



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Karolis Bardauskas

**PRECIZINIŲ LINIJINIŲ SKALIŲ ORIGINALŲ RASTRŲ FORMAVIMO
TIKSLUMO TYRIMAS**

**RESEARCH OF ACCURACY OF FORMING GRATINGS ON 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. M. Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Karolis Bardauskas

**PRECIZINIŲ LINIJINIŲ SKALIŲ ORIGINALŲ RASTRŲ FORMAVIMO
TIKSLUMO TYRIMAS**
**RESEARCH OF ACCURACY OF FORMING GRATINGS ON ORIGINAL
MATRICES**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 61409T111

Mechatronikos specializacija

Mechanikos studijų kryptis

Vadovas prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas A. Petrėtienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) Karoliui Bardauskui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Precizinių linijinių skalių originalų rastrų formavimo tikslumo tyrimas
.....
.....

patvirtinta 2011 m. lapkričio 15.... d. dekanų potvarkiu Nr. 292me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2011 m. birželio 3.... d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Linijinių skalių, skirtų precizinėms matavimo sistemoms, apžvalga ir formavimo metodų analizė. Formavimo įrangos apžvalga. Linijinių 2 D skalių, skirtų precizinėms matavimo sistemoms, tikslumo parametrų analizė. Linijinių skalių originalų formavimo fotolitografiniu metodu tikslumo analizė. Skalių formavimo skirtingais metodais eksperimentiniai tyrimai. Išvados. Literatūra.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: Lekt. A. Petrėtienė

.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Paraša)

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

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2010–2011 m. m.
6 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Karolis Bardauskas

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos

(Fakultetas)

Mechanikos

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽINGUMO DEKLARACIJA**

2010 m. _____ Birželio 1 _____ d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema _____
Precizinių linijinių skalių originalų rastrų formavimo tikslumo tyrimas

patvirtintas
20 _____ 09 _____ m. _____ Gruodžio 21 _____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____ 350me _____, yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai _____ ir _____ A. Petrėtienė
specialistai: _____

Mano darbo (projekto) prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis
vadovas _____

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų
piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs(-usi).

(Parašas)

KAROLIS BARDAUSKAS

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Mechatronikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Precizinių linijinių skalių originalų rastrų formavimo tikslumo tyrimas**

Autorius **Karolis Bardauskas**

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

Kalba

☐

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe apžvelgiamos linijinių poslinkių matavimo sistemų jų teikiamos informacijos kiekio požiūriu bei jų skalių ypatumai. Nagrinėjami skalių, naudojamų matavimo sistemose, teikiančiose informaciją ne tik apie pagrindinį judesį, bet ir dvi tiesaus judesio paklaidas plokštumoje, funkciniai ir tikslumo parametrai. Tokios skalės vadinamos 2D skalėmis. Analizuojami tokių linijinių skalių formavimo metodai, jų tikslumas. Pateikiama šio proceso tikslumo eksperimentinių tyrimų metodika, rezultatai.

Daromos išvados apie atskirų skalių formavimo metodų efektyvumą ir perspektyvumą. Atliktas dalijimo mašinos, skirtos skalių originalus gaminti ištisiniu fotolitografiniu metodu, modernizavimas ir tyrimas.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, analitinis tyrimas, eksperimentinis tyrimas, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 66 p. teksto be priedų, 49 iliustr., 18 bibliografinių šaltinių.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: 2D rastrinės skalės, originalų formavimas, dalijimo mašinos modernizacija.

Vilnius Gediminas Technical University

Faculty of **mechanics**

Department of **machine building**

ISBN ISSN

Copies No. 1

Final work for Master of **Mechanical Engineering**

Title: **Research of accuracy of forming gratings on original matrices**

Author **Karolis Bardauskas**

Supervisor prof. habil. dr. **Albinas Kasparaitis**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

Final master work reviews the linear displacement measuring systems, the information they provide in terms of quantity and characteristics of their scales. Issue scales used in measuring systems, providing information not only on the main motion, but two straight errors plane motion, the functional accuracy and performance. These scales are called 2D scales. Analyzed the formation of such linear scaling methods and their accuracy. To this process, the accuracy of experimental research methodology, results.

Draw conclusions about the methods of forming the individual scales of efficiency and viability. Complete splitting machines for the original scales to produce a continuous fotolitografiniu method of upgrading and testing.

The work consists of five parts: introduction, analytical research, experimental investigation, conclusions and suggestions, references.

Working volume of -66 p. text without appendixes, 49 pictures., 18 bibliographic sources. Appendixes.

Keywords: 2D raster scale, scales original forming, photo electric measuring systems, modernization of the machinery division.

TURINYS

ĮVADAS	10
Darbo uždaviniai ir tikslas	10
Temos naujumas	11
Temos aktualumas	11
Naudoti tyrimo ir analizės metodai.....	11
Darbo mokslinė vertė.....	11
Darbo aprobacija.....	11
1. LINIJINIŲ SKALIŲ, SKIRTŲ PRECIZINĖMS MATAVIMO SISTEMOMS, IR JŲ FORMAVIMO METODŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ	12
1.1 Fotoelektrinių poslinkio matavimo sistemų skalių tipai ir ypatumai.....	12
1.2 Linijinių 2D skalių ir jų originalų formavimo metodų apžvalga	18
1.2.1 Ištinis originalų formavimo metodas	19
1.2.2 Originalo ir ruošinio žymių sutapdinimo metodas	20
1.2.3 Tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodas	22
2. LINIJINIŲ 2D SKALIŲ, SKIRTŲ PRECIZINĖMS MATAVIMO SISTEMOMS, TIKSLUMO PARAMETRŲ ANALIZĖ	27
3. LINIJINIŲ SKALIŲ ORIGINALŲ FORMAVIMO FOTOLITOGRAFINIU METODU TIKSLUMO ANALIZĖ	36
A. Tikslaus pozicionavimo metodas	37
B. Žymių sutapdinimo metodas	40
C. Ištinis metodas	43
4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....	46
4.1 Skalių formavimo sutapdinimo metodu eksperimentinis tyrimas	47
4.1.1 Ruošinio paruošimas	47
4.1.2 Fragmento su žymėmis paruošimas.....	48
4.1.3 Eksperimentinio tyrimo rezultatai	51
4.2 Tikslaus pozicionavimo metodo eksperimentiniai tyrimai	52
4.3 Ištinio fotolitografinio metodo eksperimentiniai tyrimai.....	55
4.3.1 Modernizuojamo objekto aprašymas.....	55
4.3.2 Modernizuoto įrengimo aprašymas	58
4.3.3 Pagrindinių pakeitimų ir charakteristikų palyginimas.....	59
4.3.4 Matavimų patikimumas	63
IŠVADOS.....	64
LITERATŪRA	65

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Periodinės skalės eskizas: N – brūkšnio plotis, 2N – struktūros žingsnis	13
1.2 pav. Rastrinės struktūros formuojami analoginiai signalai ir jų pakeitimas į skaitmeninius	13
1.3 pav. Skalių su kodinėmis žymėmis eskizai:	14
1.4 pav. Kodinių žymių pririšimas prie periodinės struktūros	15
1.5 pav. Periodinė skalė su kodiniu takeliu	16
1.6 pav. Galimos kodinės struktūros formuojamo aperiodinio signalo pavyzdys.....	16
1.7pav. Absoliutinė skalė, Grėjaus ir Binarinis kodavimo būdai	17
1.8 pav. Periodinės 2D skalės nuskaitymo būdai	17
1.9 pav. Kodinės 2D skalės su kampu pasvirusiais elementais eskizas	18
1.10 pav. Dalijimo mašina BE-217	19
1.11 pav. Sutapatinimo proceso eskizas:	20
1.12 pav. Įrenginys skirtas 2D skalės gamybai žymių sutapdinimo metodu:.....	21
1.13 pav. Pozicionavimo staliuko schema:.....	22
1.14 pav. Įrenginys skirtas ilgų skalių formavimui tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodu atlikti:	23
1.15 pav. Aukštos skyros pozicionavimo sistemos principinė schema:	25
1.16 pav. Lazerinė originalų formavimo mašina	27
2.1 pav. Pasvirusio rastrinio elemento padėties koordinatės nustatymo schema:	28
2.2 pav. Rastrinio takelio simetrijos linijos samprata:.....	28
2.3 pav. Rastrinio takelio vidurio linijos samprata kai rastriniai elementai susikerta	29
2.4 pav. Pasvirimo kampo nustatymas pagal bazinę briauną:	30
2.5 pav. Rastrinio elemento pasvirimo kampo nustatymo schema:	31
2.6 pav. Mikroskopo pasukimo mechanizmas:	31
2.7 pav. Precizinis matricos pozicionavimo mechanizmas:	32
2.8 pav. Rastrinio elemento pločio paklaidos nustatymas:.....	32
2.9 pav. Lygiagretumo nuokrypio eskizas:.....	33
2.10 pav. Rastrinių takelių susiejimo schema:	34
4.1 pav. Dalijimo mašinos optika su indikatoriumi.....	48
4.2 pav. Bazavimo rėmelyje išstatyta žymė	48
4.3 pav. Darbinio fragmento nuotrauka.....	49
4.4 pav. Kopijavimo mašinos bendras vaizdas:.....	50
4.5 pav. Sutapdinimui naudojamas mikroskopas	50
4.6 pav. Paklaidų pasiskirstymas.....	51

4.7 pav. Sutapdinimo metodu gamintos skalės suminės paklaidos grafikas	52
4.8 pav. Sutapdinimo metodu gamintos skalės suminės paklaidos grafikas	52
4.9 pav. Dalijimo mašina, turinti fragmento prispaudimo mechanizmą	53
4.10 pav. Pneumatinis fragmento prispaudimo mechanizmas:	53
4.11 pav. Išstatymo mikroskopas ir suslėgto oro valdymo sklendės.....	54
4.12 pav. Sutapdinimo būdu gamintos 160 mm ilgio liniuotes sistemingosios paklaidos grafikas	54
4.13 pav. Rastrinių elementų perslinkimas išilgine jų kryptimi dėl pozicionavimo paklaidų	55
4.14 pav. Linijinės dalijimo mašinos bendrasis vaizdas:.....	56
4.15 pav. Įrengimo prieš modernizavimą blokinė valdymo schema	57
4.16 pav. Modernizuoto įrengimo blokinė valdymo schema	59
4.17 pav. Histerezės kilpa (senasis pjezoelementas)	60
4.18 pav. Histerezės kilpa (naujasis pjezoelementas).....	61
4.19 pav. Poslinkio didžiausia deviacija nuo vidurkio	61
4.20 pav. Skalės sukaupioji paklaida formuojant senu įrenginiu	62
4.21 pav. Skalės sukaupioji paklaida formuojant senu įrenginiu	62
4.23 pav. Matavimų vidurkis ir sklaidos laukas 2σ ribose	63

IVADAS

Tyrimo objektas

Fotoelektrinės matavimo sistemos šiuo metu yra vienos iš populiariausių, kuriant naujus ar automatizuojant senuosius įrenginius, kuriems aktualus tikslus komplektuojamųjų mazgų judesio valdymas ir pozicionavimas. Naudojant šias poslinkio matavimo sistemas automatizuotų įrenginių tikslumo parametrai yra tiesiogiai priklausomi nuo matavimo sistemų tikslumo. Tobulėjant įrenginiams turi būti tobulinamos ir foto elektrinės matavimo sistemos.

Fotoelektrinės poslinkių matavimo sistemos tobulinamos tikslumo, skiriamosios gebos, informatyvumo didinimo kryptimi. Siekiama išgauti maksimalų kiekį informacijos apie poslinkio parametrus. Šia prasme ypatingas dėmesys yra atkreiptinas į vadinamąsias 2D matavimo sistemas, kurios teikia informaciją ne tik apie poslinkį pagrindinio judesio kryptimi, bet ir informaciją apie tiesaus judesio mažus linijinius poslinkius ir kampinius svyravimus judesio matavimo keitiklio skalės plokštumoje.

Tokiems keitikliams reikalingos sudėtingo rastrinio piešinio skalės su keliais informaciniais takeliais, kurie turi būti tiksliai susieti tarpusavyje. Technologiniai procesai ir įranga, naudojami skalių, skirtų 1D, t. y. tik judesio viena kryptimi matavimui, nepritaikyti 2D skalių originalų gamybai [1, 2]. Taip pat 2D skalių kalibravimui nepritaikyta ir kalibravimo įranga, naudojama 1D skalių kalibravimui [3 – 4].

Būtent dėl šių priežasčių tiriamajame darbe apžvelgiami fotoelektrinių poslinkio matavimo sistemų ir skalių tipai bei ypatumai, daug dėmesio skiriama 2D skalių ir jų originalų formavimo metodams. Analizuojami 2D skalių tikslumo parametrai, formavimo metodo paklaidų sandai.

Tiriamąjo darbo metu atliktas linijinių skalių formavimo įrenginio modernizacija ir tyrimas. Ištirti skirtingi 2D skalių originalų formavimo metodai, pateikti tyrimo rezultatai bei išvados ir pasiūlymai.

Darbo uždaviniai ir tikslas

Pagrindinis darbo tikslas – nustatyti tinkamiausią naudoti fotolitografinį 2D skalių originalų formavimo metodą. Atskleisti skirtingiems metodams būdingus bruožus. Pateikti

skirtingų metodų tikslumo tyrimo rezultatus. Įvertinti metodų realizacijos galimybes bei pateikti pasiūlymus metodams įgyvendinti.

Temos naujumas

Analizuojami kokybiškai naujų 2D skalių originalų formavimo metodų tikslumo parametrai. Parenkamas geriausias originalų formavimo metodas. Tiriama naujų, Lietuvoje negaminamų, 2D linijinių skalių formavimo metodai.

Temos aktualumas

Nusakomos originalui būdingos paklaidų savybės. Tyrimas atskleidžia fotolitografinio 2D skalių originalų formavimo metodo tinkamumą skalėms gaminti.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Modernizuotas 1D skalių originalų gamybai skirtas įrenginys, pritaikytas 2D skalių gamybai. Sukurtas originalų formavimo įrenginys veikiantis tikslaus fragmento ir ruošinio pozicionavimo metodu. Statistiškai duomenys įvertinami pagal vidutinį kvadratinį nuokrypį.

Darbo mokslinė vertė

Šis tiriamasis darbas naudingas įmonei „Precizika metrology“ vykdančiai projektą „Kokybiškai naujos 2D matavimo skalės sukūrimas“. Remiantis tyrimo metu gautais rezultatais ir išvadomis, įmonė galės pasirinkti skalių formavimo metodą ir jo realizavimo būdą.

Darbo aprobacija

Konferencijoje "MOKSLAS LIETUVOS ATEITIS" pristatytas straipsnis "Rastrų formavimo įrenginio modernizacija ir tyrimas". Tarptautinėje konferencijoje "Mechanika 2011" pristatytas straipsnis "Informative 2D scales of measurement systems design and metrological characteristics".

1. LINIJINIŲ SKALIŲ, SKIRTŲ PRECIZINĖMS MATAVIMO SISTEMOMS, IR JŲ FORMAVIMO METODŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ

1.1 Fotoelektrinių poslinkio matavimo sistemų skalių tipai ir ypatumai

Precizinio poslinkio matavimo sistemos gali būti įvairios. Tačiau pramonėje labai paplitę fotoelektriniai keitikliai. Šie keitikliai lengvai pritaikomi kuriant naujas mechatronines sistemas ar modernizuojant senąsias. Fotoelektriniai keitikliai gali turėti 1 dimensijos ir 2 dimensijų rastrines skales.

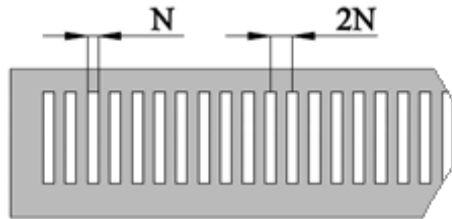
Keitikliai, turintys 1 dimensijos skales, teikia informaciją tikrai apie poslinkį išilgai keitiklio ir neteikia jokios kitos informacijos apie keitiklio nuskaitymo galvutės pasislinkimus nuskaitytos skalės atžvilgiu. Keitikliai, turintys 2 dimensijų skales, teikia informaciją apie poslinkį išilgine bei skersine keitiklio ašies kryptimis bei pasisukimą plokštumoje, lygiagrečioje keitiklio skalės plokštumai. 2D skalės, kurių informaciją apie poslinkius teikiantis piešinys yra sudarytas iš pasvirusių brūkšnių, pritaikius specialią optinę sistemą, gali suteikti informaciją ir apie nuskaitymo galvutės poslinkį statmena skalės plokštumai kryptimi. Skalės naudojamos poslinkio informacijai teikti vienos ir dviejų dimensijų keitikliuose, skiriasi savo struktūra.

Jos gali būti tokios:

1. 1D skalės:
 - a) vieno takelio periodinės skalės;
 - b) periodinės skalė su kodinėmis žymėmis;
 - c) periodinė skalė su kodiniu takeliu (skalė su pseudo atsitiktinio rašto kodu);
 - d) absoliučiosios skalės.
2. 2D skalės:
 - a) periodinės 2D skalės
 - b) kodinės 2D skalės su kampu pasvirusiais elementais.

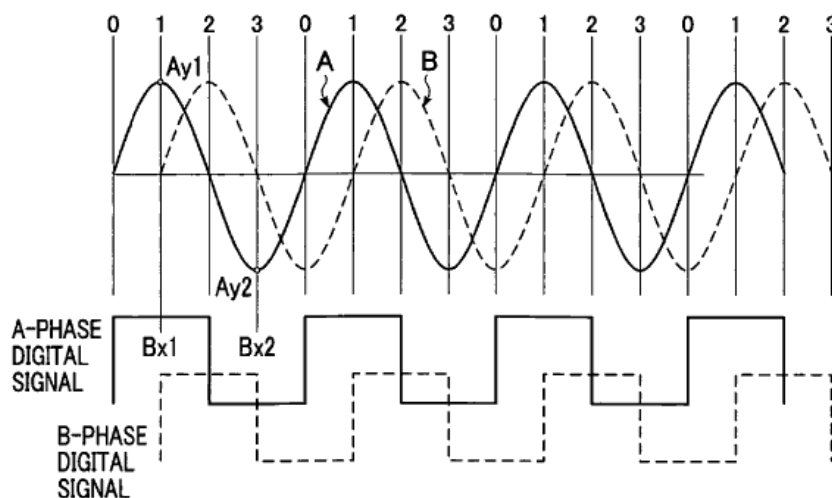
a. Liniuotės su periodine struktūra:

Precizinės periodinės skalės struktūra suformuota chromu padengtame stiklo paviršiuje iš periodiškai išdėstytų vienodo pločio brūkšnių. Tokios skalės eskizas pateiktas 1.1 pav.



1.1 pav. Periodinės skalės eskizas: N – brūkšnio plotis, $2N$ – struktūros žingsnis

Vieno takelio periodinės skalės rastrinis takelis formuoja skirtingų fazių kvazisinusinius signalus. Nuskaitymo galvutė iš šios struktūros nuskaityto individualų ciklą tarp dviejų gretimų brūkšnių. Ji, keliaudama išilgai skalės, skaičiuoja kvazisinusinio signalo ciklus ir juos sumuodama matuoja nueitą kelią. Rastrinės struktūros formuojamų analoginių kvazisinusinių signalų pavyzdys pateiktas 1.2 pav [14].



1.2 pav. Rastrinės struktūros formuojami analoginiai signalai ir jų pakeitimas į skaitmeninius

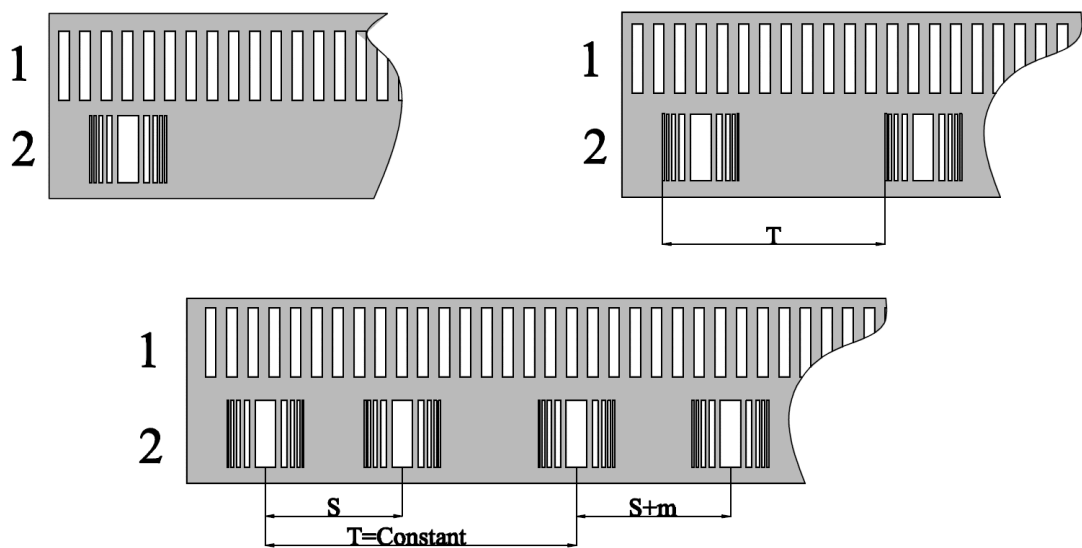
Pagrindinis šių skalių požymis tas, kad jos neturi bendros informacijos, kuri skalės vieta yra nuskaitynėjama. Uždengus skalės skaidrų brūkšnį, dėl energijos nutrūkimo keitiklis neturi jokios informacijos apie skalės judesį pertrūkio ribose. Tuomet matavimo signalas nutrūksta, arba rodomas klaidingas nueitas atstumas.

b. Liniuotės su periodine struktūra ir kodinėmis žymėmis

Skalės turinčios periodinę struktūrą ir kodines žymes, gali būti skirstomos į tris rūšis:

- 1) periodinė skalė su viena kodine žyme;
- 2) periodinė skalė su periodiškai išdėstytomis žymėmis;
- 3) periodinė skalė su neperiodiškai išdėstytomis žymėmis;

Tokių skalių eskizai pateikti 1.3 pav.



1.3 pav. Skalių su kodinėmis žymėmis eskizai:

1 – rastrinės struktūros takelis, 2 – kodinių žymių takelis

Periodinė skalė su viena kodine žyme sistemai teikia informaciją ne tik apie poslinkį išilgine skalės kryptimi, bet ir apie skaitytuvo padėtį kodinės žymės atžvilgiu. Keitiklio nuskaitymo galvutė turi atskirą fiksavimo elementą, skirtą aptikti žymeį, ją aptikus skaitikliai gali būti perstatomi į iš anksto numatytą vertę.

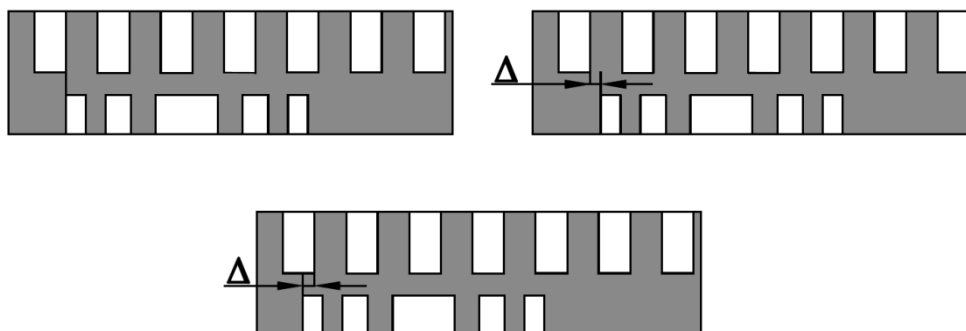
Precizinis poslinkio matavimas išilgai skalės kaip ir vieno takelio periodinėse skalėse atliekamas periodinės struktūros formuojamais signalais. Šių skalių pagrindinis bruožas tas, kad norint nustatyti sistemos padėtį skalės atžvilgiu reikia pervaziuoti per visą skalės ilgį, kol randama žymė. Naudojant šias skales padėties informacijos radimas yra nepatogus, todėl gaminamos daugiau informacijos teikiančios skalės su periodiškai išdėstytomis žymėmis [14].

Periodinė skalė su periodiškai išdėstytais kodais suteikia galimybę greičiau nustatyti bendrąją padėtį. Apytiksliai žinant kurioje vietoje skalės atžvilgiu yra sistema, pakanka nuvažiuoti iki artimiausios kodinės žymės kad nustatyti tikslią padėtį.

Šių skalių pagrindinis bruožas tas, kad sistema pagal žymių išdėstymą ir formą pati negali nustatyti kuriame skalės taške randasi. Taip yra todėl, kad kodinės žymės neturi išskirtinių bruožų, pagal kuriuos būtų galima tai padaryti.

Periodinė skalė su kintančiu atstumu tarp kodų suteikia galimybę greičiau nustatyti bendrąją sistemos padėtį. Šio tipo skalėje atstumai tarp kodų yra nevienodi. Todėl norint nustatyti bendrą sistemos padėtį, sistemai pakanka nuvažiuoti atstumą tarp dviejų gretimų kodų, kad tiksliai nustatytų tarp kurių kodų sistema yra. Sistemos su tokio tipo skalėmis, kaip ir prieš tai minėtos precizinį poslinkį matuoja pagal periodinę struktūrą.

Šiose išvardintose periodinėse skalėse kodinės žymės yra susietos su rastrinės struktūros takeliu. Kodinių žymių susiejimas su rastrine struktūra gali būti įvairus, tai priklauso nuo užsakovo pageidavimų, bei jo projektuojamos matavimo sistemos veikimo principo. Keletas kodinių žymių pririšimo prie rastrinės struktūros variantų pateikta 1.4 pav [14].



1.4 pav. Kodinių žymių pririšimas prie periodinės struktūros
 Δ – numatytas susiejimo matmuo

Kodinės žymės susiejimo su rastriniu takeliu būdas nėra griežtai reglamentuotas, taigi susiejimo variantų gali būti įvairių. Susiejimo tikslumas $\pm 0,25\mu\text{m}$.

c. Liniuotės su periodine struktūra ir kodiniu takeliu

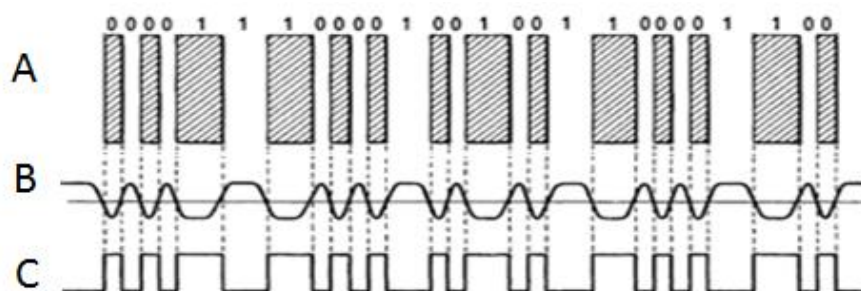
Periodinės skalės su kodiniu takeliu teikia pastovią informaciją apie sistemos padėtį skalės atžvilgiu. Kodinė struktūra suformuota taip, kad priklausomai nuo poziciją koduojančio „žodžio“, paėmus N bitų kodą bet kurioje skalės vietoje, jis per visą skalės ilgį nesikartoja. Kiekvienas pozicijos „žodis“ turi jam priskirtą pozicijos reikšmę. Sistema nuskaičius N

brūkšnių, žino apytiksę padėtį. Tikslesnė padėtis nustatoma naudojant periodinę struktūrą kaip ir prieš tai minėtose skalėse.

Naudojant tokio tipo skales sistemai nebereikia skaičiuoti kvazisinusinio signalo periodų, bei kaupti pozicijos istorijos. Absoliučios pozicijos nustatymas tampa ganėtinai paprastas ir greitas. Šių skalių naudojimas leidžia lanksčiai valdyti automatines sistemas. Toks matavimo metodas leidžia elektroniniams įrenginiams nuskaityti galvutės poziciją bet kuriuo metu. Išjungus ir įjungus elektroninius įrenginius pozicija yra nuskaityta iš karto, nereikia grįžti į nulinį pradžios tašką. Tokios skalės su kodiniu informaciniu takeliu eskizas pateiktas 1.5 pav. [14].



1.5 pav. Periodinė skalė su kodiniu takeliu
1 – periodinės struktūros takelis, 2 – kodinės struktūros takelis

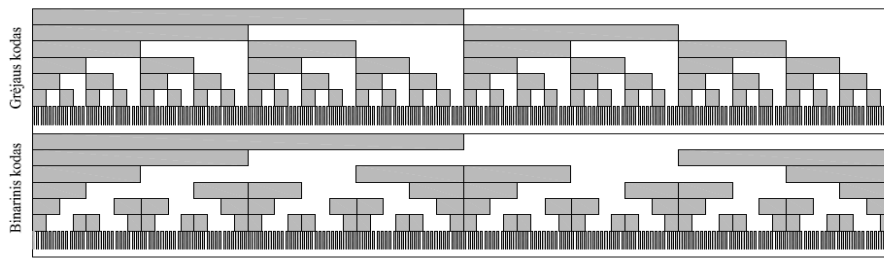


1.6 pav. Galimos kodinės struktūros formuojamo aperiodinio signalo pavyzdys
A – kodinė struktūra, B – analoginis signalas, C – skaitmeninis signalas.

d. Absoliučiosios skalės

Absoliučiosios skalės kaip ir periodinės skalės su kodiniu takeliu, teikia informaciją apie absoliučią sistemos padėtį skalės atžvilgiu. Skirtumas tik tas kad padėtį nusakantis kodas šiuo atveju gaunamas naudojant ne vieną, o kelis kodinius takelius. Poziciją koduojančių takelių skaičius priklauso nuo kodinio žodžio ilgumo ir norimos gauti skyros. Kuo skalės skyra didesnė tuo daugiau kodinių takelių reikia pozicijai užkoduoti. Jeigu padėtį koduojantis žodis bus sudarytas iš 12 bitų, skalė turės 12 kodą formuojančių takelių, ir periodinės struktūros takelį, kuriuo nustatomas precizinis poslinkis. Informacija šiuose kodiniuose takeliuose gali būti užkoduojama skirtingais būdais. Šiuo metu labiausiai paplitę du kodavimo būdai, tokie kaip Grėjaus ir Binarinis kodai. Grėjaus kodavimo būdas užtikrina nuoseklų kodo

reikšmių kitimą pagal dvejetainę sistemą. Šių dviejų kodavimo būdų eskizai pateikti 1.7pav. [14, 15].



1.7pav. Absoliutinė skalė, Grėjus ir Binarinis kodavimo būdai

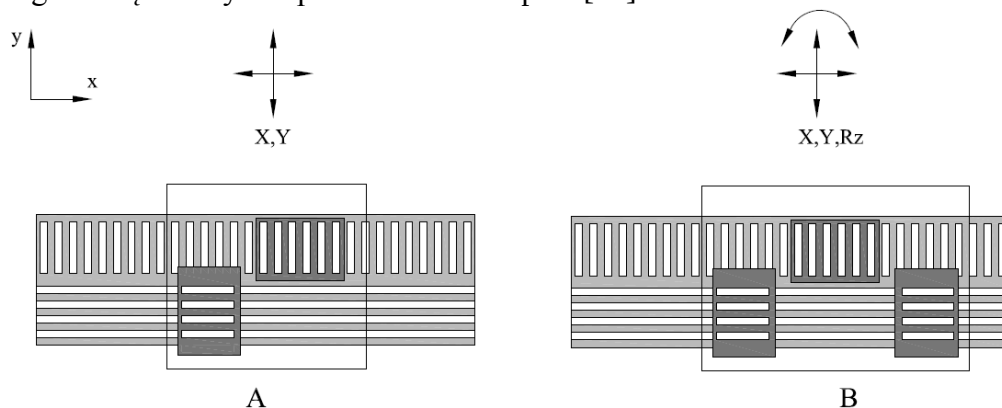
2D skalės

2D skalės, tai tokios skalės kurios teikia informaciją apie poslinkį ne tik pagrindinio judesio kryptimi, bet ir informaciją apie tiesaus judesio mažus linijinius poslinkius ir kampinius svyravimus judesio matavimo keitiklio skalės plokštumoje. Nagrinėjami du pagrindiniai tokių skalių variantai:

- 2D skalės, turinčios du periodinius rastrinius takelius
- 2D skalės su kampu skalės ašies atžvilgiu orientuotais rastriniais elementais

a. Periodinės 2D skalės

Periodinės 2D skalės turi du periodinius informacinius takelius. Viena periodinė struktūra išdėstyta išilgai skalės, o antroji skersai. Tokio tipo 2D skalę formuoja skirtingų fazių kvazisinusinius signalus. Kaip ir 1D periodinėse skalėse su vienu takeliu, precizinis poslinkis yra nustatomas skaičiuojant periodus. Skersai skalės ašiai suformuotas periodinis rastrinis takelis teikia informaciją apie poslinkį išilgine skalės kryptimi, o statmenai skalės ašies suformuotas rastrinis takelis apie poslinkius skersine kryptimi. Tokių skalių struktūra ir nuskaitymo galvūčių išdėstymas pavaizduotas 1.8 pav. [16]



1.8 pav. Periodinės 2D skalės nuskaitymo būdai

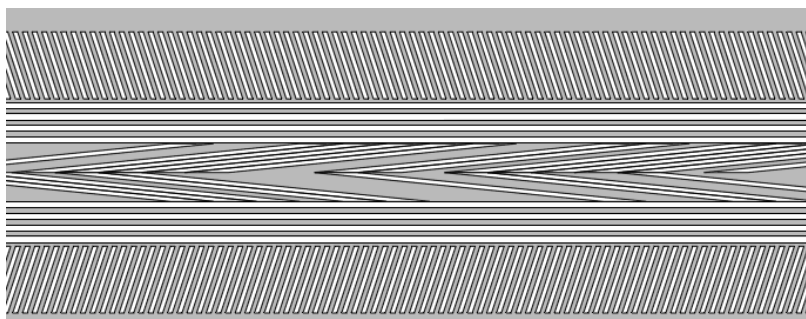
Matuojant tik linijinius poslinkius išilgai ir skersai skalės pakanka dviejų nuskaitymo elementų. Norint gauti informaciją ir apie pasisukimą skalės plokštumoje reikalingi 3 nuskaitymo elementai.

Tačiau šios skalės taip pat neteikia informacijos apie bendrą sistemos padėtį skalės atžvilgiu, jos gali pamatuoti tik nueitą kelią nuo matavimo pradžios bei atpažinti judėjimo kryptį.

b. Kodinės 2D skalės su kampu pasvirusiais elementais

Kodinės 2D skalės su kampu pasvirusiais elementais, kaip ir periodinės skalės su kodiniu takeliu, teikia pastovią informaciją apie sistemos absoliučią padėtį skalės atžvilgiu. Šios skalės turi kodinius takelius ir periodinės struktūros takelius. Kodiniai takeliai suformuoti iš pasvirusių brūkšnių. Dėl skirtingo kodinių takelių pasvirimo kampo sistema nuskaitydama absoliučiuosius kodus gali nusakyti, į kurią pusę juda nuskaitymo galvutė skalės atžvilgiu. Šių skalių precizinis poslinkis taip pat nusakomas signalais, gautais iš periodinių struktūrų.

Panaudojus specialią optinę sistemą, šios skalės gali teikti informaciją ir apie poslinkius, statmenus skalės plokštumai.



1.9 pav. Kodinės 2D skalės su kampu pasvirusiais elementais eskizas

1.2 Linijinių 2D skalių ir jų originalų formavimo metodų apžvalga

2D linijinės skalės ir jų originalai gali būti formuojami dviem pagrindiniais būdais (metodais).

Pagrindiniai skalių originalų formavimo būdai (metodai):

- a) fotolitografinis;
- b) lazerinis.

a) Fotolitografinis originalų formavimo metodas

Fotolitografiniu 2D skalių originalų formavimo metodu vadinamas toks, kai ant stiklinio ruošinio, padengto chromu ir šviesai jautriu fotorezistu, eksponuojant ultravioletine šviesa pernešamas vaizdas nuo fragmento, kuris gali būti įvairių formų ir dydžių.

Naudojant įvairius fragmentus (brūkšnius, užrašus, kodus ir t. t.) ir juos atitinkamai orientuojant skalės plokštumoje suformuojama rastrinės skalės struktūra. Fragmentas gali iš karto turėti dalį skalės struktūros. Fotolitografinis skalės struktūros formavimo metodas gali būti suskirstytas į atskirus metodus:

- Ištisinis originalų formavimo metodas.
- Originalo ir ruošinio žymių sutapdinimo metodas.
- Tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodas.

1.2.1 Ištisinis originalų formavimo metodas

Ištisinis originalų formavimo metodas – tai toks metodas, kuomet rastrinės 2D skalės originalas yra formuojamas ne iš skalės struktūros fragmentų, o iš atskirų kodinę ir rastrinę struktūras sudarančių elementų.

Pirmiausia formuojami ištisiniui fotolitografiniam metodui naudojami fragmentai. Derinami jų matmenys bei tarpusavio susiejimas. Tuomet keičiant fragmentus eksponavimo būdu, apšviečiant fragmentus ultravioletine šviesa pernešamas fragmente esantis vaizdas ant ruošinio. Tokiu būdu suformavus rastrinės skalės originalą, atliekami papildomi technologiniai procesai. Ruošinys ryškinamas, atkaitinama, ėsdinama ir nuvalomas fotorezistas [6].

Metodo realizavimo priemonės bei specifiniai reikalavimai joms

Šį metodą realizuoti įmanoma naudojant dalijimo mašiną BE-217 (1.10 pav.).



1.10 pav. Dalijimo mašina BE-217

Specifiniai reikalavimai šio proceso realizavimo priemonei:

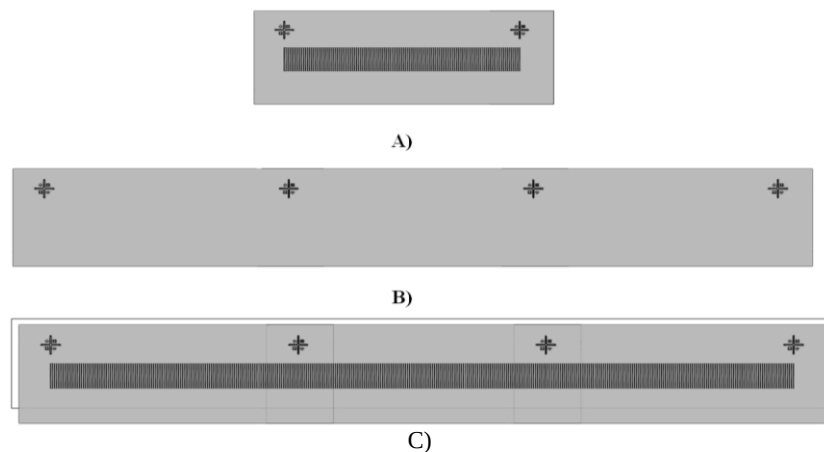
- tikslus sistemos pozicionavimas (ne mažiau nei $0,3 \mu\text{m}$);
- pastovus apšvietimo stiprumas;
- judesio tiesumas;
- tikslus židinio nuotolio išlaikymas.

Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištisiniu fotolitografiniu metodu privalumai

- procesas yra lengvai suderinamas;
- gaunama labai gera brūkšnio formos kokybė (kampai neužsiapvalina, brūkšnio pakraštys tolygus);
- brūkšnius galima formuoti bet koku norimu kampu (tai nepriklauso nuo dalijimo mašinos pirminio rastrinio elemento pozicionavimo).

1.2.2 Originalo ir ruošinio žymių sutapdinimo metodas

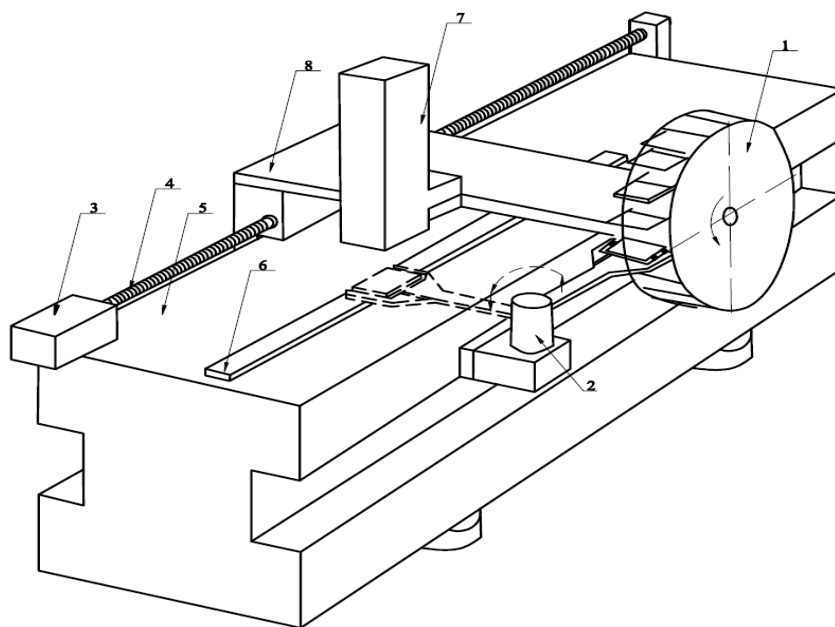
Rastrinį piešinį formuojant šiuo metodu pirmiausia suformuojami atskiri skalių fragmentai turintys tam tikrais atstumais išdėstytas sutapatinimo procesui skirtas žymes. Tokiais pat atstumais žymės yra suformuojamos ir ruošinyje. Po to fragmentai nustatyta tvarka pozicionuojami ant ruošinio tapatinant ruošinyje ir fragmente esančias žymes (1.11 pav.). Skalių fragmentų ruošinių ilgis priklauso nuo turimos originalų formavimo įrangos ir rastrinio piešinio. Paprastai jis neviršija 200 mm [17].



1.11 pav. Sutapatinimo proceso eskizas:

A) darbinis fragmentas; B) ruošinys su žymėmis; C) sutapatinimo būdu pagamintas originalas

Skalių originalus formuojant šiuo metodu, fragmento pozicionavimas atliekamas dviem etapais. Jis manipulatoriumi paimamas iš fragmentų kaupiklio ir transportuojamas ant tikslaus fragmento išstatymo mechanizmo. Pastaruoju fragmentas ruošinio atžvilgiu pozicionuojamas tiksliai pagal iš anksto ant originalo ruošinio ir fragmentų suformuotas žymes, naudojant PSD jutiklius (1.12 pav.) [18].

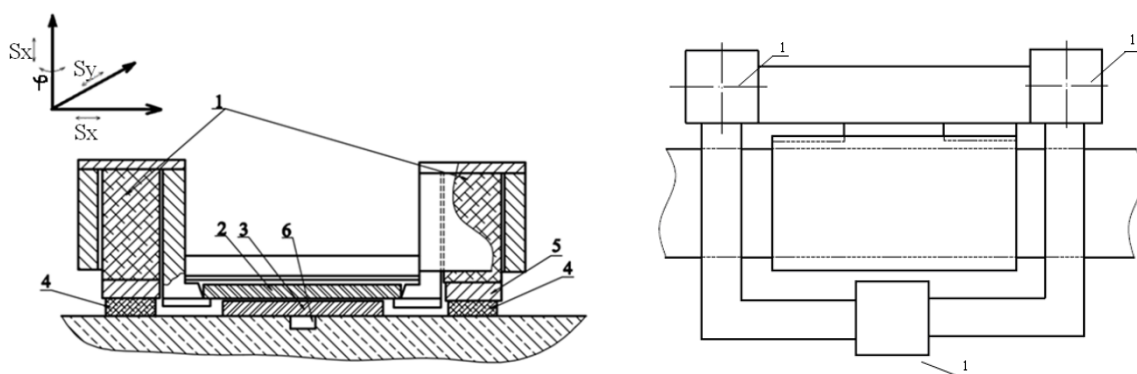


1.12 pav. Įrenginys skirtas 2D skalės gamybai žymių sutapdinimo metodu:
1 – fragmentų keitiklis, 2 – fragmentų pernešimo manipulatorius, 3 – kariatėlės pavara, 4 – kariatėlės pavaros sraigtas, 5 – stovas (granitinis), 6 – eksponuojamoji liniuotė, 7 – ultravioletinės šviesos šviestuvai, 8 – kariatėlė.

Ant granitinio stovo (5) išstatomas ruošinys (6). Paleidžiama programa, kurią vykdydamas įrenginys fragmentų pernešimo manipulatoriumi (2) suima fragmentą esantį fragmentų kaupiklyje (1) ir pakeldamas jį viršų, bei pasisukdamas apie savo ašį perneša jį fragmento išstatymo staliuką. Fragmentas išstatomas staliuką stumdant pjezoelementais, pagal PSD jutiklio rodmenis. Kai fragmentas išstatytas, jis apšviečiamas ultravioletine šviesa, šviestuvu (7). Po eksponavimo fragmentas pjezo elementais atkeliamas nuo ruošinio, manipulatorius vėl sugriebia fragmentą ir nuneša atgal į fragmentų keitiklį. Kai manipulatorius padeda fragmentą, nusileidžia žemyn, kad netrukdytų fragmentų keitikliui pasisukti. Tuo pat metu kariatėlė (8) su šviestuvu (7), manipulatoriumi (2), fragmentų keitikliu (1) ir fragmentų išstatymo staliuku paslenkami per tam tikrą atstumą. Vieno pavažiavimo atstumas lygus skalės sektoriaus esančio fragmente ilgiui. Paslinkimas

vykdomas kariatėles pavara (3), per kariatėles pavaros sraigą (4). Perslinkus visą sistemą, imamas kitas fragmentas iš fragmentų keitiklio, ir procesas atliekamas iš naujo. Tokiu būdu nuosekliai žymių sutapdinimo metodu iš atskirų fragmentų yra suformuojama visa 3 m. 2D kodinės skalės struktūra.

Tiksliam fragmentų pozicionavimui suprojektuota originali konstrukcija, kuri yra pozicionuojama į reikiamą vietą, bei pakeliama ir nuleidžiama ant ruošinio naudojant pjezo elementus. Trimis pjezo elementais fragmentas išlaikomas pastoviai aukštyje virš ruošinio, kai reikia pjezo elementais fragmentas sklandžiai nuleidžiamas ant ruošinio. Kiti trys pjezo elementai skirti sistemos pozicionavimui. Jais galima sistemą paslinkti x-y kryptimis, bei pasukti. Pjezo elementai suteikia galimybę sistemą pastumti iki 0,05 μm tikslumu. Pozicionavimo staliuko schema pateikta 4 pav.



1.13 pav. Pozicionavimo staliuko schema:

a) vaizdas iš šono, b) vaizdas iš viršaus (pasuktas), 1 – pjezo elementai sistemos pakėlimui ir nuleidimui, 2 – originalas, 3 – ruošinys, 4 – pjezo elementai skirti pozicionavimui 5 – tarpinis rėmas, 6 – griovelis skirtas ruošiniui vakuumu pritraukti prie granito

Ši įranga yra skirta greitam ir tiksliam rastrinių skalių originalų formavimui pramoninėje gamyboje. Žymių sutapdinimo metodas gali būti atliekamas ir paprastesniais būdais, žymes tapdinant mikroskopu, rankiniu būdu. Šis būdas ir buvo pasirinktas atliekant žymių sutapdinimo eksperimentinius tyrimus [18].

1.2.3 Tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodas

Rastrinį piešinį formuojant šiuo metodu pirmiausia suformuojami atskiri skalių fragmentai. Po to jie nustatyta tvarka suduriami. Tuo tikslu jie tiksliai pozicionuojami ir

eksponuojami ant skalės originalo ruošinio. Skalių fragmentų ruošinių ilgis priklauso nuo turimos originalų formavimo įrangos ir rastrinio piešinio. Paprastai jis neviršija 200 mm.

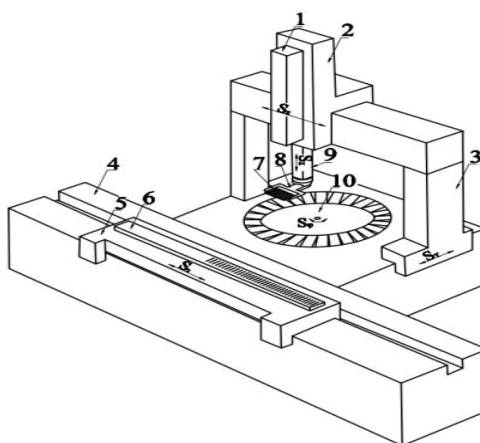
Skalės originalo tikslumas priklauso nuo fragmento suformavimo tikslumo ir jo padėties ant skalės originalo eksponavimo metu.

Metodas pagrįstas fragmento išstatymu bazuojantis jo ruošinio kraštais. Fragmentas griebtuvu yra sugriebiamas už kraštų iš fragmentų kaupiklio ir nešamas į reikiamą vietą ant ruošinio, tiksliai padedamas ir eksponuojamas ultravioletine šviesa. Papildomų išstatymo procesų šiam metodui nereikia.

Skalę formuojant šiuo metodu, fragmentams keliama aukšti rastrinio piešinio padėties fragmento bazių atžvilgiu bei fragmento bazių tikslumo reikalavimai. Šis piešinio susiejimas su fragmentų kraštais turės labai didelę įtaką formuojamos skalės tikslumui. Bazinio pririšimo paklaidos tiesiogiai atsispindi gaminamos skalės kokybei.

Norint šį metodą realizuoti, reikia turėti manipuliatorių gebantį judėti trimis kryptimis. Jo judesiai turi būti labai tikslūs. Suminė įrenginio paklaida neturėtų viršyti $0,3\ \mu\text{m}$ (tai yra leistina sutapdinimo paklaida). Įrengimo griebtuvas turi būti pritaikytas tiksliam, švelniam fragmento sugriebimui, kad sugriebdamas fragmentą neapgadintų jo kraštų.

Sukurto ilgų skalių originalų formavimui tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodui atlikti skirtą įrengimo pavyzdys pateiktas 1.14 pav. [18].



1.14 pav. Įrenginys skirtas ilgų skalių formavimui tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodu atlikti:

1 – šviestuvas, 2 – kariatėlė, 3 – portalas, 4 – stovas, 5 – staliukas, 6 – ruošinys, 7 – fragmentas, 8 – griebtuvas, 9 – pinolė, 10 – fragmentų keitiklis. ΔS_x – kariatėlės poslinkis x ašies kryptimi, ΔS_y – portalo poslinkis y ašies kryptimi, ΔS_z – pinolės poslinkis z ašies kryptimi, ΔS_s – staliuko poslinkis, ΔS_ϕ – fragmentų keitiklio kampinis poslinkis

b) Lazerinis originalų formavimo metodas

Lazerinio metodo metu kodinė struktūra formuojama panašiu principu kaip ir fotolitografijos metodu. Tačiau kodinės struktūros brūkšniai yra formuojami lazerio spinduliu išgarinant chromą. Ruošinio nebereikia dengti fotorezistu, bei atkaitinti, dėl to sumažėja technologinių procesų, ir paprastėja ruošinio paruošimas.

Skalių originalai gali būti formuojami dviem lazeriniais būdais:

- a) sufokusuotu į tašką lazerio spindulio pluoštu;
- b) išskleistu į liniją lazerio spindulių pluoštu.

Sufokusuotu į tašką lazerio spindulio pluoštu, vienu šūviu išgarinant chromą suformuojamas taškas (šviesą praleidžiančią zoną). Formuojant skalės piešinį cilindrinės formos lazerio pluoštu, sistema yra labai lanksti. Tereikia suteikti lazerinei sistemai judesį skersai gaminamos struktūros. Skalės formavimas tokiu būdu būtų atliekamas sluoksniais. Lazerio spinduliui judant skersai struktūros reikiamose vietose chromas išgarinamas, ir tokiu būdu formuojamas piešinys, tuomet kariatėlė ant kurios sumontuotas lazeris ir spindulio formavimo optinė sistema, yra stumdoma tikslios pavaros, kurios valdiklis siunčia sinchronizuojančius signalus į lazerį, todėl yra galimybė tiksliai valdyti postūmį tarp atskirų lazerio impulsų.

Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištisiniu lazeriniu metodu, cilindrinės formos lazerio pluoštu trūkumai:

- dėl formuojamo spindulio diametro paklaidos gali atsirasti kontūro mikro nukrypimų.

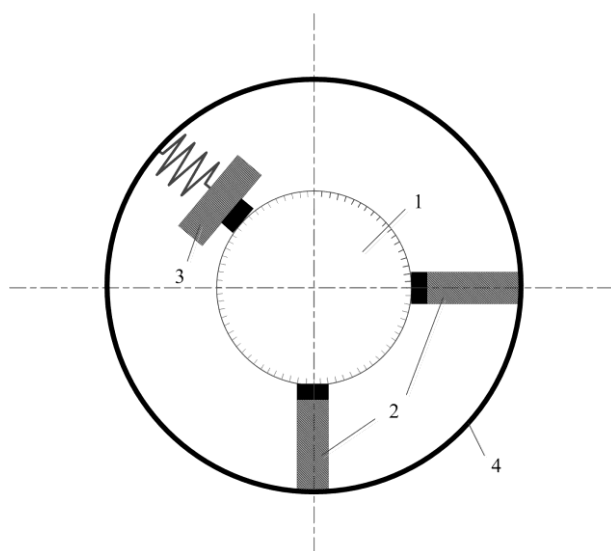
Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištisiniu lazeriniu metodu, cilindrinės formos lazerio pluoštu privalumai:

- sistema turėtų gan didelį našumą, kadangi skalės piešinys būtų formuojamas ne po vieną takelį o visas iš karto;
- viso skalės piešinio formavimui užtektų vieno lazerinės sistemos derinimo.

Išskleistu į liniją lazerio spindulių pluoštu formuojant kodinę struktūrą, procesas vyksta taip pat kaip ir paprastos 1D linijinės kodinės skalės gamybos metu. Vienas kodinės struktūros brūkšnys yra formuojamas keliais šūviais, tokiu būdu perklojant brūkšnius galima formuoti platesnį ar siauresnį kodinės struktūros brūkšnį, ir suformuoti visą kodinę struktūrą.

Tačiau tokiu būdu formuojant skalės piešinį, turi būti palikta galimybė keisti formuojančio brūkšnelio ilgį bei pasisukimo kampą, taip yra todėl, kad skalėje esančių kodinių struktūrų takelių pločiai gali skirtis, taip pat gali skirtis ir kodinės struktūros brūkšnelio pasvirimo kampas.

Norint palikti galimybę keisti spindulio pasisukimo kampą, galima panaudoti aukštos skyros pozicionavimo sistemą [3]. Ši sistema pateikta 1.15 pav.



1.15 pav. Aukštos skyros pozicionavimo sistemos principinė schema:
1 – rastrinė kampinė skalė; 2 – preciziniai linijinio poslinkio vykdikliai; 3 – sukamojo poslinkio vykdiklis; 4 – korpusas

Rastrinė kampinė skalė 1 erdvėje pozicionuojama trimis aktyviais pjezo elementais: linijinio poslinkio preciziniais vykdikliais 2 ir kampinio poslinkio vykdikliu 3. Šie trys aktyvūs elementai kontaktuodami su rastrine skale, atlieka jos bazavimo funkcijas. Vykdikliai 2 rastrinės skalės centro atžvilgiu išdėstyti taip, kad tarp jų yra 90° kampas, o tarp sukamojo vykdiklio yra 135° laipsnių kampas. Šioje sistemoje maksimaliai sumažintas kinematinų grandžių skaičius. Tai labai pagerina metrologines charakteristikas ir supaprastina konstrukciją.

Turint tokią fokusavimo lęšio pasukimo sistemą, būtų galima sklandžiai pakeisti formavimo spindulio kampą. Bei reikalui esant pakeisti fokusavimo lęšio padėtį.

Šios sistemos didžiausia linijinė skiriamoji geba 20×10^{-6} mm, kampinė $0,2 \times 10^{-3}$ rad.

Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištisiniu lazeriniu metodu ištęsto skerspjuvio pluoštu trūkumai:

- Nelygūs brūkšnių galai.
- Originalo gamybos metu gali būti pažeidžiamas pats stiklinis paviršius, gali pakisti stiklo pralaidumas.

Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištisiniu lazeriniu metodu privalumai:

- Lyginant su fotolitografijos metodu, procesas yra labai greitas.
- Ruošinio nebereikia dengti fotorezistu ir atkaitinti kaip fotolitografijos metodo taikymo atveju.
- Kodinė struktūra formuojama dinamiškai, įrenginiui nesustojant.

Lazerinio metodo realizavimo priemonės bei specifiniai reikalavimai joms:

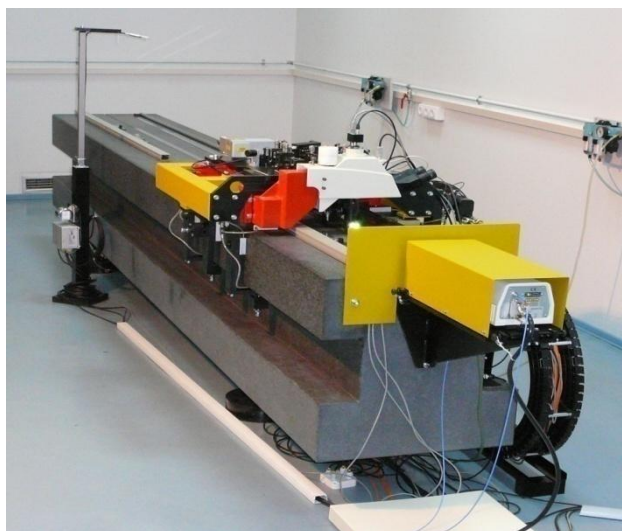
Specifiniai reikalavimai šio proceso realizavimo priemonei:

- Tolygus sistemos judėjimas.
- Sinchronizuotas lazerio darbas su pavara.
- Tiesiaeigiškumas.
- Tikslus židinio išlaikymas.
- Galimybė keisti išskleisto į liniją lazerio spindulio kampą.

Šiam metodui galima būtų pritaikyti lazerinę originalų formavimo mašiną (1.16 pav.). Ji turi pakankamai tolydų sistemos judėjimą, judesio tiesumą bei tikslų židinio nuotolio išlaikymą.

Tačiau įrenginyje nėra optinės sistemos, kuri formuotų cilindrinės formos lazerio pluoštą ir turėtų skenavimo sistemą skersai formuojamos skalės piešinio.

Taip pat norint piešinį formuoti su ištęsto skerspjuvio pluoštu, negalima keisti formuojamo brūkšnio kampo, ir formuojamas spindulys yra nepakankamo ilgio norint formuoti 2D skales. Dėl šių parametrų trūkumo, pritaikant įrenginį 2D skalių gamybai, turėtų būti projektuojama nauja lazerinė optinė sistema, turinti arba cilindrinio spindulio formavimą, arba ištęsto skerspjuvio pluošto formavimą.



1.16 pav. Lazerinė originalų formavimo mašina

Apžvelgus linijinių skalių tipus ir jų formavimo būdus (metodus), galima teigti, kad sudėtingo 2D skalių piešinio (struktūros) formavimo technologija nėra plačiai žinoma ir išplėtota. Taip pat nėra žinomi įvairių 2D skalės formavimo metodų ypatumai bei formavimo tikslumas. Todėl buvo pasirinkta tiriamajame darbe nagrinėti skalių originalų rastrų formavimo tikslumą skirtingais fotolitografiniais metodais.

Formuojant 2D skales keliama pagrindiniai klausimai:

- 1) Priimtinas tikslumo atžvilgiu.
- 2) Technologijos paprastumas.
- 3) Formavimo proceso trukmė (formuojant atitinkamu metodu).
- 4) Aplinkos poveikis formavimo procesui.

2. LINIJINIŲ 2D SKALIŲ, SKIRTŲ PRECIZINĖMS MATAVIMO SISTEMOMS, TIKSLUMO PARAMETRŲ ANALIZĖ

2D skalėms su pasvirusiais kodinės struktūros elementais yra svarbūs šie tikslumo parametrai.

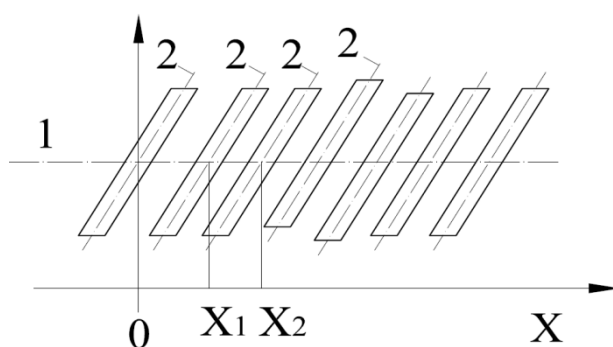
- a) Kampu išdėstytų rastrinių elementų koordinatės (pozicijos padėties) paklaida.
- b) Rastrinių elementų pasvirimo kampo paklaida.
- c) Brūkšnių pločio paklaida.
- d) Rastrinių (informacinių) takelių tarpusavio lygiagretumo nuokrypiai.

Tai, kad rastriniai elementai išdėstyti ne statmenai skalės ašiai, o kampu jai, reikia išvesti keletą naujų sampratų ir jomis operuoti norint nustatyti pagrindinius tikslumo parametrus bei atliekant skalių kalibravimą.

a) Kampu išdėstytų rastrinių elementų padėties paklaida

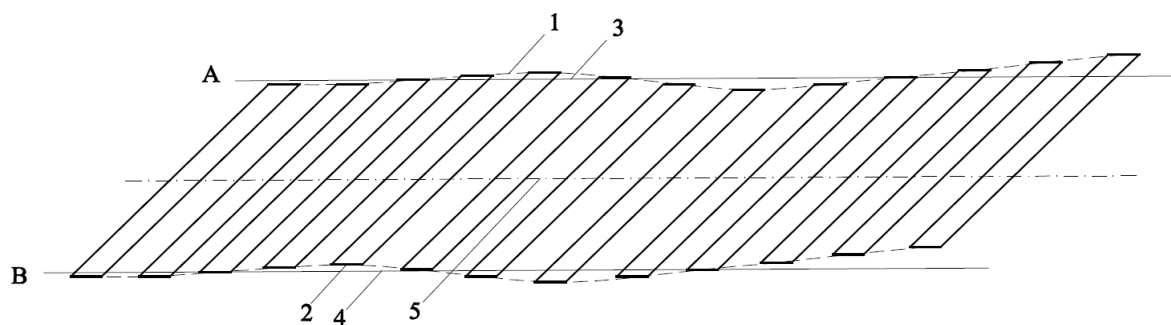
Paklaidos norminimas (apibrėžimas)

Kampu išdėstytų rastrinių elementų padėties koordinatė nusakoma brūkšnio simetrijos ašies susikirtimo su rastrinio takelio simetrijos ašimi taško koordinatė. Koordinatės ašies nulinis taškas nusakomas pirmojo arba kito nustatyto rastrinio elemento (brūkšnio) simetrijos ašies susikirtimu su rastrinio takelio simetrijos ašimi (žr. 2.1 pav.).



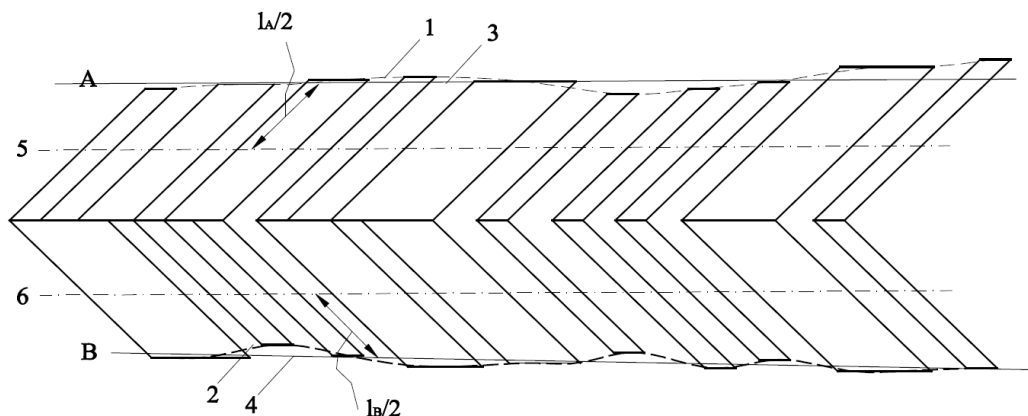
2.1 pav. Pasvirusio rastrinio elemento padėties koordinatės nustatymo schema:
1 – rastrinio takelio simetrijos ašis; 2 – rastrinio elemento (brūkšnio) simetrijos ašis

Rastrinio takelio simetrijos linija nusakoma kaip rastrinio takelio elementų galų gaubtinių (1,2) vidurio linijų (3,4) simetrijos ašis (5) (žr. 2.2 pav.) Gaubiamosios vidurio linija brėžiama mažiausių kvadratų metodu pagal nustatytą reikšmių skaičių, kuris nusakomas dydžiu n . $n = L/50$, L – skalės ilgis, mm.



2.2 pav. Rastrinio takelio simetrijos linijos samprata:
1 – galų A gaubtinė; 2 – galų B gaubtinė; 3 – gaubtinės A vidurio linija; 4 – gaubtinės B vidurio linija; 5 – vidurio linijų A ir B simetrijos ašis

Kai rastriniai takeliai susikerta, rastrinio takelio vidurio linija (5,6) nustatoma pagal laisvojo rastrų krašto (A,B) gaubtinės (1,2) vidurio liniją (3,4), brėžiant jai lygiagrečią liniją, perslinktą į rastrinio takelio pusę dydžiu, lygiu nominalių rastrinių elementų ilgių l_a , l_b , pusei (žr. 2.3 pav.).



2.3 pav. Rastrinio takelio vidurio linijos samprata kai rastriniai elementai susikerta

Kalibravimas ir jo realizacijos priemonės

1. Linijinių skalių kalibravimo komparatoriumi rastrinio piešinio vieno krašto rastrinių elementų (brūkšnių) galų padėties kitimas statmenai skalės ašiai. Matavimai atliekami 50 mm žingsniu.

Šie ir kiti matavimai bei skaičiavimai atliekami dešininėje stačiakampėje koordinatų sistemoje, kurios abscisių ašį realizuoja komparatoriaus tiesus precizinis judesys. Koordinatų pradžia sutapdinama su pirmojo arba bet kurio užsiduotojo brūkšnio simetrijos ašies susikirtimo su rastrinio takelio simetrijos ašimi koordinate. Surandama rastrinių elementų galų gaubtinė. Tuo tikslu rastrinių elementų (brūkšnių) galų padėties matavimo rezultatai aproksimuojami parametrine funkcija. Optimaliu aproksimacijos modeliu yra antros ir trečios eilės algebriniai splainai.

Pagal šių matavimų rezultatus mažiausių kvadratų metodu surandama vidurio linija.

Analogiškai surandama rastrinio piešinio antrojo krašto vidurio linija. Skaičiuojama šių linijų simetrijos ašis, kuri yra rastrinio takelio simetrijos ašis.

2. Matuojama rastrinio takelio pirmojo brūkšnio vienos (kairiosios) briaunos padėtis. Matuojama rastrinio takelio pirmojo brūkšnio antrosios briaunos padėtis. Skaičiuojama šių dviejų briaunų simetrijos linija, kuri yra rastrinio elemento simetrijos ašis.

3. Skaičiuojama pagal 1p. surastos rastrinio takelio simetrijos ašies ir pagal 2p. surastos rastrinio elemento simetrijos ašies susikirtimo koordinatė. Ši reikšmė laikoma koordinatinių sistemos pradžia.

4. Analogiškai, kaip išdėstyta 1-3 punktuose, randamos rastrinio takelio simetrijos ašies ir pagal kitų rastrinių elementų, kurių paklaida turi būti nustatyta, simetrijos ašies susikirtimo koordinatės.

5. Bet kurio rastrinio elemento padėties paklaida lygi pagal 4 p. nustatytos koordinatės ir nominaliosios to rastrinio elemento koordinatės skirtumui

6. Visi matavimai ir skaičiavimai atliekami po 6 kartus.

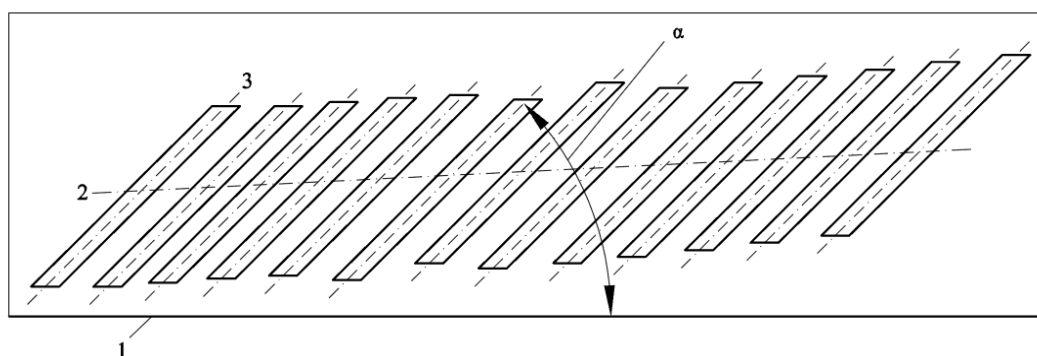
7. Rastrinių elementų padėties sistemingoji paklaida įvertinama šešių realizacijų vidurkiu. Taip gauti kalibravimo grafikai pateikiami grafiškai stačiakampėje koordinatinių sistemoje, kurios argumentas yra kalibruojamosios skalės ilgis.

8. Kalibravimo neapibrėžtis nustatoma šešių koordinatinių reikšmių vidutiniu kvadratinu nuokrypiu vidurkių atžvilgiu su tikimybe P96 %.

b) Kampu išdėstytų rastrinių elementų pasvirimo kampo paklaida

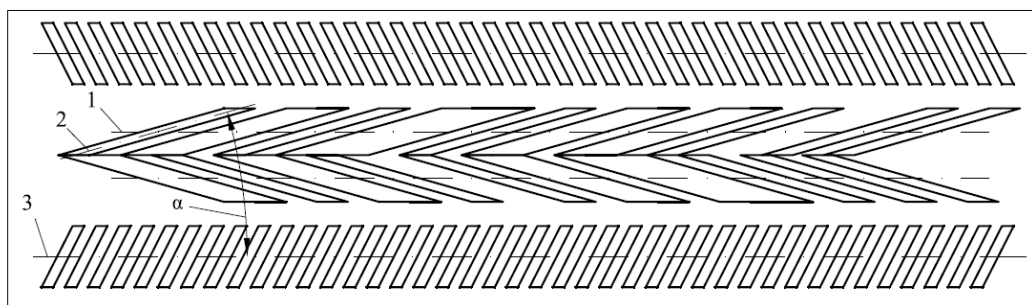
Paklaidos norminimas (apibrėžimas)

Rastrinių elementų pasvirimo kampas nusakomas kampu kurį sudaro brūkšnio simetrijos linijos susikirtimas su bazine skalės briauna, jei tokia neužduodama, - tai to rastrinio takelio simetrijos linijos atžvilgiu (žr. 2.4 - 2.5 pav.).



2.4 pav. Pasvirimo kampo nustatymas pagal bazinę briauną:

1 – bazinė briauna; 2 – rastrinio takelio simetrijos ašis; 3 – rastrinio elemento (brūkšnio) simetrijos ašis; α – pasvirimo kampas

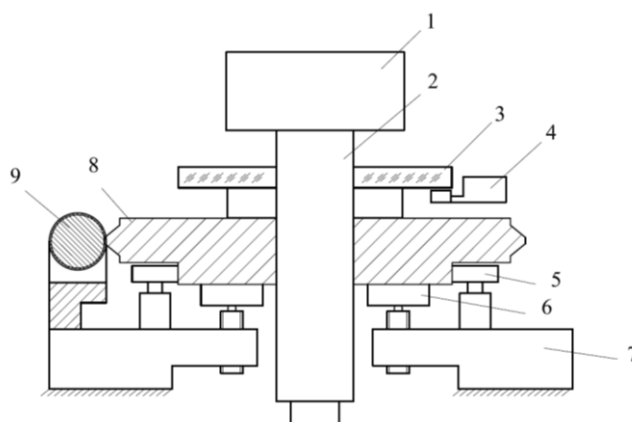


2.5 pav. Rastrinio elemento pasvirimo kampo nustatymo schema:
1 – rastrinio takelio simetrijos ašis; 2 – rastrinio elemento (brūkšnio) simetrijos linija; 3 – bazinio rastrinio takelio simetrijos linija

Kalibravimas ir jo realizacijos priemonės

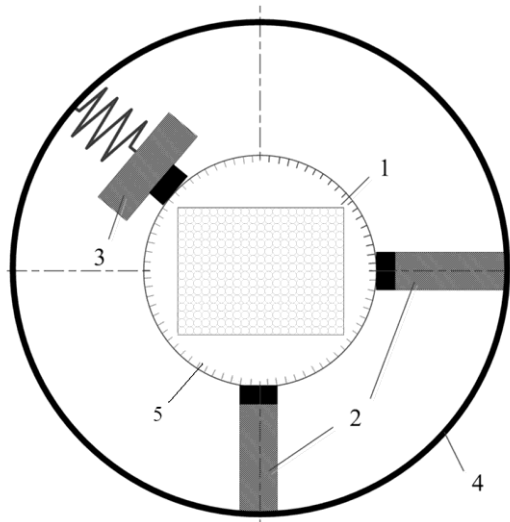
Norint kalibruoti pasvirusių rastrinių elementų pasvirimo kampą, paprastoms 1D linijinėms skalėms kalibruoti skirtą įrengimą reikia pritaikyti šiam kalibravimo procesui gali būti taikomi tokie pasukto vaizdo apdorojimo algoritmai:

Kai naudojamas algoritmas, kuriame yra skaičiuojamas brūkšnio profilis, tai, kad padidinti matavimo tikslumą, yra specialiai išstatomas brūkšninis matas ar rastrinė liniuotė. Tam kalibravimo įrenginys turi reguliuojamas atramas. Įrenginio kalibravimo metu mikroskopas su kamera per specialų įtvarą yra pasukama taip, kad brūkšnio kontūro vaizdas būtų lygiagretus kameros jutiklio kraštinei 2.6 pav. Tai daroma, naudojant Canny kontūro dektektorių, ir aproksimuojant jį tiesę, kuri eina per kontūro svorio centrą. Šios tiesės posūkio kampas rodo kiek reikia pasukti kamerą.



2.6 pav. Mikroskopo pasukimo mechanizmas:
1 – kamera; 2 – mikroskopas; 3 – etaloninis limbas; 4 – nuskaitymo galvutė; 5 – atraminis guolis; 6 – aerostatinis guolis; 7 – korpusas; 8 – krumpliaratis; 9 – sukamojo judesio vykdyklis

Vaizdas gali būti pasukamas sukant ne visą mikroskopą su kamera o tik nuskaitymo matricą. Kadangi matrica yra nesunki, jos pasukimui gali būti panaudojamas pozicionavimo mechanizmas išstatantis matricą pjezo elementais 2.7 pav.



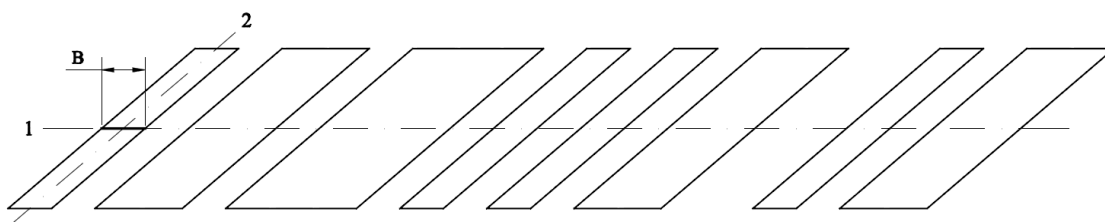
2.7 pav. Precizinis matricos pozicionavimo mechanizmas:

1 – matrica; 2 – linijinio poslinkio vykdikliai; 3 – sukamojo judesio vykdiklis; 4 – korpusas;
5 – etaloninė pasisukimo matavimo sistema

c) Kampu išdėstytų rastrinių elementų pločio paklaida

Paklaidos norminimas (apibrėžimas)

Pasvirusių rastrinių elementų pločio paklaida nusakoma matuojant atstumą nuo vieno brūkšnio krašto iki antrojo, išilgai rastrinio takelio simetrijos ašies. Tokio matavimo eskizas pateiktas 2.8 pav.



2.8 pav. Rastrinio elemento pločio paklaidos nustatymas:

1 – rastrinio takelio simetrijos linija; 2 – rastrinio elemento simetrijos linija; B – brūkšnio plotis

Kalibravimas ir jo realizacijos priemonės

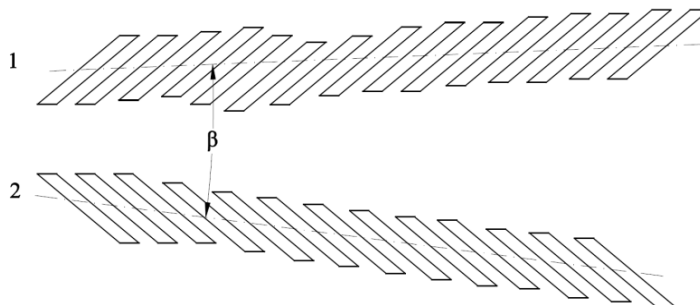
1. Nustatoma rastrinio takelio simetrijos linija, pagal metodiką, aprašyta poskyryje a) 1p.
2. Matuojamas brūkšnio vienos briaunos padėtis. Matuojama to paties brūkšnio antrosios briaunos padėtis. Apskaičiuojamas atstumas tarp brūkšnio briaunų išilgai simetrijos ašies.
3. Iš išmatuotos brūkšnio pločio reikšmės atimama nominalaus brūkšnio pločio reikšmė - gautas rezultatas ir bus rastrinio brūkšnio pločio paklaida.

Pasvirusio rastrinio elemento pločio paklaida gali būti matuojama 1D skalių kalibravimui skirtu linijiniu komparatoriumi.

d) Rastrinių takelių tarpusavio lygiagretumo paklaida

Paklaidos norminimas (apibrėžimas)

Rastrinių takelių tarpusavio lygiagretumo nuokrypis nustatomas dviejų rastrinių takelių simetrijos linijų, nustatytų pagal metodiką, aprašyta poskyryje A 1p., lygiagretumo nuokrypiu užduotame ilgyje



2.9 pav. Lygiagretumo nuokrypio eskizas:

- 1 – pirmojo rastrinio takelio simetrijos linija; 2 – antrojo rastrinio takelio simetrijos linija;
 β – rastrinių takelių lygiagretumo nuokrypis

Kalibravimas ir jo realizacijos priemonės

1. Nustatoma pirmojo rastrinio takelio simetrijos linija, pagal metodiką, aprašyta a) 1p.
2. Nustatoma antrojo rastrinio takelio simetrijos linija 1p.
3. Matuojamas atstumas tarp rastrinių takelių simetrijos linijų takelių pradžioje.
4. Matuojamas atstumas tarp rastrinių takelių simetrijos linijų takelių pabaigoje.

5. Žinant atstumus tarp rastrinių takelių simetrijos linijų takelio pradžioje ir pabaigoje, bei tikslų atstumą tarp matavimo vietų, apskaičiuojama lygiagretumo paklaida.

6. Matavimai atliekami 6 kartus.

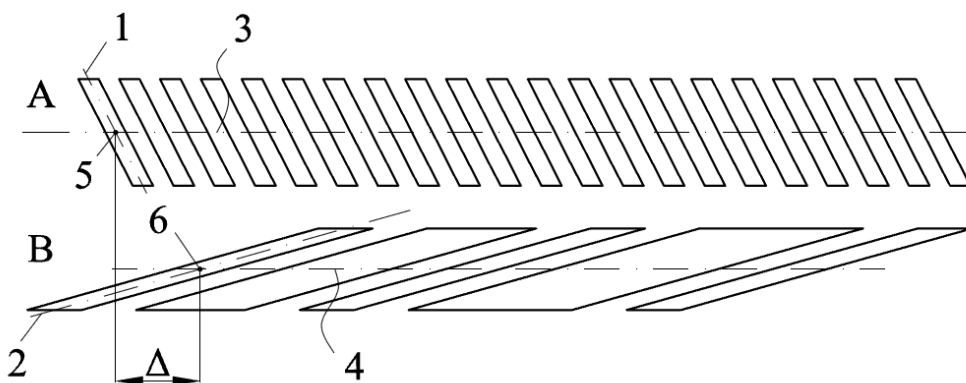
7. Kalibravimo neapibrėžtis nustatoma šešių koordinačių reikšmių skaičiavimo reikšmių vidutiniu kvadratinu nuokrypiu vidurkių atžvilgiu su tikimybe P96 %.

Rastrinių takelių tarpusavio lygiagretumo paklaidai įvertinti gali būti naudojamas linijinis komparatorius skirtas 1D skalių kalibravimui, tačiau jam turi būti pritaikyta mikroskopo tiesaus perslinkimo sistema, turinti atskirą precizinio poslinkio matavimo sistemą.

E. Kampu išdėstytų rastrinių takelių susietumo paklaida

Paklaidos norminimas (apibrėžimas)

Rastrinių takelių susiejimo paklaida nustatoma susiejamo takelio rastrinio elemento (brūkšnio) simetrijos ašies susikirtimo taško su šio rastrinio takelio simetrijos ašimi nuokrypiu nuo užduotos koordinatės pagrindinio arba pasirinkto takelio pirmojo arba užduotojo rastrinio elemento simetrijos ašies susikirtimo su to rastrinio takelio simetrijos ašimi taško, ir išilgai šios ašies.



2.10 pav. Rastrinių takelių susiejimo schema:

A – bazinis rastrinis takelis; B – susiejamasis rastrinis takelis; 1 – bazinio takelio pirmojo elemento arba užduotojo elemento simetrijos ašis; 2 – susiejamo rastrinio elemento simetrijos ašis; 3,4 – bazinio ir siejamo takelio simetrijos ašys; 5 – bazinio rastro padėtis – koordinatė; 6 – siejamo rastro padėtį nusakantis taškas

Kalibravimas ir jo realizacijos priemonės

Kalibruojant kampu išdėstytų rastrinių takelių susietumo paklaidas, kalibravimas atliekamas kas 50mm.

1. Nustatoma kalibruojamo rastrinio takelio simetrijos linija, kaip aprašyta potemėje A 1p.
2. Nustatoma informacinio kodinio rastrinio takelio simetrijos linija kaip a) 1p.
3. Nustatoma pirmojo arba pasirinktojo rastrinio elemento simetrijos linija a) 2p. Šio rastrinio elemento simetrijos linijos susikirtimo taškas su rastrinio takelio simetrijos linija ir bus koordinatinių sistemos pradžios taškas.
4. Nustatoma kodinio takelio pirmojo arba pasirinktojo elemento (brūkšnio) simetrijos linija. Šios simetrijos linijos susikirtimo taškas su kodinio takelio simetrijos linija bus taškas kurio padėties paklaidą norima nustatyti.
5. Nustatomas atstumas nuo koordinatinių pradžios taško iki kalibruojamo taško išilgai skalės, ir atimamas iš atstumo nusakančio takelių tarpusavio susietumą. Taip nusakoma susietumo paklaida tarp takelių. Matavimus atliekant kas 50 mm. Atstumas lyginamas tarp rastrinio elemento ir kodinio takelio elemento patenkančių į matavimo zoną.
6. Visi matavimai ir skaičiavimai atliekami po 6 kartus.
7. Paklaida nusakoma šešių realizacijų vidurkiu. Taip gauti kalibravimo rezultatai pateikiami grafiškai.
8. Kalibravimo neapibrėžtis nustatoma šešių koordinatinių reikšmių skaičiavimo reikšmių vidutiniu kvadratinu nuokrypiu vidurkių atžvilgiu su tikimybe P96 %.

Skyriaus apibendrinimas

Iš analizavus 2D skalių tikslumo parametrus matome, kad pagrindiniai parametrai yra nusakomi išilgai arba statmenai rastrinių takelių simetrijos ašies. Atsižvelgiant į tai tyrimo metu formuojami paprasti rastriniai takeliai, kurių štrichai išdėstyti statmenai takelio simetrijos ašiai. Matuojant rastrų padėties paklaidą galima atitinkamai spręsti ir apie kodinės struktūros pasvirusių brūkšnių padėties paklaidas. Tiriamajame darbe brūkšnio pasvirimo paklaida ne nagrinėjama.

3. LINIJINIŲ SKALIŲ ORIGINALŲ FORMAVIMO FOTOLITOGRAFINIU METODU TIKSLUMO ANALIZĖ

a) *Suminės paklaidos skaičiavimo metodika*

Priimta tokia suminės paklaidos skaičiavimo tvarka ir metodai:

1. Išnagrinėjamas 2D originalo formavimo procesas, įvertinama formuojamas objektas, procesui realizuoti naudojamos priemonės, sąlygos.
2. Nustatomi tikslumą įtakojantys veiksniai ir išvardijami visi suminės matavimo paklaidos sandai (komponentės).
3. Skaičiavimais, iš katalogų, iš patirties nustatomos suminės paklaidos sandų ribinės skaitinės reikšmės arba jų funkcinė priklausomybė nuo tam tikrų argumentų.
4. Nustatomas paklaidų pobūdį – sistemingosios ar atsitiktinės paklaidos. Atmetamos nereikšmingosios paklaidos, pagrindžiamas nereikšmingų paklaidų atmetimas.
5. Nustatomi paklaidų įtakos koeficientai. Jei apskaičiuotų pavienių paklaidų įtaka suminei paklaidai tiesioginė, tai įtakos koeficientas lygus 1.
6. Parenkamas skaičiavimo metodas – tikimybinis, maksimumo-minimumo, 100% užtikrinantis tikslumą ir surandama suminė proceso paklaida.

Kaip ekonomiškai racionaliausias ir užtikrinantis pakankamą skaičiavimo patikimumą yra taikomas tikimybinis suminės paklaidos skaičiavimo metodas. Suminė paklaida Δ_{Σ} skaičiuojama pagal formulę [5]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k \Delta_j \xi_j \pm t \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \xi_i^2}, \quad (3.1)$$

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

Ši metodika yra universali nagrinėjamų tikslumo analizės klausimų sprendimui ir yra taikoma visų trijų skalių formavimo metodų tikslumui įvertinti.

b) *Suminės paklaidos skaičiavimas*

A. Tikslaus pozicionavimo metodas

1. Išsami 2D originalų formavimo proceso analizė atlikta ir pateikta 2.1 poskyryje.

Ten pat išanalizuotos procesui realizuoti naudojamos priemonės, sąlygos. Formuojami objektai įvertinti projekto pirmosios veiklos ataskaitoje [6].

2. Pagrindiniais tikslumą įtakančiais veiksniais ir suminės paklaidos sandais yra

šie.

- a. Paklaidų grupė, susijusi su skalės ruošinio ir jo pozicionavimu paklaidomis:
 - darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai,
 - skalės bazavimo ant darbinio stalo paklaida,
 - pozicionavimo stalo tiesaus judesio linijinės paklaidos Δy ir Δz statmenomis pagrindiniam judesiui kryptimis,
 - pozicionavimo stalo poslinkio matavimo paklaida,
 - ABBE principo neišlaikymo paklaidos;
- b. Temperatūrinės paklaidos:
 - skalės ruošinio temperatūrinių deformacijų paklaida,
 - skalių formavimo įrenginio temperatūros poveikio paklaidos;
- c. Paklaidų grupė susijusi su originalo segmento manipuliavimu:
 - originalo segmento rastrinio piešinio padėties jo bazinių briaunų atžvilgiu paklaida;
 - originalo segmento užgriebimo paklaida;
 - manipulatoriaus pozicionavimo paklaida,
 - originalo segmento pozicionavimo (padėjimo) ant ruošinio paklaida

3. Suminės paklaidos sandų ribinių skaitinės reikšmės skaičiavimas, jų pobūdis ir reikšmingumas.

a. Darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai. Ilgų skalių, padėtų ant originalų formavimo įrenginio ruošinių pozicionavimo stalo, darbinio paviršiaus tiesumo nuokrypio matavimų rezultatų statistinė analizė rodo, kad šis dydis neviršija 30 – 50 μm . Ši paklaida yra kompleksinis dydis, įvertina paties ruošinio plokštumo bei lygiagretumo nuokrypį, ruošinio deformacijas, atsirandančias dėl įrenginio darbinio stalo plokštumo nuokrypių, įrenginio darbinio stalo plokštumos lygiagretumo nuokrypį jo eigos

atžvilgiu ir įrenginio darbinio stalo tiesaus judesio linijinės paklaidos vertikalioje kryptimi Δ_z . Dėl monotoninio šių nuokrypių pobūdžio, originalo, kurio ilgis priimamas 200 mm, skalės originalo kopijavimo paklaida, ją skaičiuojant pagal kosinuso teoremą, lygus $S_f = 2 \cdot 10^{-3} \mu m$. Tad šis suminės paklaidos sandas gali būti atmetamas be poveikio suminės paklaidos skaičiavimo tikslumui.

b. Skalės bazavimo ant darbinio stalo paklaida. Skalė ant įrenginio darbinio paviršiaus specialiu mikrosraigtniu mechanizmu išstatoma taip, kad suminis skalės šlifotos ir poliruos originalo ruošinio briaunos tiesumo ir išstatymo tiesumo nuokrypis neviršija 20 - 40 μm ir taip pat turi monotoninį charakterį. Tiesumo suminio nuokrypio bangos vidutinis ilgis yra ne mažesnis už 300 mm. Skaičiuojant pagal kosinuso teoremą, suminės paklaidos sandas, atsirandantis dėl šių tiesumo nuokrypių, yra $S_b = 1.5 \cdot 10^{-3} \mu m$.

c. Pozicionavimo stalo tiesaus judesio linijinės paklaidos Δ_y ir Δ_z statmenomis pagrindiniam judesiui kryptimis.

Tiesaus judesio linijinės paklaidos vertikalioje kryptimi Δ_z įtaka formuojamo rastro tikslumui įvertinama *a* punkte skaičiuojant darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypių įtaką.

Tiesaus judesio linijinės paklaidos Δ_y horizontalioje kryptimi dydis yra 4,9 μm . Šios paklaidos tyrimai parodė, kad jos sistemingoji dedamoji pakankamai tiksliai yra aproksimuojama parametrine funkcija ir gali būti kompensuota originalų segmento manipulatoriaus pozicionavimo duomenų koregavimas. Atsitiktinės paklaidos dydis, susidedantis iš judesio atsitiktinės paklaidos ir sistemosios paklaidos aproksimacijos paklaidos, nusakomas vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčiu S_j , yra lygus $S_j = 0.17 \mu m$ [7, 8].

d. Pozicionavimo stalo poslinkio matavimo paklaida. Šio mazgo poslinkis matuojamas HP vieno dažnio lazeriniu interferometru, turinčiu temperatūros nuokrypio nuo norminės, slėgio kitimo ir drėgmės kitimo monitoringo ir automatinę dėl šių faktorių poveikio atsirandančių paklaidų kompensaciją. Po šių paklaidų kompensacijos liekamoji paklaida turi tiesinę nuo poslinkio priklausomybę, tad gali būti paprastu būdu pagal tiesinį modelį sukompensuota. Po šių kompensacijų liekamoji paklaida turi atsitiktinį pobūdį. Jos dydis įvertinamas vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčiu S_m . Eksperimentiniu būdu komparuojant su dvi dažniu ZYGO lazeriniu interferometru nustatyta tokia šio parametro reikšmė $S_m = 0,12 \mu m$.

e. ABBE principo neišlaikymo paklaidos. Šios paklaidos buvo įvertintos nustatant pozicionavimo stalo poslinkio matavimo paklaidą ir įeina į dydį S_m .

f. Skalės ruošinio temperatūrinių deformacijų paklaida. Skalės ruošinys originalo formavimo metu yra bazuojamas ant įrenginio darbinio stalo visa apatine plokštuma. Todėl gana greitai jo ir stalo darbinės plokštumos temperatūros išsilygina ir dėl didelės stalo masės bei temperatūrinės inercijos mažai reaguoja į staigius aplinkos temperatūros pasikeitimus. Originalų formavimo įrenginys yra montuojamas termokonstantinėje laboratorijoje, turinčioje tokius temperatūros stabilumo parametrus [9,10,5]:

- temperatūra ir jos stabilumas laboratorijos kontroliniame taške $20 \pm 0,2$ l. $^{\circ}\text{C}$;
- temperatūros gradientas erdvėje – vertikalus $0,05^{\circ}\text{C/m}$, horizontalus $0,2^{\circ}\text{C/m}$;
- temperatūros gradientas, priklausantis nuo laiko $0,05^{\circ}\text{C/h}$;

Buvo atlikti specialūs skalės, uždėtos ant darbinio įrenginio stalo minėtoje laboratorijoje, temperatūros kitimo išilgai jos tyrimai [11]. Jų rezultatai rodo, kad dėl išorinių ir vidinių temperatūrinių trikdžių poveikio skalės temperatūra jos ilgyje kinta iki $0,3^{\circ}\text{C}$.

Skalių formavimo metu numatytas temperatūros matavimas elektroniniais temperatūros jutikliais, išdėstytais kas 300 mm.

Esant, tokioms sąlygoms galimas, panaudojant gana parastus modelius temperatūrinių deformacijų, skaičiavimas ir matematinis kompensavimas realiame laiko mastelyje, taigi pilnas sistemingųjų paklaidų eliminavimas. Įvertinant temperatūros matavimo ir jos poveikio įvertinimo paklaidas [11], liekamųjų temperatūrinių paklaidų, turinčių atsitiktinį pobūdį, vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis lygus $S_t = 0,09 \mu\text{m}$.

g. Skalių formavimo įrenginio temperatūros poveikio paklaidos. Šios paklaidos buvo įvertintos nustatant pozicionavimo stalo tiesaus judesio linijines ir jo poslinkio matavimo paklaidas. Jos įeina į dydžius S_j ir S_m .

h. Originalo segmento rastrinio piešinio padėties jo bazinių briaunų atžvilgiu paklaida. Pagal šio projekto antros veiklos tyrimo rezultatus [12] ši paklaida turi atsitiktinį pobūdį ir jos vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_o = 1.2 \mu\text{m}$.

i. Originalo segmento užgriebimo paklaida. Ši paklaida turi atsitiktinį charakterį ir pagal precizinių sugriebimo mechanizmų prospektinius duomenis maksimali sugriebimo paklaida siekia $6 \mu\text{m}$. Tad techniniams tikslams pakankamu priimtam 95% pasiklovimo intervalui šios paklaidos vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis lygus $S_u = 1.0 \mu\text{m}$.

j. Manipulatoriaus pozicionavimo paklaida.

Atlikus paklaidų skaičiavimus ir jų sistemingųjų dedamųjų korekciją pagal matematinius skaičiavimus ir metodiką, išdėstytus 2.2.1-2.2.3 poskyriuose, ir įvertinant ten nurodytas ribines tiesių judesių paklaidas, bei ribinį mažiausią realiai pasiekiamą teisių eigų tarpusavio statmenumo nuokrypį 1 kampinę sekundę, pozicionavimo paklaidos atskirų ašių kryptimis vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_p = 1,1 \mu\text{m}$. Šiuo atveju nenumatyta liekamųjų sistemingųjų paklaidų korekcija, nes ji neduotų apčiuopiamo tikslumo padidinimo efekto.

k. Originalo segmento pozicionavimo (padėjimo) ant ruošinio paklaida.

Ekspertiniu būdu vertinama, kad ši paklaida turi atsitiktinį pobūdį, jos vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis lygus $S_d = 0,3 \mu\text{m}$.

4. Paklaidų įtakos koeficientai

Kadangi visi suminės paklaidos sandai skaičiuoti galutinei grandžiai, t.y. pozicionavimui nustatyti, tai visi įtakos koeficientai lygūs $\zeta_i = 1$.

5. Suminės proceso paklaidos skaičiavimas

Suminė proceso paklaida skaičiuojama pagal (3.1) formulę įvertinant 3p. nustatytas suminės paklaidos sandų reikšmes ir jų pobūdį. Skaičiavimo formulė supaprastėja, nes visos sistemingosios paklaidos yra eliminuojamos korekcijos būdu. Skaičiavimai atliekami 95 % pasiklivimo intervalui. Įvertinus 3 punkte pateiktus suminės paklaidos sandų vidutinius kvadratinus nuokrypius S_i , jų skaitines reikšmes, 4,5 punktų prielaidas, suminę rastrų formavimo tikslaus ruošinio ir originalo fragmento pozicionavimo metodu paklaida $\Delta_{\Sigma\text{tp}}$ yra suskaičiuojama tokiu būdu:

$$\begin{aligned}\Delta_{\Sigma\text{tp}} &= \pm 2,1 \left\{ S_f^2 + S_b^2 + S_j^2 + S_m^2 + S_t^2 + S_o^2 + S_n^2 + S_p^2 + S_d^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ &= \pm 2,1 \left\{ (2 \cdot 10^{-3})^2 + (1,5 \cdot 10^{-3})^2 + 0,17^2 + 0,12^2 + 0,09^2 + 1,2^2 + 1,0^2 + 1,1^2 + 0,3^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \pm 4,09 \mu\text{m}\end{aligned}$$

B. Žymių sutapdinimo metodas

1. Situacija analogiška A metodui, t.y. 2D originalų formavimo proceso analizė atlikta ir pateikta 2.1 poskyryje. Ten pat išanalizuotos procesui realizuoti naudojamos priemonės, sąlygos. Formuojami objektai įvertinti projekto pirmosios veiklos ataskaitoje [13].

2. Pagrindiniais tikslumą įtakojančiais veiksniais ir suminės paklaidos sandais yra šie.

a. Paklaidų grupė, susijusi su skalės ruošinio ir jo pozicionavimo paklaidomis:

- žymių padėties ant ruošinio paklaidos,
- darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai,
- skalės bazavimo ant darbinio stalo paklaida.

b. Temperatūrinės paklaidos:

- skalės ruošinio temperatūrinių deformacijų paklaida,
- skalių formavimo įrenginio temperatūros poveikio paklaidos;

c. Paklaidų grupė susijusi su originalo segmentu ir jo manipuliavimu:

- pozicionavimo pagal žymes paklaida,
- originalo rastrinio piešinio padėties jo žymių atžvilgiu paklaida,
- paklaida, susijusi su originalo žymių formavimo paklaidomis.

2. Suminės paklaidos sandų ribinės skaitinės reikšmės, jų pobūdis ir reikšmingumas.

a. Žymių padėties ant ruošinio paklaidos ant ruošinių matavimo rezultatų statistine analize nustatyta, kad jų padėties paklaidos sklaidos laukas yra skirtingas išilgai skalės ašies ir skalės ašiai statmena kryptimi.

Žymių padėties paklaidos sklaidos laukas išilgai skalės ašies, žymint lazerine originalų formavimo mašina 3,4 m. ilgyje yra 3,2 μm . Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3\sigma$, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_{zi} = 0,533 \mu\text{m}$.

Žymių padėties paklaidos sklaidos laukas statmenai skalės ašiai turimomis priemonėmis nėra išmatuojamas, nes nėra tokio ilgio pakankamo tikslumo tiesumo mato. Tačiau ši paklaida gali būti pakankamai tiksliai įvertinta šalutiniu būdu – lazerinio originalų formavimo įrenginio karietėlės, transportuojančios lazerinę rastro elementų formavimo sistemą, tiesaus judesio linijiniais nuokrypiais horizontalioje plokštumoje. Pastarieji buvo patikimai kalibruoti HP lazeriniu interferometru [9, 10]. Šios paklaidos sklaidos laukas 3,4 m. ilgyje yra 4,9 μm . Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3\sigma$, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_{zs} = 0,817 \mu\text{m}$.

b. Darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai yra

identiški A metodo atvejui, t.y. $S_f = 2 \cdot 10^{-3} \mu m$. Tad šis suminės paklaidos sandas gali būti atmetamas be poveikio suminės paklaidos skaičiavimo tikslumui.

c. Skalės bazavimo ant darbinio stalo paklaida identiška A metodo atvejui, t.y.

$$S_c = 0,14 \mu m.$$

d. Temperatūrinės paklaidos taip pat identiškos A metodo atvejui, t.y.

$$S_t = 0,09 \mu m.$$

e. Pozicionavimo pagal žymes paklaida. 1 skyriuje atlikti tyrimai parodė, kad

šios paklaidos sklaidos laikas yra $1,2 \mu m$. Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3 \sigma$, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_p = 0,2 \mu m$.

f. Originalo rastrinio piešinio padėties jo žymių atžvilgiu paklaida. Pirmos veiklos tyrimai [1] parodė, kad šios paklaidos sklaidos laukas yra $1,3 \mu m$. Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3 \sigma$, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_z = 0,217 \mu m$.

g. Paklaida, susijusi su originalo žymių formavimo paklaidomis 1 skyriuje atlikti tyrimai parodė, kad šios paklaidos sklaidos laikas yra $0,9 \mu m$. Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3 \sigma$, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_{zf} = 0,15 \mu m$.

3. Paklaidų įtakos koeficientai

Kadangi visi suminės paklaidos sandai skaičiuoti galutinei grandžiai, t.y. pozicionavimui nustatyti, tai visi įtakos koeficientai lygūs $\zeta_i = 1$.

4. Suminės proceso paklaidos skaičiavimas

Kadangi visos suminės proceso paklaidos komponentės yra atsitiktinės, pastaroji skaičiuojama pagal tą pačią formulę, kaip A metodo atveju. Skaičiavimai taip pat atliekami 95 % pasiklovimo intervalui. Įvertinus 3 punkte pateiktus suminės paklaidos sandų vidutinius kvadratinus nuokrypius S_i , jų skaitines reikšmes, priimtas prielaidas, suminė rastrų formavimo žymių sutapdinimo metodu paklaida $\Delta \Sigma_{zs}$ yra suskaičiuojama:

Išilgai skalės ašies:

$$\Delta_{\Sigma zi} = \pm 2.1 \sqrt{S_{zi}^2 + S_f^2 + S_b^2 + S_t^2 + S_p^2 + S_z^2 + S_{zf}^2} = \pm 1.404 \mu m,$$

Statmenai skalės ašies:

$$\Delta_{\Sigma z_s} = \pm 2.1 \left\{ S_{z_s}^2 + S_f^2 + S_b^2 + S_t^2 + S_p^2 + S_z^2 + S_{zf}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \pm 1.917 \mu m,$$

C. Ištinis metodas

Suminė proceso paklaida bus skaičiuojama fotolitografiniam ir lazeriniams (su taškiniu ir į liniją išskleistu spinduliais) originalų formavimo metodams.

1. 2D originalų formavimo proceso abiem metodais analizė atlikta ir pateikta 2.1 poskyryje. Ten pat išanalizuotos procesui realizuoti naudojamos priemonės, sąlygos. Formuojami objektai įvertinti projekto pirmosios veiklos ataskaitoje [1].

2. Pagrindiniais tikslumą įtakančiais veiksniais ir suminės paklaidos sandais yra šie.

a. Paklaidų grupė, susijusi su skalės ruošinio ir jo pozicionavimu paklaidomis. Jos poveikis abiem metodams identiškas. Pagrindiniais šios grupės originalų formavimo paklaidų šaltiniais yra :

- darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai,
- skalės bazavimo ant darbinio stalo paklaida,
- pozicionavimo stalo tiesaus judesio linijinės paklaidos Δy ir Δz stamenomis pagrindiniam judesiui kryptimis,
- pozicionavimo stalo poslinkio matavimo paklaida,
- ABBE principo neišlaikymo paklaidos;

b. Temperatūrinės paklaidos. Jų poveikis abiem metodams identiškas. Pagrindiniais šios grupės originalų formavimo paklaidų šaltiniais yra :

- skalės ruošinio temperatūrinių deformacijų paklaida,
- skalių formavimo įrenginio temperatūros poveikio paklaidos.

c. Paklaidų grupė, susijusi su originalo rastrinio piešinio formavimu. Ši paklaidų grupė yra skirtinga, skirtingiems rastrų formavimo metodams.

Fotolitografinis originalų formavimo metodas.

Pagrindiniais paklaidų sandais yra šie:

- pirminio brūkšnio pločio paklaida,
- pirminio brūkšnio kampinės padėties paklaida,
- pirminio brūkšnio eksponavimo optinės sistemos paklaida,

- mechaninio ir terminio dreifo išilgai formuojamos skalės, vystančio tarp atskirų rastrinių takelių eksponavimo pradžių, paklaida.

3. Suminės paklaidos sandų ribinės skaitinės reikšmės, jų pobūdis ir reikšmingumas.

a. Darbinio skalės paviršiaus formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai yra identiški A metodo atvejui, t.y. $S_f = 2 \cdot 10^{-3} \mu m$. Tad šis suminės paklaidos sandas gali būti atmetamas be poveikio suminės paklaidos skaičiavimo tikslumui. tačiau ši paklaida įtakos optinės ar lazerinės rastrinių elementų formavimo sistemos defokusavimo dydį, o tuo pačiu ir brūkšnių kokybę.

b. Skalės bazavimo ant darbinio stalo paklaida identiška A metodo atvejui, t.y. $S_b = 0,14 \mu m$.

c. Pozicionavimo stalo tiesaus judesio linijinės paklaidos Δy ir Δz stamenomis pagrindiniam judesiui kryptimis.

Tiesaus judesio linijinės paklaidos vertikalia kryptimi Δz įtaka formuojamo rastro tikslumui pasireiškia kaip optinės sistemos (fotolitografinio metodo atveju) defokusavimo paklaida. Ši paklaida neturi esminės įtakos originalo sukaupai paklaidai, bet įtakoja rastrinių elementų kokybę, jų formos paklaidų dydį ir pobūdį.

Tiesaus judesio linijinės paklaidos Δy horizontalia kryptimi yra skirtingo dydžio skirtingiems metodams. Tačiau, nekompensuojant jų poveikio, savo esme jis bus vienodas, bet skirtingo dydžio.

Fotolitografiniam originalų formavimo metodui realizuoti naudojamo įrenginio šio paklaidos sklaidos laukas yra $3,7 \mu m$. Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3 \sigma$, ir įvertinat, kad realizuojant šį metodą negalima sistemingųjų paklaidų kompensacija, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_{jf} = 0,62 \mu m$.

Atsistiktinės paklaidos dydis, susidedantis iš judesio atsistiktinės paklaidos ir sistemingosios paklaidos aproksimacijos paklaidos, nusakomas vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčiu S_j , yra lygus $S_{jl} = 0.817 \mu m$.

d. Pozicionavimo stalo poslinkio matavimo paklaida.

Šio mazgo poslinkis fotolitografiniam originalų formavimo metodui realizuoti naudojamame įrenginyje matuojamas Renishaw vieno dažnio lazeriniu interferometru, turinčiu temperatūros nuokrypio nuo norminės, slėgio kitimo ir drėgmės kitimo monitoringo

ir automatinę dėl šių faktorių poveikio atsirandančių paklaidų kompensaciją. Po šių paklaidų kompensacijos liekamoji paklaida turi tiesinę nuo poslinkio priklausomybę, tad gali būti paprastu būdu pagal tiesinį modelį sukompensuota. Liekamoji po šių kompensacijų paklaida turi atsitiktinį pobūdį. Jos dydis įvertinamas vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčiu S_m .

e. ABBE principo neišlaikymo paklaidos. Šios paklaidos buvo įvertintos nustatant pozicionavimo stalo poslinkio matavimo paklaidą ir įeina į dydį S_m .

f. Temperatūrinės paklaidos taip pat identiško A metodo atveju, t.y.
 $S_t = 0,09 \mu m$.

g. Fotolitografinio originalų formavimo metodo atveju paklaidų grupė, susijusi su originalo rastrinio piešinio formavimu

- pirminio brūkšnio pločio paklaida,
- pirminio brūkšnio kampinės padėties paklaida,
- pirminio brūkšnio eksponavimo optinės sistemos paklaida įtakoja rastrinio piešinio kokybę, bet neįtakoja sukauptosios skalės paklaidos dydžio.

h. Fotolitografinio originalų formavimo metodo atveju mechaninio ir terminio dreifo išilgai formuojamos skalės, vystančio tarp atskirų rastrinių takelių eksponavimo pradžių, paklaidos sklaidos dydis įvertintas eksperimentiškai ir yra lygus $2,7 \mu m$. Maksimalią sklaidą vertinat dydžiu $\pm 3 \sigma$, gaunama, kad šios paklaidos sklaidos lauko vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis yra $S_{df} = 0,45 \mu m$.

4. Paklaidų įtakos koeficientai.

Kadangi visi suminės paklaidos sandai skaičiuoti galutinei grandžiai, t.y. pozicionavimui nustatyti, tai visi įtakos koeficientai lygūs $\zeta_i = 1$.

5. Suminės proceso paklaidos skaičiavimas.

Kadangi visos suminės proceso paklaidos komponentės yra atsitiktinės, pastaroji skaičiuojama pagal tą pačią formulę, kaip A metodo atveju. Skaičiavimai taip pat atliekami 95% pasikliovimo intervalui. Įvertinus 3 punkte pateiktus suminės paklaidos sandų vidutinius kvadratinus nuokrypius S_i , jų skaitines reikšmes, priimtas prielaidas, suminė rastrų formavimo ištisiniu metodu paklaida Δ_{Σ} yra suskaičiuojama kaip ir A metodo atveju atskirai fotolitografiniam ir lazeriniams originalų formavimo metodams.

Fotolitografinis originalų formavimo metodas.

Suminė paklaida išilgai skalės ašies

$$\Delta_{\Sigma fc} = \pm 2.1 \{S_f^2 + S_{mr}^2 + S_t^2 + S_{dt}^2\} = \pm 1.028 \mu m.$$

Suminė paklaida statmenai skalės ašiai

$$\Delta_{\Sigma fs} = \pm 2.1 \{S_t^2 + S_b^2 + S_{jf}^2\} = \pm 1.354 \mu m.$$

Apibendrinant trijų ilgų rastrinių skalių originalų formavimo metodus galima padaryti šiuos apibendrinimus.

Didžiausias tikslumas yra pasiekiamas rastrinių skalių originalus formuojant ištisiniu fotolitografiniu metodu.

Suskaičiuotam tikslumui gauti būtina realizuoti matematinę nurodytų paklaidų kompensaciją arba korekciją.

Ištisiniu rastrų formavimo metodu suformuotiems skalių originalams bus būdingos monotoniškai kintančios jų paklaidos, priklausomai nuo skalės ilgio.

Rastrus formuojant sudūrimo metodais iš segmentų, suformuotiems skalių originalams bus būdingos šuoliškai kintančios jų paklaidos, pasikartojančios rastro segmento ilgio periodu.

Rastrus formuojant sudūrimo metodais iš segmentų, suformuotiems skalių originalams paklaidos statmena skalės ašimi šuoliškai iškreips rastrinių elementų formą žingsniu, pasikartojančiu rastrų segmento ilgio periodu.

4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Eksperimentinių tyrimų metu buvo numatyta ištirti 3 skirtingus rastrinių skalių skirtų preciziam poslinkio matavimui, originalų formavimo fotolitografinius metodus.

Eksperimentų metu gaminami 3 skalių originalai, tačiau skirtingais metodais. Pagamintos skalės matuojamos linijiniu komparatoriumi. Lyginami skalių originalų sukauptos paklaidos parametrai, ištiriami skirtingų metodų bruožai.

Papildomai atliekamas ištisiniu formavimo metodui skirtu įrengimo modernizavimas ir tyrimas.

4.1 Skalių formavimo sutapdinimo metodu eksperimentinis tyrimas

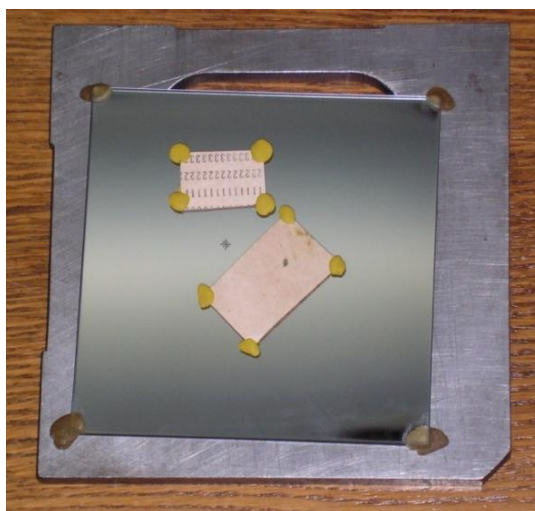
Eksperimento eiga

4.1.1 Ruošinio paruošimas

- a. Turimas žymės fragmentas, pagamintas ant chromu dengtos plokštelės, yra išstatomas lygiagrečiai žymių išdėstymo procesui naudojamos eksponavimo mašinos BE217 judėjimo krypčiai.
- b. Žymė išstatoma naudojant mikroskopą. Išstatymo metu fragmentas yra klijuojamas prie metalinio rėmelio vašku.
- c. Rėmelis padedamas ant dalijimo mašinos optikos bazuojant jį baziniais taškais. Tais pačiais baziniais taškais rėmelis bazuojamas ant mikroskopo išstatinėjant žymę.
- d. Ant dalijimo mašinos darbinio staliuko guldoma chromu ir fotorezistu padengtas stiklinis ruošinys.
- e. Ruošinys pritraukiamas vakuumu.
- f. Suderinamas optikos atstumas nuo ruošinio. Dalijimo mašinos optika užvažiuoja virš ruošinio ir pakeliama nuo jos į 5,42 μm . aukštį. Norint tai padaryti optika leidžiama žemyn tol, kol jos apačioje esančios kojelės atsiremia į ruošinį, tuomet stebint indikatorius rodmenis optinė sistema pakeliama per 22 padalas (padalos vertė 0,01 mm). Šis optinės sistemos atstumo nuo ruošinio nustatymas gali turėti nemažą įtaką žymės gabaritiniams matmenims, nuo kurių priklausys tolesnis sutapatinimo proceso tikslumas.
- g. Pamatuojamas ultravioletinės šviesos intensyvumas liuksmetru. Jis turi didelę reikšmę ryškinimo procesui, dėl to gali kisti žymės gabaritiniai matmenys. Apšviestumas reguliuojamas maitinimo šaltinyje keičiant elektros srovės stiprį.
- h. Atliekamas eksponavimo procesas. Jo metu žymės išdėstomos optimaliu atstumu. Išdėstymas vyksta pozicionuojant įrenginį tam tikroje vietoje ir ant jo optikos rėmelio pagalba bazuotą žymę apšviečiant ultravioletine šviesa.
- i. Ruošinys ryškinamas. Ryškinimo procesui naudojamas kalio šarmas.
- j. Ruošinys atkaitinamas krosnyje.
- k. Ruošinys ėsdinamas.
- l. Ruošinys iš naujo padengiamas fotorezistu.



4.1 pav. Dalijimo mašinos optika su indikatoriumi



4.2 pav. Bazavimo rėmelyje išstatyta žymė

4.1.2 Fragmento su žymėmis paruošimas

Fragmento su žymėmis, turinčio rastrinę struktūrą, paruošimo procesas labai panašus į ruošinio su žymėmis gaminimą.

1. Žymės ir ratinės struktūros fragmentai išstatomi lygiagrečiai žymių išdėstymo procesui naudojamos eksponavimo mašinos BE217 judėjimo kryptį.
2. Išstatymas vykdomas mikroskopu. Išstatymo metu fragmentai yra klijuojami prie metalinio rėmelio vašku.

3. Rėmelis su rastrinės struktūros fragmentu padedamas ant dalijimo mašinos optikos bazuojant jį baziniais taškais.

4. Ant dalijimo mašinos darbinio staliuko guldomas chromu ir fotorezistu padengtas stiklinis ruošinys.

5. Ruošinys pritraukiamas vakuumu.

6. Suderinamas optikos atstumas nuo ruošinio.

7. Matuojamas ultravioletinės šviesos intensyvumas liuksmetru.

8. Atliekamas eksponavimo procesas.

9. Pakeičiamas fragmentas.

10. Atliekamas eksponavimo procesas.

11. Ruošinys ryškinamas kalio šarmu.

12. Ruošinys atkaitinamas krosnyje.

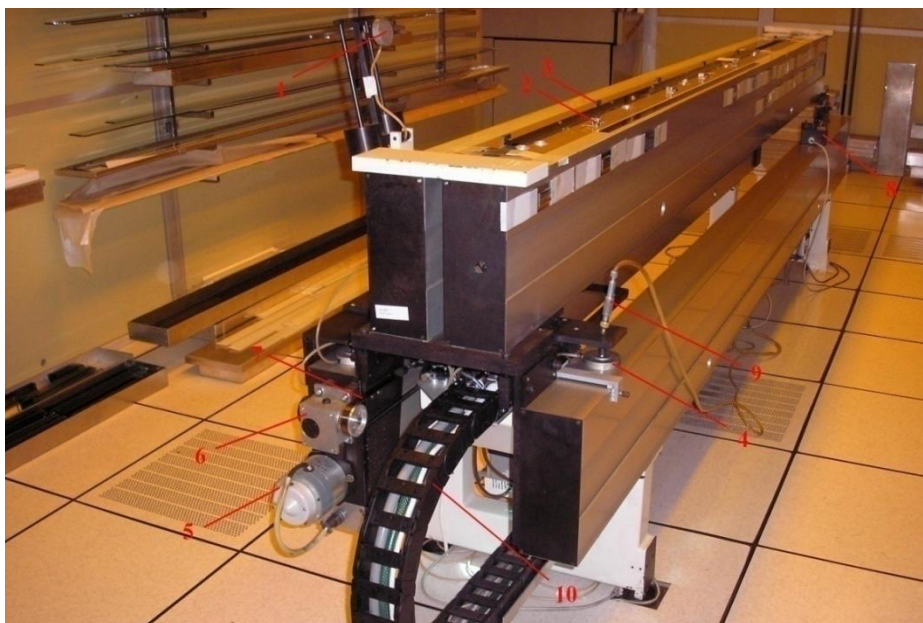
13. Ruošinys ėsdinamas.

Reikia nepamiršti, kad ant darbinio fragmento paliekama žymė turi būti veidrodinė ruošinyje esančios žymės atžvilgiu. Taip yra todėl, kad ruošinys su darbinio fragmentu sutapatinimo metu glaudžiami chromuotomis pusėmis, tai reiškia, kad vieno iš jų vaizdas apsiverčia.



4.3 pav. Darbinio fragmento nuotrauka

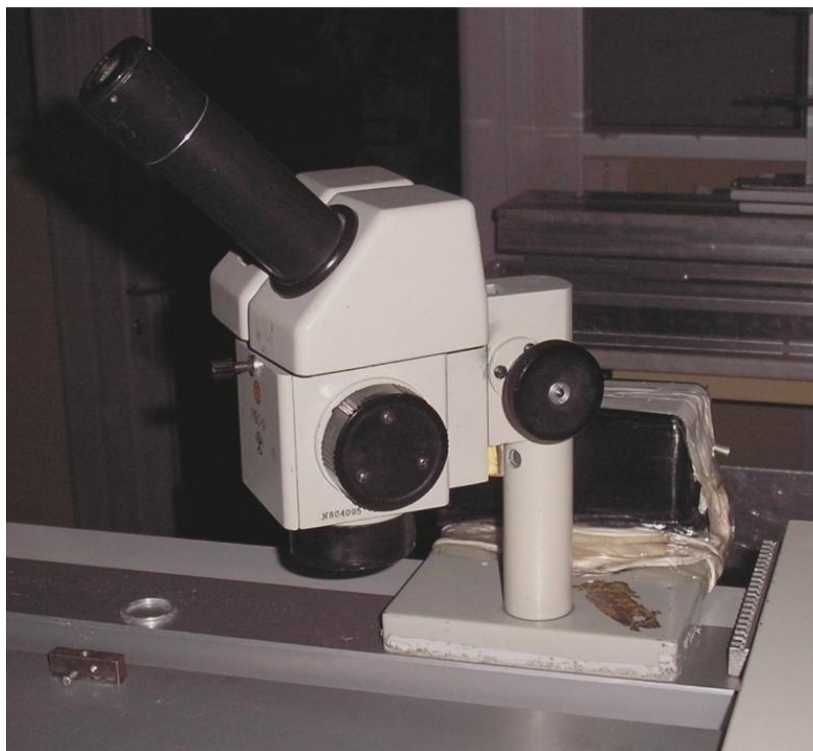
Pagaminus ruošinį ir darbinį fragmentą atliekamas ilgos skalės formavimas žymių sutapdinimo metodu. Šiam procesui atlikti naudojama fotolitografinė kopijavimo mašina. Darbinio fragmento sutapdinimo žymės paeiliui tapatinamos su ruošinio žymėmis. Sutapatinus fragmente ir ruošinyje esančias žymes ir sulietus ruošinį su fragmentu į kontaktą, apšviečiamas fragmentas. Tokiu būdu fragmente esantis piešinys (struktūra) perkeliamas ant ruošinio ir suformuojama vientisa ilga rastrinė skalė. Kopijavimo įrenginys pateiktas 4.4 pav.



4.4 pav. Kopijavimo mašinos bendras vaizdas:

1– Pneumatinis prispaudiklis; 2 – atrama; 3 – prispaudiklis; 4 – oro pagalvės; 5 – variklis;
6 – reduktorius; 7 – pastūmos diržas; 8 – lempos valdymo pultas; 9 – pūtiklis; 10 – vikšras

Skalių sutapdinimui atlikti naudojamas mikroskopas (4.5 pav.). Sutapdinimo metu bandant sutapdinti žymes turi būti palaikomas tarpas tarp ruošinio ir fragmento, kad išstatymo metu nebūtų pažeista ruošinyje esanti rastro zona.



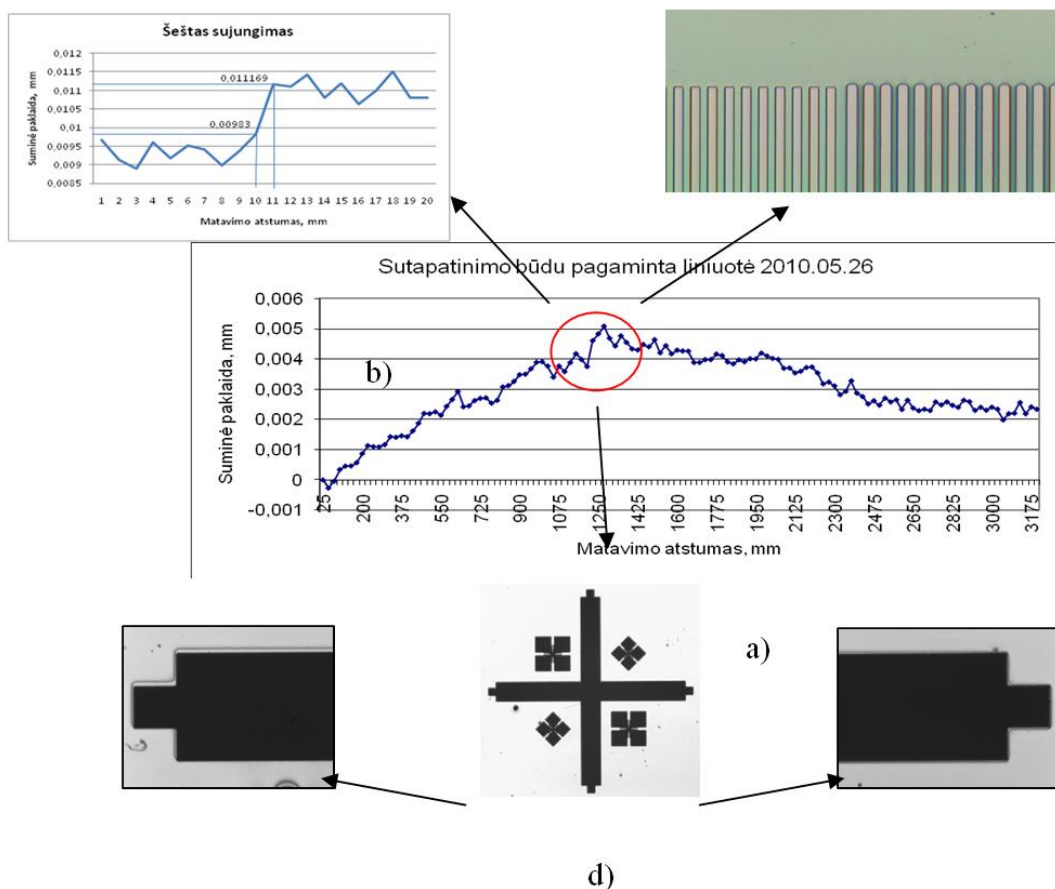
4.5 pav. Sutapdinimui naudojamas mikroskopas

4.1.3 Eksperimentinio tyrimo rezultatai

Norint įsitikinti realiai sudūrimo proceso įtaka sukauptai skalės paklaidai, sudūrimo metodu pagal žymes buvo suformuotas 3150 mm ilgio rastrinės skalės originalas. 4.6 pav. a parodytas paklaidų grafikas visame skalės ilgyje. Išsiskiria sudūrimas ties 1250 mm atžyma. Čia matyti didesnis paklaidos šuolis. Skalės paklaida šioje zonoje buvo kalibruota papildomai 1 mm žingsniu. Šių matavimų rezultatai pateikti 4,6 pav. b.

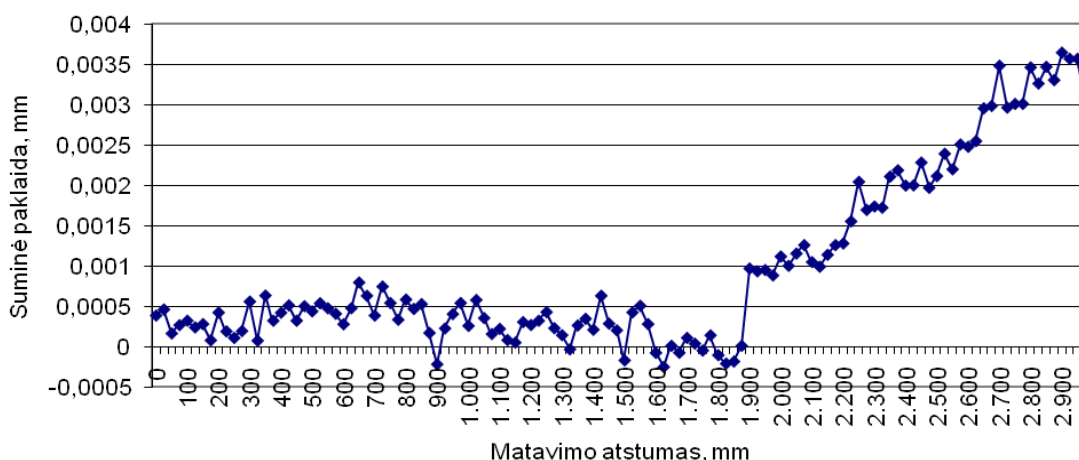
Šie matavimo rezultatai rodo, kad segmentų sudūrimo vietoje atsirado +1,3 μm dydžio paklaida. Tai taip pat akivaizdžiai matoma 4.6 c paveiksle, kuriame parodytas skalės fragmento vaizdas sudūrimo zonoje. Jis taip pat iliustruoja sutapdinimo paklaidas ir skalės ašiai statmena kryptimi bei atskirų skalės segmentų rąstrų skirtumus, atsirandančius dėl jų gamybos fotolitografinių procesų nestabilumo.

Paklaidų šuolio priežastis šiame sudūrime paaiškina 4.6 pav. d, kuriame parodytas skalės ruošinio ir segmento žymių sutapdinimo vaizdas. Jame aiškiai matomas nepakankamas žymių sutapimas. To priežastis yra žymių ant segmento ir ruošinio išdėstymo paklaidos bei pačių žymių suformavimo paklaidos.

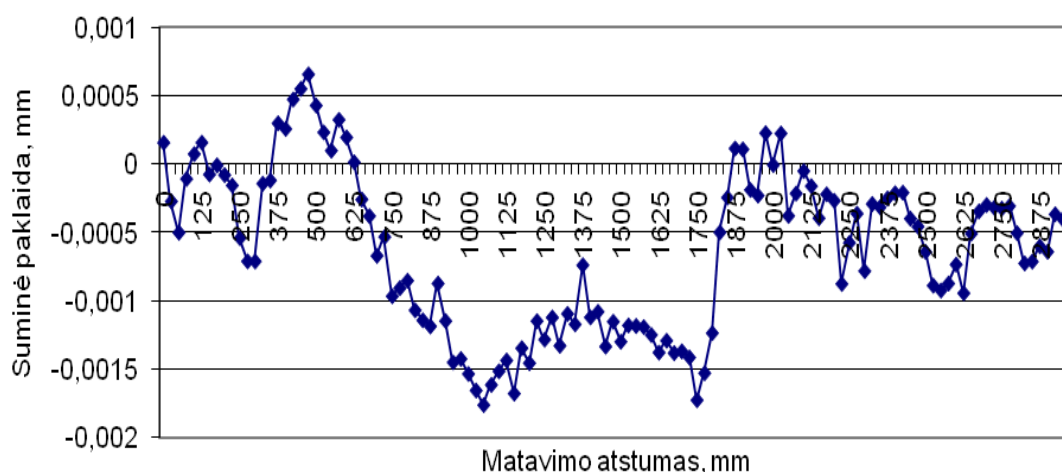


4.6 pav. Paklaidų pasiskirstymas

Gaminant rastrines skales šiuo metodu, matuojant skales linijiniu komparatoriumi vienoje ar keliose vietose išryškėja staigesnis paklaidų šuolis. Šiuo metodu gamintų skalių sukauptos paklaidos grafikai pavaizduoti 4.7 – 4.8 pav.



4.7 pav. Sutapdinimo metodu gamintos skalės suminės paklaidos grafikas



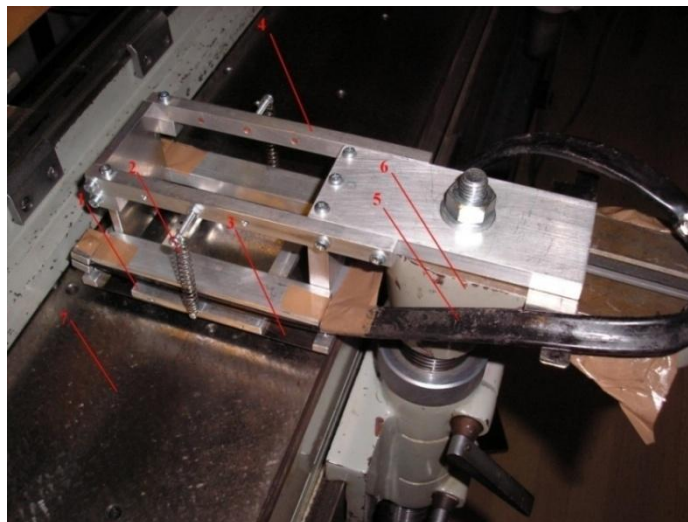
4.8 pav. Sutapdinimo metodu gamintos skalės suminės paklaidos grafikas

4.2 Tikslaus pozicionavimo metodo eksperimentiniai tyrimai

Norint ištirti ruošinių bazavimo įtaką skalės tikslumui, buvo atlikti šie tyrimai. Iš vieno 20mm. ilgio rastro fragmento, sutapdinimo būdu pagaminta 160 mm. rastrinė skalė. Šiam bandymui buvo panaudota dalijimo mašina, parodyta 4.9 pav. Šis įrenginys turi šviestuvą su ultra violetine lempa bei fragmento prispaudimo mechanizmą (4.10 pav.).



4.9 pav. Dalijimo mašina, turinti fragmento prispaudimo mechanizmą



4.10 pav. Pneumatinis fragmento prispaudimo mechanizmas:

1 – rėmelis; 2 – spyruoklė; 3 – diafragma; 4 – korpusas; 5 – plokščia pneumatinės sistemos žarna; 6 – laikiklis

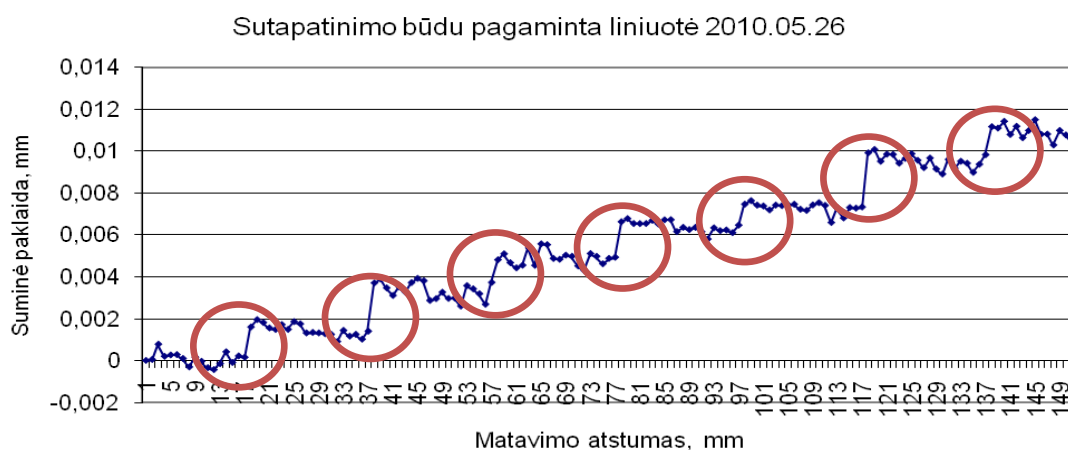
Pagamintas rastro fragmentas yra priklijuojamas prie prispaudiklio rėmelio (1) ir išstatomas lygiagrečiai stalo (7) judėjimo kryptčiai. Ant staliuko guldomas ruošinys išstatomas lygiagrečiai staliuko judėjimo kryptčiai. Tuomet kas 20mm fotolitografijos būdu, rastras yra kopijuojamas ant chromu ir rezistu padengto ruošinio. Rastro kopijavimo metu fragmentas pneumatiškai yra prispaudžiamas prie ruošinio. Eksponavimo laikas yra reguliuojamas laikmačiu. Po eksponavimo oras iš pneumatinės sistemos yra išleidžiamas, diafragma (3) ir spyruoklės (2) pakelia rėmelį su fragmentu nuo ruošinio. Staliukas pastumiamas 20mm, ir eksponavimas kartojamas. Taip suformuojama vientisa rastrinė liniuotė.

Suslėgto oro paduodamas į sistemą ir išleidimas iš jos valdomi rankiniu būdu sklendėmis (4.11 pav.).



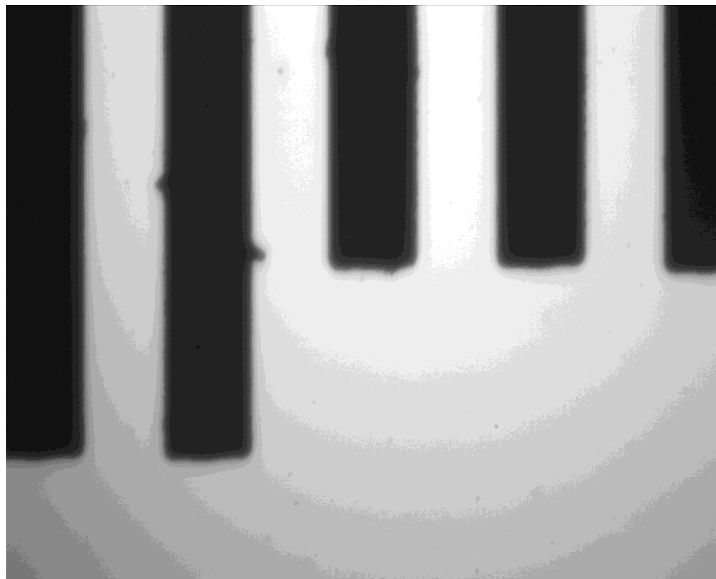
4.11 pav. Išstatymo mikroskopas ir suslėgto oro valdymo sklendės

Buvo įvertinta tokiu būdu pagamintos 160mm ilgio rastrinės liniuotės paklaida. Paklaidos kalibravimo grafikas pateiktas 4.12 pav. Matosi, kad rastrinė struktūra gavosi šiek tik trumpėjanti. Taip atsitiko dėl to, kad fragmentas buvo išstatytas ne visiškai lygiagrečiai stalo judėjimo kryptčiai. Tačiau bendras liniuotės ilgis yra per ilgas. Kiekviename fragmentų sujungime matomas aiškus liniuotės pailgėjimas (šuoelis), šio reiškinio priežastis yra fragmento pasisukimas ar pasislinkimas pozicionavimo metu. Taigi bendras 160mm ilgio liniuotės pailgėjimas gavosi net 12μm kai tuo tarpu norimas gauti rezultatas yra ne daugiau kaip 3μm 1m ilgyje.



4.12 pav. Sutapatinimo būdu gamintos 160 mm ilgio liniuotes sistemingosios paklaidos grafikas

Pozicionavimo netikslumas taip pat aiškiai matosi pro mikroskopą žiūrint į raistro struktūros pakraštį (4.13 pav.). Rastro brūkšniai išilgine rastrinių elementų kryptimi apie 20 μm .



4.13 pav. Rastrinių elementų perslinkimas išilgine jų kryptimi dėl pozicionavimo paklaidų

Taigi matome, kad gaminant liniuotę tikslaus pozicionavimo metodu, ruošinio išstatymas rastro tikslumui turi labai didelę įtaką. Fragmentus išstatinėti ant ruošinio padengtos fotorezistu sudėtinga, bei užima daug laiko. Dėl šios priežasties kyla poreikis turėti tiesų ruošinio kraštą, kad gamybos metu būtų galima juo bazuoti ir taip sutaupyti laiko.

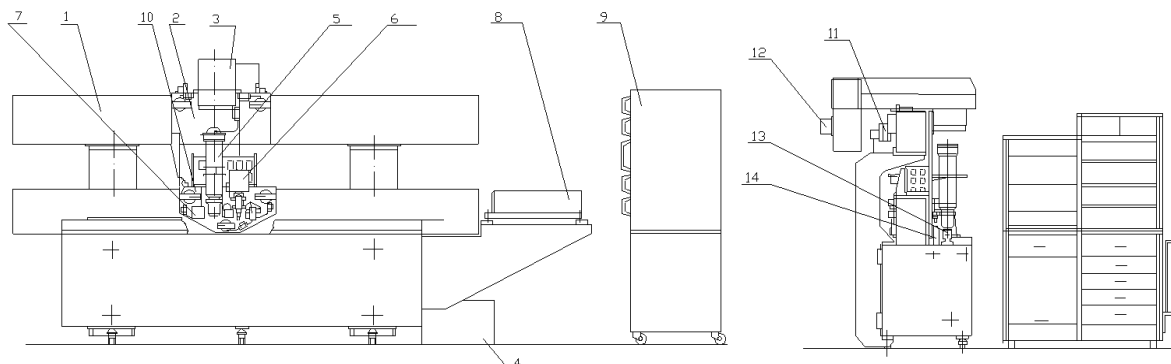
4.3 Ištisinio fotolitografinio metodo eksperimentiniai tyrimai

Norint pritaikyti fotolitografinę dalijimo mašiną 2D skalių gamybai, teko ją modernizuoti. Pagrindinis senosios dalijimo mašinos trūkumas buvo, jos valdymo bloko nelankstumas. Senuoju įrengimu norint pagaminti 2 m. 2D skalę reikėjo rankinių būdu įvesti iki 40000 koordinačių. O tai padaryti be klaidų yra praktiškai neįmanoma. Būtent dėl šios priežasties buvo atliktas fotolitografinės dalijimo mašinos modernizavimas ir tyrimas.

4.3.1 Modernizuojamo objekto aprašymas

Fotolitografinė dalijimo mašina skirta rastrinių skalių šablonų gamybai. Šią mašiną sudaro mechaninė dalis ir valdymo dalis. Pagrindinės dalys yra granitinė bazė, objektyvo ir lempos kariatėlės, grubaus pozicionavimo įrenginys, etaloninės skalės bazavimo laikiklis ir

ruošinio laikiklis. Tiriamo objekto (fotolitografinės mašinos) bendrasis vaizdas pateiktas 1pav.[1]



4.14 pav. Linijinės dalijimo mašinos bendrasis vaizdas:

- 1 – granitinė bazė; 2 – šviestuvo kariatėlė; 3 – šviestuvai; 4 – suslėgto oro tiekimo mazgas;
 5 – objektyvas; 6 – kalibravimo mikroskopas; 7 – objektyvo kariatėlė; 8 – lazerinis interferometras; 9 – valdymo blokas; 10 – indikatoriaus laikiklis; 11 – žingsninis variklis;
 12 – aušintuvas; 13 – darbinis stalelis; 14 – kalibravimo liniuotes stalelis

Įrenginys dirba fotomultiplikavimo metodu. Prie įrengimo kariatėlės yra pritvirtinta optika, kuri skirta multiplikavimo būdu pernešti norimo piešinio formą nuo fragmento ant paruošos apšviečiant ją ultra violetine šviesa. Kariatėlė grubiai pastumiama žingsniniu varikliu, o į tikslesnę poziciją objektyvas pastatomas pjezo elementu.

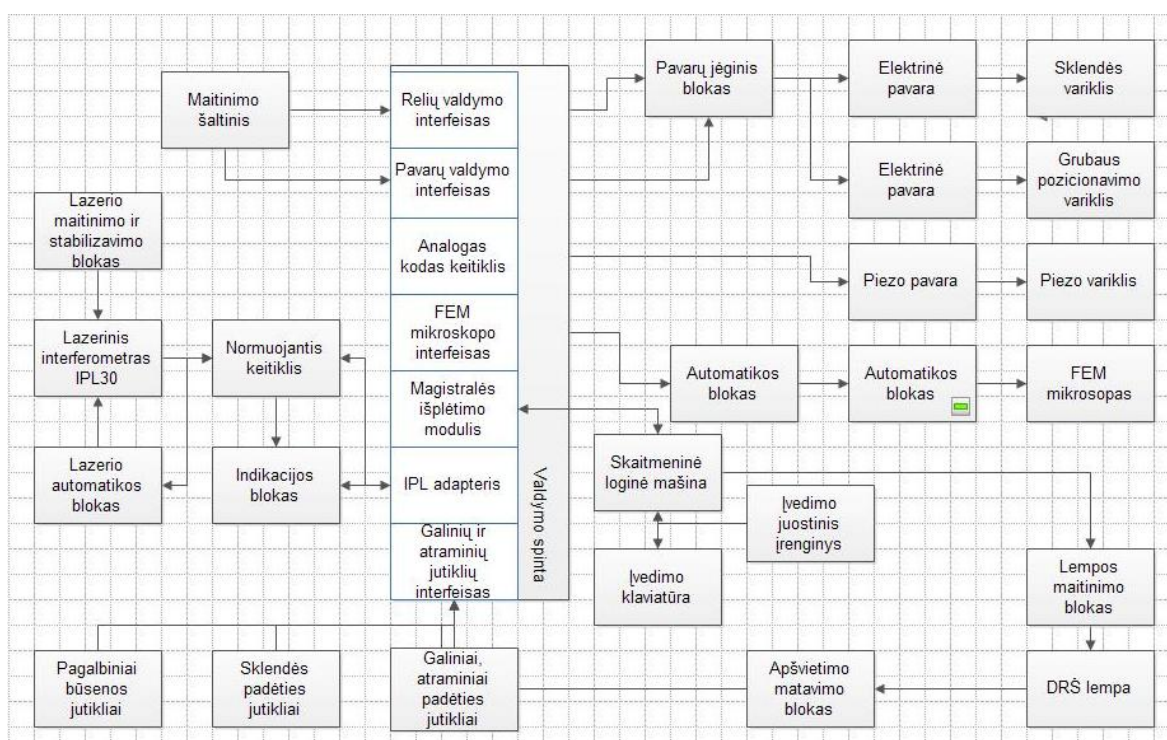
Įrenginys turi dvi matavimo sistemas: tai lazerinis interferometras ir atestuota stiklinė rastrinė liniuotė, pagal kurią kalibruojamas įrenginys. Lazerinis interferometras skirtas preciziniam kariatėlės poslinkio matavimui ir kartu su skaitmenine logine mašina (SLM) bei pjezo pavara, tiksliam pozicionavimui, FEM mikroskopas pagal brūkšninio mato atskaitas užtikrina besikeičiančio oro lūžio kompensaciją.

Kariatėlės pozicionavimo sistemą sudarė žingsninis variklis su reduktoriumi, krumpliaistiebis, elektromagnetinis stabdis, pjezo elementas, pavaros, analogas-kodas keitimo ir valdymo blokai. Matavimo ir korekcijos sistemą sudaro lazerinis interferometras IPL30-KI, fotoelektrinio mikroskopo su atestuotu brūkšniniu matu bei atitinkamos SLM sąsajos.

Valdymo sistemą sudarė SLM, valdymo programa, periferiniai įrenginiai ir galiniai padėties jutikliai. Pozicionavimo valdymą, eksponavimo procesą ir kitus atlieka matavimo-valdymo kompleksas, sudarytas iš valdymo spintos, SLM su periferiniais įrenginiais, FEM

automatikos blokas ir pavarų jėginis blokas. Valdymas atliekamas užrašant komandas į SLM atmintį arba įrašant programą iš juostinio įrenginio.

Karietėlė perstumiama krumpliastiebine pavana, sukančią žingsninį motoreduktorių, ir precizinę pjezo pavara. Pavaros diskretų žingsnį apsprendžia variklio ir reduktoriaus parametrai. Jis lygus 5 μm . Esant didžiausiam variklio sūkių skaičiui karietėlės greitis siekia 20mm/sek. Precizinio poslinkio pjezo pavara gali 0,01 μm žingsniu perstumti karietėlę 9 μm . Įrengimo blokinė valdymo schema pateikta 4.15 pav.



4.15 pav. Įrengimo prieš modernizavimą blokinė valdymo schema

Bendrą darbo algoritmą neįmanoma užrašyti, nes kiekvienam gaminamam šablonui jį sudaro operatorius rašydamas darbo programą. Atskirų mašinos mazgų tarpusavio informacijos apsikeitimo ir valdymo algoritmus įmanoma aprašyti. Dažniausiai dirbama pagal šį algoritmą: 1) karietėlės pozicionavimo sistema gauna komandą perstumti karietėlę į sekančią poziciją, 2) žingsninis variklis ir pjezo pavara stumia karietėlę, matavimo sistema perduoda duomenis apie poslinkį valdymo sistemai, 3) pasiekus užduotą poziciją, valdymo sistema atidaro eksponavimo sklendę ir atitinkamą laiką apšviečia ruošinį, 4) ciklas kartojamas naujai pozicijai.

Operatoriaus darbo algoritmas: 1) įjungti įrenginius ir eksponavimo lempą, 2) parinkti eksponavimo laiką, 3) nuskaityti iš juostelės operacines programas, patikrinti operacinės sistemos darbą, įrašyti į SL atmintį darbinę programą, 4) sukalibruoti matavimo korekcijos sistemą, nustatant mikroskopą ant etaloninio mato pirmo ir paskutinio brūkšnių bei keičiant korekcijos koeficientą, kol sistema rodys lygiai 1000mm poslinkį, 5) uždėti ruošinį ir užtikrinti jo paviršiaus švarumą, 6) pradėti darbinės programos vykdymą.

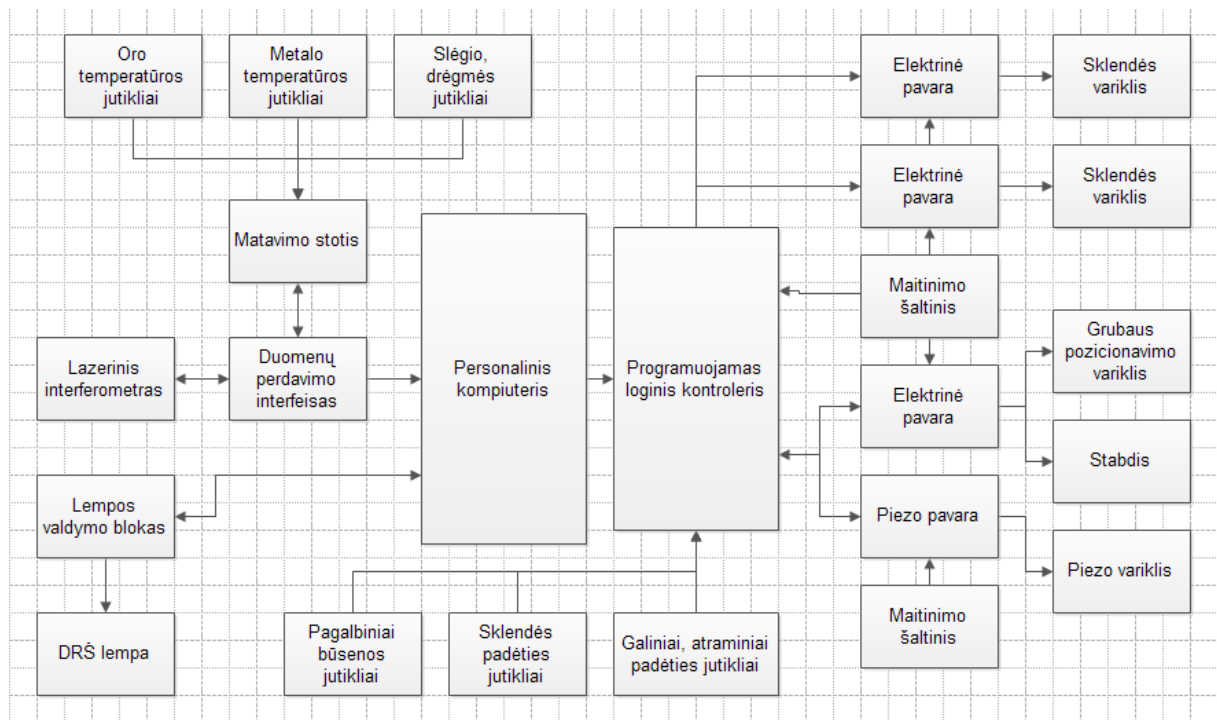
4.3.2 Modernizuoto įrengimo aprašymas

Rekonstruota sistema veikia tuo pačiu dalijimo mašinos principu, nes tai apsprendžia eksponavimo sistemos sandara. Rekonstruojant buvo pakeista dauguma automatikos elementų naujais: kariatėlės grubaus pozicionavimo žingsninis variklis, precizinio pozicionavimo pjezo elementas, sklendės variklis, jų pavaros, lazerinis interferometras, SLM, automatikos blokai, galiniai jutikliai.

Pagrindiniu valdymo įrenginiu tapo kompiuteris ir speciali valdymo programa, pasikeitė komandos ir jų įrašymo tvarka, atsirado naujų funkcijų. Tai pat valdymo sistemoje yra loginis programuojamas valdiklis (PLK), ir naujos variklių pavaros. Kompiuteris vykdo programą žingsnis po žingsnio (Step by Step). Jis siunčia komandą PLK ir kontroliuoja jo būsenos registrą, tai sužinodamas apie komandos vykdymo fazes ir jas pateikdamas ekrane. PLK gavęs komandą, atlieka atitinkamus veiksmus ir, surinkęs informaciją iš jutiklių pavarų ir kitų mazgų, pateikia ją būsenos registre. Tokia valdymo struktūra pasirinkta dėl to, kad kompiuteris pastoviu laiko intervalu nuskaityt informaciją iš lazerinio interferometro ir kiti darbai prailgintų šį intervalą. Dėl šios priežasties atsirastų vadinama (Data age) duomenų amžiaus problema.

Eksponavimo sistema liko nepakitusi, išskyrus naują sklendės variklį, tačiau jos darbo algoritmas ir valdymas liko panašūs į buvusios sistemos. Kariatėlės pozicionavimo sistemoje pakeistas žingsninis, variklis pjezo elementas, pavaros, valdymo blokai. Variklis pakeistas dėl susidėvėjimo ir siekiant padidinti pozicionavimo greitį, greičių diapazoną, pozicionavimo dinamiškumą, tačiau lieka apribotas reduktoriaus dinamiinių parametrų. Pjezo pavaros keitimas susijęs naujos kartos pjezo elementų savybėmis. Tai mažesnė valdymo įtampa, mažesnė elemento poslinkio histerezė, atlaiko didesnes apkrovas, mažas parametrų dreifas.

Matavimo ir korekcijos sistemą dabar sudaro lazerinis interferometras Renishaw ML-10, automatinė oro lūžio koeficiento nustatymo sistema Renishaw EC-10 ir duomenų sąsaja. Atsisakyta FEM mikroskopo ir etaloninio brūkšninio mato. Juos naudojame tik prietaiso sukalibravimui kartą per metus. Modernizuoto įrengimo blokinė valdymo schema pateikta 4.16 pav.



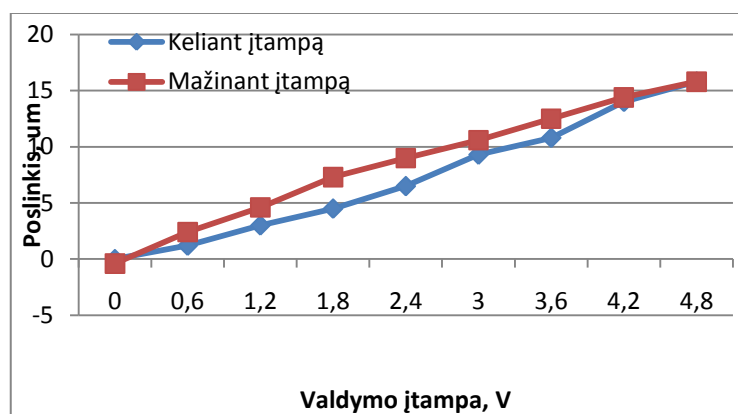
4.16 pav. Modernizuoto įrengimo blokinė valdymo schema

4.3.3 Pagrindinių pakeitimų ir charakteristikų palyginimas

Svarbiausi pakeitimai atlikti modernizuojant fotolitografinę dalijimo mašiną:

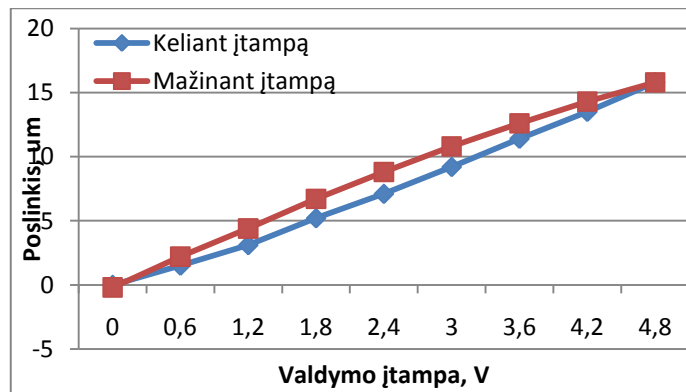
1. Pakeistas lazerinis interferometras, turintis automatinę oro lūžio koeficiento kompensavimo sistemą.
2. Skaitmeninė loginė mašina pakeista į personalinį kompiuterį ir programuojamą loginį kontrolerį.
3. Pakeistas pjezo elementas nauju, turinčiu geresnes charakteristikas.
4. Pakeisti žingsniniai varikliai.
5. Pakeista valdymo programa ir padaryta nauja, patogi sąsaja su vartotoju, rodomos vykdomų darbų fazės.
6. Įvestas proceso monitoringas, leidžiantis aptikti proceso klaidas ir nustatyti jų atsiradimo priežastys.

Viena iš svarbiausių dalijimo mašinos charakteristikų yra pjezo elemento veikimas ir jo pastūmos mazgo histerezė. Nuo pjezo elemento tiesiogiai priklauso sistemos pozicionavimo tikslumas bei pozicionavimo greitis. Norint palyginti pjezo elementų veikimą buvo atlikti matavimai. Matavimas buvo vykdomas abiem pjezo elementams po 5 kartus, buvo matuojama naujuoju lazeriniu interferometru Renishaw ML10 ir induktyviniu kontaktiniu poslinkio matavimo prietaisu Novibra. Matavimo metu buvo kas 0,6 V didinama pjezo elemento valdymo įtampa, stumiant kariatėlę pjezo elementu pirmyn, ir matuojamas jos poslinkis. Pasiekus didžiausią įtampą 4,8 V, valdymo įtampa mažinama tokiu pačiu įtampos dydžiu ir užrašoma poslinkio informacija iš abiejų matavimo priemonių. Dėl trinties, bei pjezo elemento įtvirtinimo mechaninių komponentų standumo, gaunamas poslinkių nesutapimas. Iš gautų duomenų nubraižyta histerezės kilpa ir palyginti duomenys. Eksperimentas pakartotas po penkis kartus į abi puses. Rezultatų sklaidos įvertis yra didžiausia deviacija nuo visų matavimų vidurkių kreivių. Įrengimo su senuoju pjezo elementu judesio pakartojamumas pateiktas 4.17 pav.

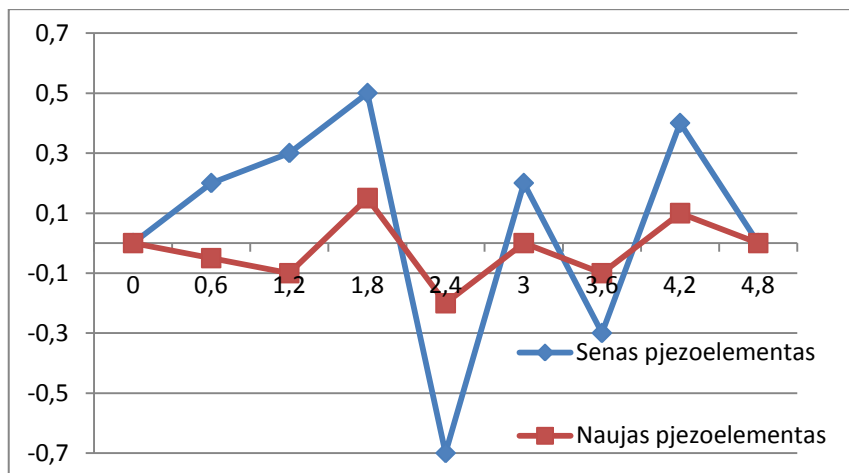


4.17 pav. Histerezės kilpa (senasis pjezoelementas)

Naujasis pjezo elementas pasižymi mažesnėmis valdymo įtampos savybėmis. Nustatyta modernizuoto įrengimo pjezo elemento stumiančio kariatėlę su optine sistema histerezė ir pavaizduota histerezės kilpa 4.18 pav.

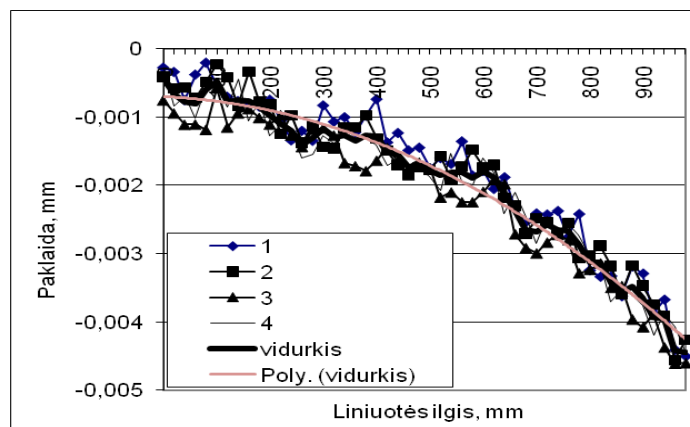


4.18 pav. Histerezės kilpa (naujasis pjezoelementas)



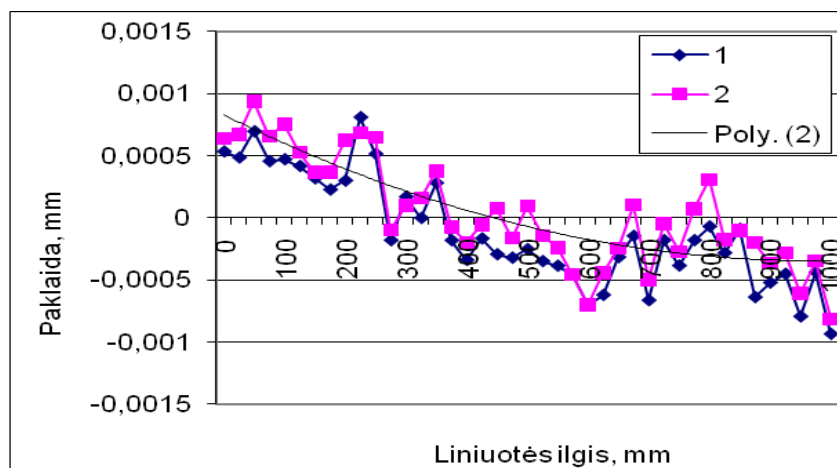
4.19 pav. Poslinkio didžiausia deviacija nuo vidurkio

Iš gautų matavimo rezultatų galima matyti, kad naujojo pjezo elemento judesio netolygumas yra mažesnis. Senojo pjezo elemento maksimali deviacija nuo matavimų vidurkio $0,7\mu\text{m}$, naujojo pjezo elemento $0,2\mu\text{m}$ 1.6 pav. Didžiausia paklaida dėl pjezo elemento ir sistemos histerezės bus $3,6\pm 0,7\mu\text{m}$, o su naujuoju $2,1\pm 0,2\mu\text{m}$. Tai reiškia, kad sistemos išstatymas su šiuo pjezo elementu bus paprastesnis ir efektyvesnis. Kad histereze pozicionavimo tikslumui neturėtų įtakos pozicionavimas atliekamas žingsneliais, priartėjimo būdu.



4.20 pav. Skalės sukauptoji paklaida formuojant senu įrenginiu:
1,2 kai matavimo kariatėlė juda nuo interferometro; 3,4 kai matavimo kariatėlė juda link
interferometro

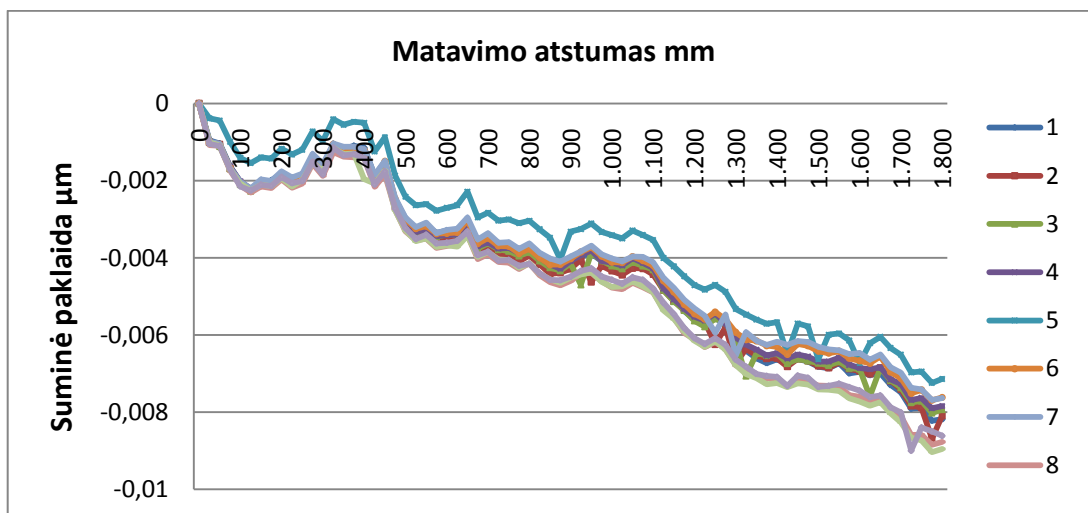
Atliktas rastrinio takelio formavimo tikslumo tyrimas. Tam buvo pagamintos 1000mm skalės su senu ir modernizuotu įrenginiu naudojant tą pačią kaukę, stengiantis išlaikyti tas pačias sąlygas. Matuojama skalės brūkšnių pozicija sukaupta paklaida ir įvertinama matavimo sklaidos vidurkis nuo aproksimuojančios 2 laipsnio algebrinio polinomo kreivės. Formuojant senu įrenginiu gauta apie 4 μ m sukauptoji paklaida ir matavimo sklaida 0,52 μ m. Formuojant modernizuotu įrenginiu gauta mažesnė nei 2 μ m sukauptoji paklaida ir matavimo sklaida 0,35 μ m.



4.21 pav. Skalės sukauptoji paklaida formuojant senu įrenginiu:
1 – kai matavimo kariatėlė juda nuo interferometro; 2 – kai matavimo kariatėlė juda link
interferometro

4.3.4 Matavimų patikimumas

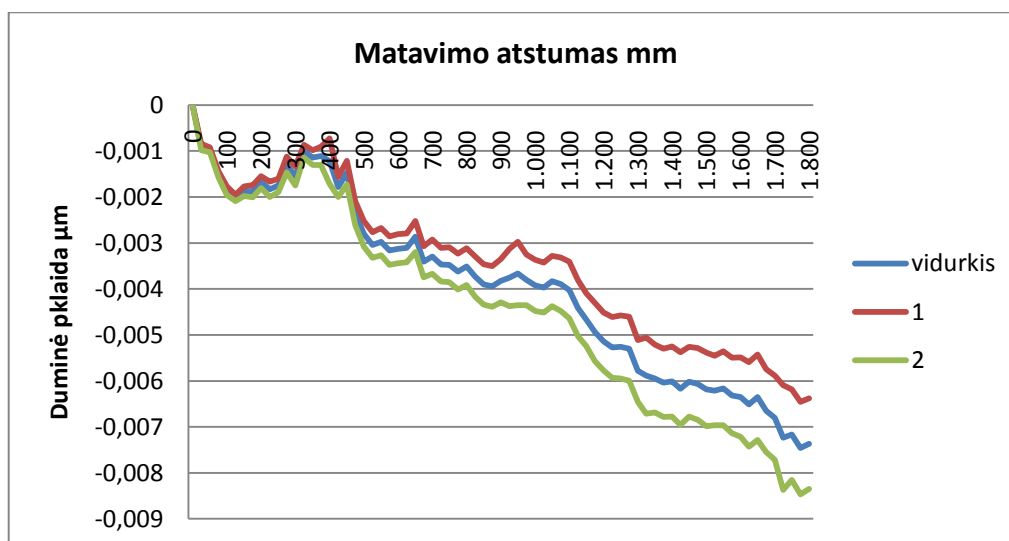
Norint nusakyti matavimo patikimumą, ir matavimo duomenų sklaidą, buvo atlikta 9 matavimai. Matuota 1800 mm ilgio rastrinė skalė pagaminta ištisiniu fotolitografiniu metodu. Išvestas matavimų vidurkis, apskaičiuota vidutinis kvadratinis nuokrypis. Visi matavimų rezultatai pateikti 4.22 pav.



4.22 pav. Skalės suminės paklaidos 8 matavimo rezultatai

Iš 4.22 pav. pateiktų duomenų matosi, kad penktojo matavimo duomenys gerokai išsiskiria. Taip galėjo atsitikti dėl to, kad skalė matavimo metu buvo netiksliai išstatyta, arba temperatūrinis gradientas buvo netinkamai kompensuotas. Dėl šios priežasties skaičiuodami matavimų vidurkį ir vidutinį kvadratinį nuokrypį, penktojo matavimo duomenų nenaudojame.

Matavimų vidurkis ir duomenų sklaidos laukas 2σ , (95%) ribose pateikti 4.23 pav. Matavimų vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma = 0,000249424$ mm.



4.23pav. Matavimų vidurkis ir sklaidos laukas 2σ ribose: 1 – 2 – sklaidos lauko ribos

IŠVADOS

1. Didžiausias 2D skalių originalų formavimo fotolitografiniu būdu tikslumas yra pasiekiamas ištisiniu metodu. Suskaičiuotam tikslumui gauti, būtina realizuoti matematinę sistemingųjų paklaidų kompensacija arba korekciją.
2. Ištisiniu rastrų formavimo metodu suformuotiems skalių originalams bus būdingos monotoniškai kintančios jų paklaidos, priklausomai nuo skalės ilgio
3. Rastrus formuojant sudūrimo metodais iš segmentų, suformuotiems skalių originalams bus būdingos šuoliškai kintančios jų paklaidos, pasikartojančios rastro segmento ilgio periodu.
4. Rastrus formuojant sudūrimo metodais iš segmentų, suformuotiems skalių originalams paklaidos statmena skalės ašimi šuoliškai iškreips rastrinių elementų formą žingsniu, pasikartojančiu rastrų segmento ilgio periodu.
5. Pagrindinė suminės paklaidos komponente 2D ilgų (iki 3,4 m) skalių originalus formuojant visais nagrinėtais metodais yra paklaidos, susijusios su originalo formavimo įrenginio tiesaus judesio linijinėmis paklaidomis rastro formavimo plokštumoje statmenai formuojamo rastro ašiai.

LITERATŪRA

1. Barakauskas A., Kasparaitis A., Zakas G. Investigation of Innovative Proceses for Manufacture of Precise Metal Scale Gratings // 6th International Conference of DAAM Baltic Industrial Engineering, April 24-26, 2008. DAAM Int Vienna, Tallinn, Estonia. Pts 1 and 2, p. 203-208.
2. Barakauskas A., Kasparaitis A., Šukys A., Zakas G. Research into Exposure. Process of Long Metal Raster Scale Production // Proceedings of 13th International Conference on Mechanika: Mechanika-2008, Apr. 3-4, 2008, Kaunas Univ. Technol. ISSN 1822-2591. 2008, p. 44-50.
3. Jakštas A., Kaušinis S., Barauskas R., Barakauskas A., Kasparaitis A. Refinements of Precision Line Scale Calibration System// Proceedings of 14th International Conference on Mechanika: Mechanika-2009, Apr. 2-3, 2009, Kaunas Univ. Technol. ISSN 1822-2591. Kaunas, 2009, p. 137-140.
4. J. Flügge, R. Köning and H. Bosse: "Characterising the performance of the PTB line scale interferometer measuring photoelectric encoders", in Proc. SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements, Jennifer E. Decker; Gwo-Sheng Peng; Eds. San Diego, 2005, Vol. 5879, p 08-1 - 08-9
5. Kasparaitis A., Šukys A. Metrologinio ūkio ir matavimų organizavimas. ISBN 978-9955 283065. 2008, 192 p.
6. Kokybiškai naujos 2D matavimo skalės sukūrimas“, reg.Nr. VP2-1.3-ŪM-02.K 01-002, etapas Specialaus 2D piešinio fragmento sudarymo būdų bei fragmento dizaino formavimo tyrimas. Metodinė medžiaga. Projekto vadovas A. Barakauskas, A. Kasparaitis, R Lazdinas ir kt. Vilnius, 2009, 51 p.
7. Tyrimo „Precizinių pozicionavimo įtaisų su pjezo pavaromis, skirtų aukštos skyros matavimo sistemoms, techninių galimybių tyrimas“ parengimas. Ataskaita. Ataskaitos vykdytojas – Vyriausiasis mokslo darbuotojas A. Bubulis. Kaunas, 2010. Kauno Technologijos Universitetas
8. Birch, K.P., Downs, M.J. Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air. – Metrologia, 1994, 31, p.315-31.
9. Barakauskas, A., Kasparaitis, A., Kojelavičius, P., Šukys, A. Compensating accuracy of ABBE errors of linear laser calibrator. – Proceedings of 13th International Conference. Mechanika, 2008, p.39-43.
10. Precizinių ilgio kalibravimo sistemų sukūrimas ir tyrimas, Aukštųjų technologijų plėtros programa, Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas, Projekto Reg. Nr. B-03008,

- Projekto vadovas prof. S. Kaušinis, vykdytojai A. Barakauskas, A. Kasparaitis ir kt. Kaunas, 2003-2006 m., 570 p.
11. Barakauskas A., Čižiūnas A., Kasparaitis A. The Researches of Long Linear Scale Comparator and its Environmental Temperatures Gradient // Proceedings of 13th International Conference on Mechanics: Mechanika-2008, Apr. 3-4, 2008, Kaunas Univ. Technol. ISSN 1822-2591. 2008, p. 33-38.
 12. Kokybiškai naujos 2D matavimo skalės sukūrimas“, reg.Nr. VP2-1.3-ŪM-02.K 01-002, etapas Reikalavimų paruošoms suformulavimo analizė bei įrangos tiksluminių charakteristikų tyrimas. Metodinė medžiaga. Projekto vadovas A. Barakauskas, A. Kasparaitis, R. Lazdinas ir kt. Vilnius, 2009, 51 p.
 13. Bentkus, R., Kasparaitis, A., Šukys, A. Optimization of linear precise movements. – Mechanika. - Kaunas: Technologija, 2005, Nr.1(51), p.49-53.
 14. Kokybiškai naujos 2D matavimo skalės sukūrimas, reg.Nr. VP2-1.3-ŪM-02.K 01-002, etapas Metodinė medžiaga „Metrologinio patikrinimo parametrų nustatymo tiriamieji darbai“. Projekto vadovas A. Barakauskas, A. Kasparaitis, R. Lazdinas ir kt. Vilnius, 2011, 10 - 20 p.
 15. Samuel Cormier-Iijima's, 2010, <http://sciyoshi.com/2010/12/gray-codes/>
 16. Reinhard Kuhn, Senior Project Manager, HEIDENHAIN, Traunreut, Germany, Friday, September 10, 2010, <http://www.designworldonline.com/articles/6391/11/Encoders-for-the-Nanotech-World.aspx>
 17. Contact Photolithographic Alignment Tutorial, Aaron R. Hawkins, January, 2004 http://cleanroom.byu.edu/Alignment_Tutorial.pdf
 18. Kokybiškai naujos 2D matavimo skalės sukūrimas“, reg.Nr. VP2-1.3-ŪM-02.K 01-002, etapas Metodinė medžiaga „Sutapatinimo 2D galimybių bei sutapatintų fragmentų metrologiniai tyrimai“ Projekto vadovas A. Barakauskas, A. Kasparaitis, R. Lazdinas ir kt. Vilnius, 2011, 42 - 52 p.