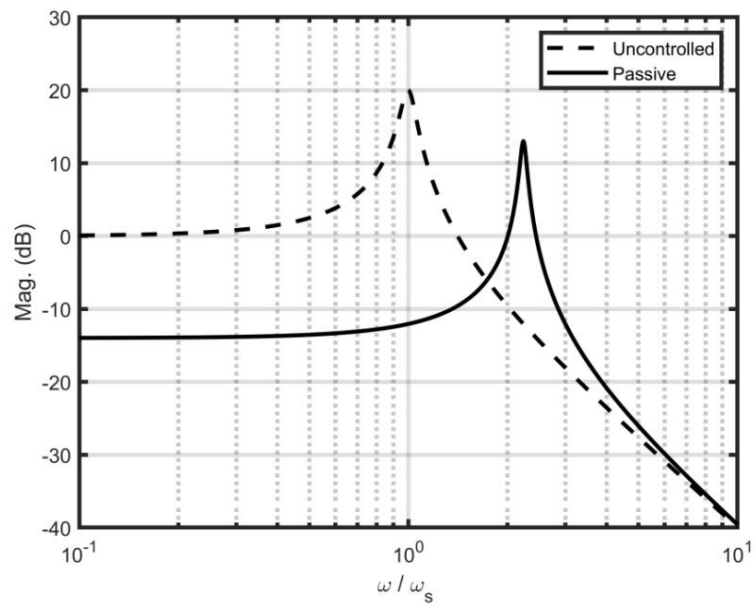
$$g / s = 0,0001, \quad s = 0,05, \quad g = 0,0001, \quad 0,01, \quad 0,2$$

Hình 3 cho thấy biểu đồ Bode lý thuyết của mô hình tàu không có bộ ổn định con quay hồi chuyển (có chấm dòng), và được trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động (dòng liền). Như dự kiến bởi lý thuyết nghiên cứu và thể hiện trong Hình 3, độ cứng lặn của tàu được trang bị con quay hồi chuyển thụ động bộ ổn định tăng lên và tần số lặn tự nhiên được dịch chuyển sang bên phải, điều này ngụ ý cao hơn tần số cuộn tự nhiên. Tất nhiên, như tăng, tần suất lặn tăng. Hành khách trên

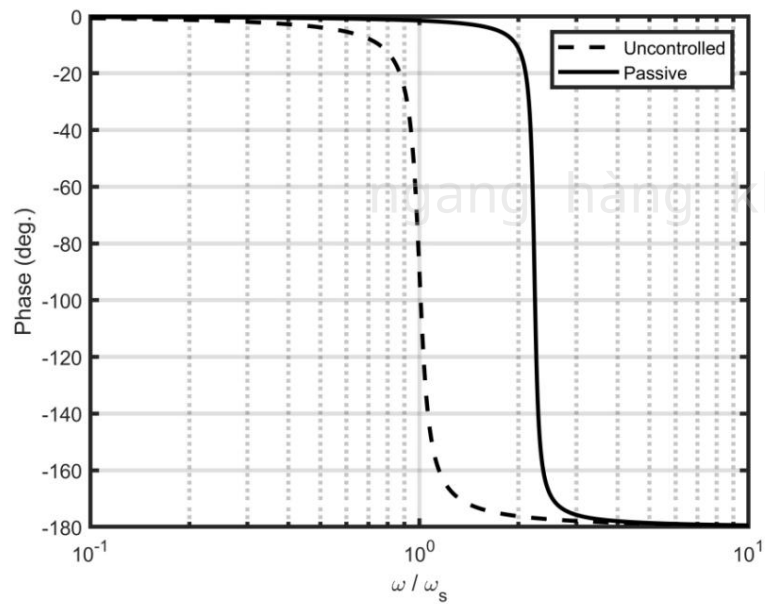
bo mạch chủ có thể gặp phải rung động tần số cao do vấn đề này. Tuy nhiên, nó có thể tìm thấy từ Hình 3 rằng với sự ra đời của bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động, biên độ đỉnh giảm. Nhìn chung, phản ứng với mô men kích thích bên ngoài do sóng nước tạo ra trong

Dải tần số thấp có thể bị triệt tiêu đáng kể. Nhưng đối với bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động hiệu quả, hoặc là mômen quán tính khối lượng của rôto phải lớn hoặc vận tốc góc của rôto phải đủ nhanh để đạt được giá trị cao của .

Bản in trực



(a) Độ lớn



(b) Pha

Hình 3. Biểu đồ Bode lý thuyết của góc lặn có và không có bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động.

### 3. Mô hình động của một con tàu được trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động

Khi một mômen kích thích bên ngoài khiến một cấu trúc lăn, bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động

gắn vào cấu trúc bắt đầu tiến động và tạo ra mô-men xoắn theo hướng ngược lại

chống lại mô men bên ngoài, tự nó tác động tư động ứng với mô men bên ngoài. Để

mục đích này, người ta mong muốn tăng độ cứng lăn để  $\omega_g = 0$  và  $\ddot{\theta}_g = 0$ . Mặt khác

Mặt khác, bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động là một thiết bị đo lường khi tàu lăn

tốc độ lăn bằng cách sử dụng cảm biến và điều khiển sự tiến động theo thuật toán điều khiển. Để

kiểm soát chuyển động tiến động, một bộ truyền động thích hợp phải được kết nối với chuyển động tiến động

trục. Trong nghiên cứu về bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động (Perez và Steinmann, 2009), người ta cho rằng

rằng trục động cơ được kết nối trực tiếp với trục tiến động và mô men điều khiển bổ sung

được áp dụng cho trục tiến động, tương đương với việc thêm vào thuật ngữ mô men điều khiển bên phải-

phía bên tay của phương trình (4). Tuy nhiên, xét đến thực tế là hầu hết các động cơ đều sử dụng bánh răng để khuếch đại

mô-men xoắn, không có bộ truyền động thực sự nào có thể tạo ra đủ mô-men theo cách này bằng cách

kết nối động cơ trực tiếp với trục tiến động mà không cần bánh răng. Ngoài ra, thiết kế điều khiển

trở nên phức tạp.

Trong nghiên cứu này, việc sử dụng động cơ servo có hộp số được xem xét cho các ứng dụng thực tế.

Động cơ servo có khả năng theo dõi góc của trục dẫn động rất chính xác bằng bộ phận bên trong

Thuật toán điều khiển PID. Do đó, trong nghiên cứu này, một thuật toán điều khiển mới có thể tạo ra

góc tiến động mong muốn được phát triển. Trên thực tế, thuật toán điều khiển mới cũng dựa trên

phương trình chuyển động của bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động, Phương trình (4). Thuật toán điều khiển được đề xuất như sau

sau đây:



$$\frac{\bar{c}}{s} = \frac{g}{s^2} \quad (16)$$

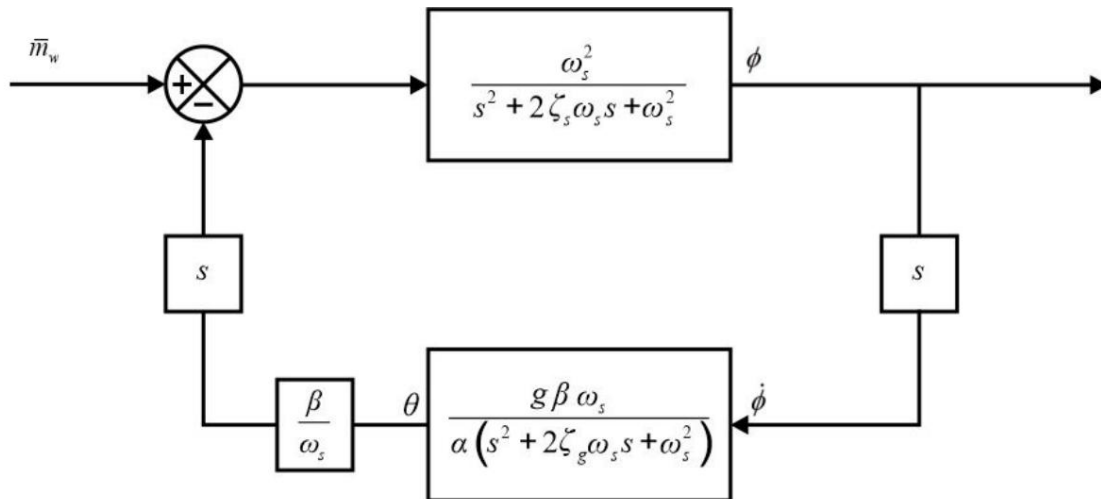
Ở đây  $\bar{c}(s)$  và  $\bar{g}(s)$  là các biến đổi Laplace của  $c(t)$  và  $g(t)$ , và  $g$  là kiểm soát độ lợi. Một chỉ số  $c$  được thêm vào góc tiến động để phân biệt nó với góc thụ động hệ thống. Thuật toán điều khiển mới sử dụng tốc độ lăn thay vì góc lăn, rất thực tế, vì cảm biến con quay hồi chuyển thường đo vận tốc góc. Các cảm biến thường được sử dụng để đo chuyển động góc là cảm biến con quay hồi chuyển, đòi hỏi phải sử dụng các kỹ thuật như Lọc Kalman và loại bỏ độ lệch để ước tính góc nghiêng thực tế của tàu. Tuy nhiên, theo thời gian, rất khó để ước tính góc lăn chính xác, do ảnh hưởng của sự trôi dạt. Đây là tại sao chúng tôi áp dụng tốc độ lăn, thay vì góc lăn. Thuật toán điều khiển chủ động mới được đề xuất sử dụng tốc độ cuộn trực tiếp, do đó rất dễ sử dụng cho các ứng dụng thực tế.

Bởi vì đầu ra của thuật toán điều khiển là góc tiến động mong muốn, nên mong muốn góc tiến động sẽ được bộ điều khiển servomotor theo dõi bằng cách sử dụng bộ điều khiển PID bên trong thuật toán. Thuật toán mới chủ yếu dựa trên lý thuyết về bộ giảm chấn khối lượng được điều chỉnh, do đó chúng tôi điều chỉnh tần số tự nhiên của bộ điều khiển theo tần số tự nhiên của tàu, nghĩa là  $\omega_n$ . Trong trường hợp này, hiệu ứng giảm chấn chủ động có thể đạt được ở cộng hưởng, và do đó Biên độ cộng hưởng bị triệt tiêu đáng kể. Bởi vì chúng ta cần một băng thông tần số rộng hơn để đối phó với các dải tần số rộng của sóng nước,  $\omega_n = 0,3$  được đề xuất, như trong trường hợp của điều khiển phản hồi vị trí tích cực (Fanson và Caughey, 1990) và điều khiển phản hồi tiêu cực thuật toán điều khiển phản hồi gia tốc cho bộ giảm chấn khối lượng được điều chỉnh chủ động (Yang và cộng sự, 2017). Thuật toán điều khiển chủ động mới được đề xuất làm tăng khả năng giảm xóc của tàu, không phải

độ cứng lăn. Thuật toán điều khiển mới được đưa ra bởi Phương trình (16) được gọi là tốc độ góc

điều khiển phản hồi (ARFC). Kết hợp Phương trình (7) và Phương trình (16), một hệ thống điều khiển vòng kín là

được thể hiện như trong Hình 4:



Hình 4. Sơ đồ khối vòng kín của tàu có bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động.

Hàm truyền của hệ thống vòng kín với thuật toán con quay hồi chuyển chủ động có thể được viết

như sau:

$$\frac{\bar{\phi}(s)}{\bar{m}_w(s)} = G_c(s) \cdot \frac{N_c(s)}{D_c(s)} \quad (17)$$

Ở đây,

$$G_c(s) = \frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s\omega_s s + \omega_s^2} \quad (18a)$$

$$D_c(s) = \frac{\alpha(s^2 + 2\zeta_g\omega_g s + \omega_g^2)}{s^2 + 2\zeta_s\omega_s s + \omega_s^2} \quad (18b)$$

Áp dụng tiêu chuẩn Routh-Hurwitz vào phương trình (18b), có thể thấy rằng nếu  $g \geq \frac{4}{2} \text{ sg}$ , cái

Hệ thống ổn định vô điều kiện. Nghĩa là, thuật toán điều khiển được đề xuất có trạng thái ổn định tĩnh và không phụ thuộc vào tần suất. Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ sử dụng giá trị dương

nhận được.

Tỷ lệ khuếch đại định tại cộng hưởng có thể thu được bằng cách thay thế  $s = j \omega$  TRONG

Phương trình (17), như sau:

$$PG(j\omega) = \frac{1}{2s^2 + \frac{g}{4s}} \tag{19}$$

Có thể dễ dàng hiểu được bằng cách so sánh Phương trình (19) với Phương trình (8) và (13) rằng giảm chấn lần là tăng lên một cách chủ động. Hệ số giảm chấn của hệ thống vòng kín với ARFC có thể được viết như sau sau đây:

$$\zeta = \frac{g}{4} \tag{20}$$

Phương trình (20) cho thấy khi bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động được điều khiển bởi ARFC được đề xuất trong nghiên cứu này

được cài đặt, bình phương của  $\zeta$  được thêm vào tỷ lệ giảm xóc của tàu. Do đó, như

động lượng góc của rôto tăng lên, lực giảm chấn của kết cấu tăng lên. Trong

cộng thêm, bình phương của  $\zeta$  được nhân với độ lợi điều khiển, do đó lực giảm chấn

của cấu trúc có thể được khuếch đại mà không làm tăng mômen động lượng của rôto.

hệ thống điều khiển được đề xuất có thể đạt được sự giảm chấn chủ động với một rôto nhỏ hơn và chậm hơn so với

con quay hồi chuyển thụ động, cho phép xây dựng bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động tiết kiệm chi phí.

Mô phỏng số được thực hiện với các giá trị tham số sau:

$$g / s = 1, \quad s = 0,05, \quad g = 0,3, \quad 0,01, \quad 0,02, g = 5$$

Lưu ý ở đây rằng giá trị của được sử dụng cho hệ thống hoạt động là một phần mười giá trị được sử dụng trong

hệ thống thụ động, ngụ ý động lượng góc nhỏ hơn. Với những giá trị này, tổng lực lăn

Tỷ lệ giảm chấn có thể được dự kiến là khoảng 0,22. Hình 5 cho thấy biểu đồ Bode của tàu

được trang bị bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động. Trong Hình 5, đường chấm chấm biểu thị mô hình không có

bộ ổn định con quay hồi chuyển, trong khi đường nét liền biểu thị mô hình được trang bị con quay hồi chuyển chủ động

bộ ổn định. Hình 5 cho thấy không giống như loại thụ động, hệ số giảm chấn chắc chắn tăng lên, do đó

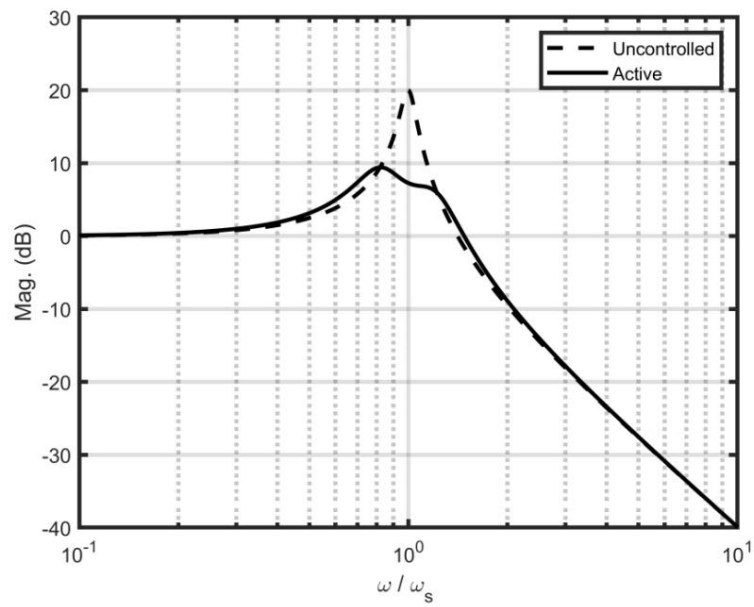
làm giảm đáng kể biên độ cộng hưởng. Ngoài ra, vì tần số tự nhiên không

không tăng như trong trường hợp của bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động, sự bất ổn tần số cao không

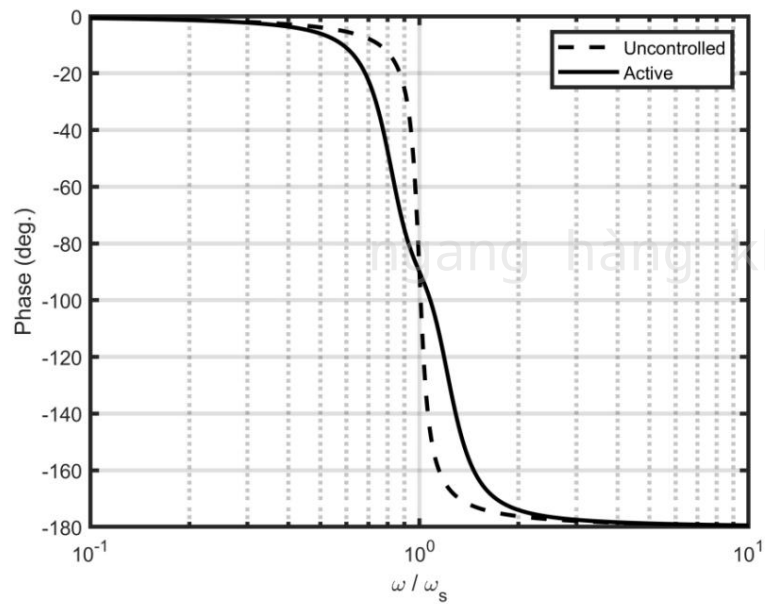
xuất hiện.

ngang hàng không

Bản in trực



(a) Độ lớn



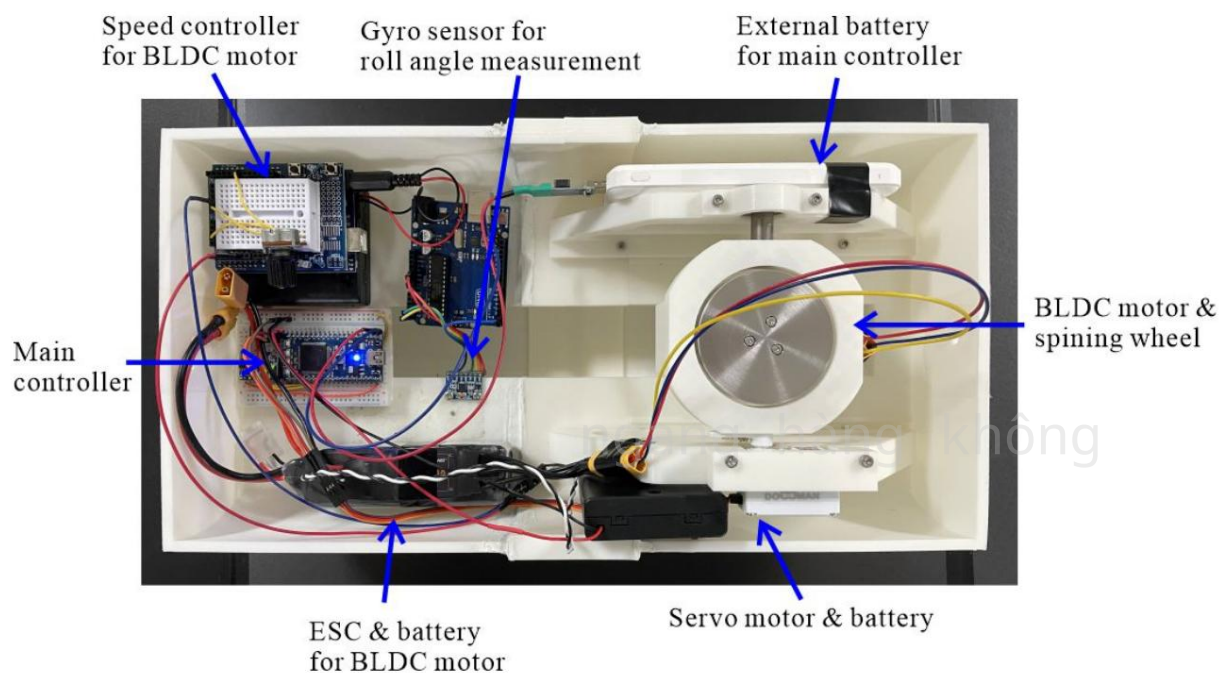
(b) Pha

Hình 5. Đường cong đáp ứng tần số lý thuyết của góc lặn.

Bản in thử ợc

## 5. Thí nghiệm

Để xác nhận hoạt động thực tế của bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động đã được xác minh về mặt lý thuyết và để xác nhận tính hợp lệ của thuật toán ARFC, một mô hình tàu đã được xây dựng và một hoạt động hệ thống điều khiển được gắn trên mô hình, như thể hiện trong Hình 6. Hình dạng của mô hình là một hình trụ nhẵn, để có thể lăn dễ dàng. Hình 6 cho thấy bên trong cấu hình của thiết bị thử nghiệm:



Hình 6. Các thành phần của thiết bị thí nghiệm.

Động cơ BLDC X2814 900KV của SUNNY SKY được sử dụng cho động cơ được kết nối với rôto trong thiết bị thử nghiệm. Arduino Uno được sử dụng như một bộ điều khiển để kiểm soát tốc độ quay

của động cơ BLDC này. Ngoài ra, một cảm biến con quay hồi chuyển (MPU-6050) đã được sử dụng để đo tốc độ lăn của mô hình tàu, trong khi động cơ servo RC (DM-CLS119TD) được sử dụng để theo dõi chính xác góc tiến động cho trước. Thuật toán ARFC được triển khai bằng cách sử dụng vi điều khiển (mbed NXP LPC 1768). Ngoài ra, một cảm biến con quay hồi chuyển và bộ điều khiển bổ sung để đo góc lăn của mô hình tàu, bộ điều khiển tốc độ điện tử để kiểm soát tốc độ và hướng của rôto và pin lithium polymer và pin khô được sử dụng để điều khiển động cơ và bộ điều khiển. Bởi vì vi điều khiển là bộ điều khiển kỹ thuật số, dạng tương tự của Thuật toán ARFC cần được chuyển đổi sang dạng số. Phép biến đổi song tuyến tính sau đây được thực hiện được sử dụng để làm cho nó phù hợp với điều khiển kỹ thuật số (Tustin, 1947):

$$s = \frac{2z-1}{T_s z+1} \tag{21}$$

Ở đây,  $T_s$  là chu kỳ lấy mẫu. Thay thế phương trình (21) vào phương trình (16), hàm truyền trong  $T_s$  dạng số có thể thu được như sau:

$$H_z G = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \tag{22}$$

Ở đây,  $b_2 = \frac{K}{T_s}$ ,  $b_1 = \frac{K}{T_s}$ ,  $b_0 = \frac{K}{T_s}$ , và,

$$b_2 = \frac{2}{T_s}, \quad b_1 = \frac{2}{T_s} \tag{23a,b}$$

$$\frac{2}{T_s} \frac{8}{T_s} \quad , \quad \frac{4}{T_s} \frac{4}{T_s} \tag{23c,d}$$

$$\frac{4}{2} \frac{4}{Ts} \frac{gs}{Ts} \frac{2}{s} \quad (23e)$$

Việc biểu thị phương trình (22) dưới dạng phương trình sai phân rời rạc là cần thiết cho C lập trình. Phương trình sau đây tính toán góc tiến động mong muốn là

được thực hiện bằng cách sử dụng ngôn ngữ C

$$1 \ 0 \ k \ z^2 \ a \ k \ 1 \ k \ G \ b \ 2 \ ng \ h \ i \ n \ b_1 \ k \ 1 \ b_0 \ k \ 2 \quad (24)$$

Trong thí nghiệm, vận tốc góc ( ) theo hướng lăn của mô hình tàu là

được đo bằng cảm biến con quay hồi chuyển. Ngoài ra, góc tiến động mong muốn được tính toán bằng Công thức.

(24) được cung cấp cho động cơ servo RC. Một ngắt hẹn giờ được yêu cầu để khớp chính xác

thời gian lấy mẫu và một chức năng bao gồm một thuật toán điều khiển được thực thi tại mỗi thời điểm lấy mẫu

được thiết lập bằng lệnh Ticker của mbed. Trong hàm, phép tính được thực hiện bằng cách sử dụng

giá trị cảm biến và mỗi biến được cập nhật. Thời gian lấy mẫu được đặt thành 1 ms.

các thí nghiệm được tiến hành trong hai điều kiện khác nhau. Thí nghiệm đầu tiên được tiến hành

trên mặt đất bằng phẳng. Nó được thực hiện với các giá trị tham số sau:

$$g_s \ 0,7342 \ 2 \ , \ s \ 0,03 \ , \ g \ 0,3 \ , \ G \ 0,6$$

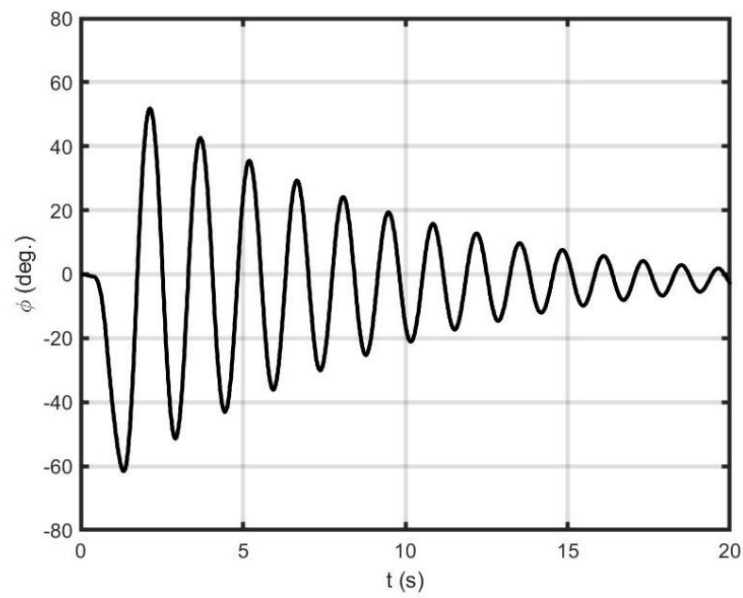
Các giá trị của  $s$  và  $s$  được đo bằng phản ứng của rung động tự do mà không có

kiểm soát. Tổng mức tăng,  $G$ , được chọn dựa trên các thử nghiệm mô hình. Hình 7 cho thấy kết quả của

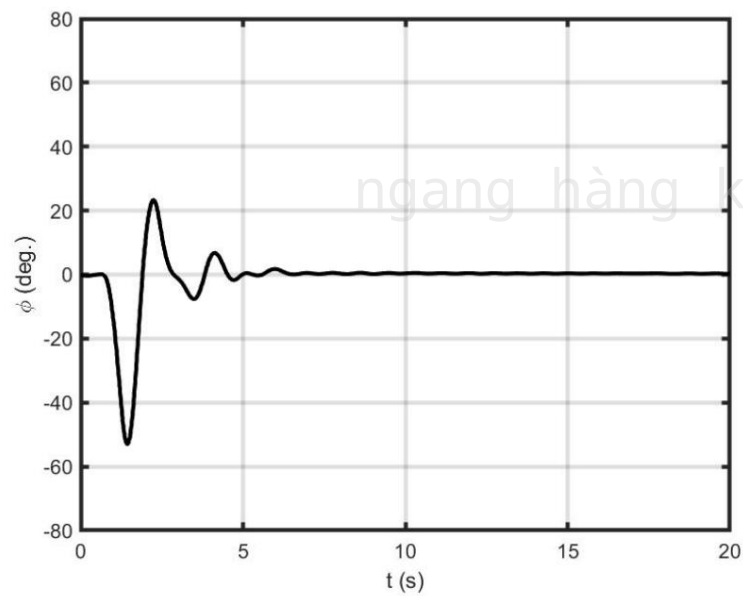
thí nghiệm lăn tự do và cho thấy rằng khi được điều khiển bằng bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động với

ARFC, hiện tượng lăn đã nhanh chóng được ngăn chặn.





(a) Không kiểm soát được



(b) Kiểm soát

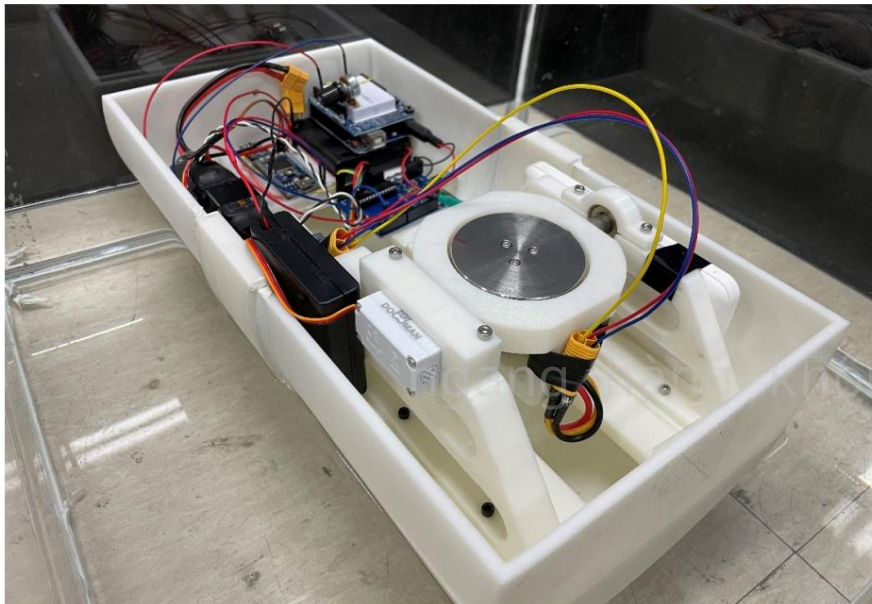
Hình 7. Phản ứng thời gian của góc nghiêng của mô hình tàu trên mặt đất bằng phẳng.

Thí nghiệm thứ hai được tiến hành trong một bể acrylic, như thể hiện trong Hình 8. Thí nghiệm được thực hiện với các giá trị tham số sau:

$$g_s = 1,0596 \cdot 2, \quad s = 0,02, \quad g = 0,3, \quad G = 0,6$$

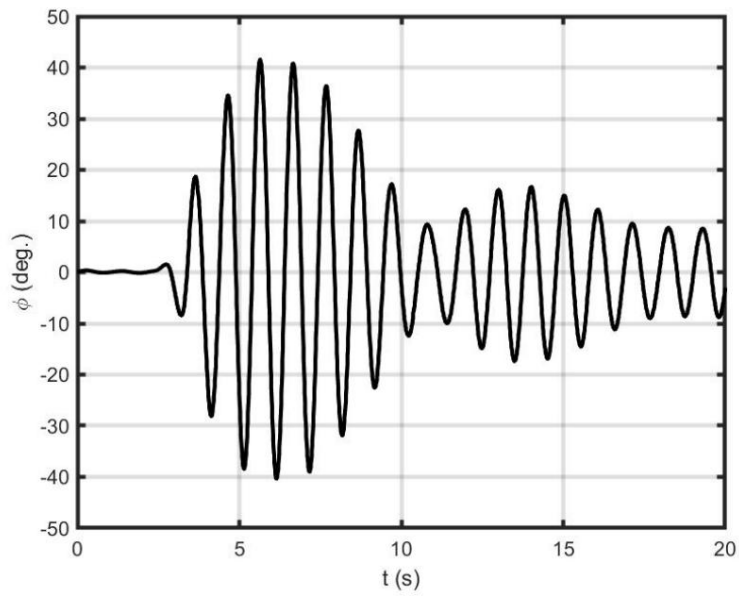
Các giá trị của  $s$  và  $s$  được đo theo cách tương tự như trong thí nghiệm trên mặt đất.

Hình 9 cho thấy kết quả của thí nghiệm và cho thấy việc sử dụng bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động và thuật toán ARFC đã ngăn chặn sự lặn của mô hình.

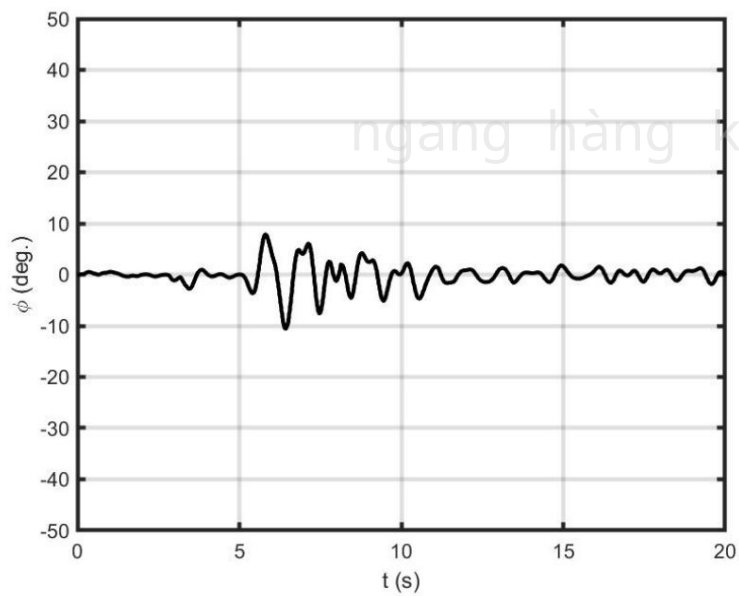


Hình 8. Bố trí thí nghiệm trên mặt nước.

Bản in thử



(a) Không kiểm soát được



(b) Kiểm soát

Hình 9. Phản ứng thời gian của góc nghiêng của mô hình tàu trên mặt nước.

## 5. Thảo luận và Kết luận

Trong nghiên cứu này, một bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động được coi là một phương pháp để ngăn chặn sự lăn chuyển động của một con tàu, và một thuật toán điều khiển mới đã được phát triển. Đầu tiên, các phương trình chuyển động của các tàu có bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động và chủ động đã được phân tích về mặt lý thuyết và tính hợp lệ của hệ thống kiểm soát được đề xuất đã được xác nhận thông qua tính toán số. Trong khi bộ ổn định con quay hồi chuyển thụ động truyền thống tăng độ cứng để chịu được sự lăn, con quay hồi chuyển chủ động bộ ổn định và thuật toán điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu này có thể đạt được sự giảm chấn chủ động, do đó có thể có hiệu quả ngăn chặn biên độ lăn cộng hưởng.

Để chứng minh tính hiệu quả của bộ ổn định con quay hồi chuyển chủ động và thuật toán điều khiển được chứng minh thông qua tính toán số, thí nghiệm được tiến hành bằng cách xây dựng một mô hình tàu, tác dụng lực bên ngoài và đo góc lăn của mô hình. Thực nghiệm kết quả cho thấy thuật toán và hệ thống điều khiển được đề xuất có hiệu quả ngay cả đối với các hệ thống phức tạp nhiễu loạn bên ngoài.

Bởi vì góc tiến động được điều khiển chính xác bởi động cơ servo, bộ điều khiển thuật toán tạo ra góc tiến động mong muốn và bộ điều khiển servomotor thực hiện theo dõi góc chính xác bằng bộ điều khiển PID bên trong. Thuật toán điều khiển mới trực tiếp sử dụng tốc độ góc thay vì độ dịch chuyển góc ước tính gián tiếp, do đó nó loại bỏ nhu cầu phải có được độ dịch chuyển góc thông qua đầu ra của máy đo gia tốc và lọc. Thuật toán điều khiển ổn định con quay hồi chuyển chủ động được đề xuất đủ đơn giản để có thể được thực hiện bằng cách sử dụng vi điều khiển.

Thuật toán điều khiển được đề xuất cho thấy khả năng sử dụng rôto nhỏ hơn với tốc độ chậm hơn tốc độ quay và hiệu quả về chi phí. Cả lý thuyết và thực nghiệm đều chứng minh rằng thuật toán và hệ thống điều khiển được đề xuất có thể ngăn chặn hiệu quả sự lắc lư của con tàu

ngư ời mẫu.

Đóng góp của tác giả

Bài hát Ki-Seok: Phương pháp luận, Phần mềm, Xác thực, Phân tích chính thức, Điều tra.

Soo-Min Kim: Xác thực, Phân tích chính thức.

Moon K. Kwak: Khái niệm hóa, Giám sát, Viết - bản thảo gốc

Weidong Zhu: Viết - phê bình và chỉnh sửa.

Tài trợ

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi MOTIE (Bộ Thương mại, Công nghiệp và Năng lượng) tại Hàn Quốc, theo Chương trình Bồi dưỡng Tài năng Toàn cầu cho Tăng trưởng Sáng tạo (P0017307) được giám sát bởi Viện Phát triển Công nghệ Hàn Quốc (KIAT)

Tài liệu tham khảo

Chalmers, TW, 1931. Ổn định tự động tàu thủy. Chapman và Hall, London.

Fanson, JL, Caughey, TK, 1990. Kiểm soát phản hồi vị trí tích cực cho không gian lớn

Cấu trúc. AIAA J. 28 (4), 717-724. <https://doi.org/10.2514/3.10451>

Harris, CM, Piersol, AG, 2002. Sổ tay chấn động và rung động của Harris, ấn bản thứ năm. McGraw-

Hill, New York, trang 6.26-6.27.

Jones, R., 1967. Bộ hấp thụ rung động con quay hồi chuyển. ASME. J. Ind. 89(4), 706-712.

<https://doi.org/10.1115/1.3610140>.

Lewis, EV, 1989. Nguyên tắc kiến trúc hải quân: Tập 1 - Chuyển động trong sóng và

Khả năng kiểm soát. Hiệp hội Kiến trúc Hải quân và Kỹ sư Hàng hải, Jersey City, NJ.

Manmathakrishnan, P., Pannerselvam, R., 2021. Nghiên cứu điều khiển chuyển động của xà lan gắn trên

Tuabin gió động ngoài khơi sử dụng bộ ổn định con quay hồi chuyển. Kỹ thuật Đại dư ứng 237.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109578>.

Perez, T., 2005. Kiểm soát chuyển động của tàu: Giữ hứ ớng và ổn định độ nghiêng bằng bánh lái

và Fins. Springer-Verlag London Limited.

Perez, T., Steinmann, PD, 2009. Phân tích kiểm soát bộ ổn định con quay hồi chuyển của tàu. Biên bản báo cáo

của Hội nghị quốc tế lần thứ 8 của IFAC về Điều khiển và Điều khiển Tàu biển.

<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.03.010>.

42(18), 310-315. <https://doi.org/10.3182/20090916-3-BR-3001.0007>.

Perez, T., Blanke, M., 2012. Kiểm soát độ nghiêng của tàu. Annu. Rev. Contr. 36(1), 129-147.

Poh, AK -B., Tang, CH -H., Kang, H. -S., Lee, K. -Q., Siow, C. -L., Malik, AMA,

Mailah, M., 2017. Ổn định chuyển động lăn bằng con quay hồi chuyển trong thân tàu biển đơn giản

Mô hình. 2017. Hội nghị quốc tế lần thứ 7 của IEEE . Công nghệ hệ thống dư ới nư ớc: Lý thuyết và

Ứng dụng. <https://doi.org/10.1109/USYS.2017.8309458>.

Seakeeper, 2022. Báo cáo thử nghiệm trên biển của Seakeeper. <https://www.seakeeper.com/performance/>

(truy cập ngày 22 tháng 9 năm 2022).

Schlick, EO, 1904a. Thiết bị giảm thiểu chuyển động dao động của tàu. Bằng sáng chế Hoa Kỳ

769, 493.

Schlick, EO, 1904b. Hiệu ứng con quay hồi chuyển của bánh đà trên tàu. Trans. Inst. Nav.

Kiến trúc sư. 23(1), 117-134.

Sperry, EA, 1915. Con quay hồi chuyển của tàu, Bảng sáng chế Hoa Kỳ 1.150.311.

Townsend, NC, Murphy, AJ, Sheno, RA, 2007. Một hệ thống ổn định con quay hồi chuyển chủ động mới cho

kiểm soát hành trình của phương tiện thủy. Kỹ thuật đại dương 34(11-12), 1607-1617.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.11.004>.

Đại dương. Kỹ thuật 39, 243-255. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2254591>.  
Townsend, NC, Sheno, RA, 2014. Chiến lược kiểm soát cho bộ ổn định con quay hồi chuyển hàng hải. IEEE J.

đã đư

Takeuchi, H., Maeda, S., Umemura, K., 2011. Phát triển con quay chống lặn

375T (Bộ ổn định lặn cho du thuyền) sử dụng công nghệ kiểm soát không gian. Mitsubishi Heavy

Ind. Tech. Rev. 48(4), 70-75.

Tustin, A., 1947. Một phương pháp phân tích hành vi của hệ thống tuyến tính theo chuỗi thời gian.

J. Inst. Electr. Eng. - Phần IIA: Bộ điều chỉnh tự động và cơ chế servo. 94(1), 130-

142. <https://doi.org/10.1049/ji-2a.1947.0020>.

Khoa học Xã hội, 195, 2306-2315. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.182>.  
Ünker, F., Çuvalcı, O., 2015. Kiểm soát rung động của cột băng con quay hồi chuyển. Procedia -

ngang hàng không

Ünker, F., Çuvalcı, O., 2016. Nghiên cứu thực nghiệm về bộ hấp thụ rung động con quay hồi chuyển

Về việc kiểm soát độ rung của dầm công xôn thẳng đứng. Biên bản của Hội nghị quốc tế lần thứ tư.

Dân sự. Cấu trúc. Máy móc. Anh. 78-82. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-093-4-74>.

Yang, DH, Shin, JH, Lee, HW, Kim, SK, Kwak, MK, 2017. Kiểm soát rung động chủ động

thuật toán điều khiển. J. Sound Vib. 392, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.12.036>.  
của cấu trúc băng Bộ giảm chấn khối lưu động chủ động và Phản hồi gia tốc âm đã được thực

Bản in trước