

KAMPŲ MATAVIMO TIKSLUMO TYRIMAS

Artūras Prielaidas¹, Rimas Lazdinas²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹arturiuxtukas@yahoo.com; ²r.lazdinas@gmail.com

Santrauka. Nagrinėjamas limbų paklaidų matavimas, jų vertinimas, fotoelektrinių matavimų keitiklių paklaidų matavimas, bandoma nustatyti keitiklio paklaidų priklausomybę nuo limbo paklaidų. Pateikta limbų, keitiklių apžvalga, analizė, pagrindinės schemos. Atlikta limbų ir keitiklių paklaidų aproksimacija parametrinėmis funkcijomis. Apibendrinti visų matavimų rezultatai – kas būdinga paklaidų kreivėms, kokie dydžiai, jų aproksimacijos parametrinėmis funkcijomis rezultatai, formulės, analizė. Atlikti koreliacijos tarp limbo ir matavimo keitiklio paklaidų tyrimai.

Reikšminiai žodžiai: limbas, fotoelektrinis keitiklis, aproksimacija, parametrinės funkcijos, koreliacija.

Įvadas

Informacinės kampų matavimo sistemos ir jų elementai – rastrinės ir kodinės skalės, kampo keitikliai, žiediniai lazeriai (lazeriniai girometrai) – plačiai naudojami automatizuotose metalo pjovimo staklėse ir mašinos, robotų valdymo sistemose, matavimo prietaisuose ir navigacijos įrenginiuose. Linijinių poslinkių mechanizmai ir mašinos bei matavimo technika labai gerai išnagrinėti ir aprūpinti matavimo prietaisais ir etalonais. To negalima pasakyti apie kampų matavimo prietaisus ir sistemas. Siekiant patikrinti kampų matavimo sistemų tikslumo parametrus reikia specialios įrangos ir kampo etalonų, o šiuolaikiniuose įrenginiuose ir prietaisuose įdiegtų kampų matavimo sistemų įvairovė dar labiau apsunkina šį uždavinį.

Limbo ir kitokio pobūdžio apskritiminių skalių brūkšnių kampinės padėties paklaidos nustatomos ir vertinamos šiais būdais (Bansevicius, Giniotis 2005):

- lyginant su kampu, sudarytu kitais kampų matavimo įtaisais;
- lyginant su kampu, sudarytu bandymų metu ir artimu jo nominaliajai vertei;
- sukant pavyzdinę ir matuojamąją skales ir jų kampų skirtumą išreiškiant laiko intervalų skaičiumi.

Darbo tikslas – išmatuoti limbų paklaidas, rasti keitiklio paklaidų priklausomybę nuo limbo paklaidų, nustatyti, ar galima prognozuoti keitiklio paklaidas pagal limbo paklaidas.

Tyrimo objektas

Tyrimo struktūra: limbų paklaidų matavimas, jų vertinimas, fotoelektrinių matavimų keitiklių paklaidų matavimas,

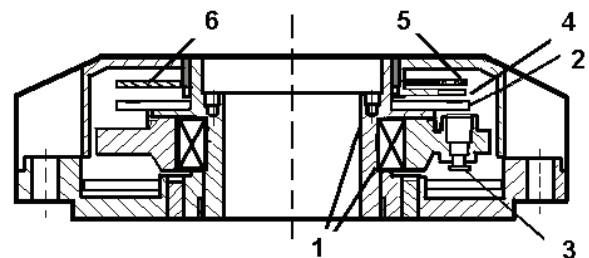
keitiklio paklaidų priklausomybės nuo limbo paklaidų nustatymas. Lyginami dažniniai spektrai.

Kampo keitiklis – tai įrenginys, keičiantis į jėgimą perduodamą kontroliuojamąjį ar reguliuojamąjį fizikinį dydį signalu, tinkamiausiu kitiems komponentams valdyti. Dauguma keitiklių neelektrinius fizikinius dydžius (kampinius ir linijinius poslinkius, greitį, slėgį, temperatūrą ir kt.) keičia elektriniais dydžiais (varža, įtampa, srove, induktivumu) (Seilius 2001).

Fotoelektriniai kampinių poslinkių keitikliai (1 pav.) skirti poslinkiams registruoti, matuoti ir keisti į elektrinius signalus, teikiančius informaciją apie poslinkio kryptį ir dydį. Informacija apie kontroliuojamąjį dydį pateikiama šviesos srauto Φ intensyvumu.

Pagrindiniai kampų matavimo sistemų paklaidos sandai (Giniotis 2005):

1. Limbo ir indikatorinės plokštelės brūkšnių padėties paklaida.
2. Limbo ir indikatorinės plokštelės brūkšnių formos nuokrypiai.



1 pav. Fotoelektrinio keitiklio pjūvis: 1 – velenas ir guolis; 2 – limbas; 3 – šviesos šaltinis; 4 – indikatorinė plokštelė; 5 – fotoimtuvas; 6 – elektronika

Fig. 1. A section of an optical encoder

3. Limbo ir indikatorinės plokštelės darbinio paviršiaus formos nuokrypiai.
4. Limbo ir indikatorinės plokštelės dangos pralaido kitimas.
5. Limbo ir indikatorinės plokštelės reperinių rastrų padėties pagrindinio raistro atžvilgiu nuokrypiai.
6. Keitiklio sukimosi paklaidos: radialiosios, ašinės, kampinės.
7. Limbo ir indikatorinės plokštelės montavimo paklaidos, sukeliančios:
 - limbo ir indikatorinės plokštelės darbinio paviršiaus formos nuokrypius;
 - limbo ir indikatorinės plokštelės darbinio paviršiaus padėties sukimosi ašies atžvilgiu nuokrypius.
8. Optroninės sistemos parametrų nuokrypių ir kitimo sukiamos paklaidos.
9. Pirminių elektrinių signalų įvertinimo ir interpoliavimo paklaidos.
10. Rodmenų pateikimo paklaidos.

Eksperimentinis tyrimas

Limbas matuoti naudotas „Hilger Watts TM 23“ mikroskopas ir Lietuvoje pagamintas „Moore“ staliukas.

Mikroskopas pastatomas matavimo staliuko viduryje. Tam pasitelkiamas tikslus kryžiuokas. Aerostatinė kariatėlė mikroskopas stumdomas y ašimi, taip nustatoma y padėtis ($0-180^\circ$).

Sukant mikroskopo mikropastūmos limbą (stumdant plyšį) nustatoma mikroskopo pozicija x ašyje ($90-270^\circ$).

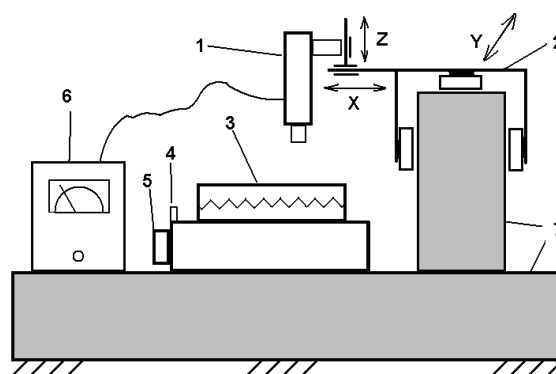
Lentelė. Limbų apžvalga

Table. A review of rotary disks

Limbas „MicroE“	Matmenys	Žingsnis	Brūkšnių sk.
301-00058/61	4,250×2,000×0,90	20 μm	16 384
301-00095	4,250×3,150×0,90	20 μm	16 384
301-000121	6,496×5000×1,20	20 μm	24 000

Ant matavimo staliuko dedamas limbas (2 pav.), vizualiai nustatomas centras, limbas pritvirtinamas vašku. Vizualiai stebint mikroskopas stumiamas (į aerostatinis guolius tiekiant orą) prie rastrinio kelio krašto. Staliukas atkabina fiksiatoriumi ir sukamas kas 90 laipsnių, tikrinama, ar sutampa su rastrinio takelio kraštu.

Plyšys sutapatinamas su juodu brūkšniu. Rezultatai gaunami indikatoriumi. Indikatoriuje nulius nustatomas sukant matavimo staliuko mikropastūmos limbą. Matavimas



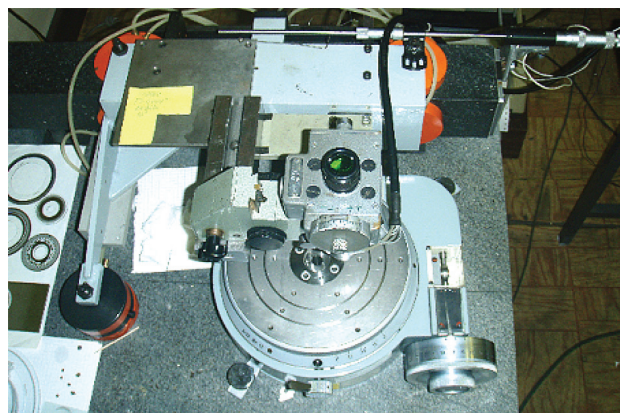
2 pav. Kampų matavimo prietaiso schema: 1 – plyšinis mikroskopas; 2 – aerostatinė kariatėlė; 3 – matavimo staliukas; 4 – staliuko fiksiatorius; 5 – staliuko mikropastūmos limbas; 6 – indikatorius, 7 – granitas

Fig. 2. A scheme for a device of measuring angular displacement

remiasi pastovaus kampo kartojimu apskritime, pradedant nuo vieno kurio nors brūkšnio ir baigiant tuo pačiu brūkšniu. Matuojama keletą kartų, skaičiavimams imamas kelių matavimų vidurkis. Apskaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis.

Limbo brūkšnių kampinė pozicija nustatoma pagal „Moore“ staliuko rodmenis. Surinkto keitiklio rastrinės sąveikos palyginamos su etaloninio keitiklio. Duomenys renkami mikroprocesorine sistema, perduodami į PC, vaizduojami ekrane ir spausdinami (3 pav.).

Matuojant limbo paklaidą nustatoma vieno brūkšnio paklaida, o komparuojant keitiklį matuojama keliasdešimties brūkšnių rastrinė sąveika. Pagrindinės limbo matavimo paklaidos, be brūkšnio padėties, yra staliuko paklaida, limbo nustatymo (ekscentriciteto) ir limbo darbinio paviršiaus. Žinoma, yra staliuko paklaida, ji kompensuojama, taip pat iš matavimų rezultatų skaičiuojama pirmosios harmonikos (ekscentriciteto) paklaida, galiausiai lieka matuojant nekompensuotas dydis – darbinio paviršiaus paklaidos. Šio pavir-



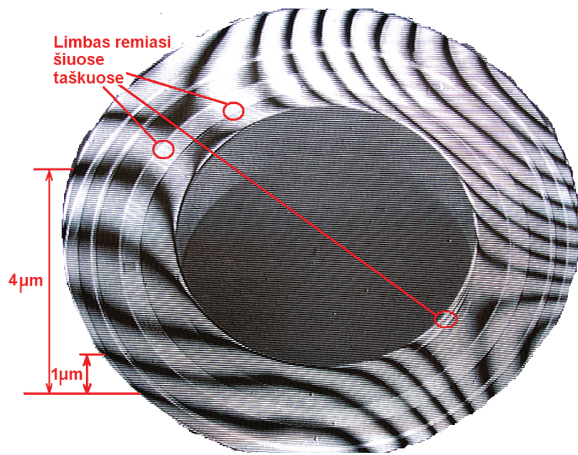
3 pav. Kampų matavimo prietaisas

Fig. 3. A device of angle measurement

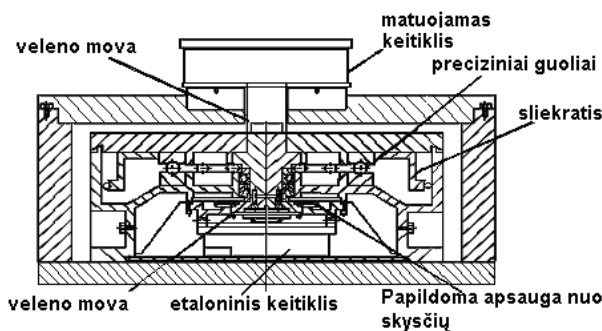
šiaus nuokrypius matuojame optinio interferometro ekrane (4 pav). Atstumas tarp interferencinių juostų lygus $1\ \mu\text{m}$.

Matuojant keitiklį dominuoja movų ir limbo matavimo paklaidos. Limbo matavimo paklaidos mažinamos įmontuojant į keitiklį kelias matavimo galvutes.

Keitiklis kalibruojamas ant specialaus stendo su etaloniniu keitikliu (5 pav.). Kalibruojant nustatomos keitiklio rastrinio takelio kampinės paklaidos. Matuojamo keitiklio kampinė padėtis komparuojama su etaloninio keitiklio kampine padėtimi.



4 pav. Limbo plokštumos vaizdas optinio interferometro ekrane
Fig. 4. The image of the flatness of the rotary disk in the screen of the optical interferometer

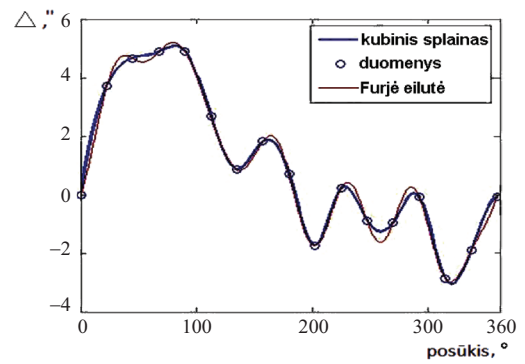


5 pav. Kampinių keitiklių kampo kalibravimo stendo pjūvis
Fig. 5. A section of angle calibration stand for rotary encoders

Tyrimų rezultatai

Tyrimui limbų paklaidų duomenys rinkti kas $7,5^\circ$, 15° , $22,5^\circ$ ir 30° laipsnių, statistiškai duomenims įvertinti buvo skaičiuojamas vidutinis kvadratinis standartinis nuokrypis. Duomenims aproksimuoti pasirinkti kubinio splaino polinomas ir Furjė eilutė (6 pav.).

Vidutinis kvadratinis nuokrypis tarp Furjė eilutės ir kubinio splaino polinomo lygus 0,2.



6 pav. Limbo „MicroESystems 301-00058/61“ išmatuotų duomenų aproksimacija kubiniu splainu ir Furjė eilute

Fig. 6. Cubic spline and Fourier series approximation to the measured data of rotary disk “MicroESystems 301-00058/61”

Gauti duomenys apdoroti taikant spektrinę signalų analizę (Bručas, Giniotis 2008). Signalo spektras gautas taikant diskretinę Furjė transformaciją.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i kn}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

čia X_k – spektro dedamosios; x_n – n -oji interpoliuota paklaidų reikšmė, e – natūrinio logaritmo pagrindas; π – 3,14; i – menamasis vienetas, N – transformuojamas duomenų skaičius.

Dažniam spektrui nustatyti taikoma greitoji Furjė transformacija „Matlab“ terpeje.

Dažniniuose spektruose vyrauja žemojo dažnio harmonikos iki 5 Hz. Tai susiję su nevisiškai kompensuojamu ekscentricitetu ir kreivuoju limbo paviršiumi (7 pav.). Keitiklio spektre (8 pav.) aukštos dedamosios yra mažos amplitudės, nes, kaip minėta, keitiklio nuskaitymo sistema vidurkina keliasdešimties brūkšnių vaizdą.

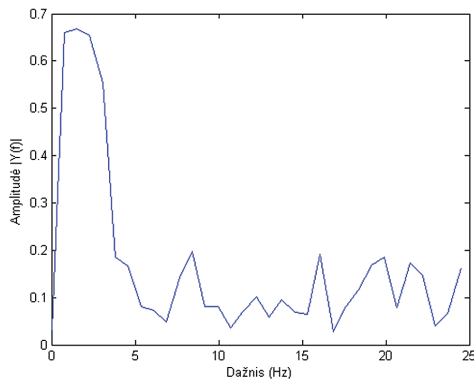
Surinkus limbą negalima tiksliai nustatyti, nuo kurios vietos bus matuojamas keitiklis. Tam apskaičiuojamas koreliacijos vektorius $Rxy(n)$ (9 pav.). Čia raudona kreivė pavaizduotos limbo paklaidų reikšmės, interpoliuotos kubiniu splainu, mėlyna – keitiklio, o n nurodo, kiek diskrečių verčių perstumta tarp šių kreivių konkrečiai koreliacijos koeficiento reikšmei.

Matyti, kad komparuojant limbą ir keitiklį komparavimo pradžios sutapo. Dabar galima apskaičiuoti normuotą koreliacijos koeficientą (Vekteris *et al.* 2009)

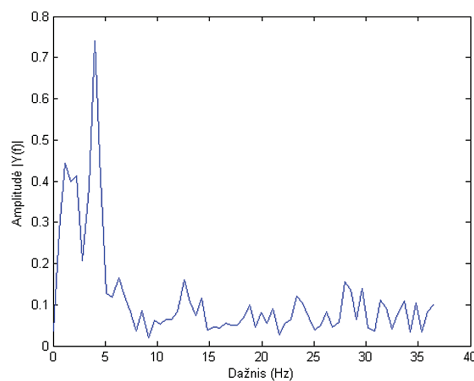
$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y}, \quad (2)$$

čia x_i ir y_i – i -oji duomenų reikšmė; \bar{x} ir \bar{y} – vidurkiai; s_x ir s_y – vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai; n – duomenų sekos ilgis.

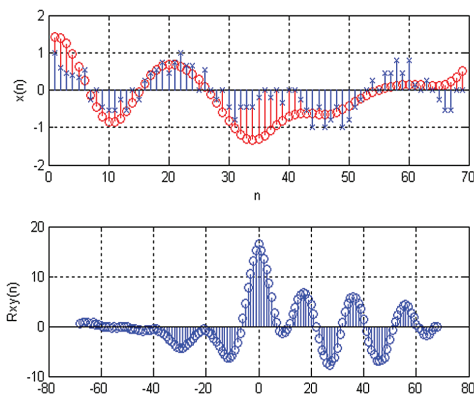
Koreliacijos ryšio stiprumas $r = 0,4$. Jis parodo tiesinį ryšį tarp tiriamų duomenų vektorių. Koreliacija silpna, kadangi limbų kampinių paklaidų dydis santykinai mažas lyginant su abiejų stendų matavimo skyra, bei didelė kalibravimo neapibrėžtis. Tai pat sumontuoto keitiklyje limbo paviršius iškreipiamas, dėl to gali netiesiškai pasikeisti paklaidų kreivė.



7 pav. Amplitudinė dažninė limbo paklaidų charakteristika
Fig. 7. Frequency response characteristics of errors in the rotary disk



8 pav. Amplitudinė dažninė keitiklio paklaidų charakteristika
Fig. 8. Frequency response characteristic of errors in the encoder



9 pav. Kampinių paklaidų kreivės ir koreliacijos koeficientų vektorių
Fig. 9. The graph of the angle error and coefficients of the correlation vector

Išvados

1. Pamatavus limbą, apytiksliai galima prognozuoti keitiklio paklaidas, net ir lyginant su skirtingais, tačiau tiksliais kampiniais matais.
2. Limbo ir keitiklio paklaidų kreivėse vyrauja žemojo dažnio harmonikos.
3. Limbo kampinėms paklaidoms nustatyti pagal naudotą metodiką pakanka matuoti kas 15 laipsnių, vėliau pakankamu tikslumu aproksimuoti kubiniu splainu ar Furjė eilute.

Literatūra

- Bansevičius, R.; Giniotis, V. 2005. Mechatronic correctional devices for precision engineering, in *International Conference "Mechatronic Systems and Materials MSM 2005"*. Abstracts. 20–23 October 2005, 133–134.
- Bručas, D.; Giniotis, V. 2008. Modified circular scale testing and calibration method, in *The 7th International Conference "Environmental Engineering"*: Selected papers, vol. 3. Ed. by Čygas, D.; Froehner, K. D. May 22–23, 2008. Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1269–1273.
- Giniotis, V. 2005. *Padėties ir poslinkių matavimas*. Vilnius: Technika.
- Seilius, A. 2001. *Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai*. Vilnius: Technika.
- Vekteris, V.; Jurevičius, M.; Kilikevičius, A. 2009. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Technika. doi:10.3846/1043-S

RESEARCH ON THE ACCURACY OF ANGLE MEASUREMENT

A. Prielaidas, R. Lazdinis

Abstract

Rotary encoders are the main devices in industrial angle measurement. Accuracy is very important and is assured by the technology of manufacture. The main part (rotary disk) is under examination, and therefore a number of its characteristics are established and a comparison with the assembled encoder is presented. In conclusion, an error in the angle of the rotary disk makes a possibility of forecasting an error in the assembled encoder angle.

Keywords: rotary disk, photoelectric encoder, approximation, parametric functions, correlation.