



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Renatas Užkurnys

**PRECIZINIŲ LIMBŲ-ORIGINALŲ RASTRŲ FORMAVIMO TIKSLUMO
TYRIMAS**

**RESEARCH OF ACCURACY OF FORMING OF PRECISION DISC SCALES
ORIGINAL MATRICES**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

Mechanikos studijų kryptis

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. dr. Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Renatas Užkurnys

**PRECIZINIŲ LIMBŲ-ORIGINALŲ RASTRŲ FORMAVIMO TIKSLUMO
TYRIMAS**

**RESEARCH OF ACCURACY OF FORMING OF PRECISION DISC SCALES
ORIGINAL MATRICES**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

Mechanikos studijų kryptis

Vadovas: prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas: lekt. A. Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Technologijos mokslo sritis
Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis
Mechanikos inžinerijos studijų kryptis
Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas – 62409T111
Mechatronikos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. dr. Mindaugas Jurevičius
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei)Renatui Užkurniui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Precizinių limbų-originalų rastrų formavimo tikslumo tyrimas

.....
.....
patvirtinta 2010 m. lapkričio 15 d. dekanų potvarkiu Nr. 292 me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2011 m. birželio 2 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti limbų ir jų formavimo metodų apžvalgą ir analizę. Aprašyti originalų formavimo įrenginio konstrukciją. Nustatyti pagrindinius limbų originalų gamybos paklaidų sandus. Atlikti tyrimus, reikalingus originalų tikslumui gerinti ir rezultatų statistinę analizę. Pateikti pasiūlymus originalų formavimo įrenginio modernizacijai taip pat rekomendacijas ir išvadas, gaminamų limbų originalų kokybei gerinti. Literatūra.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

lekt. A. Petrėtienė
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....Renatas Užkurnys.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Data-....-....

Mechanikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Precizinių limbų-originalų rastrų formavimo tikslumo tyrimas**

Autorius **Renatas Užkurnys**

Vadovas prof. habil dr. **Albinas Kasparaitis**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe tiriamas precizinių limbų – originalų rastro formavimo įrenginys, rastro brūkšnių kampinės padėties paklaidos, formuojant rastrą skirtingu multiplikavimo skaičiumi, ir brūkšnių formavimo procesas. Išnagrinėti kampinių skalių paklaidų sandai. Pateikti pasiūlymai originalų formavimo įrenginio modernizacijai. Sulyginti atliktų matavimų rezultatai, pateiktos išvados.

Darbą sudaro 9 dalys: įvadas, apžvalga, darbo užduotis, metodika ir struktūra, limbų originalų formavimo tikslumo analizė, pasiūlymai įrenginio modernizacijai, eksperimentiniai tyrimai, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 63 p. teksto be priedų, 52 iliustr., 7 lent., 22 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai:

Limbai, originalas, multiplikavimas, fotolitografija, kampinės skalės.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Machine Engineering

ISBN ISSN
Copies No.
Date-....-....

Master Degree Studies **Mechanics** study programme Master's Thesis.

Title: **Research of accuracy of forming of precision disc scales original matrices**

Author **Renatas Užkurnys**

Academic supervisor Prof Dr Habil **Albinas Kasparaitis**

Thesis language

☐

Lithuanian

☒

Foreign (English)

Annotation

The thesis studied precision disc - the original raster formation unit, the raster lines on the angular position error in forming the raster, a different number of multiplication and the lines forming process. To analyze the angular scales of errors sand. Proposals for modernization of the original molding. Compare the measurements results of the findings.

The work consists of 9 sections: introduction, overview of the work tasks, methods and structure of the original limba making accurate analysis of the proposals for the modernization of equipment, experimental studies, conclusions and suggestions, references. Work size - 63 p. Text without appendixes, 52 pictures., 7 tables., 22 bibliographic sources.

Keywords:

Disc, original, multiplication, photolithography, angular scales.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	10
ĮVADAS	11
1. LIMBŲ IR JŲ FORMAVIMO METODŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ	12
1.1. Kampų matavimo sistemų ir jų limbų įvairovė	12
1.2. Dvejjetainės kodinės skalės.....	17
1.3. Apskritiminių skalių matavimo būdai.....	21
1.4. Limbų ir jų originalų rastrų formavimo metodų apžvalga	24
2. LITERATŪROS APŽVALGOS APIBENDRINIMAS	27
3. LIMBŲ ORIGINALŲ GAMYBOS PROCESAS.....	28
3.1. Limbų gamybos įrenginio ir rastro formavimo multiplikavimo būdu analizė.....	28
3.2. Valdymo elektronikos aprašymas	30
3.3. Suslėgto oro tiekimo sistema	32
3.4. Įrenginio dinaminis modelis.....	32
4. LIMBŲ ORIGINALŲ FORMAVIMO TIKSLUMO ANALIZĖ	35
4.1. Limbų, skirtų precizinėms matavimo sistemoms, tikslumo parametrų analizė	35
4.2. Kampinių skalių paklaidų sandai	36
5. PASIŪLYMAI ĮRENGINIO MODERNIZACIJAI	41
6. EKSPERIMENTINIS LIMBŲ ORIGINALŲ FORMAVIMO PAKLAIDŲ TYRIMAS	42
6.1. Eksperimento metodika ir planavimas, multiplikavimo skaičiaus įtaka kampinėms rastro brūkšnių paklaidoms.....	42
6.2. Eksperimento rezultatai.....	44
6.3. Optimalios rastro brūkšnių formos tyrimas	56
6.4. Fokusavimo įtaka fragmento kokybei – mechaninio indikatoriaus rodmenų pakartojamumo nustatymo tyrimas	59
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	61
LITERATŪRA	62

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Periodinės struktūros limbas	12
1.2 pav. Kodiniai limbai.....	13
1.3 pvz. Kampinio keitiklio konstrukcija.....	13
1.4 pav. Inkrementinio kampinio keitiklio schema.....	14
1.5 pav. Prieauginio kampinio keitiklio generuojamų signalų serijos	15
1.6 pav. Prieauginio jutiklių jungimo su skaitikliu būdai	15
1.6 pav. Vieno apsisukimo absoliutaus kampinio keitiklio schema	16
1.7 pav. Daugelio apsisukimų absoliutaus kampinio keitiklio schema.....	16
1.8 pav. Dvejetainė apvali kodinė skalė.....	17
1.9 pav. Dvejetainė apvali kodinė skalė su fotoelementais, išdėstytais „dvigubo šepečio“ metodu	19
1.10 pav. Apvali skalė su Grėjaus kodu.....	20
1.11 pav. 5 skilčių Grejaus kodo nuo 4 skilčių dvejetainės apvalios kodinės skalės nuskaitymo pavyzdys	20
1.12 pav. Apskritiminių skalių matavimo būdai.....	22
1.13 pav. Limbų paklaidų matavimo rezultatai pagal limbų skersmenį	23
1.14 pav. Precizinės apskrito dalijimo mašinos ašies pjūvis.....	25
3.1 pav. Limbų originalų gamybos įrenginys	28
3.2 pav. Rastro eksponavimo schema	29
3.3 pav. Aerostatinis špindelis	30
3.4 pav. Valdymo bloko prijungimo schema	31
3.5 pav. Oro tiekimo schema	32
3.6 pav. Kinematinė mechanizmo schema.....	33
3.7 pav. Sistemos dinaminis modelis	33
4.1 pav. Limbo brūkšnių padėties paklaida.....	36
4.2 pav. Rastro žingsnio paklaida	37
4.3 pav. Rastro ir kodo surišimo paklaida.....	38

4.4 pav. Karietėlės fiksavimo mechanizmas	39
4.5 pav. Karietėlės konstrukcijos schema	40
4.6 pav. Ekscentriciteto paklaidos įtaka brūkšnių padėčiai formuojant rastrą multiplikavimo būdu	40
6.1 pav. Stiklinės plokštelės	43
6.2 pav. Limbų paklaidų matavimo prietaisas	44
6.3 pav. 2-jų kartų multiplikavimo schema.....	44
6.4 pav. Multiplikavimas 2 kartus.....	45
6.5 pav. Rastro brūkšnių forma multiplikuojant 2 kartus	45
6.6 pav. x2 multiplikavimo, matavimų vidurkių aproksimavimas Furjė eilute grafikas	47
6.7 pav. x2 multiplikavimo, kampų paklaidų vid. kv. nuokrypių grafikas	48
6.8 pav. 4-jų kartų multiplikavimo schema.....	48
6.9 pav. Multiplikavimas 4 kartus.....	49
6.10 pav. Rastro brūkšnių forma multiplikuojant 4 kartus	49
6.11 pav. x4 multiplikavimo, matavimų vidurkių aproksimavimas Furjė eilute grafikas	51
6.12 pav. x4 multiplikavimo, kampų paklaidų vid. kv. nuokrypių grafikas	51
6.13 pav. 8-jų kartų multiplikavimo schema.....	52
6.14 pav. Multiplikavimas 8 kartus.....	52
6.15 pav. Rastro brūkšnių forma multiplikuojant 8 kartus	53
6.16 pav. x8 multiplikavimo, matavimų vidurkių aproksimavimas Furjė eilute grafikas	54
6.17 pav. x8 multiplikavimo, kampų paklaidų vid. kv. nuokrypių grafikas	55
6.18 pav. 2, 4 ir 8 multiplikavimų matavimo vidurkių paklaidų grafikas.....	55
6.19 pav. 2, 4 ir 8 multiplikavimų mikroskopinės brūkšnių nuotraukos	56
6.20 pav. Brūkšnio pločio priklausomybė nuo eksponavimo ir ryškinimo laikų santykio	57
6.21 pav. Brūkšnio forma kintant eksponavimo ir ryškinimo laiko santykiui.....	58
6.22 pav. Mechaninis indikatorius	59
6.23 pav. Indikatoriaus rodmenų sklaida	60
6.24 pav. Brūkšnių forma	60

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Servovariklio techninės charakteristikos.....	31
4.1 lentelė. Pagrindiniai limbams keliami reikalavimai.....	35
6.1 lentelė. Tiriamų limbų parametrai.....	42
6.2 lentelė. Matavimo rezultatai.....	46
6.3 lentelė. Matavimo rezultatai.....	50
6.4 lentelė. Matavimo rezultatai.....	53
6.5 lentelė. Matavimo rezultatai.....	56

IVADAS

Lietuvoje gaminami įvairių matmenų periodinės struktūros ir kodiniai limbai, skirti fotoelektrinėms matavimo sistemoms. Išorinis skersmuo ≤ 200 mm, dalijimo linijų skaičius 1 – 36000, kampinė paklaida nuo ± 2 kamp. sek. iki ± 15 kamp. sek. [16] Taip pat gaminamos indikatorinės liniuotės darbui poroje su limbais.

Limbo rastras yra formuojamas ploname chromo sluoksnyje multiplikavimo būdu. Rastras vakuume yra užgarinamas ant stiklinio pagrindo. Toks procesas garantuoja pakankamą eksploatacijai gamybinėmis sąlygomis rastro atsparumą mechaniniam ir kenksmingų medžiagų poveikiui [14].

Tyrimo objektas. Šiame darbe yra nagrinėjamas limbų originalų gamybos įrenginys ir rastro formavimo procesas. Limbas – svarbiausias optinių kampinių keitiklių elementas. Paskirtis – šviesos srauto moduliavimas, dviem vienas kito atžvilgiu judančiais rastrais.

Projekto tikslas ir uždaviniai. Nustatyti pagrindinius limbų originalų gamybos paklaidų sandus. Atlikti reikiamus tyrimus Pateikti rekomendacijas ir išvadas gaminamų limbų originalų kokybei gerinti.

Temos naujumas. Limbų originalų rastrų formavimo tikslumo, susijusio su gamybos įrenginiu ir formavimo procesu iki šiol nėra ištirtas. Nėra publikacijų šiais klausymais, nes tai yra limbų gamintojų „know - how“.

Temos aktualumas. Šiuolaikinė pramonė reikalauja vis didesnio limbų tikslumo. Šiuos reikalavimus išpildyti, būtiną sumažinti paklaidas atsirandančias , dėl limbų originalų gamybos įrenginio ir rastro formavimo proceso. Vien techninėmis priemonėmis, didinant formavimo įrenginio komponentų tikslumą, tai pasiekti neimanoma. Reikalingi procesų tyrimai ir technologijos tobulinimas.

Tyrimo metodai. Tiriant limbų originalų gamybos įrenginį ir rastro formavimo procesą tikslumo tyrimai buvo atliekami praktinių eksperimentų metu ir statistiniais rezultatų apdorojimais.

Darbo mokslinė vertė. Pateikti pasiūlymai limbų originalų gamybos įrenginio modernizacijai ir rastro formavimo proceso kokybei gerinti, leidžia pasiekti didesnę gaminamų limbų originalų parametrų tikslumą. Gauti nauji iki šiol nežinomi duomenys apie originalų formavimo procesą, jo paklaidas.

Darbo aprobacija. Keturioliktojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „MOKSLAS - LIETUVOS ATEITIS“, skaitytas pranešimas „Limbų rastrų formavimo multiplikavimo metodu tikslumo tyrimas“. Pranešimo kopija pridedama.

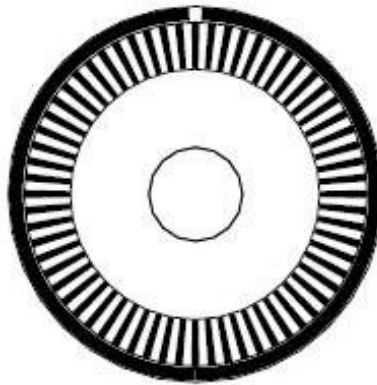
1. LIMBŲ IR JŲ FORMAVIMO METODŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ

1.1. Kampų matavimo sistemų ir jų limbų įvairovė

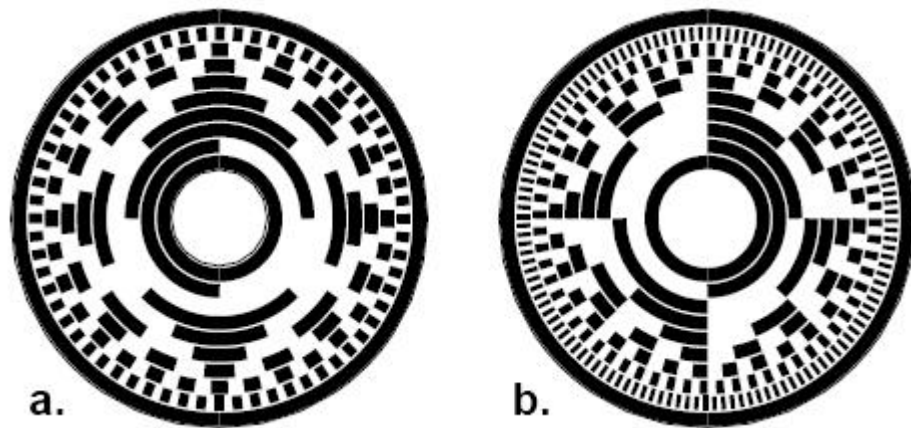
Matavimo technikoje – atskaitymo sistemose, pasukamų optinių stalų matavimo sistemose, mikroskopuose, teodolituose ir kt. Kampiniuose keitikliuose naudojamų limbų pavyzdžiai yra pavaizduoti 1.1 ir 1.2 paveiksluose. Tokie limbai pagaminti iš stiklo, kuris padengtas chromo sluoksniu (gali būti padengtas ir kitokia medžiaga), kuriame suformuojamas rastras (skaidrių/neskaidrių) brūkšnių derinys arba kodas.

Kampinių poslinkių keitiklis skirtas informacinio ryšio sukūrimui tarp staklių mašinų ir pramoninių robotų vykdomųjų organų ir skaitmeninio programinio valdymo įrenginių. Keitiklis duoda informaciją apie vykdomųjų organų padėtį. Keitiklis susideda iš trijų pagrindinių dalių: mechaninės, optinės ir elektroninės. Keitiklio korpusas tvirtinamas prie objekto varžtais, su objekto velenų jungiamas kompensacine mova.

Naudojamų pramonėje kampo keitiklių impulsų vieno apsisukimo metu skaičius būna tokių dydžių: 100; 250; 500; 600; 1024; 1500; 2000; 4096; 5000; 25000; 32400 ir kt. Generuojamų impulsų skaičius būna dvejetainės, dešimtainės bei šešiatainės laipsnių sistemose [9].



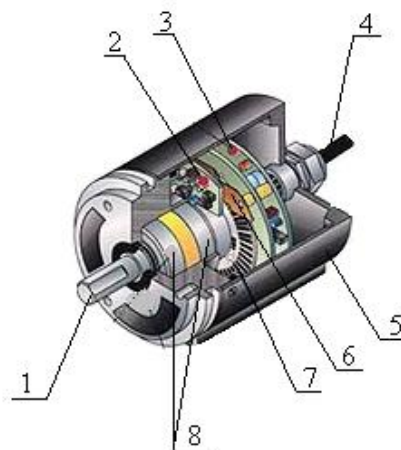
1.1 pav. Periodinės struktūros limbas



1.2 pav. Kodiniai limbai: a) Grėjaus kodas; b) dvejetainis kodas

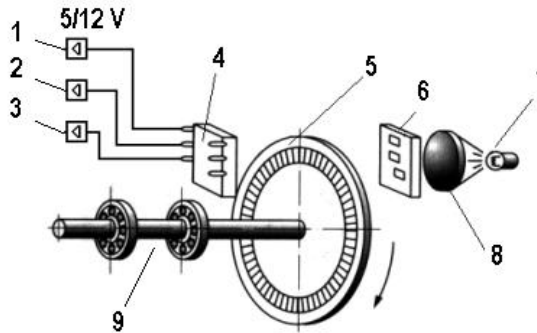
Lietuvoje gaminami įvairių matmenų ir rastrų parametrų periodinės struktūros ir kodiniai limbai, skirti fotoelektrinėms matavimo sistemoms. Išorinis skersmuo ≤ 200 mm, dalijimo linijų skaičius 1-36000, kampinė paklaida nuo ± 2 kamp. sek. iki ± 15 kamp. sek. Taip pat gaminamos indikatorinės liniuotės darbui poroje su limbais.

Fotoelektriniai matavimo keitikliai su periodinės struktūros limbais. Tai plačiausiai naudojami matavimo keitikliai (1.3 pav.) tiek matavimo prietaisuose, tiek ir metalo apdirbimo staklėse, robotuose bei įvairiuose įtaisuose, kur reikia matuoti judesius. Jų pagrindą sudaro periodinės struktūros rastrinis limbas, šis keitiklyje tvirtinamas prie guoliuose sukamo veleno ir matuojant sukamas nejudamų indikatorinės liniuotės ir šviestuvo bei šviesai jautrių elementų atžvilgiu, sužymėtos lygaus pločio skirtingo šviesos pralaidumo arba atspindėjimo brūkšniais.



1.3 pvz. Kampinio keitiklio konstrukcija: 1 – velenas; 2 – šviesos diodų matrica; 3 – fotoimtuvų matrica; 4 – matavimo signalas; 5 – korpusas; 6 – indikatorinė; 7 – limbas; 8 – guoliai

Kampinio keitiklio su periodinės struktūros limbu schema pateikta 1.4 paveiksle.



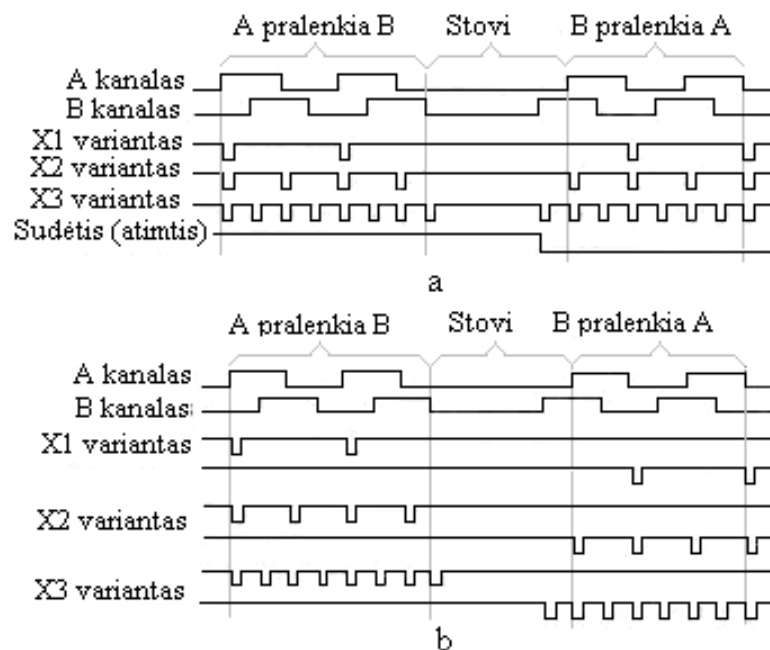
1.4 pav. Inkrementinio kampinio keitiklio schema: 1 – nulinis signalas; 2 – signalas A; 3 – signalas B; 4 – fotoimtuvas; 5 – inkrementinis limbas; 6 – indikatorinė; 7 – šviesos šaltinis; 8 – lęšis; 9 – velenas

Veikimas remiasi šviesos srauto moduliavimu dviem vienas kito atžvilgiu judančiais rastrais. Lygiagrečių spindulių pluoštas nukreipiamas į vienas kitos atžvilgiu judančius rastrinius limbą ir indikatorinę, tarp kurių yra mažas tarpelis. Šviesa moduluojama periodiškai sutampant indikatorinės šviesai pralaidiems brūkšniams su limbo šviesai pralaidžiais ir nepralaidžiais brūkšniais. Moduluotoji šviesa apšviečia fotodiodus, esančius už indikatorinės rastrų sektorių, kurie vienas kito atžvilgiu paslinkti $1/4$ rastro žingsnio dydžiu. Tokiu būdu šviesos diodai sukuria elektrinius kvazisinusinius signalus, kurių fazės skiriasi $1/4$ periodo T dydžiu ir kurie nulinio lygio atžvilgiu pasislinkę nuolatinės dedamosios dydžiu [18].

Po to šie signalai elektroniškai dalijami, iš šių kvazisinusinių signalų formuojami proporcingi jiems stačiakampiai signalai arba trumpalaikiai impulsai, jie stiprinami ir siunčiami į valdymo arba rodmenų įtaisus [7,18].

Kaip matyti iš 1.5 paveikslo, pirminis keitiklis generuoja dvi serijas periodinių stačiakampių impulsų, perstumtų faze per $1/4$ keitiklio žingsnio.

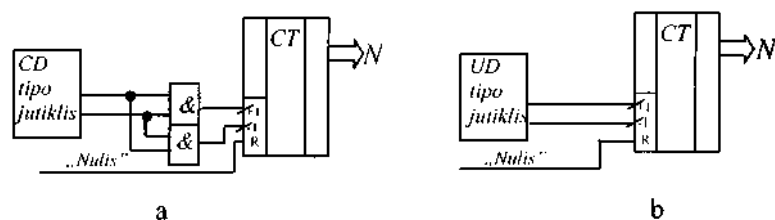
Atsižvelgiant į pirminio keitiklio modelį, skaičiuojamieji prieauginio kampiniai keitikliai impulsai gali būti generuojami nuo vieno signalo impulsų priekinio fronto, nuo vieno signalo impulsų priekinio ir užpakalinio fronto ir nuo abiejų signalų abiejų frontų. Kaip pavyzdys pateikiami „US Digital“ kompanijos gaminami dviejų modifikacijų *HD25* serijos optiniai kampiniai keitikliai. *CD* serijos kampiniai keitikliai generuoja skaičiuojamųjų impulsų seriją ir loginį krypties signalą, o *UD* serijos kampiniai keitikliai – dvi signalų serijas. Abiejų tipų jutiklių signalų serijos parodytos 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Prieauginio kampinio keitiklio generuojamų signalų serijos: a) *CD* serijos kampinis keitiklis; b) *UD* serijos kampinis keitiklis

Užsakant jutiklį galima pasirinkti skiriamąją jutiklio gebą lemiantį, variantą – *XI*, *XI* arba *X3*. Jutiklių sujungimo su skaitikliais schemas pateiktos 1.6 paveiksle. Siekiant didesnio atsparumo triukšmams signalų perdavimo linijose, jutikliai generuoja žemo lygio kelio impulsus.

Prieauginiai poslinkio matuokliai pasižymi itin plačiu matavimo diapazonu, kurį riboja tik impulsų skaičiavimo įtaiso talpa. Tačiau tokiems jutikliams būdingas esminis trūkumas, susijęs su informacijos praradimu, dingus maitinimo įtampai ar išjungus sistemą. Įjungiant tokią sistemą, būtina ją *inicializuoti*, t. y. suderinti objekto padėtį su informacija, įrašyta į skaitiklį. Šiam tikslui turi būti numatytas papildomas pradinės padėties jutiklis. Pastačius objektą į šią (pradinę) padėtį, į skaitiklį įrašoma šią padėtį atitinkanti (dažniausiai – nulio) vertė [7,10].

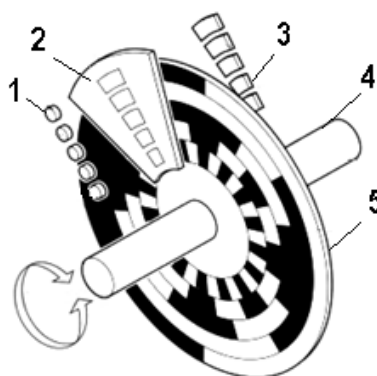


1.6 pav. Prieauginio jutiklių jungimo su skaitikliu būdai: a) *CD* tipo jutikliai; b) *UD* tipo jutiklis

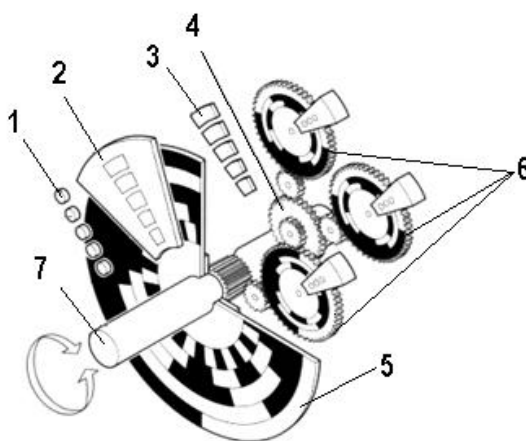
Absolūtieji keitikliai pagal matavimo diapazoną gali būti vieno apsisukimo ir daugelio apsisukimų. Vieno apsisukimo keitikliuose kampinės padėties kodavimas atliekamas kampo diapazone nuo 0° iki 360° , Daugelio apsisukimų keitikliuose darbo diapazonas viršija 360° . Tokių keitiklių pagrindu tarnauja absoliutieji vieno apsisukimo keitikliai tarpusavyje sujungti mažinančiais reduktoriais iš kelių kodinių diskų, kurie naudojami apsisukimų skaičiui skaičiuoti.

Vieno apsisukimo keitikliai (1.6 pav.), gali būti iki 16 bitų (32688 reikšmių). Daugelio apsisukimų (1.7 pav.), keitikliuose skyra gali būti iki 30 bitų t.y. virš 1 milijardo registruojamų kampo reikšmių.

Daugelio apsisukimų keitikliai naudojami tuo atveju, kai reikšmių skaičius, kurį duoda vieno apsisukimo keitiklis, yra nepakankamas.



1.6 pav. Vieno apsisukimo absoliutaus kampinio keitiklio schema: 1 – šviesos šaltinis; 2 – indikatorinė; 3 – fotoimtuvai; 4 – velenas; 5 – kodinis limbas



1.7 pav. Daugelio apsisukimų absoliutaus kampinio keitiklio schema: 1 – šviesos šaltinis; 2 – indikatorinė; 3 – fotoimtuvai; 4 – precizinė pavara; 5 – kodinis limbas; 6 – 2-o laipsnio kodiniai limbai; 7 – velenas

1.2. Dvejetainės kodinės skalės

Naudojant dvejetainį kodavimą visas matuojamo poslinkio diapazonas A_x suskaidomas vienodais intervalais h_x ir kiekvienam intervalui priskiriamas tam tiktas dvejetainis skaičius. Santykis tarp dvejetainio skaičiaus (kuris yra koduojamo poslinkio ekvivalentas) skilčių „n“ kiekio ir pasikeitimo diapazono A_x , kuris yra lygus $X_{\max} - X_{\min}$, atrodo taip (1.1):

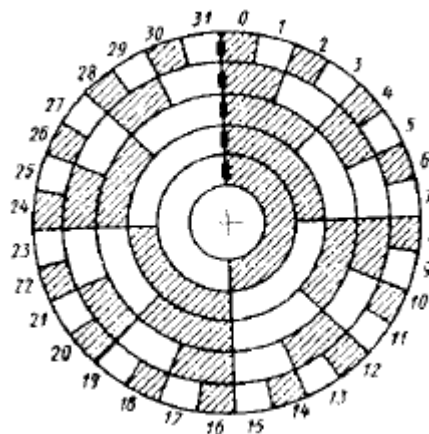
$$2^{n-1} < (X_{\max} - X_{\min})/h_x \leq 2^n \quad (1.1)$$

Kai koduojamas linijinis poslinkis visas dvejetainės skalės laukas suskaidomas į linijinius takelius. Kai koduojamas kampinis poslinkis kodinės skalės laukas suskaidomas į žiedinius koncentrinus takelius. Dvejetainės kampinės kodinės skalės pavyzdys parodytas 1.8 paveiksle. Kodinį nulį atitinka tamsūs intervalai, kodinį vienetą-skaidrus intervalai.

Dvejetainių skaičių jauniausiu skiltį atitinka išorinis kodinės skalės žiedas, o vyriausią skiltį - vidinis žiedas. Jeigu žiedams priskirti eilės numerius pradedant nuo vidinio, tai tam tikro žiedo skaidrių ir tamsių kodinių atkarpų kiekį galima užrašyti taip (1.2):

$$M_k = N_k = 2^{k-1} \quad (1.2)$$

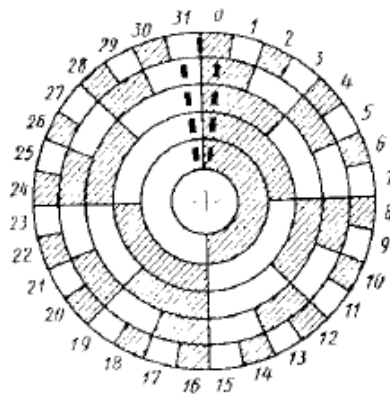
čia $k = 1, 2, 3 \dots n$ - žiedo eilės numeris; M_k - k-ojo žiedo kodinių atkarpų „1“ kiekis; N_k - k-ojo žiedo kodinių atkarpų „0“ kiekis.



1.8 pav. Dvejetainė apvali kodinė skalė

Dvejetainės kodinės skalės privalumas yra tai, kad keitiklio su tokia skale išėjime iškart gaunamas dvejetainio skaičiaus kodas. Tačiau informacijos nuskaitymo nuo dvejetainės kodinės skalės metu gali atsirasti didelės paklaidos. Iš tikrųjų, dvejetainiame kode gali skirtis visos gretimų skaičių skiltys. Todėl kai skalė skaidoma į kodinius intervalus, paaiškėja, kad skiriasi visi sektorių segmentai, kurie atstoja šiuos skaičius. Kad nebūtų nuskaityti netikri kodai pereinant nuo vieno sektoriaus prie kito, reikia, kad riba tarp sektorių būtų tiesioji linija ir nuskaitymo fotoelementai būtų išdėstyti tiksliai šioje linijoje. Bet praktikoje šie reikalavimai neįvykdomi. Kodinės skalės gaminamos su tam tikromis paklaidomis, nuskaitymo fotoelementai statomi tam tikrų tolerancijų ribose. Šių paklaidų egzistavimo pasekmė yra ta, kad pereinant nuo vieno sektoriaus prie kito, t.y. pereinant nuo vienos dvejetainės skilties prie kitos, įvairių skilčių nuskaitymo prietaisai fiksuoją perėjimą ne vienu metu. Toks nesinchroninis nuskaitymas duoda paklaidą, kurios dydis blogiausiu atveju gali siekti iki pusės nuskaitymo nuo skalės maksimalaus dydžio. Tokių didelių nuskaitymo paklaidų atsiradimo galimybė yra ženklus dvejetainių kodinių skalių trūkumas. Šių nuskaitymo nuo dvejetainės kodinės skalės paklaidų eliminavimui naudojami du bendri metodai: daugiau nei vienos eilės nuskaitymo fotoelementų naudojimas su tolesnių loginių signalų pasirinkimu; kodų su ištisiniu vieno vieneto pasikeitimu naudojimas. Yra du pagrindiniai metodai nuskaitymo fotoelementų pastatymo ir loginio parinkimo: „dvigubo šepetio“ metodas ir nuskaitymo fotoelementų V formos išdėstymo metodas. Turint V formos išdėstymą, nuskaitymo fotoelementai simetriškai pasislenka atraminės nuskaitymo linijos atžvilgiu [19, 22].

Kai yra V formos išdėstymas ir loginis nuskaitymo fotoelementų parinkimas, vyriausios skilties kodas gali būti nustatytas tik tada, kai yra nustatytas visų ankstesnių skilčių kodas. Tai didina kodavimo laiką. Šis trukumas eliminuojamas, kai naudojamas nuskaitymas „dvigubo šepetio“ metodu (1.9 pav.), taip pat vadinamu U – nuskaitymu. Čia taip pat naudojami po du nuskaitymo fotoelementai vienai skilčiai, išskyrus jauniausią. Bet skirtingai nuo V formos išdėstymo, nuskaitymo fotoelementai yra išdėstyti simetriškai jauniausios skilties nuskaitymo fotoelementų linijos atžvilgiu, atstumu, kuris yra lygus pusei kodinio intervalo jauniausios skilties. Jeigu nuo jauniausios skilties nuskaitymas kodas „0“, tai kitų skilčių signalai nuskaitymi nuo ankstesnės fotoelementų eilės. Jeigu jauniausios skilties kodas yra „1“, tai kitų skilčių signalai nuskaitymi nuo vėlesnės fotoelementų eilės. Visų skilčių signalai nuskaitymi vienu metu, tai ženkliai sumažina kodavimo laiką [19, 22].



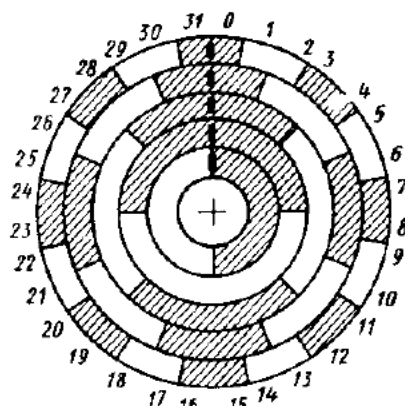
1.9 pav. Dvejetainė apvali kodinė skalė su fotoelementais, išdėstytais „dvigubo šepečio“ metodu

Nuskaitymo neapibrėžtumą dėl kodo pasikeitimo iškart keliose skiltyse galima eliminuoti panaudojus tokį kodą, kuriame perėjimo nuo vieno skaičiaus iki gretimo keičiasi tik viena skiltis. Tokius kodus galima gauti, jei kiekvienai skalės padėčiai formaliai priskirti nulių ir vienetų kombinaciją taip, kad gretimų sektorių kodinės kombinacijos skirtųsi tik vienoje skiltyje. Tarp tokių kodų labiausiai paplitęs yra ciklinis dvejetainis kodas – Grėjaus kodas[19, 22].

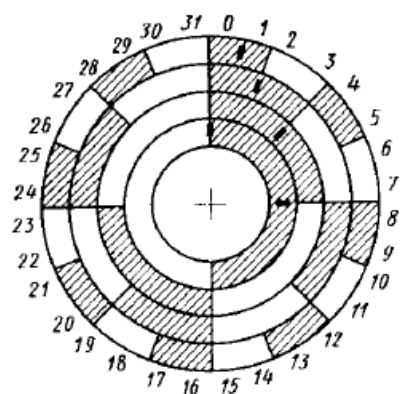
1.10 pav. parodyta apvali skalė su Grėjaus kodu. Grėjaus kodo ypatumas yra tas, kad visų vienetų absoliutus dydis skiltyje „k“ nustatomas taip (1.3):

$$\pm \sum_{i=0}^k 2^i \quad (1.3)$$

Sumuojamų elementų ženklas yra teigiamas visiems neporiniams vienetams skaičiuje, užrašytame Grėjaus kodo pavidalu skaičiuojant iš kairės į dešinę, ir neigiamas visiems poriniams vienetams. Informacijos nuskaitymą Grėjaus kodu galima atlikti naudojant paprastą dvejetainę skalę, tik nuskaitymo fotoelementai turi būti išdėstyti tam tikru būdu atraminės nuskaitymo linijos atžvilgiu. 1.11 paveiksle parodytas 5 skilčių Grėjaus kodo nuo 4 skilčių dvejetainės kodinės skalės nuskaitymo pavyzdys. Jauniausios (1-os) skilties fotoelementas pastumtas atraminės nuskaitymo linijos (kuri eina nuo skaičiaus 0 į skalės centrą) atžvilgiu per pusę jauniausios skilties kodinio sektoriaus ilgio į skaičių didinimo pusę, 2-os skilties fotoelementas pastumtas ta pačia kryptimi per dvigubai didesnę dydį. 3-os skilties fotoelemento postūmis yra dar dvigubai didesnis. 4-os skilties fotoelementas pastumtas dvigubai daugiau negu 3-os skilties fotoelementas, Grėjaus kodo 5-os skilties nuskaitymui fotoelementas statomas 4-os skilties takelyje atraminėje linijoje [19, 22].



1.10 pav. Apvali skalė su Grėjaus kodu



1.11 pav. 5 skilčių Grejaus kodo nuo 4 skilčių dvejetainės apvalios kodinės skalės nuskaitymo pavyzdys

Apibendrinant, grynoje dvejetainėje skalėje pasikartojančių skaidrių ir neskaidrių sektorių dėka yra 2^{k-1} galimos fotoelementų padėtys „k“ skilties takelyje. Nuskaitymo fotoelementas gali būti pastatytas bet kurioje iš 2^{k-1} padėčių, jeigu tai reikalauja keitiklio konstrukcija, pavyzdžiui, kuriant miniatiūrinį keitiklį.

Nagrinėjant skales su Grėjaus kodu, paaiškėja, kad pereinant nuo vieno skaičiaus prie gretimo, riba tarp šviesaus ir tamsaus sektorių (atstovaujančių atitinkamai kodus „1“ ir „0“) pereinama tik vieną kartą. Kitaip tariant skaitmuo keičiasi tik vienoje skiltyje. Taigi šiuo atveju nuskaitymo paklaida neviršija jaunosios skilties vieneto. Reikia pažymėti, kad Grėjaus kodo skalės gamybos tolerancijos ir nuskaitymo elementų pastatymo tolerancijos yra daug griežtesnės, nei tos, kurios taikomos naudojant loginį nuskaitymą nuo dvejetainės skalės [19, 22].

1.3. Apskritiminių skalių matavimo būdai

Limbo ir kitokio pobūdžio apskritiminių skalių brūkšnių kampinės padėties paklaidos yra nustatomos ir įvertinamos šiais būdais:

- 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.

Pastovaus kampo kartojimo apskritime būdas buvo tobulintas ir išplėtotas daugelio mokslininkų. Plačiai yra žinomi H. Brunso (Bruns), matematiko G. Šraiberio (Schreiber), prancūzų fiziko ir metrologo A. Peraro (Perard), šveicarų mokslininko H. Vildo (Wild), Heivelinko (Heiwelink), S. Jelisejevo ir kt. Būdai [9].

Matuojant limbus Vildo būdu, apskritime nuosekliai yra kartojamas kampas (pagal šį būdą vadinamas kontroliniu), kurio tikroji reikšmė, lyginant su limbo padalomis, įvertinama apskaičiuojant vidutinį aritmetinį vidurkį ir iš jo atimant atskiras kampų reikšmes. Tokiu būdu yra gaunamos taip vadinamos "pataisų" reikšmės. Jas suradus, yra apskaičiuojamos redukuotos limbo "diametrų" reikšmės, nustatant jų nuokrypį nuo vienos ašies. Tą patį kampą atidedant nuo kitų limbo padalų (pavyzdžiui, 10° , 20° , 30° ir t. t.), gali būti apskaičiuojamos paklaidos kas 10° , atitinkamai pavaizduojant jas grafiškai. Būdo trūkumas yra tas, kad diametrų paklaidų dydžiai įvairiose limbo vietose yra nustatomi nevienodu tikslumu, taip pat netiksliai yra nustatoma grafiko ašies padėtis [9].

Šį trūkumą pataiso Č. Vitoženco būdas, kuriuo matuojant tarp pirmos serijos krypties yra įterpiami kitos krypties matavimai, sudarantys kartotinę pirmos serijos kampo dalį (pvz., 36° kampe yra įterpiami matavimai 9° kampu).

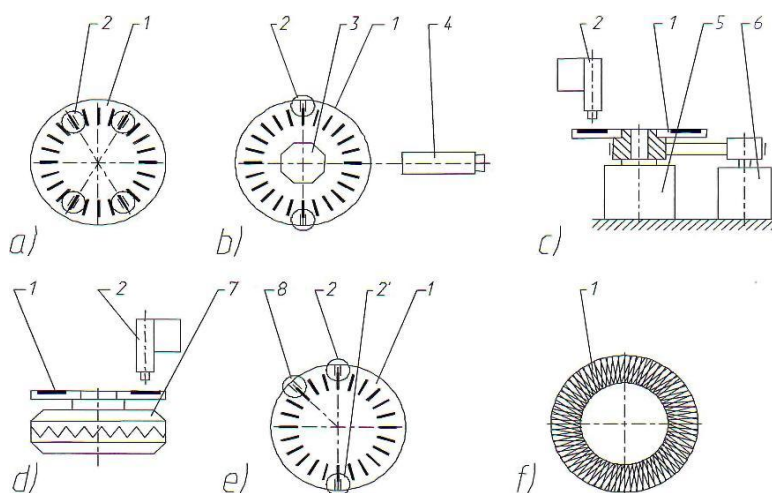
Išsamesniam limbo padalų tikslumo įvertinimui yra skirtas Heivelinko būdas, tačiau matavimai pagal jį trunka visą darbo dieną (vertinant pagal literatūroje nurodomą ankstesnių metų matavimo ir skaičiavimo trukmę), ilgai trunka rezultatų apdorojimas. Aišku, ta trukmė nurodoma tam atvejui, kai nebuvo naudojamos beveik jokiomis matavimų ir skaičiavimų automatizavimo priemonėmis. Taikant pastarąjį būdą, yra nustatomos atsitiktinės ir sisteminės limbo padalų kampo paklaidos, o pastarosios išreiškiamos Furjė eilutėmis. Be to, yra nustatomas santykis tarp vidutinės kvadratinės padalų paklaidos ir bendros vidutinės kvadratinės padalų paklaidos viena pasirinkta matavimo kryptimi. Iš jos nuosekliai pagal Furjė eilutės narių skaičių yra eliminuojamos periodinės paklaidų sudėtinės dalys ir pereinama prie atsitiktinių, charakterizuojančių padalų tikslumą [9].

S. Jelisejevo metodas, pagrįstas supaprastintu Brunso ruožtu (rozečių) metodu, yra skirtas matavimų tikslumo didinimui. Norint išmatuoti limbą kas 3° , yra matuojama 36° , 45° ir 60° kampai ties limbo kampų padėtimis 0° , 3° , 6° , ..., 177° . Apskaičiuojamos išmatuotos paklaidų vidutinės reikšmės ir gaunamos vidutinės pataisų reikšmės. Atliekamų savitarpio matavimų skaičiavimų dėka betarpiškai yra nustatomos limbo "diametrų" paklaidos. Teigiama, kad naudojant šį metodą, matavimų trukmė yra pusantro karto didesnė, negu matuojant Heivelinko būdu.

Rastrinėje skalėje būna nuo kelių šimtų iki kelių dešimčių tūkstančių brūkšnelių. Kadangi kampų etalonai, arba matavimo prietaisais sudaromi kampai gali būti tik tam tikro riboto dydžio, aiškėja, kad matuojant sulyginimo būdu, bus išmatuotas tik nedidelis skaičius rastro brūkšnelių. Aukščiau minėtuose matavimų būdo aprašymuose yra akcentuojamos ilgų periodų sisteminės paklaidos ir smulkaus periodo paklaidos. Prie smulkaus periodo paklaidų priskiriamos paklaidos, esančios 1° ... 3° kampo ribose [9].

Norint išvengti limbo pastatymo ekscentriciteto paklaidos, matavimo metu daugiausiai yra taikomas dvipusis limbo brūkšnių matavimas, tokiu būdu nustatant taip vadinamų limbo "diametrų" paklaidas. Gauti matavimų rezultatai po to apskaičiuojami, panaudojant matematinės statistikos elementus ir pilno apskritimo, prasidedančio ir besibaigiančio ties tuo pačiu brūkšniu, savybę [9].

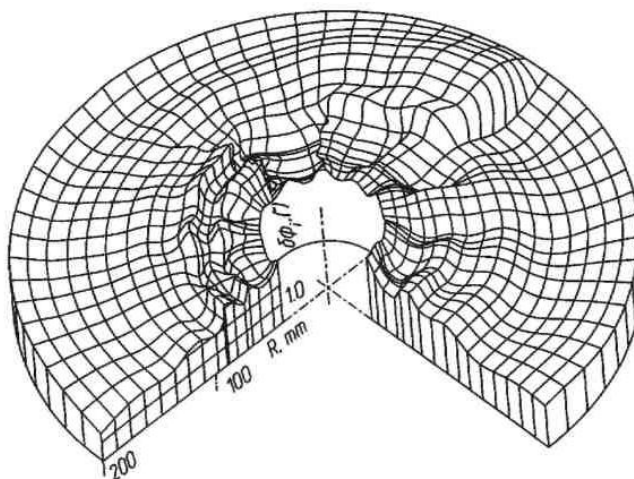
Toliau pateiktos kai kurios matavimų technikoje naudojamos kampų matavimo schemas (1.12 pav.).



1.12 pav. Apskritiminių skalių matavimo būdai: a) – kalibravimas pastoviu kampu pilname apskritime; b) – skalės kalibravimas poligonu – autokolimatoriumi; c) – stabilus sukimas ir signalų iš skalės žymių lyginimas laike; d) – kalibravimas lyginant skalės žymes su precizinio Moore Indexing table etalonu, e) – trijų mikroskopų metodas, t) – muarinio vaizdo metodas, 1 – matuojamoji skalė, 2, 8 – skalės padalų atskaitymo prietaisas (mikroskopas ar kt.), 3 – poligonas, 4 – autokollimatorius, 5 – sukimo ašis, 6 – pavara, 7 – Moore Index staliukas

Beveik visų matavimo būdų taikymas priklauso nuo matuojamosios skalės diametro, pamatinio etalono ir matavimo prietaisų matmenų. Net ir šiuolaikinių fotoelektrinių mikroskopų, naudojamų skalės brūkšnių padėčiai atskaityti, matmenys trukdo matuoti skales, kurių diameteras yra apie 50 mm ir mažesnis. Todėl matavimo tikslumo didinimas yra itin aktualus mažų diametro limbams. 1.13 paveiksle yra parodytas limbų tikslumo matavimų kitimas, įvertinus 62 limbų matavimus, juos atliekant su įvairaus diametro limbais -nuo 400 mm iki ~ 30 mm diametro. Mažų diametro skalės buvo matuojamos vienu mikroskopu, o paklaidos apskaičiuojamos pašalinus ekscentriciteto įtakos sandą [9].

Didelio (apie 150-200 mm) diametro limbų matavimai rodo stabilų, tolygų paklaidų pasiskirstymą, o limbų diametrui mažėjant (nuo 100 mm) yra pastebimos didelės paklaidos, staigūs jų kitimo periodai. Tai rodo, kaip jau buvo nustatyta ankstesniuose tyrimuose, didelę technologinių įrenginių tikslumo parametrų įtaką, gaminant mažo diametro limbus, taip pat didelę linijinių matavimo verčių įtaką, matuojant kampų paklaidas [9].



1.13 pav. Limbų paklaidų matavimo rezultatai pagal limbų skersmenį

Ekscentriciteto paklaidų padeda išvengti limbo priešpriešinių brūkšnių linijų kanpinės padėties tikslumo matavimas. Šią paklaidą sudaro dviejų priešingos limbo centro pusėse esančių brūkšnių paklaidų algebrinės sumos pusė (1.4):

$$\Delta(\varphi_{\Sigma}^i) = \frac{1}{2}(\varphi_{\Sigma}^i + \varphi_{\Sigma}^{i+180^\circ}) \quad (1.4)$$

čia φ_{Σ}^i ir $\varphi_{\Sigma}^{i+180^\circ}$ - priešingose skalės pusėse esančių brūkšnių kampinės padėties paklaidos.

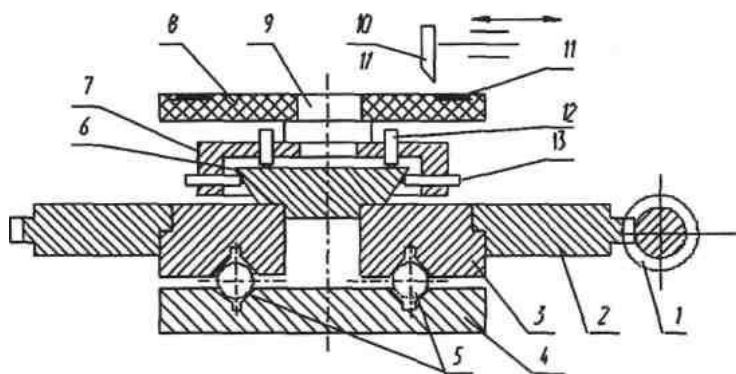
1.4. Limbų ir jų originalų rastrų formavimo metodų apžvalga

Limbų gamybai naudojami keli būdai. Labiausiai paplitę yra mechaninis, fotolitografinis, elektroerozinis, ultragarsinis, graviravimo, fotomechaninis ir kiti progresyvūs būdai.

Mechaninis būdas skiriasi tuo, kad naudojamas tik mechaninis apdirbimas, kurio metu disko pagrinde, pašalinama medžiaga skaidrių sektorių vietose vienu iš žinomu būdu (gręžimu, pjovimu ir kt.). Taip gaunamas tik vienas kodinis diskas ir jo tikslumas paprastai būna neaukštas.

Gaminamoje apskritiminėje skalėje brūkšniai paprastai yra įpjunami peiliuku. Svarbus elementas, nuo kurio labai priklauso dalijamos apskritiminės skalės tikslumas, yra įpjunamos skalės pasukimo ašis. Skalių gamybos įrenginiuose yra naudojami ir aerostatiniai sukliai (špindeliai), kurių bazinės detalės turi rutulinius, kuginius, cilindrinus ir plokščius paviršius [26].

Lietuvoje sukurtų ADM kampinio pozicionavimo paklaida neviršija vienos kampo sekundės, o ruošinio sukimo ašies trajektorijos paklaida yra apie 0,1 μm . Panaši ir peiliuko judesio tiesialinijškumo vertė. Šiomis mašinomis gaminami 0,5" tikslumo limbai, o laikantis techninėje norminėje dokumentacijoje nurodytų sąlygų, galima pasiekti ir apie 0,3 kampo sekundės tikslumą. Precizinės apskrito dalijimo mašinos ašies pjūvis pateiktas 1.14 paveiksle. Gaminamos skalės ruošinys 8 tvirtinamas prie išpraustinės 9, kuri yra sujungta su reguliavimo staliuku 7. Justavimo sraigteliais 12 ir 13 staliukas ir skalės ruošinys pirmiausia yra niveliuojami – ruošinys yra pastatomas taip, kad jo plokštuma būtų lygiagreti su sliekračio 2 sukimosi ašies plokštuma. Paskui keturiais (kai kada ir trimis, esančiais kas 120") sraigteliais skalė su staliuku yra centruojama sliekračio sukimosi ašies atžvilgiu. Naudojant justavimo mechanizmą galima skalės ruošinį centruoti ir niveliuoti apie vieno mikrometro tikslumu. Be to, šiam tikslui yra naudojama ir automatizuota justavimo įranga su pjezoelektriniais vykdikliais, o centruojant bei niveliuojant ruošinį, yra pasiekiamas dar didesnis tikslumas [19].



1.14 pav. Precizinės apskrito dalijimo mašinos ašies pjūvis: 1 – globoidinis sliekas; 2 – sliekratis; 3, 4 – disko pavidalo atraminis guolis; 5 – rutuliukai; 6 – kūginis Diskas; 7 – reguliavimo staliukas; 8 – stiklinis diskas – limbo ruošinys; 9 – ruošinio tvirtinimo įspraustinė; 10 – peiliukas; 11 – skalėje įrėžtas brūkšny; 12, 13 – justavimo sraigteliai

Fotolitografniu būdu gaminant limbus, pirma gaminamas limbas – originalas, kuris toliau naudojamas darbinių limbų gamybai kontaktinio spausdinimo metodu. Kontaktinio spausdinimo metodas turi keletą technologinių ciklų:

- *limbo-originalo* gamybą pagal brėžinį ant specialaus stiklinio pagrindo, kuris turi fetro arba chromo padengimą fragmentu multiplikavimo būdu;
- *kontaktinio* spausdinimo būdu, naudojant specialius įrengimus, gaminami darbiniai limbai-originalai. Gamybos metu darbiniai originalai praeina visą eilę piešinio fiksavimo cheminių procesų specialų ėsdinimą;
- *kontaktinio spausdinimo* būdu, naudojant fotolitografiją ir kitus technologinius procesus, gaminami darbiniai limbai.

Čia limbo pagrindo padengimas fotorezistu daromas naudojant specialius centrifuginius įrenginius, kurie užtikrina kokybišką (tolygų) fotorezisto padengimą. Stiklo darbinio paviršiaus padengimas chromu atliekamas specialiose vakuuminėse kamerose, kur giliame vakuume chromas garuoja ir jo molekulės tolygiai padengia stiklinio disko paviršių arba tam tikras disko zonas.

UAB „Precizika Metrology“ jau 40 metų naudoja aprašytą būdą gaminant įvairias rastrines skales. Įvertinant daugiametę gamybos patirtį ir visų technologinių procesų automatizaciją, jos gaminamų rastrinių skalių kokybė neatsilieka nuo analogiškų užsienio įmonių gaminių kokybės [19].

Elektroerozinis būdas – tai plonų metalinių paruošų elektroerozinis pradūrimas – pjaustymas. Elektroerozinio pradūrimo įrangos darbinė dalis turi parinkto kodo konfigūraciją. Šiai operacijai skirta įranga taip pat gali būti pagaminta elektroeroziniu metodu. Tai daroma taip: cilindrinėse

paruošose, iš kurių kiekviena atitinka tam tikrai skilčiai, naudojant dalijimo įrenginį sumontuotą elektroerozinę staklę, torcinėje pusėje prapjaunami grioveliai. Po tokių paruošų surinkimo ir justiravimo gaunama pradūrimo įranga. Šia įranga tose pačiose staklėse praduriama/prapjaunama plona metaline paruoša, taip gaunamas limbas su kodinių piešiniu skaidrių ir neskaidrių sektorių pavidalo [19].

Ultragarsinis būdas labai panašus į elektroerozinį. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad darbinė įranga, paveikta ultragarsiniais virpesiais, ardo paruošos, esančios vonioje su skysčiu ir abrazyviniais milteliais, apdirbimo paviršių. Šios operacijos metu kopijuojamas įrangos profilis [19].

Graviravimo metalizuotame padengime būdas. Būdai, turintys aukščiausią našumą, leidžiantys gauti aukščiausio tikslumo kodinius piešinius, yra tokie, kur limbai gaminami naudojant specialius dalijimo įrengimus.

Gamybos procesas susidaro paprastai iš dviejų pagrindinių etapų: limbo – etalono gamybos ir jo kopijavimo, t.y. darbinių limbų gamybos.

Naudojant graviravimą metalizuotame padengime kodinis piešinys gaunamas skaidrių sektorių vietoje nuimant metalizuotą padengimą nuo stiklinės paruošos paviršiaus. Šis būdas turi du charakteringus etapus:

- stiklinės paruošos padengimas metalizuota danga;
- piešinio graviravimas ant metalizuoto padengimo naudojant posūkio dalijimo mašiną [19].

Fotomechaniniai būdai, tai piešinio eksponavimas šviesos srautu ant šviesai jautrios emulsijos, naudojant aukšto tikslumo dalijimo įrengimus.

Reikia pabrėžti, kad dalijimo stalo, ant kurio pritvirtinta paruoša su šviesai jautria emulsija, posūkį galima atlikti tiek ištisai, tiek diskretiškai. Išstis dalijimo stalo sukimas turi privalumų, nes techniškai jis lengviau atliekamas, be to leidžia gaminti didesnio tikslumo kodinius piešinius, nes neturi mechaninių diskretizavimo paklaidų [19].

Lazeriniai būdai – vienas iš pažangiausių limbų gamybos būdų yra toks, kur šviesos šaltiniu naudojamas optinis kvantinis generatorius – lazeris.

Pagrindinis lazerio spinduliuojamo srauto skirtumas yra tas, kad jis yra monochrominis ir koherentinis, yra labai siauras ir pakankamai galingas.

Aukšto tikslumo kodinių piešinių gamyba lazeriu galima naudojant ir minėtus būdus. Tam tikro bangos ilgio lazerinis spinduliavimas, taip pat kaip ir paprasto šviestuvo spinduliavimas, gali būti panaudotas fotocheminiam poveikiui į šviesai jautrius sluoksnius arba fotoeristus, Taip pat

galingas lazerinis spinduliavimas, paprastai impulsinis, gali būti panaudotas terminiam poveikiui į plonas plėveles, esančias ant skaidrios paruošos.

Lazerio panaudojimas šviesai jautrios medžiagos eksponavimui turi privalumų, kurie atsiranda dėl to, kad šviesos srautas yra monochrominis, turi mažą sklaidos kampą ir aukštesnį nei kiti šviesos šaltiniai (pastovios šviesos šaltiniai, impulsinės lempos) šviesos srauto tankį. Impulsinis lazerinis srautas, kai impulso ilgis yra iki 10^{-7} , leidžia padidinti šviesos galingumą ir pagerinti vaizdo kokybę dėl to, kad limbų gamybos įrenginį veikia mažesnės vibracijos. Dėl vibracijų poveikio eksponavimo metu vaizdas pasislenka, dėl to jis gali gautis neryškus, nepaisant to, kad visas įrenginys gali turėti geras charakteristikas, padidinto standumo konstrukciją ir specialius antivibracinius įrenginius [19].

2. LITERATŪROS APŽVALGOS APIBENDRINIMAS

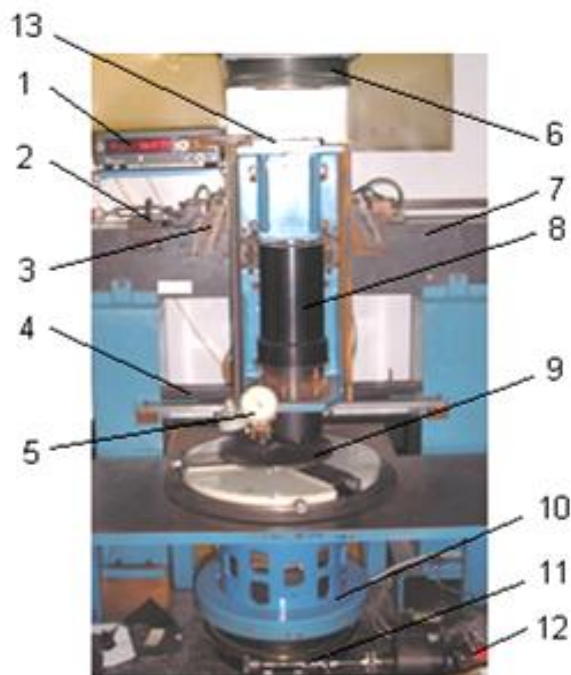
Atlikus literatūros apžvalgą buvo pastebėta kad:

- Vienas iš diskinių absoliučiujų optinių enkoderių trūkumų yra nedidelis jų matavimo diapazonas, lygus 360° . Reguliavimo diapazoną galima išplėsti naudojant daugiasūkius enkoderius, kai greta kampo kodavimo disko sumontuojama šio disko apsisukimų matavimo sistema.
- Prieauginiams kampinio poslinkio jutikliams būdingas esminis trūkumas, susijęs su informacijos praradimu, dingus maitinimo įtampai ar išjungus sistemą.
- Išanalizavus keitiklių charakteristikas, nustatyta, kad tiksliausio šiuo metu gaminamo Heidenhain firmos (Vokietija) keitiklio paklaida siekia $\pm 0,4''$, kai signalai formuoti ir $\pm 0,2''$, kai signalai specialiai derinti, neformuojant.
- Fotolitografinio rastro formavimo procesas yra lengvai suderinamas, gaunama labai gera brūkšnio kokybė, trūkumas – gaminant sudėtingos struktūros rastrą/kodas procesas trunka labai ilgai.
- Pats pažangiausias limbų ir jų originalų rastrų formavimo metodas – lazerinis būdas, procesas yra labai greitas ir užtikrina didelį našumą, tačiau reikalauja daug, tiesa sudėtingiausias ir reikalaujantis daugiausia investicijų.

3. LIMBŲ ORIGINALŲ GAMYBOS PROCESAS

3.1. Limbų gamybos įrenginio ir rastro formavimo multiplikavimo būdu analizė

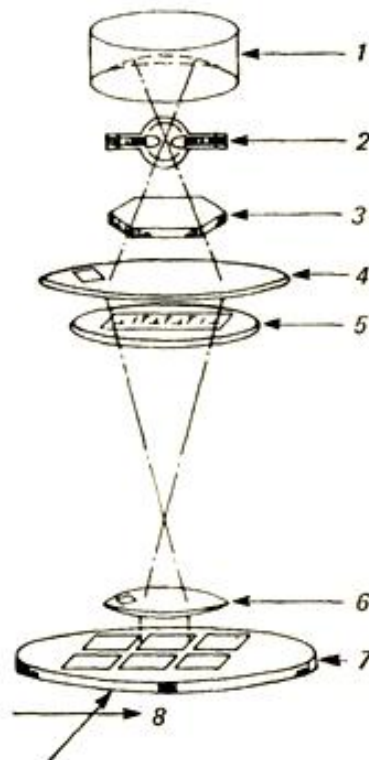
Limbų originalų gamybos įrenginį (3.1 pav.) sudaro aerostatinis špindelis 10, jį pasuką užduotu kampu precizinė sliekinė pavara 11 valdoma nuolatinės srovės varikliais 12. Ant sukamo stalo 9 tvirtinama stiklinė plokštelė padengta chromu ir fotorezistu, kurioje multiplikavimo būdu formuojamas rastras ar kodinė limbų struktūra. Indikatorius 5 reikalingas nustatyti reikiamą atstumą tarp objektyvo 8 ir plokštelės, etaloninis fragmentas 13 eksponuojamas per objektyvą iš kurio suformuojamas rastras ar kodas 360° perimetru. Eksponavimas vyksta įjungus šviestuvą 6. Limbų originalų rastro užduoti radialiniai matmenys išgaunami paslinkus ir užfiksavus kariatėlę su aerostatiniais guoliais 3 reikiamojoje padėtyje, kariatėlė slankioja portalo 7 išilgine kryptimi, jis pagamintas iš granito, poslinkį išilgine portalo kryptimi fiksuoja linijinis poslinkio keitiklis 4, poslinkio didis pateikiamas rodmenų bloke 1, labai maži poslinkiai atliekami mikrometrine pastūma 2, didesni paslenkant kariatėlę rankomis, nustačius ją į reikiamą padėtį, fiksuojama fiksavimo varžtu (5.11 pav.).



3.1 pav. Limbų originalų gamybos įrenginys: 1 – rodmenų blokas; 2 – mikrometrinė pastūma; 3 – kariatėlė su aerostatiniais guoliais; 4 – linijinis poslinkio keitiklis; 5 – indikatorius; 6 – šviestuvas; 7 – portalas; 8 – objektyvas; 9 – sukamasis stalo; 10 – aerostatinis špindelis; 11 – sliekinė pavara; 12 – varikliai; 13 – etaloninis fragmentas

Gaminant limbus multiplikavimo būdu gamybos proceso seka yra tokia: pirmiausiai suformuojamas etaloninis limbo rastro fragmentas 6.3 pav., sudarytas iš x brūkšnių – bendro kartotinio skaičiaus. Toliau etaloninį rastro fragmentą bazuojant tarp šviestuvo ir objektyvo fragmentas apšviečiamas. Etaloninio rastro fragmento vaizdas perėjęs per objektyvo lęšius, du kartus sumažintas, apšviečią stiklo plokštelę padengtą chromo ir fotorezistu sluoksniu [20, 21]. Apšvietus – sukamasis stalas pasukamas kampu, kuris lygus limbo rastro bendram kartotiniam brūkšnių skaičiui, tokia operacija kartojama 360° apskritimu. Pasukimo kampas yra mažesnis už suformuoto etaloninio rastro fragmento kampą (6.3 pav.), todėl etaloninio rastro fragmento vaizdas persidengia – multiplikuojamas. Atlikus eksponavimo operaciją, fotolitografijos [20, 21], technologijos būdu, suformuojamas skaidrių/neskaidrių brūkšnių derinys.

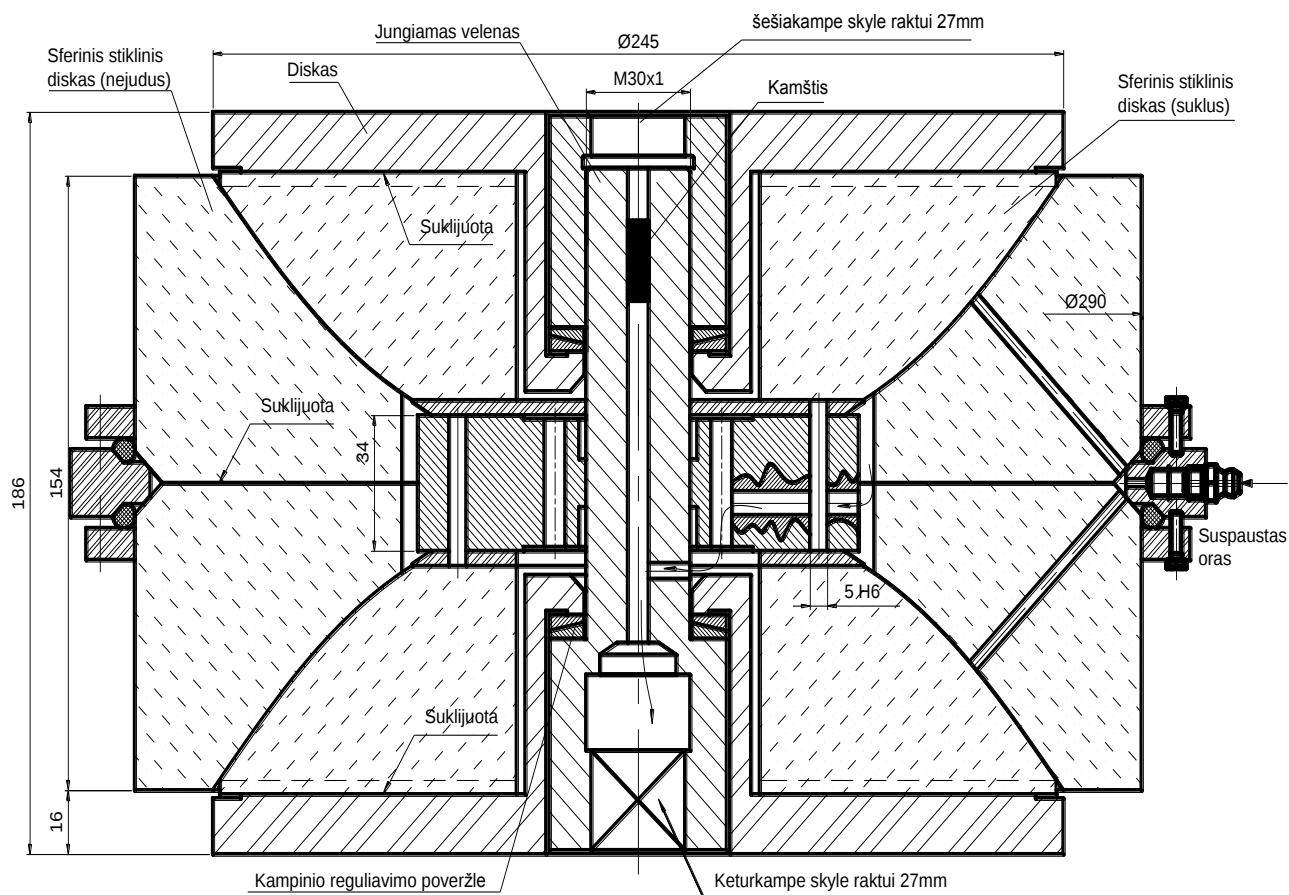
Limbo rastrų eksponavimo schema pavaizduota 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Rastro eksponavimo schema: 1 – veidrodis; 2 – šviesos šaltinis; 3 – filtras; 4 – kodecacinis lęšis; 5 – rastro fragmento šablonas; 6 – mažinantis objektyvas; 7 – stiklo plokštelė padengta chromo ir rezisto danga; 8 – pasukamas stalas

Pasukamo stalo špindelio konstrukcija parodyta 3.3 paveiksle. Jo pagrindą sudaro du sferiniai stikliniai diskai – sukliai ir du nejudantis suklijuoti sferiniai stikliniai diskai. Ant suklių tvirtinami

(priklijuojami) metaliniai diskai. Tokių špindelių – didelis sukimosi tikslumas, o trukumas – sudėtinga gamybos technologija ir neatsparus smūgiams.



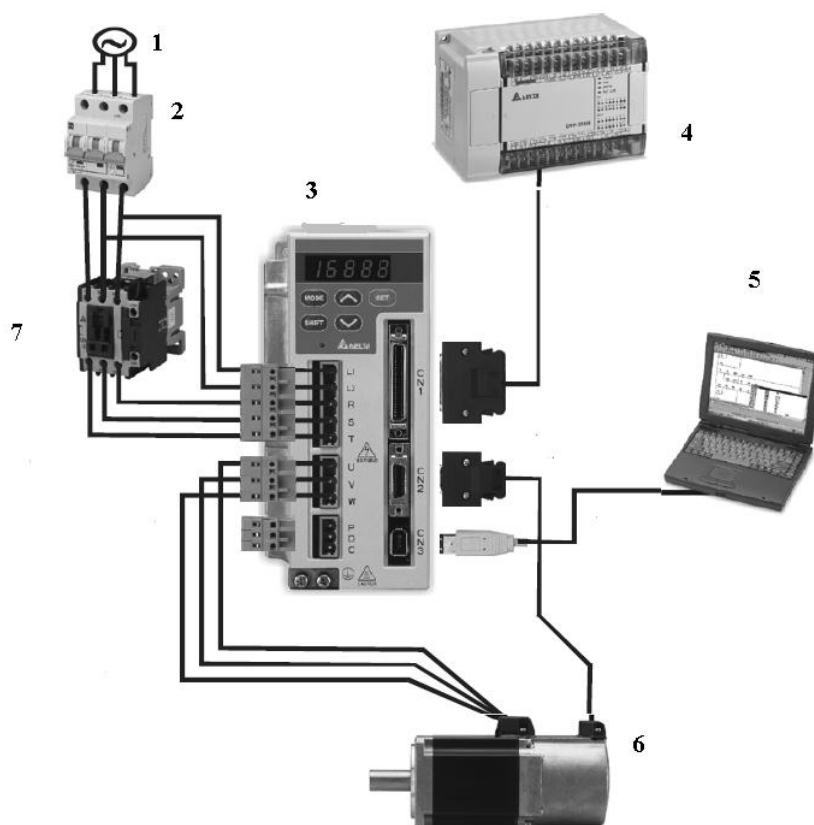
3.3 pav. Aerostatinis špindelis

3.2. Valdymo elektronikos aprašymas

Variklis firmos "Delta", kartu su valdymo bloku ir pajungimo schema parodyta 3.4 paveiksle. Dėka valdymo bloko galima reguliuoti variklio apsisukimus. Valdymo blokas suderinamas su operacine sistema "Windows". Variklio techninės charakteristikos pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Servovariklio techninės charakteristikos

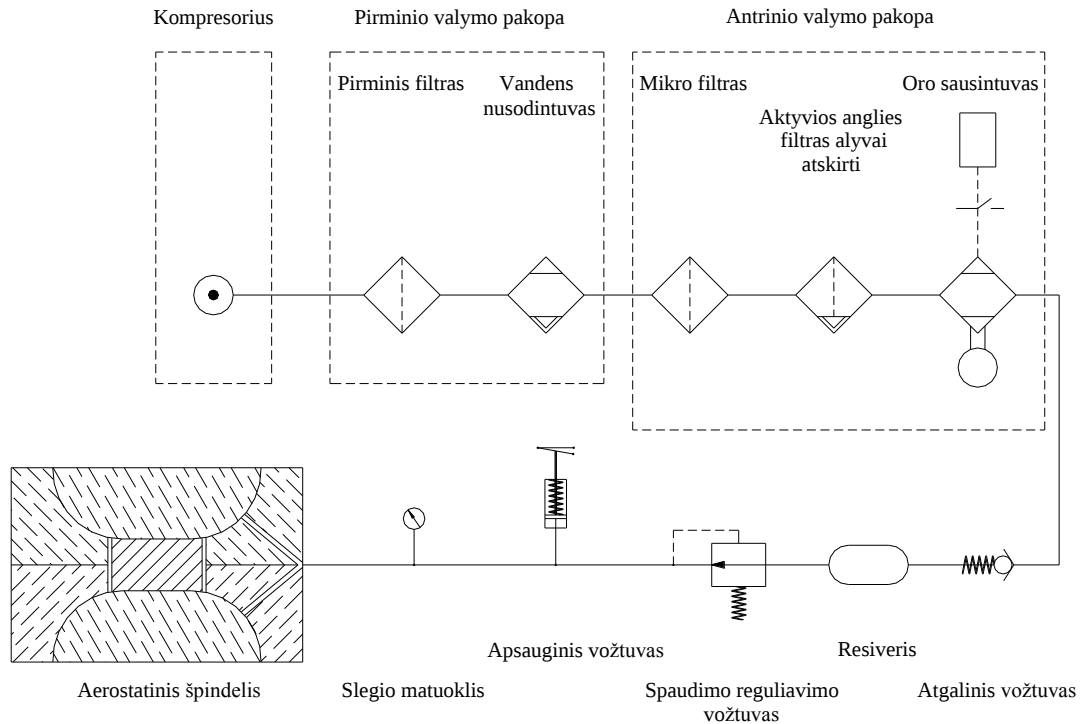
Variklio markė	ASMT 01 L 250 AK
Nominalus galingumas (W)	100
Nominalus sukimo momentas (N m)	0,318
Maksimalus sukimo momentas (N m)	0,95
Nominalus apsisukimai (aps/min)	3000
Maksimalus apsisukimai (aps/min)	5000
Nominali srovė (A)	1,1
Darbinė temperatūra	nuo 0 iki 40°C
Sandėliavimo temperatūra	nuo 20 iki 70°C



3.4 pav. Valdymo bloko prijungimo schema: 1 – srovės šaltinis, 2 – saugiklis, 3 – valdymo blokas, 4 – skaitmeninių/analoginių signalų keitiklis, 5 – kompiuteris, 6 – variklis, 7 – magnetinė relė

3.3. Suslėgto oro tiekimo sistema

Oro tiekimo sistemos schema pateikta 3.5 paveiksle. Kompresoriumi suslėgtas oras tiekimas į aerostatinį špindelį. Tiekiamas oras turi būti išvalytas nuo įvairių dulkių, drėgmės ir tepalo.



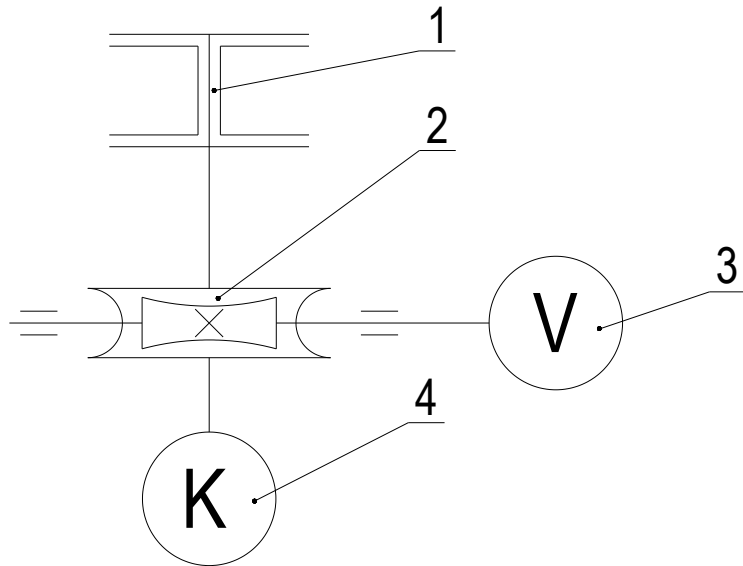
3.5 pav. Oro tiekimo schema

3.4. Įrenginio dinaminis modelis

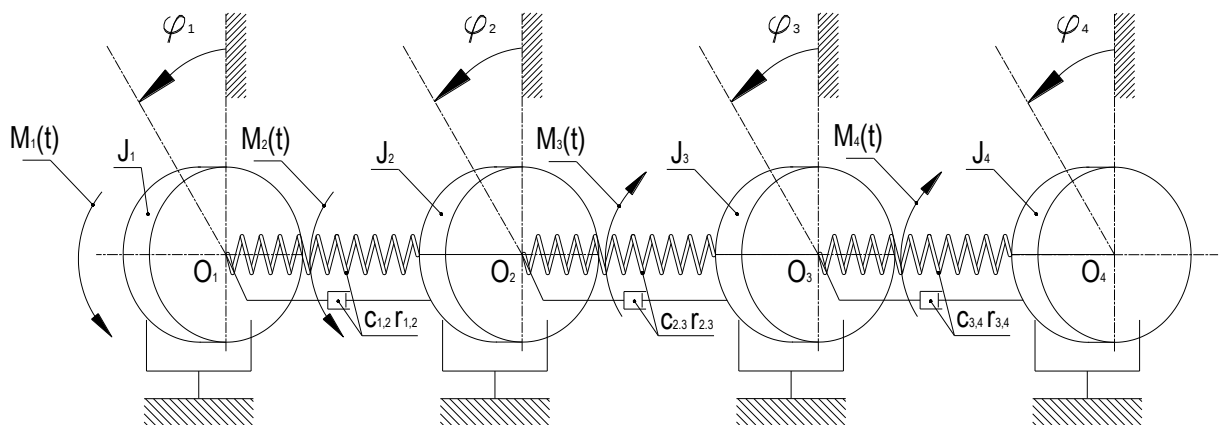
Dinaminį modelį sudaro tokie pagrindiniai elementai (3.7 pav.):

- Jėgos dedamoji (M) [$N \cdot m$];
- Inercijos momentas (J) [$kg \cdot m^2$];
- Poslinkio koordinatė (φ) [rad];
- Slopavimo elementas (r) [$N \cdot m / rad$];
- Tamprusis elementas (k) [$N \cdot m \cdot s / rad$].

Įrenginio kinematinė schema parodyta 3.6 paveiksle, o dinaminis modelis 3.7 paveiksle.



3.6 pav. Kinematinė mechanizmo schema: 1 – aerostatinis špindelįs; 2 – sliėkinė pavara; 3 – variklis; 4 – kampinis keitiklis



3.7 pav. Sistemos dinaminis modelis

Aprašant dinaminį modelį naudojame Langranžo antrojo laipsnio lygtį (3.1):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i. \quad (3.1)$$

čia T, Π – mechaninės sistemos kinetinė ir potencinė energijos; Φ – mechaninės sistemos disipatyvinė funkcija; Q_i – apibendrintoji jėga; q_i – apibendrintoji koordinatė.

Mechaninės sistemos kinetinės energijos [1] lygtis (3.2):

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} I_i \dot{\varphi}_i^2. \quad (3.2)$$

čia I_i – i-tojo kūno masių inercijos momentas apie jo sukimosi ašį; $\dot{\varphi}_i$ – i-tojo kūno kampinis greitis.

Mechaninės sistemos potencinė energija [1] lygti tampriųjų elementų potencinių energijų sumai (3.3):

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} k_{i,i+1} (\varphi_{i+1} - \varphi_i)^2 + \frac{1}{2} k_{n0} \varphi_n^2. \quad (3.3)$$

čia $k_{i,i+1}$ – tampriojo elemento sukamojo judesio standumo koeficientas; k_{n0} – m-tojo tampriojo elemento sukamojo judesio standumo koeficientas; φ_i , φ_{i+1} – tampriojo elemento galų posūkio kampai.

Mechaninės sistemos disipatyvinė funkcija [1] lygti elementų disipatyvinių funkcijų sumai (3.4):

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} c_{i,i+1} (\dot{\varphi}_{i+1} - \dot{\varphi}_i)^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} c_i \dot{\varphi}_i^2. \quad (3.4)$$

čia $c_{i,i+1}$ – elemento sukamojo judesio koeficientas; c_i – i-tojo kūno slopinimo koeficientas; $\dot{\varphi}_{i+1} - \dot{\varphi}_i$ – elementų galų kampiniai greičiai.

Dinaminio modelio lygtis [1] yra (3.5):

$$\begin{aligned} T &= 1/2 [J_1 \dot{\varphi}_1^2 + J_2 \dot{\varphi}_2^2 + J_3 \dot{\varphi}_3^2 + J_4 \dot{\varphi}_4^2]; \\ \Pi &= 1/2 [c_{1,2} (\varphi_1 - \varphi_2)^2 + c_{2,3} (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + c_{3,4} (\varphi_3 - \varphi_4)^2]; \\ \Phi &= 1/2 [r_{1,2} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)^2 + r_{2,3} (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)^2 + r_{3,4} (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4)^2 + r_1 \dot{\varphi}_1^2 + r_2 \dot{\varphi}_2^2 \\ &\quad + r_3 \dot{\varphi}_3^2 + r_4 \dot{\varphi}_4^2]. \end{aligned} \quad (3.5)$$

4. LIMBŲ ORIGINALŲ FORMAVIMO TIKSLUMO ANALIZĖ

4.1. Limbų, skirtų precizinėms matavimo sistemoms, tikslumo parametrų analizė

Pagrindiniai reikalavimai, kuriuos turi tenkinti periodinės struktūros ir kodiniai diskai yra:

lygus disko paviršius, jo ne plokštumas turi būti nuo 10 iki 2 mikronų, o ne lygiagretumas nuo 30 iki 10 mikronų, priklausomai nuo brūkšnių žingsnio, mechaninis medžiagos atsparumas;

rastro ir kodinių zonų išdėstymo, atstumo tarp jų, kraštinių tikslumas; lygus ir ryškūs gradavimo kraštai;

medžiagos defektų nebuvimas, pakankamas tamsių sektorių tankis ir pakankamas šviesių sektorių skaidrumas;

dulkių, nešvarumų, įbrėžimų ir kitų defektų darbiniam disko paviršiuje nebuvimas;

gera pagrindo ir padengimo medžiagos adhezija; limbų parametrų stabilumas, kai keičiasi eksploatacijos sąlygos.

Šie reikalavimai keliami darbiniam limbams, kurie paprastai gaunami kopijavimo būdu naudojant etaloninius limbus.

Limbus galima skirti pagal pagrindo medžiagą ir kodinio piešinio darymo būdą. Pagal pagrindo medžiagą jie skirstomi į limbus su neskaidriu pagrindu ir į limbus su skaidriu pagrindu.

Pirmu atveju neskaidrus sektorius – tai pats limbo pagrindas, o skaidrus – oro erdvė. Tokie limbai užtikrina visišką šviesos srauto, einančio į fotodiodus, uždengimą tamsos režime (kai kodas lygus nuliui) ir neduoda papildomų šviesos srauto praradimų šviesos režime (dvejetainis vienetas). Kai pagrindas yra skaidrus ant jo daromas neskaidrus padengimas ir po to atitinkami kodiniai (rastriniai) sektoriai.

4.1 lentelė. Pagrindiniai limbams keliami reikalavimai

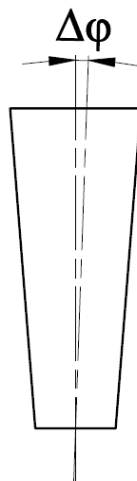
Limbo pavadinimas	Išorinis matmuo, mm	Brūkšnių skaičius, vnt.	Žingsnis, μm	Brūkšnio pločio nuokrypis, μm	Kampo nuokrypis, laips.	Dangos šviesos pralaidumas, %	Stiklo storis, mm
Wachendorff IS424096H8	$\varnothing 42,0$	4096	31	± 2	$\pm 0,003^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$
Wachendorff IS424096G8	$\varnothing 42,0$	4096	31	± 2	$\pm 0,003^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$
Wachendorff IS583840H8	$\varnothing 58,0$	3840	47	± 2	$\pm 0,003^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$
Wachendorff IS824096H8	$\varnothing 82,0$	4096	124	± 2	$\pm 0,003^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$
Wachendorff IS422500G2	$\varnothing 42,0$	5000/2500	25/50	$\pm 0,8$	$\pm 0,0025^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$
Wachendorff IS271000G8	$\varnothing 27,0$	1000	16	± 1	$\pm 0,003^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$
Wachendorff IS425000GJ	$\varnothing 42,0$	5000	13	$\pm 0,8$	$\pm 0,0025^\circ$	$< 0,3$	$1,0 \pm 0,1$

4.2. Kampinių skalių paklaidų sandai

Pagrindiniai limbų originalų paklaidų sandai :

1. Limbo brūkšnių padėties paklaida.
2. Žingsnio paklaida.
3. Limbo rastro ir kodo pririšimo paklaida.
4. Limbo brūkšnių formos nuokrypiai.
5. Limbo darbinio paviršiaus formos nuokrypiai.
6. Rastro, kodo ir kt. radialinių matmenų paklaida.
7. Netolygus šviesos pralaidumas visame limbo parametre.
8. Ekscentriciteto paklaida (sektoriaus dydis).

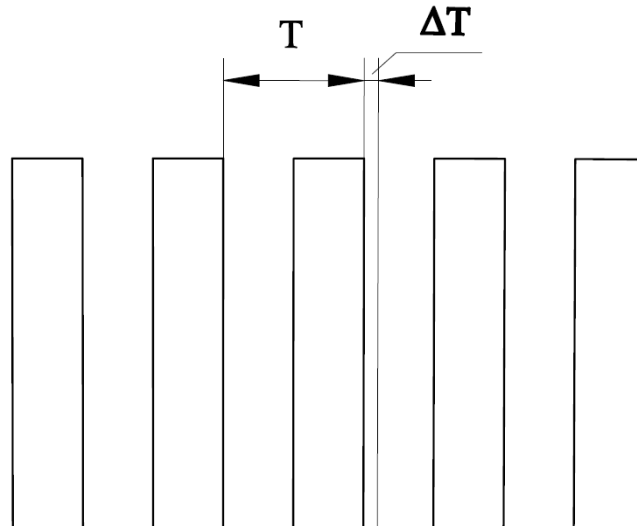
Limbo brūkšnių padėties paklaida (4.1 pav.) atsiranda formuojant pirmąjį etaloninio rastro fragmento brūkšnį. Ši paklaida pasireiškia visame suformuotame etaloniniame rastro fragmente (6.3 pav.) ir limbo rastre. Šios paklaidos dydis priklauso nuo brūkšnio formavimui, naudojamo mikroskopo tikslumo, histerezės pasireiškimo, tvirtinant brūkšnį ant metalinės plokštelės vašku. Dėl tvirtinimui naudojamo vaško brūkšnys po tvirtinimo gali šiek tiek persikreipti ir dėl to atsiranda $\Delta\phi$ paklaida, todėl būtina prieš eksponuojant etaloninį rastro fragmentą tai kontroliuoti.



4.1 pav. Limbo brūkšnių padėties paklaida

Žingsnio paklaida atsiranda dėl:

- rastro spindulio – Δr paklaidos;
- limbų gamybos įrenginio pasukamo stalo pozicionavimo paklaidos;
- ekscentriciteto paklaidos.



4.2 pav. Rastro žingsnio paklaida

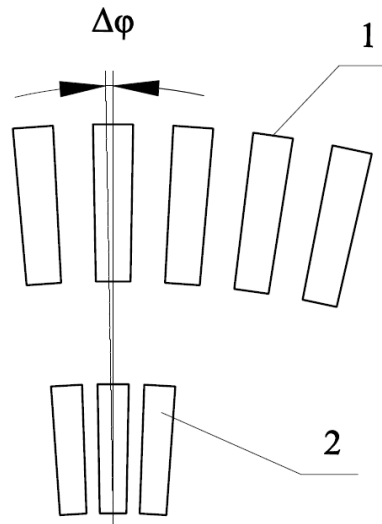
Limbų rastro kampo paklaida tiesiogiai susijusi su žingsnio (4.2 pav.) paklaida. Rastro žingsnis išreiškiamas formule (4.1):

$$T = 2\pi r \cdot \frac{\alpha}{360}; \quad (4.1)$$

čia: r – rastro išorinio matmens spindulys, α – kampas laipsniais

Iš (4.1) formulės matyti, kad žingsnio pagrindinė paklaidos dedamoji yra rastro spindulio paklaida Δr . Kita žingsnio paklaidos dedamoji – limbų gamybos įrenginio pasukamo stalo pozicionavimo paklaida – $\Delta\alpha$, ji atsiranda pozicionavimo metu ir tiesiogiai priklauso nuo įrenginio tikslumo, galimos pozicionavimo paklaidos aprašytos [2].

Rastro ir kodo surišimo paklaida – rastras su kodu yra susietas bendra ašimi (4.3 pav.), gaminant limbų originalus atsiranda bendros ašies paklaida $\Delta\phi$. Šios paklaidos atsiranda dėl įrenginio pozicionavimo ir matavimo paklaidų.



4.3 pav. Rastro ir kodo surišimo paklaida

Limbo brūkšnių formos nuokrypiai – brūkšnio briaunų tiesumo nuokrypis ir jo kampų užapvalėjimas atsiranda dėl:

- per ilgai ėsdinant chromo dangą rūgštyje;
- dėl blogos fotorezisto kokybės;
- dėl objektyvo židinio fokusavimo plokštumoje paklaidos;
- dėl netinkamo ekspozijos ir ryškinimo laiko santykio.

Limbo darbinio paviršiaus formos nuokrypiai – pagrindinė priežastis yra stiklo plokštelės plokštumo nuokrypis. Dėl plokštumo nuokrypio yra židinio fokusavimo paklaida plokštumoje, dėl šios priežasties atsiranda brūkšnio formos nuokrypiai ėsdinant chromo dangą rūgštyje.

Rastro, kodo radialinių matmenų paklaida ši paklaida atsiranda dėl:

- rastro fragmento bazavimo paklaidos;
- kariatėlės linijinio poslinkio keitiklio paklaidos;
- matavimo paklaidos, nustatant radialinius matmenis.

Esant radialiniai paklaidai atsiranda žingsnio ir brūkšnių padėties paklaidos.

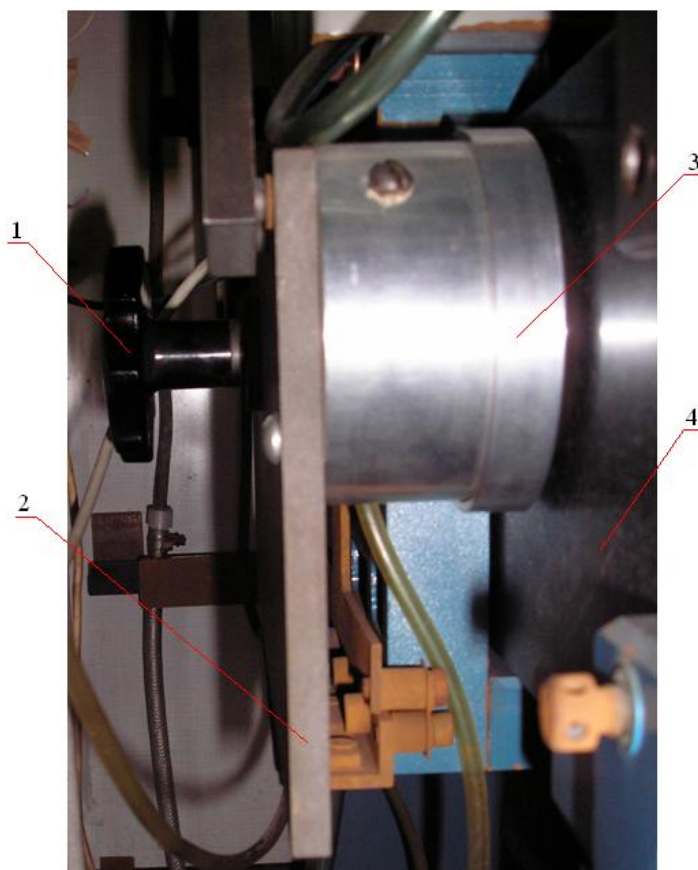
Netolygus šviesos pralaidumas visame limbo parametre atsiranda dėl

- limbo darbinio paviršiaus formos nuokrypių;
- objektyvo židinio fokusavimo plokštumoje paklaidos;

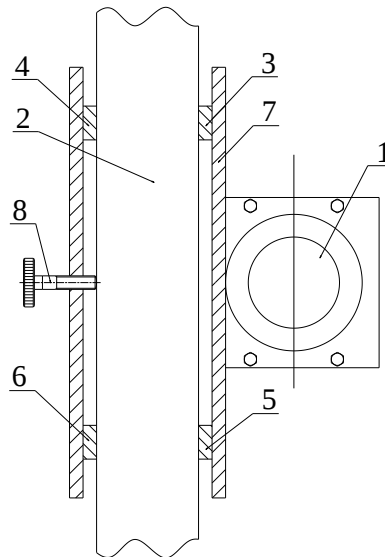
- plokštelės bazavimo paklaidos;
- fotorezisto dangos sluoksnio kitimo ant stiklo plokštelės padengtos chromo sluoksniu.

Kai objektyvo židinio fokusavimo plokštumoje paklaida yra skirtinga visame plokštelės paviršiuje, eksponuojant šviesos intensyvumas pasiskirsto netolygiai ir fotorezistas skirtingai veikiamas šviesos intensyvumo, todėl ryškinant ir ėsdinant skaidraus ir neskaidraus brūkšnių santykis visame rastro paviršiuje yra skirtingas. Taip pat po ryškinimo atsiradus nešvarumams ant stiklo plokštelės, rūgštis skirtingai veikia ėsdinamą paviršių.

Ekscentriciteto paklaida atsiranda dėl objektyvo ir šviestuvo kariatėlės fiksavimo mechanizmo (4.4 pav.) netinkamo konstrukcinio sprendimo ir fragmento bazavimo paklaidos. Fiksuojant kariatėlę varžtu (4.5 pav.), užveržimo jėga kinta, todėl atsiranda nuokrypis nuo optinės ašies.



4.4 pav. Kariatėlės fiksavimo mechanizmas: 1 – kariatėlės korpusas; 2 – fiksavimo varžtas; 3 – aerostatinė atrama; 4 – portalas



4.5 pav. Karietėlės konstrukcijos schema (vaizdas iš viršaus): 1 – objektyvas, 2 – portalas, 3, 4, 5, 6 – aerostatinės atramos, 7 – karietėlės korpusas, 8 – fiksuojimo varžtas

4.6 paveiksle parodyta, kaip išsidėsto brūkšniai formuojant rastrą multiplikavimo būdu kai ekscentriciteto paklaida didelė (a) ir minimali (b).



a)



b)

4.6 pav. Ekscentriciteto paklaidos įtaka brūkšnių padėčiai formuojant rastrą multiplikavimo būdu: a) didelė ekscentriciteto paklaida; b) nėra ekscentriciteto paklaidos

Suminės kampinių skalių formavimo metodų paklaidos skaičiavimas

Ekonomiškai racionaliausias ir užtikrinantis pakankamą skaičiavimo patikimumą yra taikomas tikimybinis suminės paklaidos skaičiavimo metodas. Suminė paklaida Δ_{Σ} skaičiuojama pagal formulę (4.2):

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \Delta_j \xi \pm t \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \xi_i^2} \quad (4.2)$$

čia Δ_j – j-toji sistemingoji suminės paklaidos komponentė; $j = 1, 2, \dots, k$; ξ_j – j-tosios sistemingosios paklaidos įtakos koeficientas; t – daugiklis, įvertinantis pasiklydimo intervalą; σ_i – i-tosios paklaidos atsitiktinės komponentės vidutinis kvadratinis nuokrypis; ξ_i – i-tosios paklaidos atsitiktinės komponentės įtakos koeficientas.

5. PASIŪLYMAI ĮRENGINIO MODERNIZACIJAI

- Didžiausią paklaidų sandų dalį sudaro ekscentriciteto paklaida, todėl būtina šią paklaidų dedamąją maksimaliai sumažinti, pakeitus karietėlės konstrukciją – vietoj fiksavimo varžto sukonstruoti sraigtinę arba krumpliaratinę pavarą, taip pat, tai leistu visiškai automatizuoti įrenginį;
- Pakeisti pavaros variklius, turinčius geresnes charakteristikas (dinaminės savybės, galingumas);
- Papildyti valdymo programos turinį;
- Modernizuotį pavaros valdymo bloką;
- Pakeisti indikatorių ir indikatoriaus mechanizmą.

6. EKSPERIMENTINIS LIMBŲ ORIGINALŲ FORMAVIMO PAKLAIDŲ TYRIMAS

6.1. Eksperimento metodika ir planavimas, multiplikavimo skaičiaus įtaka kampinėms rastro brūkšnių paklaidoms

Išnagrinėjus limbų gamybos įrenginį ir gamybos technologiją, reikia atlikti šiuos tyrimus:

- ištirti multiplikavimų skaičiaus įtaką brūkšnių kampinei padėčiai;
- ištirti brūkšnių optimalios formos ir matmenų formavimo procesą;
- atlikti mechaninio indikatoriaus rodmenų pakartojamumo nustatymo tyrimą.

Vienas iš svarbiausių paklaidų sandų yra brūkšnių kampinės padėties paklaida. Todėl buvo atliktas tyrimas, kokią įtaką turi limbų originalų, brūkšnių kampinei padėčiai, multiplikavimo skaičius.

Kadangi rastras formuojamas multiplikavimo būdu, todėl šiam tyrimui atlikti, buvo pagaminti trys vienodų matmenų limbai (6.1 pav.) su skirtingu multiplikavimo skaičiumi. Rastras buvo formuojamas vieną kartą išstačius, kad būtų išvengta galimų išstatymo paklaidų. Taip pat rastras suformuotas ant tos pačios partijos plokštelių, kad būtų suvienodintos rastro formavimo sąlygos fotolitografijos technologija. Formuojant rastrą buvo išlaikyti vienodo eksponavimo, ryškinimo ir ėsdinimo rūgštyje laiko intervalai.

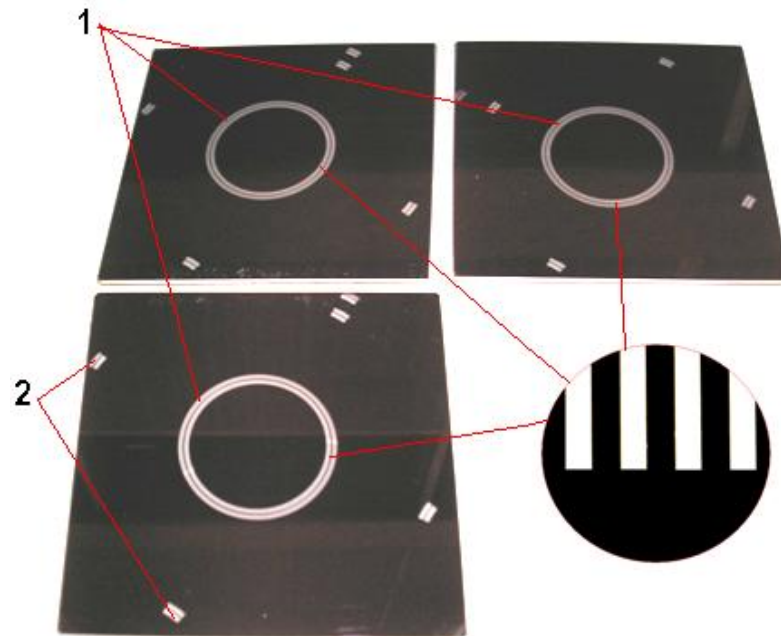
Matavimų tikslumas priklauso nuo limbų matmenų – rastro radialinio matmens ir brūkšnio žingsnio. Tiriamų limbų išoriniai matmenys ir žingsnis parinktas optimaliai, kad būtų galima atlikti tikslius matavimus.

Periodinės struktūros rastras 1 suformuotas trijose iš stiklo plokštelėse (6.1 pav.) padengtose plonu chromo sluoksniu. Matavimo išstatymo procesas yra labai imlus darbas, išstatymo laikui sutrumpinti buvo suformuotos 4-ios rastrinės žymės 2, išdėstytos 90° kampų. Pagamintų limbų originalų parametrai pateikti 6.1 lentelėje.

6.1 lentelė. Tiriamų limbų parametrai

Ž.	Išorinis rastro skersmuo, mm	Vidinis rastro skersmuo, mm	Brūkšnių skaičius, vnt.	Brūkšnio žingsnis, laips.	Multiplikavimo skaičius, vnt.	Eksponavimo laikas, tenkantis vienam brūkšniui, s	Ryškinimo trukmė, s	Ėsdinimo trukmė, s
1	ø 53,975	ø 43,967	2049	0,1786954	2	10	30	45
2	ø 53,975	ø 43,967	2049	0,1786954	4	10	30	45
3	ø 53,975	ø 43,967	2049	0,1786954	8	10	30	45

Atlikus tyrimą – padarytos skirtingo skaičiaus multiplikavimo rastro ir brūkšnių formos nuotraukos, atlikta matavimų statistinė analizė, pateikti matavimų vidurkių ir vid. kv. nuokrypių grafikai.



6.1 pav. Stiklinės plokštelės: 1 – periodinės struktūros rastras, 2 – rastro žymės

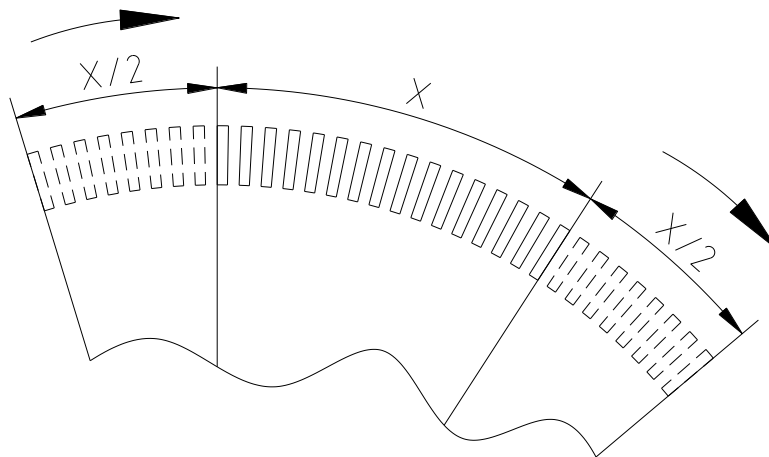
Brūkšnio žingsnis parinktas pakankamai didelis, kad būtų galima išvengti matavimo paklaidų. Rastrų matavimams panaudotas HILGER WATTS TM 23 mikroskopas, „Moore“ pasukamas stalas (6.2 pav.), matavimo metodika aprašyta kitame darbe [17].



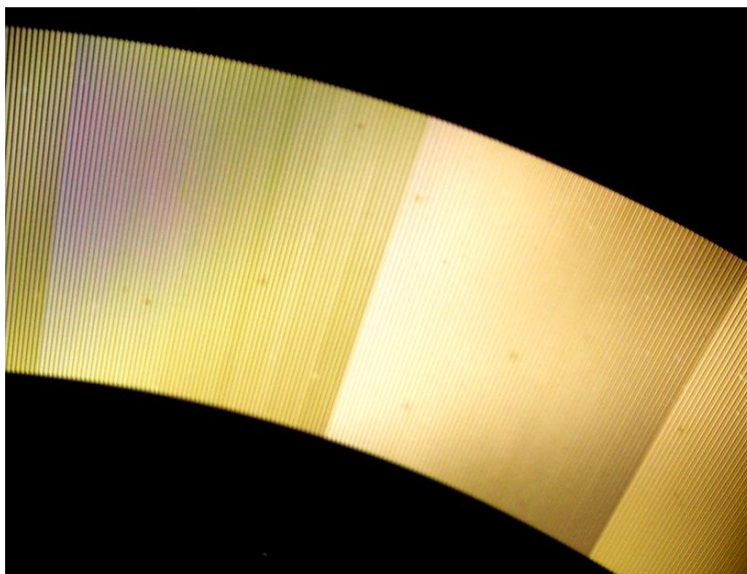
6.2 pav. Limbų paklaidų matavimo prietaisas

6.2. Eksperimento rezultatai

Dviejų kartų multiplikavimo schema pateikta 6.3 paveiksle. Šiuo atveju pasukimo kampas 2 kartus mažesnis už etaloninio rastro fragmento kampą x . Šio multiplikavimo vaizdo nuotrauka parodyta 6.4 paveiksle., paklaidų grafikas parodytas 6.6 paveiksle.

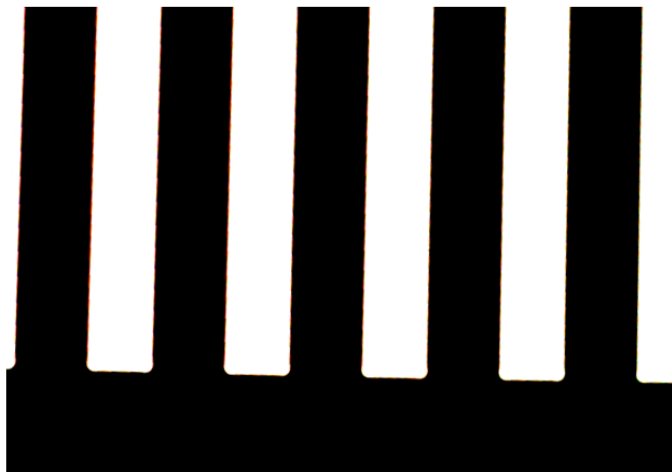


6.3 pav. 2-jų kartų multiplikavimo schema



6.4 pav. Multiplikavimas 2 kartus

6.5 paveiks;e parodyta mikroskopinė rastro brūkšnių formos nuotrauka multiplikuojant 2 kartus.



6.5 pav. Rastro brūkšnių forma multiplikuojant 2 kartus

6.2 lentelėje pateikta multiplikuojant 2 kartus matavimų vidurkių reikšmės ir statistinis duomenų apdorojimo rezultatas.

6.2 lentelė. Matavimo rezultatai

x2 mutiplikavimų skaičius			
Nominalus kampas, (°)	Matavimų vidurkio reikšmė, (")	Vid. kv. nuokrypis, (")	Matavimų skaičius, vnt.
0	-1	0,33968	50
45	-2,26667	0,38329	50
90	-2,63333	0,37013	50
135	-2,56667	0,36832	50
180	-2,56667	0,33401	50
225	-2,63333	0,32495	50
270	-2,46667	0,37135	50
315	-2,36667	0,33303	50
360	-1,1	0,39893	50

Matavimų vidurkių ir rezultatų aproksimavimo Furjė eilute grafikas parodytas 6.6, 6.11 ir 6.16 paveiksluose. Furjė eilutė detalės nuokrypiams (ekscentricitetui) skersiniame pjūvyje užrašoma trigonometrinio polinomu [11, 12, 18]:

$$\delta\tilde{\phi}(\phi) = A_0 + 2 \sum_{k=1}^{k=n} (A_m \cos 2\pi m f_1 \phi + B_m \sin 2\pi m f_1 \phi) + A_n \cos 2\pi m f_1 \phi \quad (6.1)$$

čia $\delta\tilde{\phi}(\phi)$ – funkcija, vaizduojanti profilio paklaidą; ϕ_k – pradinė fazė; n – polinomo aukščiausios harmonikos eilės numeris.

Koeficientus kiekvienai harmonikai galime apskaičiuoti pagal formules (6.2 ir 6.3):

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} \delta \phi_r \cos \frac{2\pi m r}{N} \quad (6.2)$$

$$B_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} \delta \phi_r \sin \frac{2\pi m r}{N} \quad (6.3)$$

čia m – harmonikos numeris; N – bendras matavimų skaičius; r – matavimų skaičius. Harmonikos amplitudė apskaičiuojama (6.4):

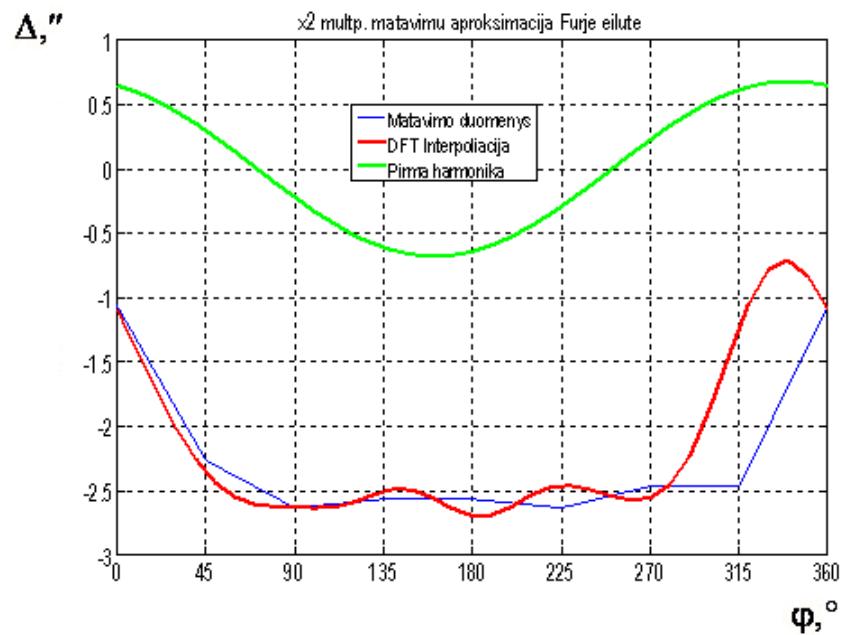
$$R_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2} \quad (6.4)$$

Harmonikos fazės poslinkis apskaičiuojamas (6.5):

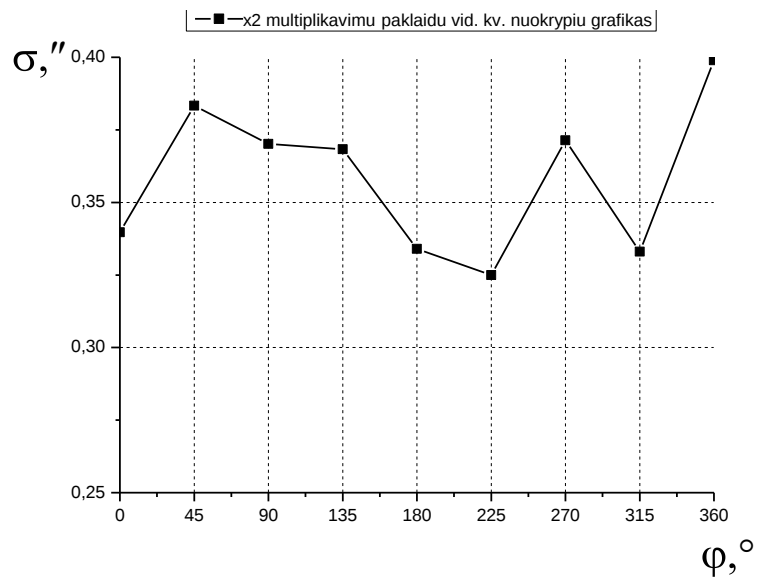
$$\varphi_m = \arctg\left(-\frac{B_m}{A_m}\right) \quad (6.5)$$

Multiplikuojant 2 kartus matavimo rezultatus aproksimuoti gauta tokia Furjė eilutės analitinė išraiška (6.6):

$$\begin{aligned} \delta\tilde{\Phi}(\phi) = & -2,1667 + \left(0,6739\cos(1,3478\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,2535\sin(-0,507\pi\frac{x}{360})\right) + \\ & \left(0,3699\cos(0,7398\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,2878\sin(-0,5756\pi\frac{x}{360})\right) + \\ & \left(0,1556\cos(0,3112\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,1796\sin(-0,3592\pi\frac{x}{360})\right) + \\ & \left(-0,0326\cos(-0,0326\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,092\sin(-0,092\pi\frac{x}{360})\right) \end{aligned} \quad (6.6)$$

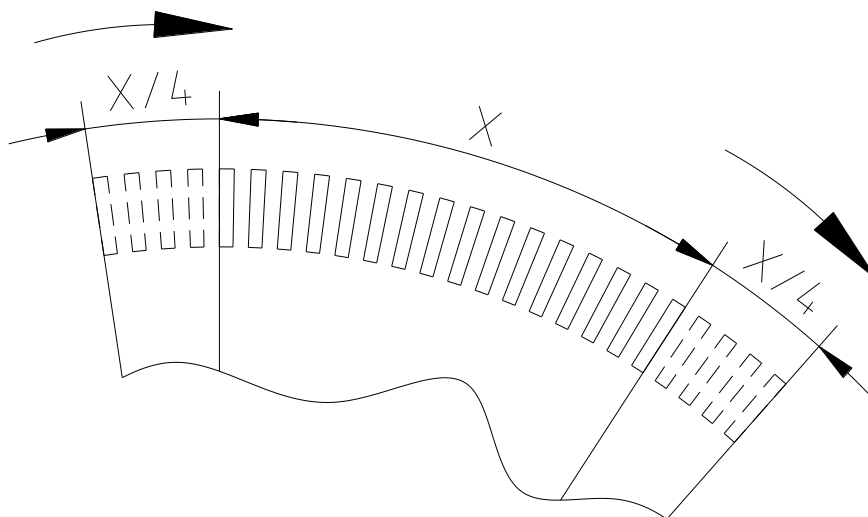


6.6 pav. x2 multiplikavimo, matavimų vidurkių aproksimavimas Furjė eilute grafikas

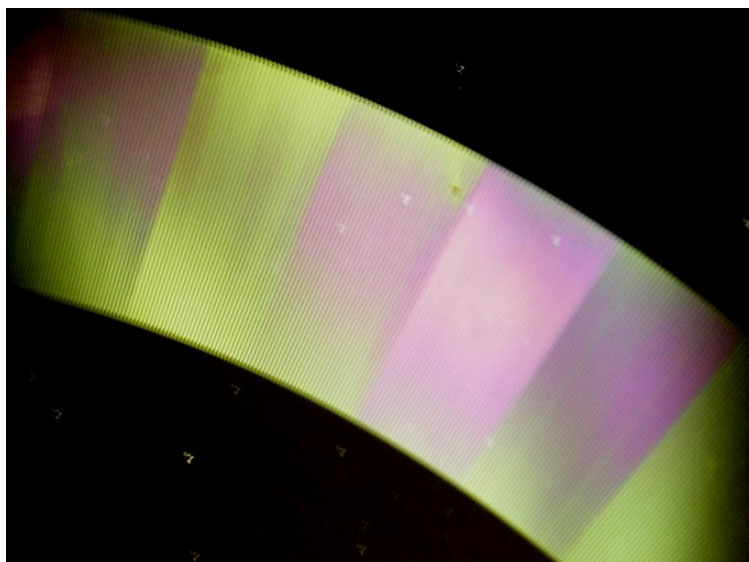


6.7 pav. x2 multiplikavimo, kampų paklaidų vid. kv. nuokrypių grafikas

Keturių kartų multiplikavimo schema pateikta 6.8 paveiksle. Šiuo atveju pasukimo kampas 4 kartus mažesnis už etaloninio rastro fragmento kampą x . Šio multiplikavimo vaizdo nuotrauka parodyta 6.9 paveiksle., paklaidų grafikas parodytas 6.11 paveiksle.



6.8 pav. 4-jų kartų multiplikavimo schema



6.9 pav. Multiplikavimas 4 kartus

6.10 paveiksle parodyta mikroskopinė rastro brūkšnių formos nuotrauka multiplikuojant 4 kartus.



6.10 pav. Rastro brūkšnių forma multiplikuojant 4 kartus

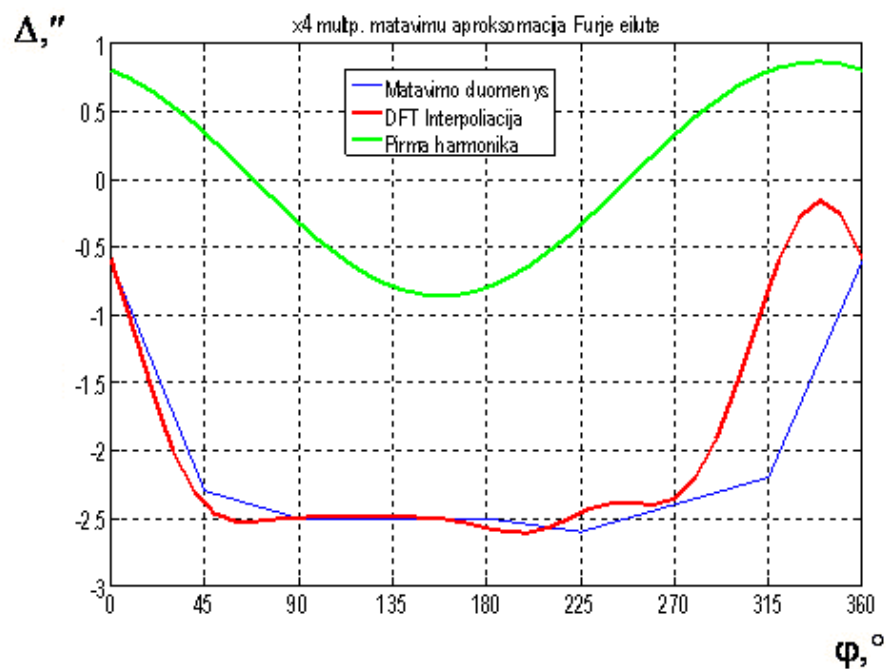
6.3 lentelėje pateikta multiplikuojant 4 kartus matavimų vidurkių reikšmės ir statistinis duomenų apdorojimo rezultatas.

6.3 lentelė. Matavimo rezultatai

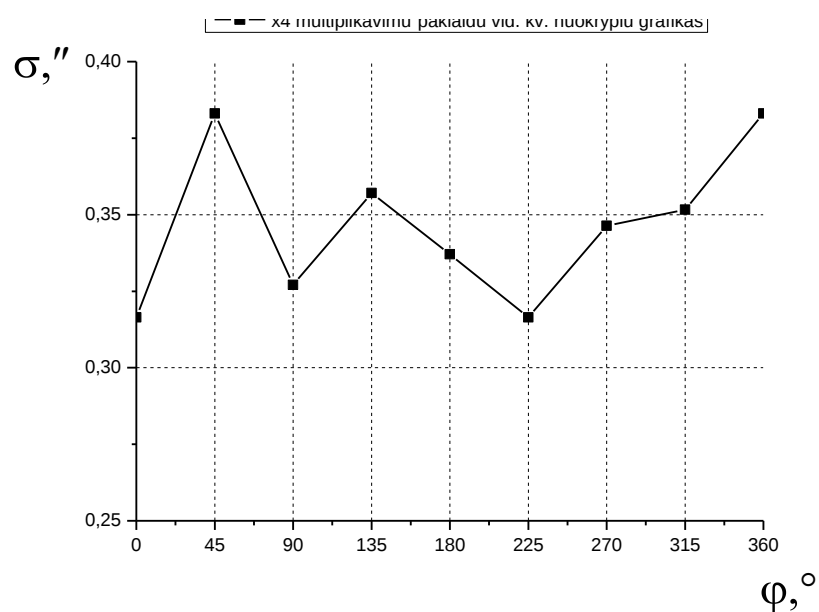
x4 mutiplikavimų skaičius			
Nominalus kampas, (°)	Matavimų vidurkio reikšmė, (")	Vid. kv. nuokrypis, (")	Matavimų skaičius, vnt.
0	-0,6	0,3164	50
45	-2,1	0,38305	50
90	-2,5	0,32705	50
135	-2,5	0,35705	50
180	-2,5	0,33705	50
225	-2,6	0,3164	50
270	-2,4	0,3464	50
315	-2,2	0,35164	50
360	-0,7	0,38305	50

Multiplikuojant 4 kartus matavimo rezultatams aproksimuoti gauta tokia Furjė eilutės analitinė išraiška (6.7):

$$\begin{aligned}
\delta\tilde{\Phi}(\phi) = & -2 + \left(0,8351\cos(1,6702\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,2916\sin(-0,5832\pi\frac{x}{360})\right) + \\
& \left(0,4202\cos(0,8404\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,3461\sin(-0,6922\pi\frac{x}{360})\right) + \\
& \left(0,1667\cos(0,3334\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,2117\sin(-0,4234\pi\frac{x}{360})\right) + \\
& \left(-0,022\cos(-0,044\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,1123\sin(-0,2246\pi\frac{x}{360})\right)
\end{aligned} \tag{6.7}$$

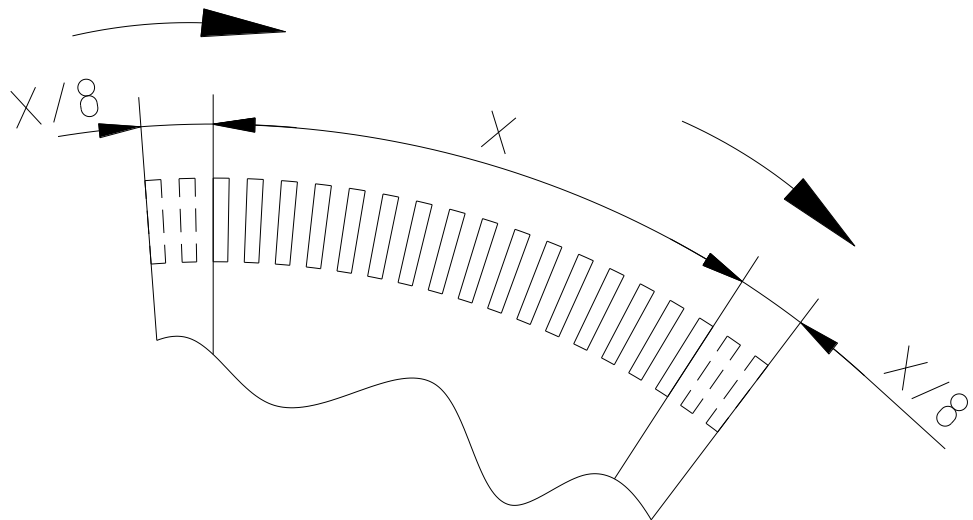


6.11 pav. x4 multiplikavimo, matavimų vidurkių aproksimavimas Furjė eilute grafikas

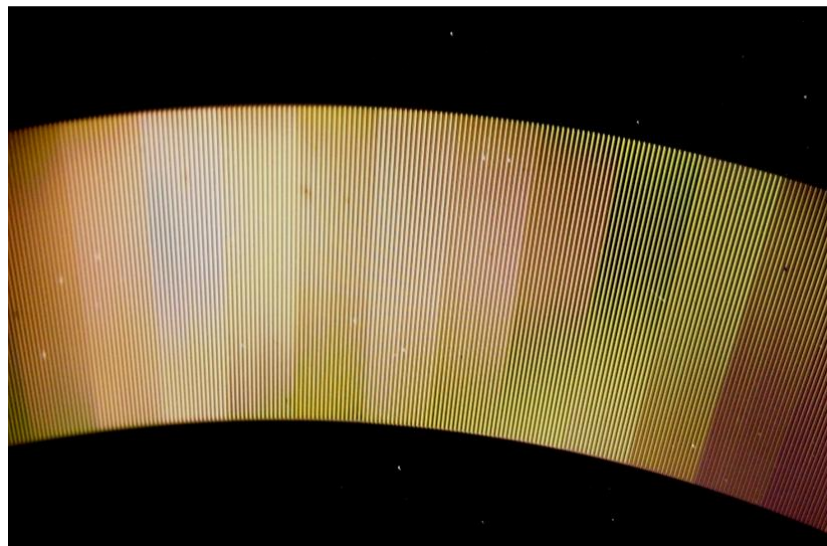


6.12 pav. x4 multiplikavimo, kampų paklaidų vid. kv. nuokrypių grafikas

Aštuonių kartų multiplikavimo schema pateikta 6.13 paveiksle. Šiuo atveju pasukimo kampas 8 kartus mažesnis už etaloninio rastro fragmento kampą α . Šio multiplikavimo vaizdo nuotrauka parodyta 6.14 paveiksle, paklaidų grafikas parodytas 6.16 paveiksle.

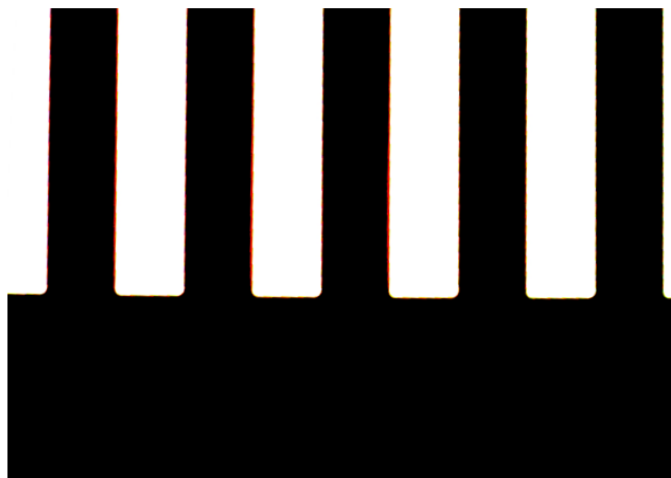


6.13 pav. 8-jų kartų multiplikavimo schema



6.14 pav. Multiplikavimas 8 kartus

6.15 pav. parodyta mikroskopinė rastro brūkšnių formos nuotrauka multiplikuojant 8 kartus.



6.15 pav. Rastro brūkšnių forma multiplikuojant 8 kartus

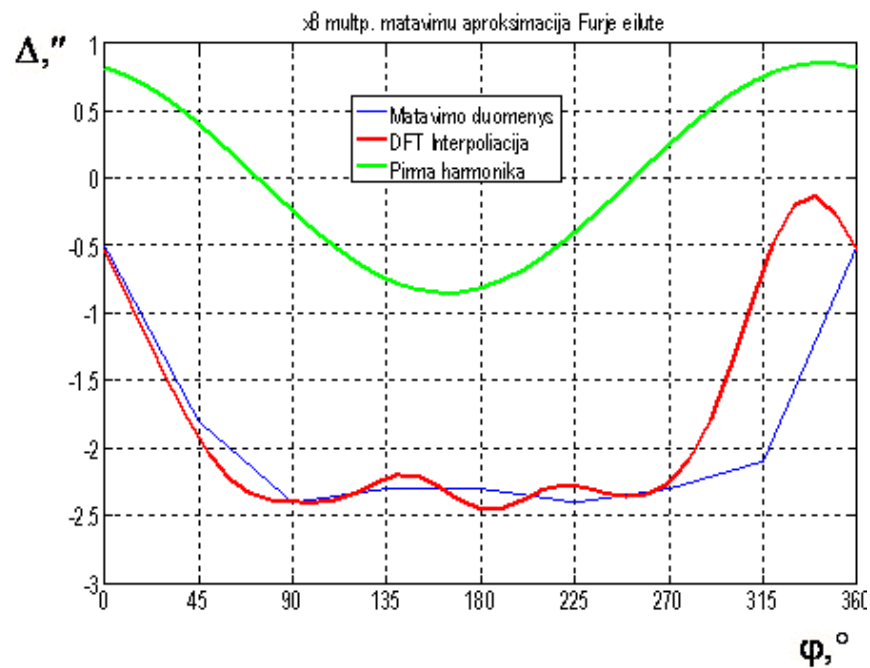
6.4 lentelėje pateikta multiplikuojant 8 kartus matavimų vidurkių reikšmės ir statistinis duomenų apdorojimo rezultatas.

6.4 lentelė. Matavimo rezultatai

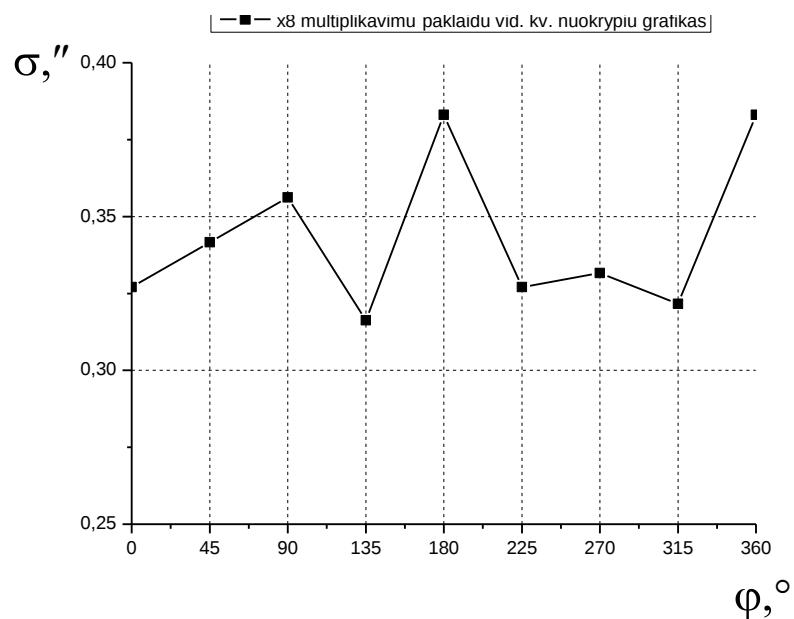
x8 mutiplikavimų skaičius			
Nominalus kampas, (°)	Matavimų vidurkio reikšmė, (")	Vid. kv. nuokrypis, (")	Matavimų skaičius, (vnt.)
0	-0,5	0,32705	50
45	-1,8	0,34164	50
90	-2,4	0,35623	50
135	-2,3	0,31623	50
180	-2,3	0,38305	50
225	-2,4	0,32705	50
270	-2,3	0,33164	50
315	-2,1	0,32164	50
360	-0,6	0,38305	50

Multiplikuojant 8 kartus matavimo rezultatams aproksimuoti gauta tokia Furjė eilutės analitinė išraiška (6.8):

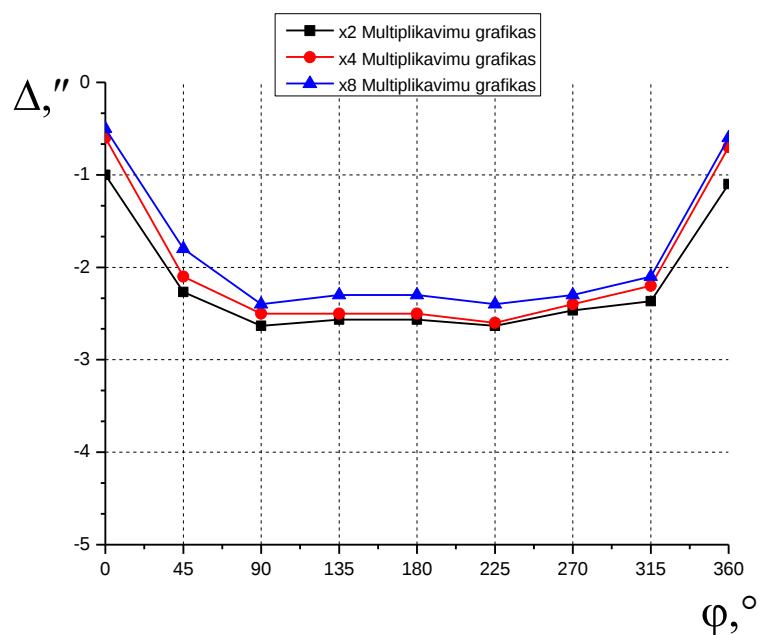
$$\begin{aligned} \delta\tilde{\phi}(\phi) = & -1,8222 + \left(0,8338\cos(1,6676\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,0909\sin(-0,1818\pi\frac{x}{360})\right) + \\ & \left(0,3809\cos(0,7618\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,3632\sin(-0,7264\pi\frac{x}{360})\right) + \\ & \left(0,1556\cos(0,3112\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,2309\sin(-0,4618\pi\frac{x}{360})\right) + \\ & \left(-0,0480\cos(-0,096\pi\frac{x}{360})\right) + \left(-0,0991\sin(-0,1982\pi\frac{x}{360})\right) \end{aligned} \quad (6.8)$$



6.16 pav. x8 multiplikavimo, matavimų vidurkių aproksimavimas Furjė eilute grafikas



6.17 pav. x8 multiplikavimo, kampų paklaidų vid. kv. nuokrypių grafikas



6.18 pav. 2, 4 ir 8 multiplikavimų matavimo vidurkių paklaidų grafikas

6.19 paveiksle parodyta 2, 4 ir 8 multiplikavimų mikroskopinės rastro brūkšnių nuotraukos, iš jų matyti, kad multiplikavimo skaičius nedaro įtakos brūkšnių formai, bet didinant multiplikavimų skaičių rastro brūkšnys nežymiai išplatėja, 8 kartus multiplikuojant brūkšnio plotis yra $2 \mu\text{m}$ didesnis už multiplikuojant 2 kartus.



6.19 pav. 2, 4 ir 8 multiplikavimų mikroskopinės brūkšnių nuotraukos

6.3. Optimalios rastro brūkšnių formos tyrimas

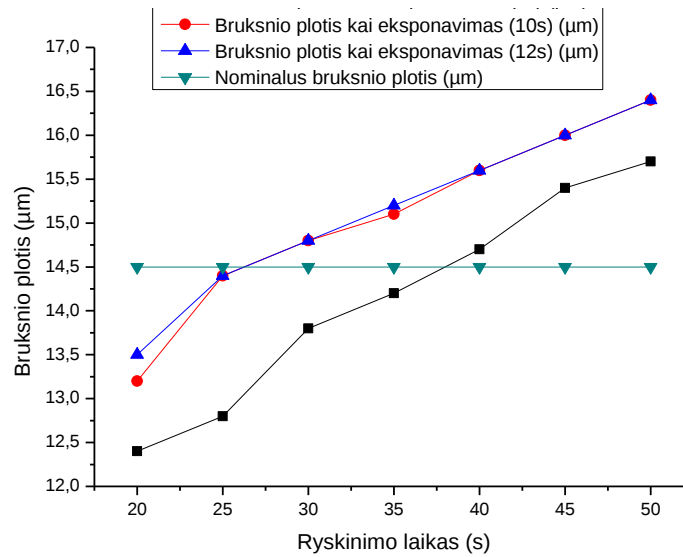
Tyrimo tikslas – nustatyti tinkamiausią ekspozicijos ir ryškinimo laiką, optimaliausiai rastro brūkšnių formai ir matmenims išgauti. Šiuo tikslu buvo atlikti tyrimai su skirtingais ekspozicijos ir ryškinimo laikais. Chromo ėsdinimo rūgštyje laikas yra pastovus, kadangi tai neturi reikšmingos įtakos brūkšnių formai ir matmenims.

6.5 lentelėje pateikti tyrimo rezultatai, kur skirtingas ryškinimo ir eksponavimo laikas, vienodas ėsdinimo laikas (45 s).

6.5 lentelė. Matavimo rezultatai

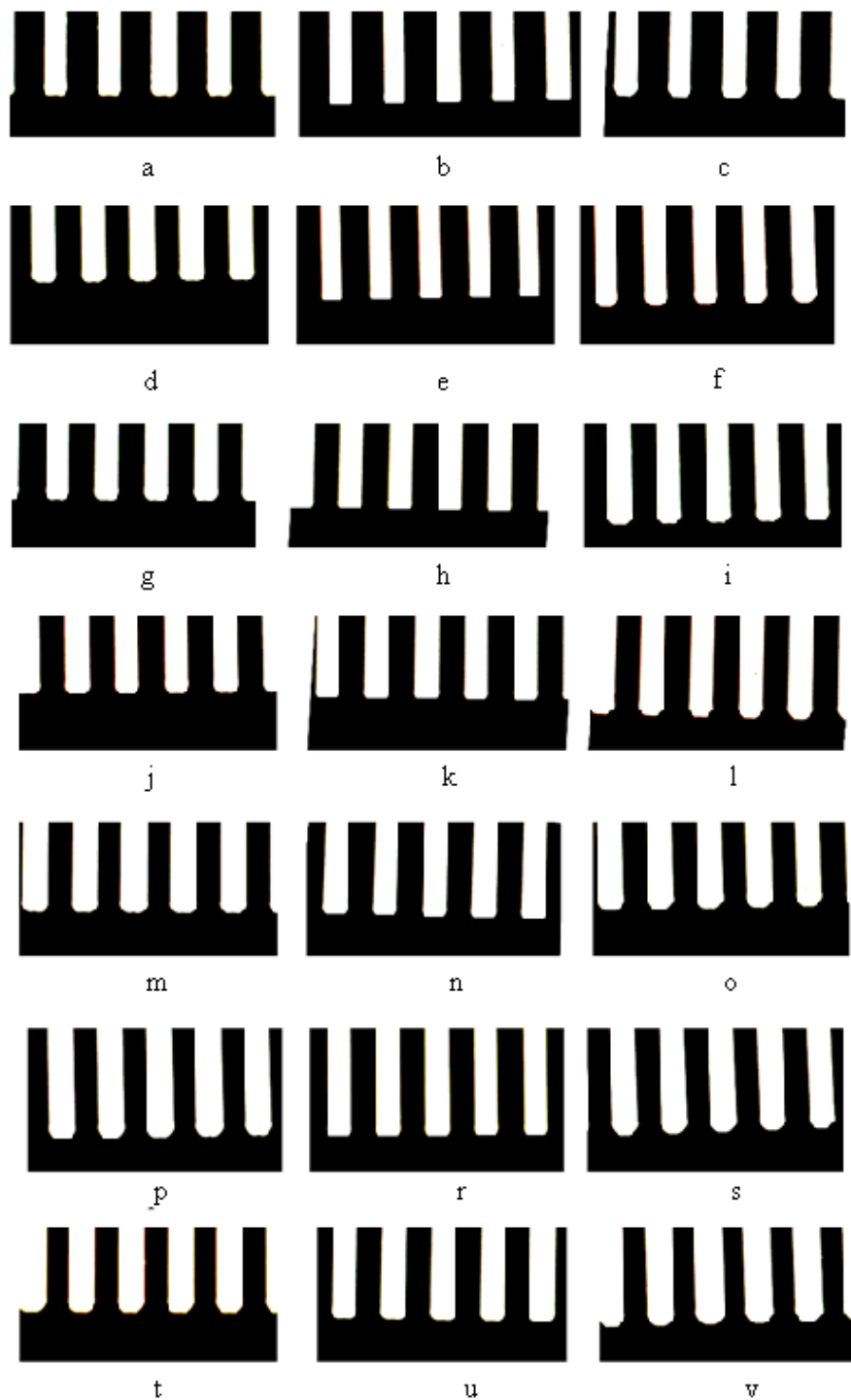
Bandymo nr.	Ryškinimo laikas, (s)	Brūkšnio matmuo kai eksponavimo laikas 8, (s)	Brūkšnio matmuo kai eksponavimo laikas 10, (s)	Brūkšnio matmuo kai eksponavimo laikas 12, (s)
1	20	12,4	13,2	13,5
2	25	12,8	14,4	14,4
3	30	13,8	14,8	14,8
4	35	14,2	15,1	15,2
5	40	14,7	15,6	15,6
6	45	15,4	16	16
7	50	15,7	16,4	16,4

6.20 paveiksle parodyta, kaip kinta rastro brūkšnių matmenys keičiant eksponavimo ir ryškinimo laiko santykį.



6.20 pav. Brūkšnio pločio priklausomybė nuo eksponavimo ir ryškinimo laikų santykio

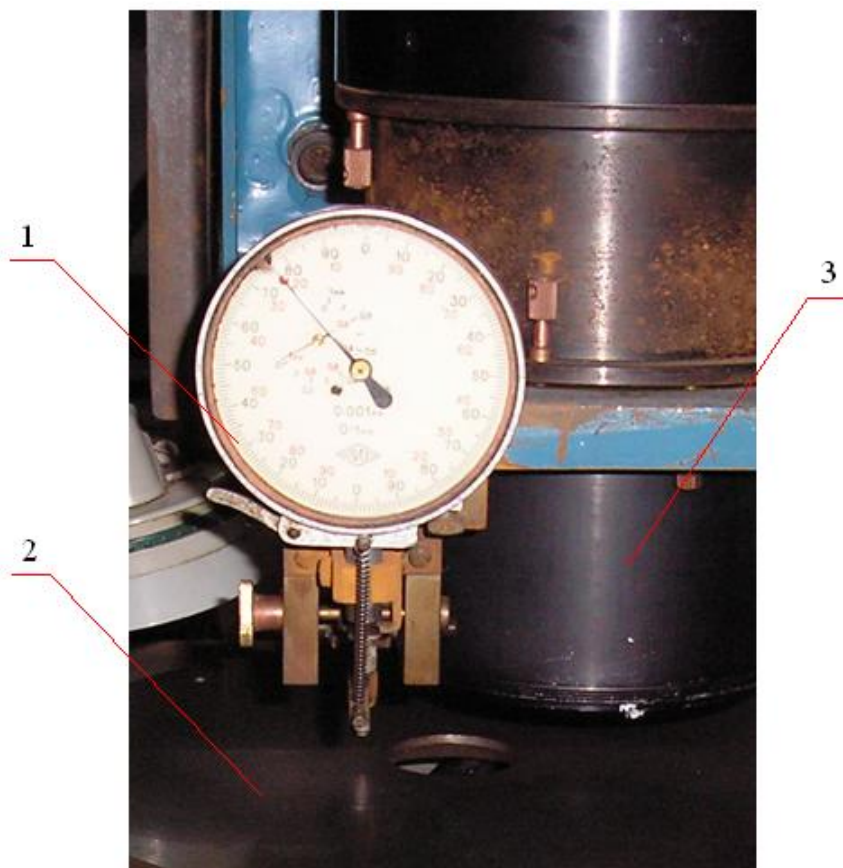
Atlikus tyrimą buvo padarytos rastro brūkšnių mikroskopinės nuotraukos 6.21 pav. jose matyti, kad 10 s eksponavimo laikas yra optimaliausias geriausiai rastro brūkšnių formai išgauti.



6.21 pav. Brūkšnio forma kintant eksponavimo ir ryškinimo laiko santykiui: a, d, g, j, m, p, t – eksponavimo laikas 8 s, ryškinimo laikas atitinkamai 20–50 s; b, e, h, k, n, r, u – eksponavimo laikas 10 s, ryškinimo laikas atitinkamai 20–50 s; c, f, i, l, o, s, v – eksponavimo laikas 12 s, ryškinimo laikas atitinkamai 20–50 s

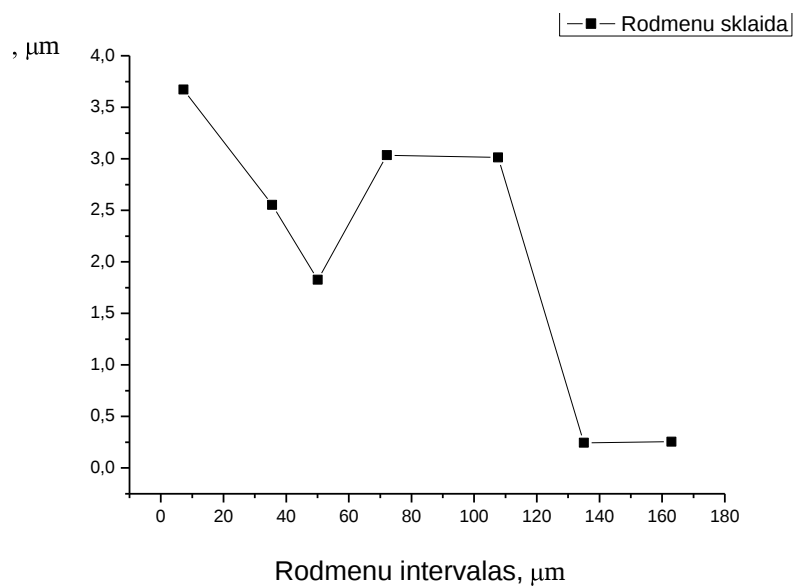
6.4. Fokusavimo įtaka fragmento kokybei – mechaninio indikatoriaus rodmenų pakartojamumo nustatymo tyrimas

Esant fokusavimo paklaidai, atsiranda brūkšnio formos nuokrypiai. Šių nuokrypių priežastis yra indikatorius (6.22 pav.), kuris skirtas objektyvo židinio nuotoliui nustatyti.



6.22 pav. Mechaninis indikatorius: 1 – indikatorius; 2 – pasukamas stalas; 3 - objektyvas

Buvo atliktas tyrimas indikatoriaus rodmenų pakartojamumui nustatyti. Skirtingame rodmenų intervale, indikatoriaus parodymų sklaida kinta, tai matyti 6.23 paveiksle. Brūkšnių formos nuokrypių mikroskopinės nuotraukos esant optimaliam židinio nuotoliui ir 10 μm paklaidai parodytos 6.24 paveiksle.



6.23 pav. Indikatoriaus rodmenų sklaida

Brūkšnių formos nuokrypių mikroskopinės nuotraukos esant optimaliam židinio nuotoliui ir $10\ \mu\text{m}$ paklaidai parodytos 6.24 paveiksle.



6.24 pav. Brūkšnių forma: a – optimalus židinio nuotolis; b – esant $10\ \mu\text{m}$ paklaidai

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

- Multiplikuojant 4 ir 8 kartus, kampo paklaida lyginant su 2-jų kartų multiplikavimu, atitinkamai sumažėja 4 % ir 7 %.
- Rastro formavimas multiplikuojant 2, 4 ir 8 kartus atitinkamai trunka 30 min., 35 min. ir 53 min.
- Didinant multiplikavimų skaičių, rastro brūkšnių kampinės paklaidos mažėja, tačiau didėja rastro brūkšnio matmenys, 8 kartus multiplikuojant plotis padidėja 2 μm , o 4 kartus multiplikuojant padidėja 1 μm lyginant su 2-jų kartų multiplikavimu, todėl ryškinant reikia tai įvertinti.
- Jei brūkšnio žingsnis iki $0,1^\circ$ optimalus multiplikavimų skaičius yra 4 kartai, kai jis didesnis, tada 2 kartai, tai užtikrina pakankamą tikslumą, sumažėja laiko trukmė formuojant rastrą bei minimali yra ekscentriciteto paklaidos įtaka.
- Multiplikavimų skaičius neturi įtakos rastro brūkšnių formai.
- Didžiausią paklaidų sandų dalį sudaro ekscentriciteto paklaida, todėl būtina šią paklaidų dedamąją maksimaliai sumažinti, pakeitus kariatėlės konstrukciją – vietoj fiksavimo varžto sukonstruoti sraigtinę arba krumpliaratinę pavarą, taip pat tai leistu visiškai automatizuoti įrenginį.
- Geriausia rastro brūkšnio forma yra, kai ekspozicijos ir ryškinimo santykis – 10/27 s.
- Kokybei užtikrinti būtina nuolat kontroliuoti kiekvieną limbų gamybos proceso etapą.

LITERATŪRA

1. Augustaitis, V., K. Mechaninių virpesių pagrindai. Vilnius: Žiburio leidykla, 2000. 319 p.
2. Bansevičius, R.; Giniotis, V. 2005. Mechatronic correctional devices for precision engineering. International conference "Mechatronic systems and materials MSM 2005" Abstracts. 20-23 October 2005, pp. 133-134. ISBN 9986-05-900-3
3. Bručas, D., Giniotis, V., Petroškevičius, P. Basic construction of the flat angle calibration test bench for geodetic instruments. Geodesy and cartography, 2006.
4. Bručas, D. geodezinių kampų matavimo prietaisų kalibravimo įrangos kūrimas ir tyrimas. Daktaro disertacijos santrauka. Vilnius: Technika, 2008. 23 p.
5. Bručas, D., Giniotis. Circular scale eccentricity anglysis. 2008
6. Bručas, D., Giniotis, V. Preliminary Accuracy Analysis of the Angular Test Bench // Matavimai. Kaunas: Technologija, 2007.
7. Czichos, H. Mechatronik, Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme. Viewegs Fachbücher der Technik, 2006. 219 p.
8. Eitutis, A.; Kiaušinis, S. Mechaninių dydžių matavimai. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 572 p.
9. Giniotis, V. Padėties ir poslinkių matavimas. Vilnius: Technika, 2005. 215 p.
10. Geleževičius, V., A. Mechatroninės sistemos. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 219 p.
11. Jenkins, G., Watts, D.G. Spectral Analysis and its Applications. Vol. 1. –Moscow: Mir, 1972. 310 p.
12. Jenkins, G., Watts, D.G. Spectral Analysis and its Applications. Vol. 2. –Moscow: Mir, 1972. 286 p.
13. Kasparaitis, A. Matavimo informacinės sistemos. Vilnius: Technika, 2006. 148 p.
14. Petrėtienė, A. Transportininkų kalbos kultūra. Vilnius: Technika, 2009. 123 p.
15. Palšaitis, R., Bazaras, D., Griškevičienė, D., Lazauskas, J. Magistro baigiamasis darbas, metodikos nurodymai. Vilnius, 2007.
16. Precizika Metrology. Matavimo prietaisai ir įtaisai [žiūrėta 2011 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.precizika.lt/index.php?id=72>>
17. Prielaidas, A. Posūkių ir kampų matavimų tikslumo tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2010.

18. Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. Matavimų teorija ir praktika. Vilnius: Žiburio leidykla, 2000. 381 p.
19. Šaninas, A. Naujo produkto technologinio gyvybingumo analizė. Vilnius: 2009
20. Моро, У. Микро литография 1. Москва: Мир, 1990. 606 p.
21. Моро, У. Микро литография 2. Москва: Мир, 1990. 633 p.
22. Преснухин, Л., Н., Майоров, С., А., Меський, И., В., Шаньгин, В., Ф. Фотоэлектрические преобразователи информации. Москва: 1979. 375 P.