

THIẾT KẾ THIẾT BỊ ỔN ĐỊNH MẬT ĐỘ DÒNG CHO THÍ NGHIỆM “NGHIÊN CỨU SỰ HÌNH THÀNH VÀ ẢNH HƯỞNG CỦA LỚP BÁM CẶN ĐẾN SỰ BẢO VỆ ĂN MÒN PHÂN CỰC ANODE BẰNG DÒNG ĐIỆN NGOÀI”

TS Lê Công Danh^{1*}, Đào Ngọc Lâm²

¹Khoa Tăng thiết giáp/Trường Sĩ quan KTQS

²Tiểu đoàn 5/Trường Sĩ quan KTQS

Tóm tắt: Hiện tượng lắng cặn và ảnh hưởng của nó đến sự phân cực cathode dưới tác dụng của dòng điện ngoài là hiện tượng chưa được nghiên cứu sâu do sự thay đổi thường xuyên và liên tục dưới ảnh hưởng của các yếu tố từ môi trường như nồng độ muối biển, nhiệt độ, áp suất. Chế tạo một thiết bị giúp ổn định mật độ dòng điện nhằm khảo sát sự ảnh hưởng của sự lắng cặn đến quá trình bảo vệ ăn mòn phân cực bằng dòng điện ngoài là việc cần thiết nhằm xác định mức độ hiệu quả của hệ thống phân cực cathode và đưa ra quy trình kỹ thuật cụ thể cho hệ thống này trong việc bảo vệ các thiết bị có kết cấu thép ở các cảng và công trình biển. Bài báo cung cấp những kiến thức cơ bản về hiện tượng lắng cặn, ảnh hưởng của nó đến sự phân cực cathode, ảnh hưởng của dòng bảo vệ đến sự hình thành lớp bám cặn để từ đó đề xuất phương án thiết kế thiết bị phục vụ thí nghiệm nghiên cứu sự hình thành và ảnh hưởng của lớp bám cặn đến sự bảo vệ ăn mòn phân cực Anode bằng dòng điện ngoài.

Từ khóa: Hệ thống phân cực cathode, thiết bị ổn định mật độ dòng, ăn mòn điện hóa, lắng cặn, dòng điện ngoài, bộ lọc Kalman, cảm biến dòng điện.

1. Giới thiệu

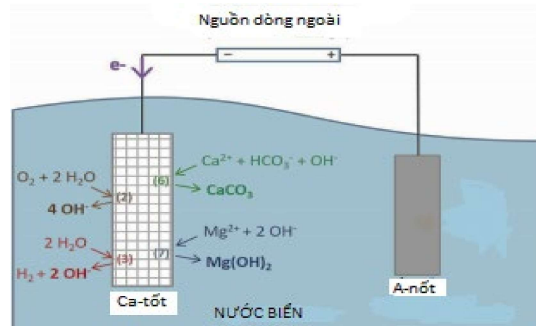
Cơ sở lý thuyết về bảo vệ điện hóa bằng phân cực cathode được nghiên cứu và đưa vào thực nghiệm bởi Davy H. vào thế kỷ XIX. Lý thuyết hoàn chỉnh của phương pháp này được công nhận vào thập niên 1930, trong đó bổ sung việc sử dụng dòng điện ngoài nhằm phân cực và tạo các phản ứng khử tại cathode và oxi hóa tại anode như một phương pháp bảo vệ điện hóa [1]. Ngoài các nguyên nhân do bản chất anode, sự phân cực nhanh tạo màng bám cặn là sản phẩm phụ không thể tránh khỏi của quá trình phân cực cathode do các chất có trong nước biển tạo kết tủa (kết tủa của canxi và magie trên bề mặt điện cực cathode [2] với thành phần bám cặn là calcium carbonate CaCO_3 và magnesium hydroxide $\text{Mg}(\text{OH})_2$). Tính chất của lớp bám cặn nói trên phụ thuộc vào: vật liệu nền, thế điện cực, nhiệt độ môi trường, độ mặn nước biển, nồng độ oxy hòa tan và áp suất thủy tĩnh [3]. Nguyên nhân xảy ra kết tủa của các hợp chất bám cặn do độ pH tăng cao cục bộ tại bề mặt điện cực xảy ra trong các quá trình điện hóa. Đây là hiện tượng ảnh hưởng đến hiệu quả hoạt động của hệ thống phân cực cathode.

Hiện nay, phương pháp phân cực cathode bằng dòng điện ngoài ứng dụng trong bảo vệ

ăn mòn cho các kết cấu thép của cảng biển và công trình biển tuân theo yêu cầu kỹ thuật quy định trong TCVN 10264:2014 [4], tuy nhiên chưa thấy tiêu chuẩn khi xét đến hiện tượng lắng cặn và tác động của nó khi phân cực cathode. Thiết bị ổn định mật độ dòng được chế tạo nhằm phục vụ cho bài toán xác định sự ảnh hưởng của lớp bám cặn đến sự bảo vệ ăn mòn phân cực anode bằng dòng điện ngoài cố định.

2. Cơ sở lý thuyết hiện tượng lắng cặn và ảnh hưởng của nó đến sự phân cực cathode

2.1. Nguyên nhân, điều kiện hình thành bám cặn khi phân cực cathode trong nước biển



Hình 1. Các phản ứng khử và kết tủa tại bề mặt cathode trong nước biển

Bám cặn là sản phẩm phụ của phản ứng điện hóa xảy ra trên bề mặt điện cực phụ thuộc

vào thành phần các chất có trong môi trường điện ly và vật liệu của chính điện cực đó. trong môi trường nước biển với độ pH ≥ 7 , tại cathode xảy ra phản ứng khử với tính chọn lọc và thứ tự ưu tiên chất bị khử phụ thuộc vào thế điện cực cathode

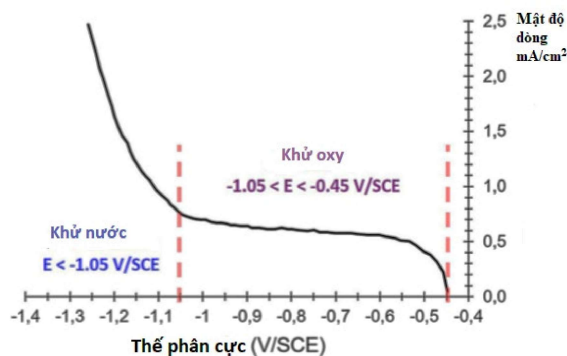
Các phản ứng khử và tạo kết tủa trong môi trường có độ pH cao tại bề mặt cathode được mô tả trong Hình 1.

2.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến thành phần, tính chất của lớp màng bám cận.

Sự phụ thuộc của các quá trình điện hóa tại bề mặt điện cực vào thế phân cực, đặc điểm, sản phẩm của các quá trình này được tổng hợp trong Hình 2 và Bảng 1. Sự hình thành magnesium hydroxide trong các điều kiện nói trên chỉ dẫn đến sản phẩm ở dạng brucit keo và xốp, kết tủa còn lại, calcium carbonate, tồn tại ở 3 dạng gồm tinh thể khan (calcit, aragonit, vaterite), tinh thể ngậm nước (monohydrocalcite, ikaite) và dạng calcium carbonate không kết tinh, vô định hình kém bền [6].

Bảng 1. Tổng hợp các dạng hình thành bám cận trên điện cực thép dưới ảnh hưởng của thế phân cực trong nước biển nhân tạo theo ASTM D1141 [7]

	Khử oxygen		Khử nước	
	Thế phân cực (V/SCE)			
	<div><div></div><div>-0,7-0,9-1,1-1,3</div></div>			
Hình thức bám cận	Tăng tốc		Bị cản trở bởi sự tạo khí hydrogen	
	<div><div></div></div>		<div><div></div></div>	
Mật độ dòng	Thấp	Rất thấp	Cao	
Cách thức hình thành	Bám từng phần	Bám dày đặc	Bám dày đặc nhưng có nứt gãy	
Dạng tinh thể chính	Vaterite + Aragonite	Aragonite	Aragonite + Brucit	Brucit



Hình 2. Đường cong phân cực trong vùng cathode của bề mặt thép trong nước biển nhân tạo theo ASTM D114 [7]

2.3. Thành phần của lớp bám cận

Nghiên cứu cấu trúc tinh thể cho thấy sự tạo brucit này là sự hấp phụ trên mặt năng lượng bề mặt cao và ức chế sự phát triển của calcit và đẩy mạnh sự phát triển tinh thể aragonite, thêm vào đó, hợp chất của magnesium có tính bám dính kém và được cải thiện khi cấu trúc tinh thể mà nó hấp phụ vào là aragonite thay vì calcit [7]. Do đó sự lựa chọn nghiêng về sự có mặt của brucit và aragonite là một sự kết hợp đem đến vai trò chống ăn mòn cho lớp bám cận tốt hơn các sự kết hợp còn lại.

2.4. Ảnh hưởng của sự phân cực và lớp bám cận đến hiện tượng ăn mòn và bám bẩn sinh học trong nước biển

Hiện tượng ăn mòn và bám bẩn sinh học trong nước biển bị ảnh hưởng bởi các điều kiện phân cực. Cụ thể, trong điều kiện phân cực gián đoạn: lớp màng bám cận chứa hợp chất của calcium và magnesium càng kín khít thì càng cản trở sự có mặt của oxygen tại bề mặt kim loại gây ra phản ứng ăn mòn. Do đó sự phân cực tạo lớp màng kín khít là một lớp bảo vệ chống ăn mòn theo nguyên lý rào cản. ngược lại, trong điều kiện phân cực liên tục: lớp bám cận tiếp tục duy trì phản ứng khử tại bề mặt cathode (khử oxygen) nhờ cấu trúc xốp. Lớp màng làm tăng điện trở điện cực và giảm dòng trao đổi giữa các điện cực [1].

Lớp màng hình thành trên bề mặt điện cực

là màng tổng hợp của biofilms và bám. Ngoài hướng nghiên cứu về sự đa dạng sinh học như trên, sự khác biệt khi có bám bản sinh học tích lũy trong môi trường tự nhiên và môi trường trong phòng thí nghiệm ảnh hưởng lớn đến kết quả của sự phân cực và chỉ thể hiện rõ sau nhiều tháng thử nghiệm.

Ở cấp độ macro, bám bản sinh học chỉ có thể ưu tiên bám trực tiếp vào nền thép đã hình thành lớp biofilms, sự bám bản macro bị sản phẩm kết tủa trên bề mặt điện cực hoàn toàn chiếm ưu thế [6]. Vai trò của bám bản sinh học, đặc biệt là hệ macro, được nhấn mạnh khi sự có mặt của chúng gây nên sự sụt giảm thế phân cực và hạn chế dòng trao đổi giữa các điện cực, đồng thời làm giảm sự ổn định của màng bám cận.

2.5. Ảnh hưởng của dòng bảo vệ đến sự hình thành lớp bám cận.

Mô hình phân cực được xây dựng trên cơ sở duy trì nguồn dòng không đổi hoặc duy trì nguồn thế không đổi. Mô hình này nghiên cứu sự tác động của các yếu tố môi trường đến sự tạo màng bám cận, có thể đánh giá hiệu quả bảo vệ điện hóa của màng bám cận khỏi sự ăn mòn. Việc theo dõi các yếu tố của môi trường điện ly được thực hiện song song với duy trì mô hình nhằm cung cấp dữ liệu mô tả điều kiện hoạt động của hệ, kỹ thuật được sử dụng là ghi dữ liệu theo thời gian thực. Khi phân cực cathode, hiện tượng hình thành bám cận là hiện tượng kết tủa của các hợp chất chứa calcium và magnesium trong nước biển. Tuy nhiên với 2 giai đoạn bám cận trong phân cực nhanh và phân cực duy trì thì động học hình thành trong mỗi giai đoạn là khác nhau do các điều kiện môi trường thay đổi. Động học hình thành lớp bám cận trong phân cực nhanh có vai trò quan trọng vì nó quyết định độ kín khít và độ bền của lớp bám cận nền ban đầu trong nước biển.

Mục tiêu nghiên cứu động học sự hình thành lớp bám cận này để xem xét mối tương quan giữa điều kiện vận hành của nguồn phân cực dưới ảnh hưởng của điều kiện môi trường

biển vùng khí hậu nhiệt đới, với thành phần, độ bền cũng như mật độ của lớp bám cận đó, từ đó đánh giá hiệu quả phân cực.

Như vậy, hiệu quả bảo vệ chống ăn mòn của phân cực cathode được nghiên cứu không chỉ phụ thuộc vào điều kiện môi trường và điều kiện vận hành mà còn phụ thuộc vào sản phẩm tạo ra do quá trình phân cực là lớp bám cận.

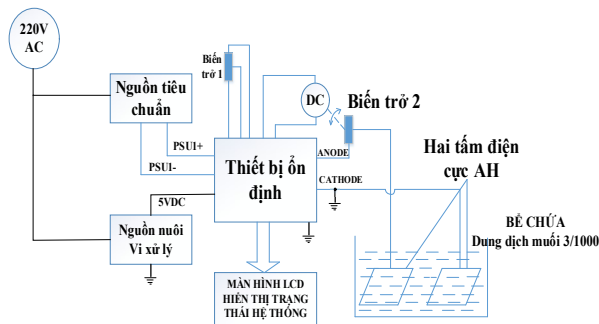
3. Phân tích và thiết kế bộ phận điều khiển của thiết bị

Từ các phân tích cơ sở lý thuyết về: “Hiệu quả bảo vệ ăn mòn của lớp bám cận khi phân cực cathode bằng dòng điện ngoài”. Để đạt được mục đích ổn định mật độ dòng nhằm cung cấp cho các tấm điện cực phục vụ cho việc thiết lập môi trường thí nghiệm nhóm tác giả sử dụng một biến trở mắc nối tiếp với tải. Sơ đồ kết nối tổng quát các khối nguyên lý được thể hiện như trên Hình 3 gồm 04 khối chính gồm: 1. khối nguồn gồm khối nguồn tiêu chuẩn nhằm tạo ra điện áp chính trong khoảng từ 0V đến 1,3V cung cấp cho hai tấm điện cực và khối nguồn nuôi vi xử lý nhằm cung cấp điện áp 5V làm nguồn cấp cho vi điều khiển và một số ngoại vi trong thiết bị ổn định; 2. Khối thiết bị ổn định với vi xử lý trung tâm là vi điều khiển Atmega328p và kết nối với các thiết bị ngoại vi như: relays, biến trở điều chỉnh mục tiêu (biến trở 1 - Hình 4), màn hình hiển thị, khối mạch công suất điều khiển động cơ DC, cảm biến đo dòng INA219. Dòng điện của tải được xác định trong thời gian thực nhờ vào cảm biến INA219 là cơ sở của tín hiệu hồi tiếp nhằm phục vụ cho việc sử dụng thuật toán PI trong việc kiểm soát vị trí của biến trở. Lưu đồ thuật toán của thiết bị được thiết lập như ở Hình 6; 3. Khối bể chứa ngâm các điện cực. 4. Khối cơ điện gồm có động cơ DC và biến trở chỉnh tinh (biến trở 2 - Hình 4) nhằm thay đổi điện trở và gián tiếp làm thay đổi dòng điện cấp cho khối cuối cùng là khối bể chứa ngâm các điện cực. Giá trị của biến trở có thể được điều chỉnh bằng cách kết nối cứng núm vặn

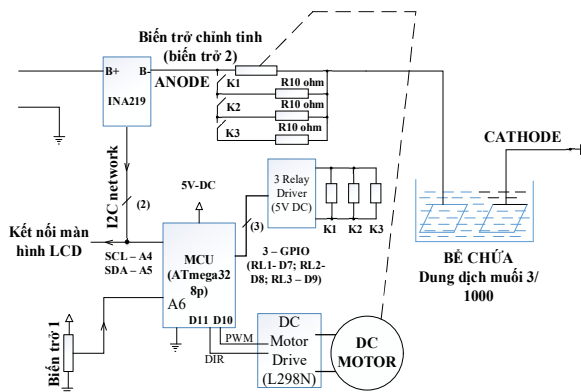
của biến trở với trục ra của động cơ điện DC có tỉ số truyền 20:1 và tốc độ định mức đầu ra của trục động cơ là 20 vòng/phút. Hình 4 là sơ đồ khối nguyên lý cụ thể của các phần tử điện - điều khiển của thiết bị ổn định và Hình 5 là sơ đồ mạch in PCB của thiết bị ổn định. Đặc tính kỹ thuật của thiết bị như trên Bảng 2.

Bảng 2. Đặc tính kỹ thuật của thiết bị

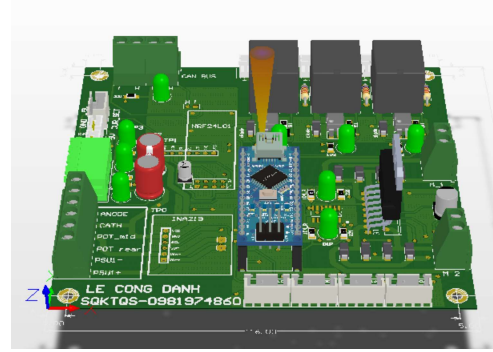
Điện áp nguồn cấp, V	220AC, 50Hz
Công suất nguồn cấp, W	150
Hiển thị	Dòng điện cài đặt và dòng điện đo
Chu kỳ lấy mẫu	100ms
Điện áp của điện cực	0 - 1,3V
Mật độ dòng điện cực	0 - 100mA
Số kênh	01



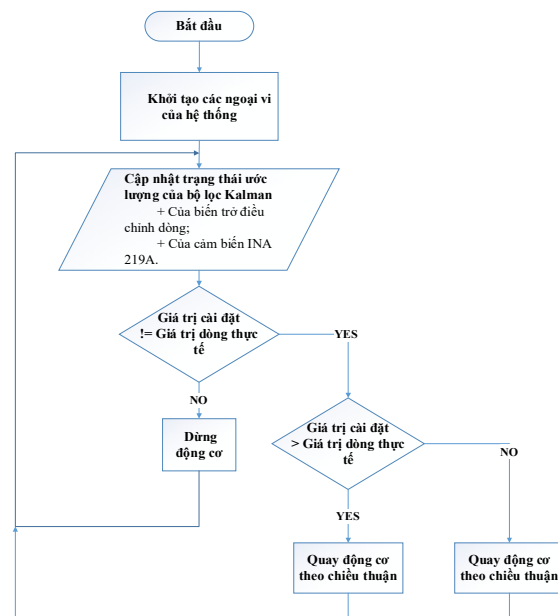
Hình 3. Sơ đồ kết nối tổng quan các khối nguyên lý của hệ thống hỗ trợ ổn định mật độ dòng.



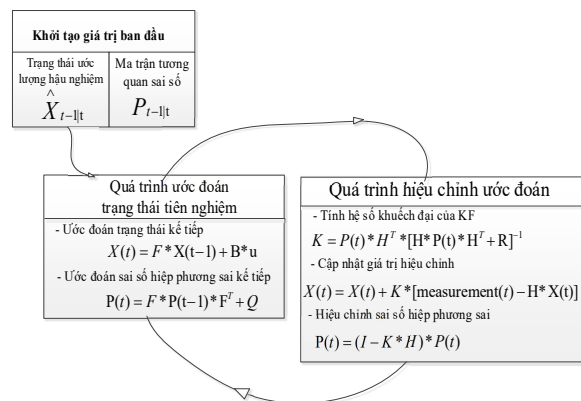
Hình 4. Sơ đồ khối nguyên lý các phần tử điện - điều khiển của khối thiết bị ổn định.



Hình 5. Thiết kế 3D sơ đồ ra chân của mạch tích hợp khối thiết bị ổn định (PCB layout).



Hình 6. Lưu đồ thuật toán của thiết bị.



Hình 7. Lưu đồ thuật toán của bộ lọc Kalman.

Ngoài ra để tăng tính chính xác của thiết bị đo, thuật toán Kalman được sử dụng nhằm

giảm sai số phép đo từ cảm biến IAN219 cũng như giá trị đọc về từ biến trở khi thiết lập mật độ dòng cần cài đặt. Lưu đồ thuật toán tổng của thiết bị và lưu đồ thuật toán của bộ lọc Kalman được trình bày chi tiết ở Hình 7, 8.

Trong đó:

F - Ma trận chuyển đổi trạng thái từ thời điểm $t-1$ sang thời điểm t ;

B - Ma trận kiểm soát đầu vào dùng cho các vector điều khiển u ;

$P(t-1)$ - Ma trận tương quan sai số hậu nghiệm;

$P(t)$ - Ma trận tương quan sai số tiên nghiệm;

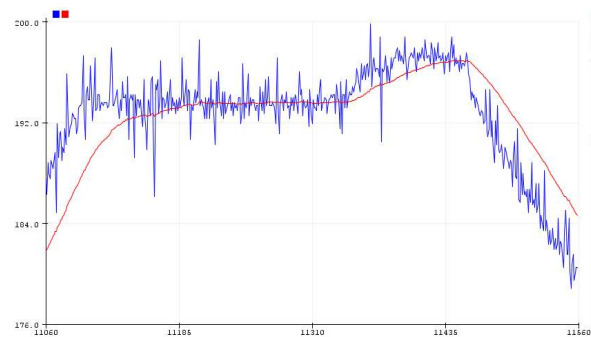
H - Ma trận quan sát, ma trận này chuyển không gian trạng thái đo đạc vào không gian trạng thái quan sát;

Q, R - Các ma trận hiệp biến (Covariance) với nhiễu quá trình w_k và nhiễu phép đo v_k trong bài toán được giả thiết là nhiễu trắng Gaussian công tính với kỳ vọng bằng 0, $w_k \sim N(0, Q_k)$, $v_k \sim N(0, R_k)$.

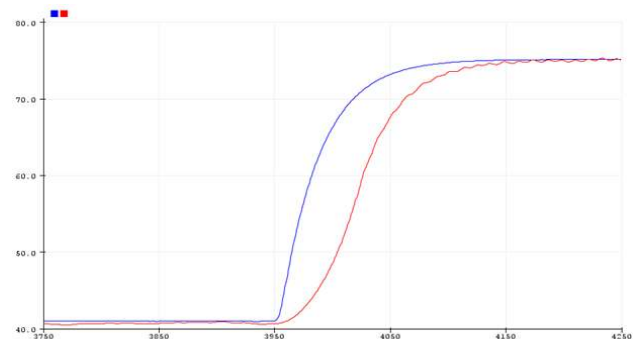
Giá trị trạng thái trong bài toán điều khiển là điện áp đầu ra của chiết áp 1 và giá trị mật độ dòng gián tiếp phụ thuộc vào vị trí của chiết áp 2 (Hình 1). Tín hiệu từ điện áp sau khi được thêm 1 lượng nhiễu trắng Gaussian (do độ chính xác không cao ở các thiết kế chiết áp hiện có trên thị trường) sẽ được lấy mẫu để đưa vào bộ lọc, khi đó tín hiệu được phân tích thông qua KF. Giả thiết các trạng thái của các chiết áp không phụ thuộc vào nhiệt độ của môi trường trong một khoảng thời gian ngắn, chỉ dùng để quan sát và không có tín hiệu điều khiển đặt lên chiết áp nên ta có ma trận chuyển đổi trạng thái $F = I$, ma trận kiểm soát đầu vào $B = 0$ và ma trận quan sát $H = I$. Trên thực tế giá trị R, Q có thay đổi nhưng không đáng kể nên trong bài toán này ta xem như không đổi và được tính từ thực nghiệm đo lường bắt đầu bằng việc cho phương sai mô hình một giá trị rất nhỏ $Q = 1.e^{-9}$.

4. Kết quả thực nghiệm

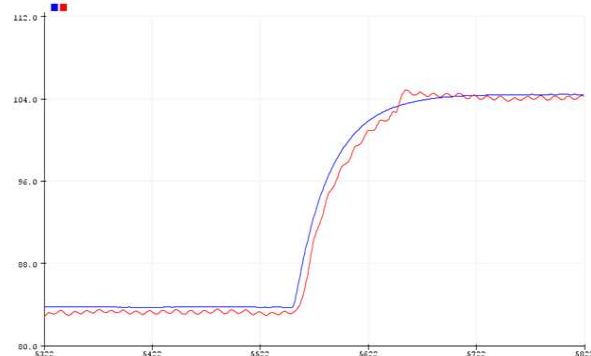
Căn cứ vào giá trị dòng cài đặt, một số kết quả về hiệu quả hoạt động của thiết bị được xác lập thông qua các đồ thị (Hình 9 - 13). theo đó, với bộ tham số Kalman với giá trị phương sai được lựa chọn thì các nhiễu của tín hiệu đo hầu như bị triệt tiêu (Hình 9). Với đường màu xanh là giá trị thực của cảm biến và đường màu đỏ là giá trị sau khi xử lý qua bộ lọc Kalman.



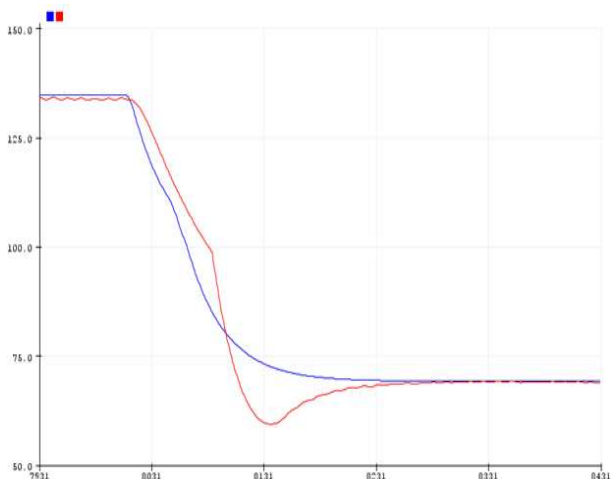
Hình 8. Khử nhiễu sai số phép đo dòng điện sử dụng bộ lọc Kalman



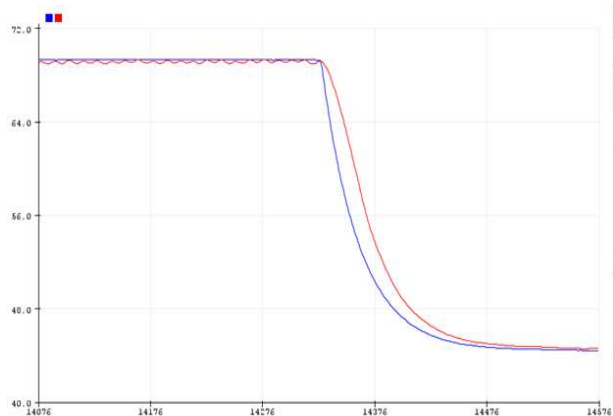
Hình 9. Quá trình quá độ điều chỉnh tăng mật độ dòng từ 40mA lên 75 mA



Hình 10. Quá trình quá độ điều chỉnh tăng mật độ dòng từ 80mA lên 104 mA



Hình 11. Quá trình quá độ điều chỉnh giảm mật độ dòng từ 130 mA xuống 74 mA



Hình 12. Quá trình quá độ điều chỉnh giảm mật độ dòng từ 70 mA xuống 45 mA

Việc điều khiển mật độ dòng điện sử dụng bộ tham số PI với $K_p = 1,267$, $K_i = 2,26$ bằng phương pháp thử - sai cho kết quả tốt với độ vọt lố nhỏ hơn 5% và thời gian xác lập nhỏ hơn 100ms (Hình 8 - 12). Việc kết hợp việc phối ghép/tách điện trở cho phép tăng tốc thời gian điều khiển và dải điều khiển lên toàn dải (Hình 9, 10). Với đường màu xanh là giá trị đặt điều khiển và đường màu đỏ là giá trị dòng sau khi dùng bộ điều khiển PI (giá trị của cảm biến đo dòng cũng được xử lý với bộ lọc Kalman).

5. Kết luận và kiến nghị

Trên cơ sở phân tích về hiện tượng lắng cặn, ảnh hưởng của nó đến sự phân cực cathode, ảnh hưởng của dòng bảo vệ đến sự hình thành lớp bám cặn tác giả bài viết đã đề xuất phương án thiết kế thiết bị phục vụ thí nghiệm nghiên cứu sự hình thành và ảnh hưởng của lớp bám cặn đến sự bảo vệ ăn mòn phân cực anode bằng dòng điện ngoài. Thiết bị ổn định mật độ dòng được chế tạo sử dụng vi điều khiển, cảm biến đo dòng, thuật toán PI và Kalman nhằm tăng độ chính xác của phép đo và tối ưu quá trình điều khiển. Thiết bị thí nghiệm này đã được áp dụng tại phòng thí nghiệm điện – điện tử; Khoa KTCS và phòng thiết bị điện – thiết bị đặc biệt; Khoa TTG góp phần nâng cao chất lượng dạy và học tại Nhà trường.

Tài liệu tham khảo

- [1]. C. Carré, A. Zanibellato, M. Jeannin, R. Sabot, P. Gunkel-Grillon, A. Serres, “*Electrochemical calcareous deposition in seawater. A review*”, Environmental Chemistry Letters, 2020.
- [2]. T. Chen, A. Neville and M. Yuan, “*Calcium carbonate scale formation – assessing the initial stages of precipitation and deposition*”, Journal of petroleum science and engineering, 2005, 46: 185-194.
- [3]. W. H. Hartt, C. H. Culberson, S. W. Smith, “*Calcareous deposits on metal surfaces in seawater - a critical review*”, Corrosion, 1984, 40:609–618.
- [4]. TCVN 10264:2014, “*Bảo vệ ca-tốt cho các kết cấu thép của cảng biển và công trình biển - Yêu cầu thiết kế, 2014*”.
- [5]. Stumm W, Morgan J., “*Aquatic chemistry. Chemical equilibria and rates in natural water*”, J. Wiley and Sons. Inc., 1996.
- [6]. J. M. Park, M. H. Lee, S. H. Lee, “*Characteristics and Crystal Structure of Calcareous Deposit Films Formed by Electrodeposition Process in Artificial and Natural Seawater*”, Coatings, 2021, 11, (359):1-12.
- [7]. ASTM D1141 – 98(2021), “*Standard Practice for Preparation of Substitute Ocean Water*”, 2021.

DESIGN CONTROL SYSTEM FOR THE POSITION TRACKING PROBLEM OF A MOBILE ROBOT IN AUTONOMOUS DOCKING

Abstract: The deposition phenomenon and its influence on cathode polarization when using external current is a phenomenon that has not been studied deeply because of frequent and continuous changes under the influence of environmental factors such as concentration Sea salt, temperature, pressure... It is necessary to fabricate a device to help stabilize the current density in order to investigate the influence of sedimentation on the polarization corrosion protection process by external current. aims to determine the effectiveness of cathode polarization systems and provide specific technical procedures for this system in the protection of structural steel equipment in ports and marine structures. The article provides basic knowledge about deposition phenomenon, its effect on cathode polarization, effect of protection current on formation of deposit layer, from which to propose a design plan for restoration equipment. Experimental service to study the formation and effect of the deposit layer on the anode polarization corrosion protection by external current.

Key words: Current density stabilizer, electrochemical corrosion, deposition, external current, Kalman filter, current sensor.

* Tác giả liên hệ: Lê Công Danh, email: danh_lecong150287@mail.ru, tel: 0981.974.860.