

Hiệu chỉnh sai số do độ lệch tâm và độ nghiêng của đĩa chia độ bằng phương pháp nhiều đầu đọc

Error Correction Caused by the Deviation of the Center and the Swash of the Divided Disk Using Multihead Method

Bùi Quốc Thu^{1,2}, Nguyễn Văn Vinh^{1*}, Vũ Khánh Xuân²

¹ Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

² Viện Đo lường Việt Nam (Vietnam Metrology Institute-VMI)

Đến Tòa soạn: 22-11-2016; chấp nhận đăng: 5-9-2017

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp hiệu chỉnh sai số do độ lệch tâm và độ nghiêng của đĩa chia độ trong thiết bị tạo góc chuẩn toàn vòng bằng phương pháp nhiều đầu đọc. Thiết bị này bao gồm đĩa mã hóa góc quay kiểu gia số có 10800 vạch chia, trên thiết bị bố trí 6 đầu đọc chia thành hai nhóm một nhóm gồm 4 đầu đọc cách đều một góc 90° nhóm còn lại gồm 3 đầu đọc cách đều 120°, được tích hợp bộ nội suy 2¹⁰ bit. Với việc sử dụng phương pháp trung bình phân đoạn bằng nhau, từ dữ liệu thu được trên các đầu đọc cho phép hiệu chỉnh sai số do lệch tâm và độ nghiêng của đĩa chia độ. Kết quả là sai số của thiết bị đạt ±0,3t đáp ứng được yêu cầu làm chuẩn đo lường quốc gia lĩnh vực góc.

Từ khóa: Chuẩn góc, phương pháp trung bình phân đoạn bằng nhau, đường cong hiệu chỉnh.

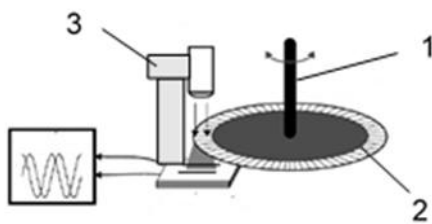
Abstract

The article presents a method to correct the error caused by the deviation of the center, the swash of the divided disk of the instrument that created full circle standard angles using multihead method. This instrument includes incremental coding divided disk with 10800 graduations, on which installed 6 sensor heads that is arranged into 2 arrays: one is 90° interval of 4 heads and another is 120° interval of 3 heads, which integrates the 2¹⁰ bit interpolation. With the use the equal division average method (EDA), from the data obtained on the head, the instrument can correct the error caused by the eccentricity and swash of the divided disk. The achieved result is the error of the instrument being ± 0.3t, meet the requirements of the national metrology standard of the angular field.

Keywords: Angle standards, EDA method, Curve calibration.

1. Đặt vấn đề

Một phương pháp tốt nhất được sử dụng để tạo ra chuẩn góc là dùng đĩa mã hóa được khắc vạch đều nhau kiểu gia số với đầu đọc quang học (Rotary Encoder - RE).



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của RE gia số

1: trục quay, 2: đĩa chia độ, 3: đầu đọc

Nguyên lý cấu tạo và hoạt động của RE như hình 1, khi quay trục 1, đĩa chia độ 2 gắn với trục sẽ quay

theo, đầu đọc 3 sẽ đọc liên tục các vạch chia đi qua, độ lớn góc quay của trục được xác định bằng số lượng các vạch chia đọc được và đó là độ lớn góc chuẩn cần tạo ra [1]. Sai số tạo góc của RE gồm hai loại chính: loại sai số góc cục bộ xuất hiện trong phạm vi một chu kỳ vạch chia do ảnh hưởng của độ chính xác, chất lượng vạch chia và xử lý tín hiệu của đầu đọc; loại sai số toàn vòng xuất hiện do chuyển động quay của đĩa chia độ. Loại sai số toàn vòng này gây sai số lớn do độ không ổn định tâm quay gồm độ nghiêng và độ lệch tâm [2,3]. Để giảm sai số toàn vòng, thiết bị tạo góc toàn vòng sử dụng ổ đệm khí quay để đảm bảo ổn định tâm quay khi hoạt động, tuy nhiên khi chế tạo, lắp đặt vẫn tồn tại độ lệch tâm của đĩa chia độ với tâm trục quay và độ nghiêng của đĩa chia độ so với thường sai số này không đáp ứng sai số của chuẩn góc nhỏ hơn 0,5". Để giải quyết vấn đề khó khăn này một phương pháp có thể được sử dụng là lắp nhiều đầu đọc để hiệu chỉnh sai số toàn vòng.

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 913021949

Email: thubq@vmi.gov.vn

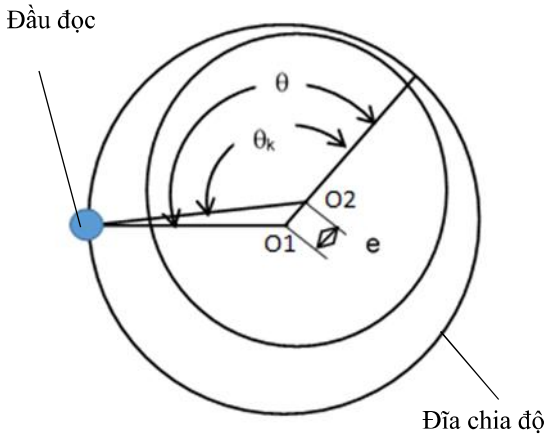
1.1 Sai số do lệch tâm [2,3]

Sai số do chế tạo và lắp đặt làm cho tâm của trục quay O2 và tâm đĩa chia độ O1 không trùng nhau hình 2

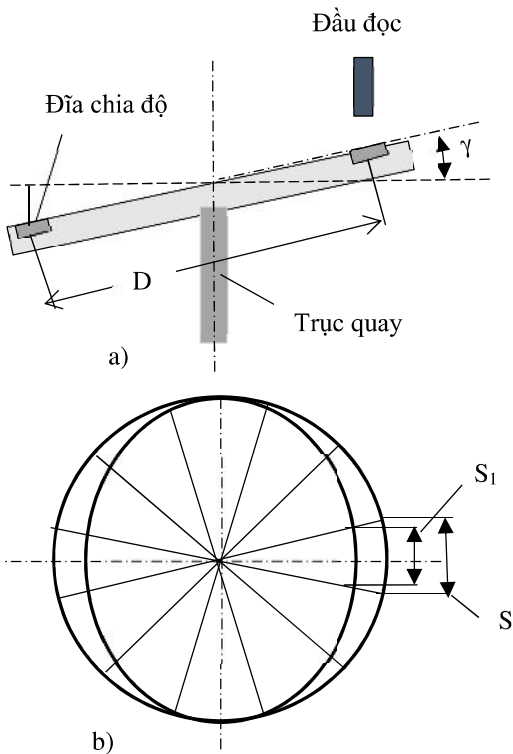
Sai số do lệch tâm $\theta_e = \theta_k - \theta$ được xác định:

$$\varphi_e = \frac{2e \sin \theta_k}{D} \quad (1)$$

Trong đó: e khoảng cách lệch tâm O1,O2; θ : giá trị góc quay của trục ; θ_k : giá trị góc đo được; D: đường kính đĩa chia độ [3]



Hình 2. Sai số do lệch tâm



Hình 3. a) Độ nghiêng chia độ,
b) sai số do ảnh hưởng độ nghiêng

1.2 Sai số do độ nghiêng của đĩa chia độ

Sai số do ảnh hưởng độ nghiêng của đĩa chia độ khi đĩa chia độ nghiêng so với trục quay một góc γ hình 3a

vòng tròn khắc độ sẽ bị biến dạng, khoảng cách giữa các vạch chia thay đổi dẫn đến sai số góc hình 3b. Sai số góc này phụ thuộc đường kính đĩa chia độ góc nghiêng γ .

Sai số góc θ_M lớn nhất do độ nghiêng đĩa chia độ được xác định

$$\varphi_M = S - S_1 \quad (2)$$

Trong đó: S, S1 Khoảng cách lớn nhất, nhỏ nhất giữa hai vạch chia hình 3b.

$$S = \frac{D}{2} \times \frac{2\phi}{n}, S_1 = \frac{D}{2} \cos \varphi \times \frac{2\phi}{n} \quad (3)$$

Trong đó: n số vạch chia của đĩa chia độ

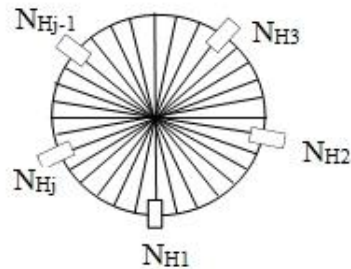
Từ 2 và 3 ta có

$$\varphi_M = \frac{2\phi}{n} \frac{D}{2} (1 - \cos \varphi) \quad (4)$$

Từ công thức (1) và (4) nhận thấy sai số toàn vòng có tính chất tuần hoàn, sai số do độ lệch tâm có chu kỳ bằng chu kỳ quay của đĩa chia độ, sai số do độ nghiêng có chu kỳ bằng nửa chu kỳ quay của đĩa chia độ. Hiệu chỉnh loại sai số này được thực hiện bằng cách sử dụng nhiều đầu đọc, xác định sai số do lệch tâm θ_e và độ nghiêng đĩa chia độ θ_M .

2. Phương pháp EDA để xây dựng đường cong hiệu chỉnh của thiết bị [4,5,6]

Phương pháp EDA (The Equal Division Average - EDA) là phương pháp sử dụng nhiều đầu đọc, bố trí cách đều nhau như trên sơ đồ nguyên lý (hình 4). Sai số của vạch chia thứ i so với giá trị danh nghĩa ký hiệu là a_i , khi đầu đọc thứ nhất đang đọc vạch thứ i đầu đọc thứ j sẽ đọc vạch chia thứ $i+(j-1)N_G/N_H$ hay là đầu đọc thứ j phát hiện vạch chia bị cách với vị trí vạch chia thứ i một đoạn là $(j-1)N_G/N_H$ (góc lệch pha)



Hình 4. Nguyên lý của phương pháp EDA

trong đó: i ($i=1,2,3,\dots,N_G$) N_G số vạch chia, j ($j=1,2,3,\dots,N_H$) N_H tổng số đầu đọc. Thứ tự tín hiệu ra của mỗi đầu đọc hình 5 cho thấy khi đầu đọc đầu tiên phát hiện ra vạch thứ i tại các đầu đọc khác cũng phát hiện ra các vạch chia khác tương ứng trong cùng một thời điểm. Khi đó độ lệch của vạch chia do đầu đọc thứ j phát hiện là $H_{i,j}$ được xác định

$$H_{i,j} = a_{i+(j-1)/N_G/N_H} \quad (5)$$

Sai số góc giữa đầu đọc thứ nhất và đầu đọc thứ j ký hiệu là δ_{ij} được xác định như sau:

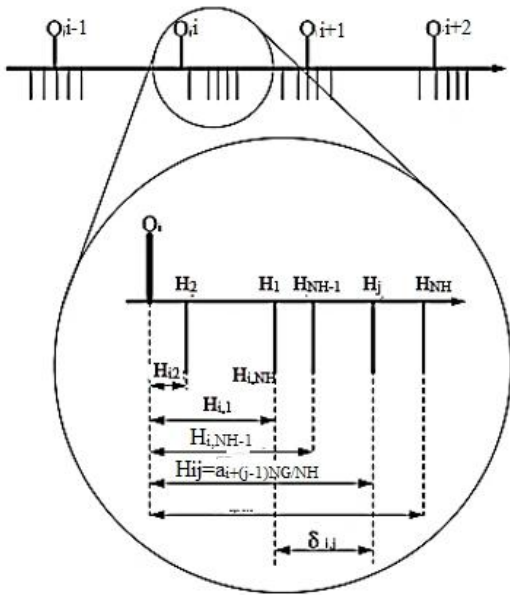
$$d_{i,j} = H_{i,1} - H_{i,j} = a_i - a_{i+(j-1)/N_G/N_H} \quad (6)$$

Sai số góc được xác định bằng giá trị a_i tại đầu đọc thứ i được trừ đi một lượng bằng trung bình cộng μ_i của tất cả các giá trị độ lệch của các đầu đọc, các đồ thị đường cong lệch pha một lượng $2\pi/N_G$. Giá trị trung bình μ_i là đường cong hiệu chuẩn của RE.

Giá trị μ_i được xác định:

$$\mu_i = \frac{1}{N_H} \sum_{j=1}^{N_H} d_{i,j} = a_i - \frac{1}{N_H} (a_i + a_{i+N_G/N_H} + a_{i+2N_G/N_H} \dots + a_{i+(j-1)/N_G/N_H}) \quad (7)$$

Nhận thấy khi tăng số lượng đầu đọc thì độ chính xác của thiết bị tăng tuy nhiên điều này cũng làm tăng kinh phí chế tạo mặt khác khi tăng quá nhiều đầu đọc dẫn đến bộ xử lý tín hiệu mất nhiều thời gian thực hiện ảnh hưởng đến quá trình xử lý tín hiệu. Do đó cần thiết tính toán số lượng, bố trí đầu đọc phù hợp sẽ giúp cho việc thiết kế, chế tạo thiết bị đạt hiệu quả



Hình 5. Thứ tự tín hiệu ra của các đầu đọc

3. Xác định mô hình chuẩn góc toàn vòng

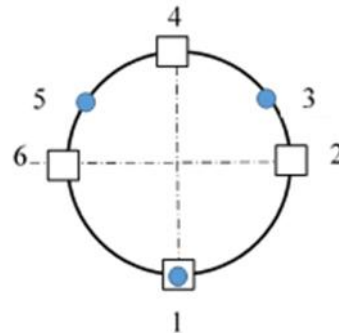
3.1 Lựa chọn sơ đồ bố trí đầu đọc

Theo nguyên lý của phương pháp EDA các đầu đọc phải được bố trí cách đều nhau trên vòng tròn khắc vạch của đĩa chia độ. Lựa chọn số lượng, sơ đồ bố trí đầu đọc phải thỏa mãn các yêu cầu sau:

- Số lượng các đầu đọc phải bao gồm số lẻ và số chẵn để đảm bảo các đầy đủ các thành phần của chuỗi Fouries

- Số lượng đầu đọc ít nhất có thể để đảm bảo hoạt động của thiết bị

Trong các đầu đọc số lẻ thì số 3 là trường hợp nhỏ nhất để có thể chia vòng thành các đoạn bằng nhau. Đối với trường hợp số đầu đọc là số chẵn, việc chọn số lượng đầu đọc tính đến khả năng bù sai số lệch tâm. Nếu chọn số lượng đầu đọc 2 khi đó đầu đọc nằm trên đường kính của vòng tròn khắc độ bù sai số lệch tâm theo một trục. Lắp đặt thêm 2 đầu đọc nằm trên đường kính vuông góc thì sai số lệch tâm được hiệu chỉnh theo hai hướng vuông góc. Vì vậy chọn số đầu đọc là 4 để đảm bảo các đầu đọc nằm đối xứng nhau qua tâm đĩa chia độ khi đó tín hiệu ra của từng cặp đầu đọc sẽ lệch pha một góc 180° giúp cho việc hiệu chỉnh sai số lệch tâm đạt hiệu quả cao.



Hình 6. Sơ đồ bố trí đầu đọc

Trên cơ sở đã phân tích như trên lựa chọn số đầu đọc phù hợp là 6 và được phân thành hai nhóm như trên hình 6, nhóm 1: bao gồm 4 đầu đọc bố trí cách đều mỗi đầu đọc cách nhau một góc 90° ; nhóm 2: bao gồm 03 đầu đọc bố trí cách đều nhau một góc 120° trong đó đầu đọc H_1 được sử dụng chung cho cả hai nhóm hình 7. Sai số góc θ được xác định bằng trung bình cộng của giá trị sai số góc θ_3 và θ_4 tính trong từng trường hợp nhóm riêng biệt [6].

Nhóm 1 bao gồm 4 đầu đọc cách đều giá trị sai lệch góc θ_4 được xác định

$$\theta_4 = H_1 - \frac{1}{4} (H_1 + H_2 + H_4 + H_6) \quad (8)$$

Nhóm 2 bao gồm 3 đầu đọc cách đều

$$\vartheta_3 = H_1 - \frac{1}{3}(H_1 + H_3 + H_5) \quad (9)$$

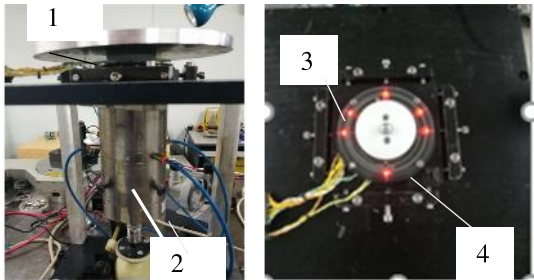
Giá trị θ được xác định:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_4 + \vartheta_3}{2} \quad (10)$$

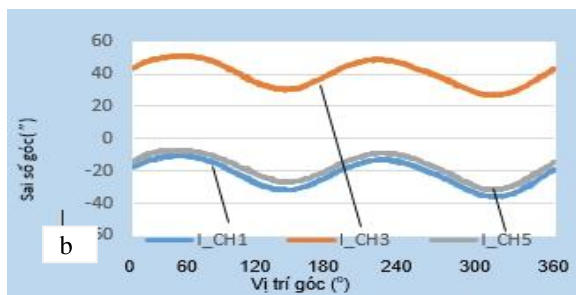
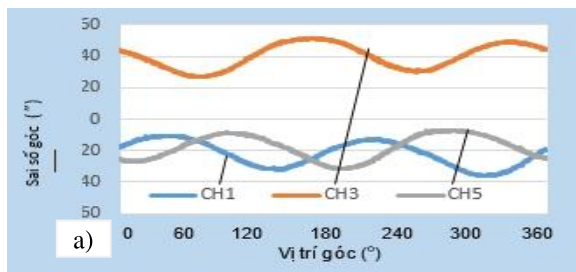
Với sơ đồ bố trí được chia thành hai nhóm hình 5 khi đó số lượng đầu đọc có thể tính là 4×3 (7 đầu đọc) do đầu đọc 1 được sử dụng chung trong cả hai nhóm, sơ đồ này có số lượng đầu đọc đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật đề ra và có số lượng đầu đọc tối thiểu.

3.2 Xây dựng thiết bị thực nghiệm

Thiết bị thực nghiệm tạo góc chuẩn toàn vòng được thiết kế sử dụng đĩa mã hóa kiểu gia số có 10800 vạch chia giá trị vạch chia là 0,02 mm, đường kính đĩa chia độ $D=68,75$ mm, độ phân giải của đĩa chia độ $120''$. Để nâng cao độ phân giải của thiết bị tích hợp thêm bộ nội suy tín hiệu 10 bit ($\times 1024$), độ phân giải thiết bị sau khi nội suy tín hiệu $0,12''$. Thiết bị tạo góc chuẩn góc toàn vòng chế tạo được thể hiện trên hình 7



Hình 7. Thiết bị tạo góc chuẩn toàn vòng: 1) Bàn đo, 2) Ổ đệm khí, 3) Đầu đọc, 4) Đĩa chia độ



Hình 8. a) Đồ thị sai số 3 đầu đọc riêng biệt, b) Đồ thị sai số trung bình cộng của 3 đầu đọc riêng lẻ

4. Kết quả thực nghiệm

4.1 Xác định đường cong hiệu chỉnh thực nghiệm

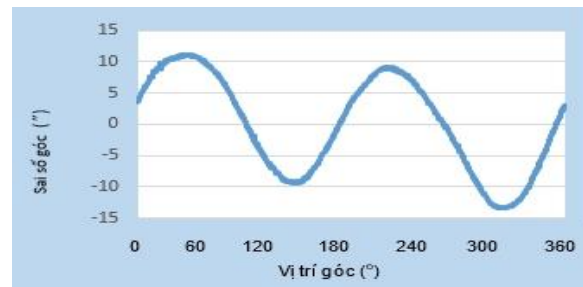
Đường cong hiệu chỉnh theo công thức (7) được xác định bằng thực nghiệm trên đồ thị thông qua dữ liệu của từng đầu đọc riêng biệt. Khi quay đĩa chia độ một vòng quay, đồ thị sai số của đầu đọc được thể hiện như trên hình 8a là đồ thị sai số của nhóm ba đầu đọc, (CH1, CH3, CH5 ký hiệu từng đầu đọc). Thực hiện dịch pha đồ thị sai số của đầu đọc CH3 và CH5 góc dịch pha 120° và 240° có đồ thị sai số tương ứng hình 8b

Đồ thị sai số của nhóm 3 đầu đọc được xác định bằng trung bình cộng của dữ liệu nhận qua từng đầu đọc sau khi dịch pha thể hiện trên hình 9.

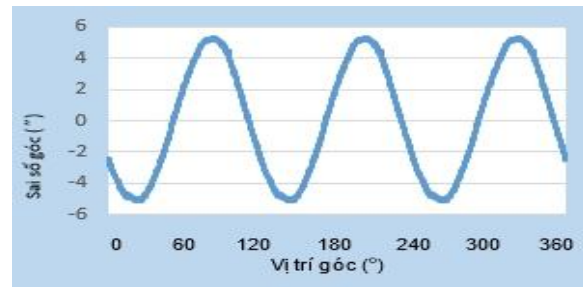
Từ dữ liệu của đồ thị sai số của nhóm 3 đầu đọc thực hiện biến đổi Fouries tính toán số hạng thứ 2 của công thức 7

$$\frac{1}{N_H} (a_i + a_{i+N_G/N_H} + a_{i+2N_G/N_H} \dots + a_{i+(j-1)N_G/N_H}) \quad (11)$$

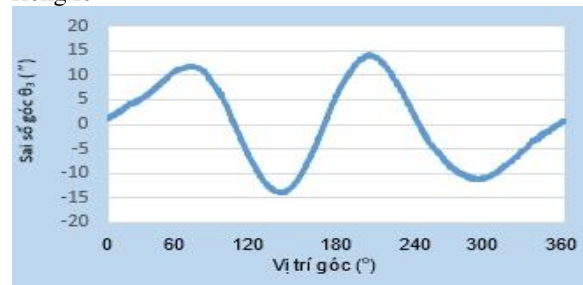
Kết quả thu được như trên đồ thị hình 10



Hình 9. Đồ thị sai số nhóm 3 đầu đọc



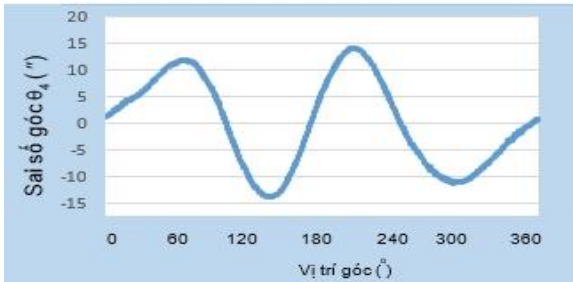
Hình 10. Đồ thị sai số trung bình cộng của 3 đầu đọc riêng lẻ



Hình 11. Đồ thị đường cong hiệu chỉnh nhóm 3 đầu đọc

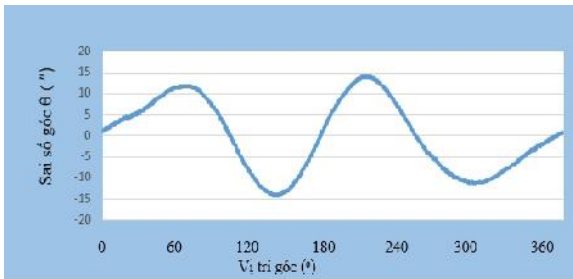
Theo công thức (7) dữ liệu trên đồ thị hình 9 trừ dữ liệu trên đồ thị hình 10 ta có đồ thị đường cong hiệu chỉnh của nhóm 3 đầu đọc hình 11

Quá trình xử lý kết quả đo xác định đường cong hiệu chỉnh thực hiện bằng chương trình xử lý số liệu được viết trên phần mềm Matlab. Với nhóm 4 đầu đọc tính toán tương tự như với nhóm 3 đầu đọc ta có đồ thị đường cong hiệu chỉnh được thể hiện trên hình 12



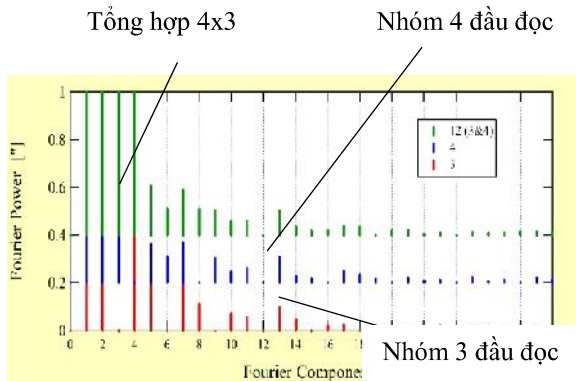
Hình 12. Đồ thị đường cong hiệu chỉnh của nhóm 4 đầu đọc

Từ dữ liệu của đồ thị đường cong hiệu chỉnh của nhóm 3 và 4 đầu đọc, đồ thị đường cong hiệu chỉnh của thiết bị bằng trung bình cộng sai số của hai nhóm đầu đọc thể hiện trên hình 13



Hình 13. Đồ thị đường cong hiệu chỉnh chuẩn thiết bị

Trên đồ thị chuỗi Fouries của đường cong hiệu chỉnh hình 14 nhận thấy thành phần chuỗi Fouries ít hơn so với số lượng đầu đọc ví dụ nhóm 4 đầu đọc không có thành phần có số thứ tự là bội số của 4.

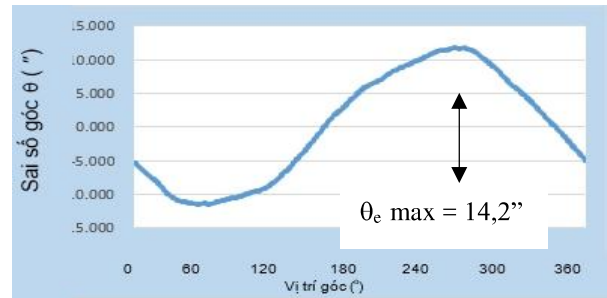


Hình 14. Đồ thị thành phần Fouries

Đối với nhóm 3 đầu đọc không có thành phần bội số của 3 điều này gây khó khăn cho việc nhận dạng loại sai số của thiết bị đặc biệt là sai số do độ nghiêng đĩa chia độ vì thiếu thành phần bội của 4. Khi bố trí thành 2 nhóm, đường cong hiệu chỉnh của thiết bị là tổng hợp của của hai nhóm 4 đầu đọc và nhóm 3 đầu đọc do đó các thành phần chuỗi Fouries được xác định đầy đủ thành phần lẻ và chẵn giúp cho việc nhận diện chính xác về sai số của thiết bị về độ lớn cũng như dạng sai số.

4.2 Hiệu chỉnh sai số

Căn cứ vào đường cong hiệu chỉnh hình 13 tiến hành phân tích đánh giá sai số góc kể cả về độ lớn và dạng đồ thị để tiến hành hiệu chỉnh sai số. Nhận thấy đồ thị đường cong hiệu chỉnh sai số có dạng hình sin với 2 cực đại và 2 cực tiểu trong một chu kỳ quay của đĩa chia độ do đó ảnh hưởng của độ nghiêng đĩa chia độ tác động đến sai số của thiết bị hình 13, độ lớn sai số xác định trên đồ thị là $\pm 18''$. Tiến hành căn chỉnh độ nghiêng đĩa chia độ đến khi đồ thị đường cong hiệu chỉnh có dạng như trên hình 15. Lúc này đồ thị đường cong hiệu chỉnh có dạng hình sin có chu kỳ trùng với chu kỳ quay của đĩa chia độ điều này cho thấy thiết bị tồn tại sai số do lệch tâm lúc này sai số do độ nghiêng đĩa chia độ đã được giảm thiểu. Sai số góc do ảnh hưởng của lệch tâm được hiệu chỉnh bằng cách thiết lập đường cong hình sin có biên độ là giá trị $\theta_e \text{ max}$, sau đó khớp số liệu của đồ thị sai số với đường cong hình sin mới tạo ra.



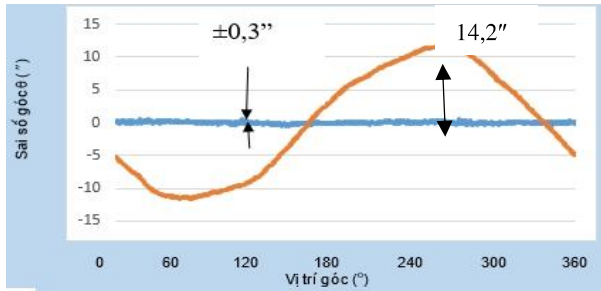
Hình 15. Đồ thị sai số lệch tâm quay

Trong trường hợp sai số như đã cho trong đồ thị hình 16 hàm số hiệu chỉnh lệch tâm được xác định

$$Y = A \times \sin \varphi \quad (13)$$

Trong đó giá trị $A = \varphi_{e \text{ max}} = 14,2''$

Hiệu chỉnh sai số do lệch tâm bằng cách khớp số liệu trên đồ thị 15 với hàm số (13) kết quả thể hiện hình 16. Nhận thấy sai số góc lớn nhất là $\pm 14,2''$ tuy nhiên sau khi hiệu chỉnh độ lệch tâm và độ đảo giá trị sai số góc là $\pm 0,3''$.



Hình 16. Đồ thị sai số sau khi hiệu chỉnh

5. Kết luận

Trên cơ sở phân tích các sai số do ảnh hưởng của độ lệch tâm và độ nghiêng của đĩa chia độ. Nhóm nghiên cứu đã bố trí 6 đầu đọc chia thành hai nhóm trên đĩa chia độ và áp dụng phương pháp trung bình phân đoạn bằng nhau (EDA) để hiệu chỉnh sai số toàn vòng từ các dữ liệu thu được trên các đầu đọc. Sai số của thiết bị đã giảm xuống chỉ $\pm 0,3''$ đáp ứng được

yêu cầu về chuẩn góc toàn vòng trong hệ thống chuẩn đo lường quốc gia lĩnh vực góc

Tài liệu tham khảo

- [1] Danaher Industrial control, Encoder Application Handbook. 1-800-873-8731-847-662-2666 (2003)
- [2] W. T. Elster., Uncertainty analysis for angle calibrations using circle closure, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 103(2) (1998), 141-201
- [3] Renishaw apply innovation – Renishaw plc – The accuracy of angle encodes (2011)
- [4] X. Lu, Self-calibration of on-axis rotary encoders. CIRP annals manufacturing technology 56(1)(2007).
- [5] Tsukasa Watanabe, H. Fujimoto, Application of self – calibratable rotary encoder (2009), 54-58
- [6] Tsukasa Watanabe, Compact Self-Calibration Rotary Encoder XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth, (September 9-14, 2012)