

RASTRŲ FORMAVIMO ĮRENGINIO MODERNIZACIJA IR TYRIMAS

Karolis Bardauskas¹, Rimantas Lazdinas², Tomas Snukiškis³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹karolisb9@gmail.com; ²r.lazdinas@gmail.com; ³tomas.snukiskis@gmail.com

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama fotolitografinės dalijimo mašinos skirtos precizinių matavimo sistemų skalių originalų gamybai, modernizavimas, pateikiami senosios ir naujosios įrangos veikimo principai bei blokinės schemos. Palyginamos įrengimų charakteristikos, bei gamybos greitimeika. Straipsnyje taip pat dėstomi temperatūros pasiskirstymo patalpoje aspektai, apžvelgiami tyrimo duomenys. Pateikiamos išvados bei pasiūlymai.

Reikšminiai žodžiai: Precizinės poslinkio sistemos, rastrinės skalės, fotolitografinė dalijimo mašina, šablonų gamyba, modernizavimas.

Įvadas

Fotoelektrinės matavimo sistemos šiuo metu yra vienos iš populiariausių, kuriant naujus ar automatizuojant senuosius įrengimus, kuriems aktualus tikslus komplektuojančių mazgų judesio valdymas ir pozicionavimas. Automatizuotų įrengimų tikslumo parametrai yra tiesiogiai priklausomi nuo fotoelektrinių poslinkio matavimo sistemų tikslumo. Tobulėjant įrengimams tobulinamos ir fotoelektrinės matavimo sistemos. Iš poslinkio matavimo sistemų siekiama išgauti kiek galima didesnę skiriamąją gebą, neprarandant tikslumo visame matuojamame ilgyje. Imta gaminti 2D matavimo sistemos kurios teikia informaciją ne tik apie pagrindinį judesį, bet ir apie tikslaus judesio mažus linijinius poslinkius ir kampinius svyravimus judesio matavimo keitiklio skalės plokštumoje.

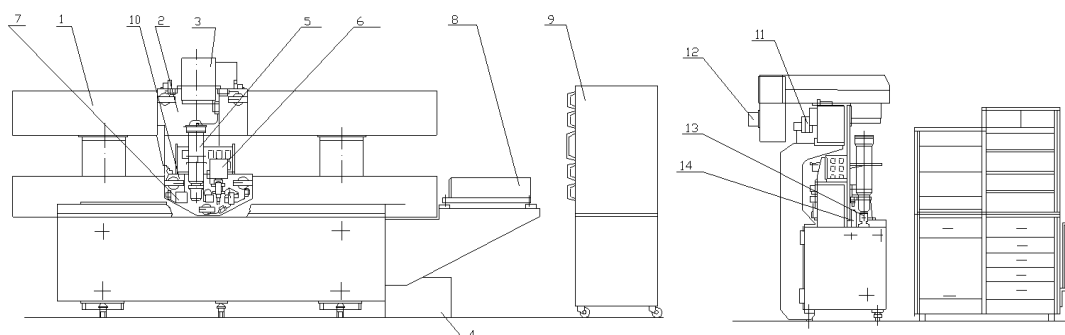
Tokioms matavimo sistemoms reikalingos informaciją apie poslinkį teikiančios skalės su sudėtingo-

mis rastrinėmis struktūromis, kurios yra tiksliai tarpusavyje susietos. Dėl šių priežasčių 2D skalių gamybai netinkami įrengimai skirti gaminti 1D skales.

Būtent dėl šios priežasties straipsnyje apžvelgiamas rastrinių skalių originalų gamybos įrengimo modernizavimas, bei pritaikymas 2D skalių gamybos procesui. Palyginami įrengimo parametrai prieš modernizavimą ir po jo, bei pateikiama supančių temperatūrinių laukų analizė, kurie taip pat įtakoja skalės tikslumą.

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]



1 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 stalėlis. 14 – kalibravimo liniuotes stalėlis.

Fig. 1. Dividing the total linear machine image. 1 - granite base. 2 - lamp carriage. 3 - light. 4 - compressed air supply unit. 5 - objective. 6 - calibration microscope. 7 - objective carriage. 8 - laser interferometer. 9 - control unit. 10 - indicator holder. 11 - stepping motor. 12 - cooler. 13 - working table. 14 - standard scale table.

Įrengimas 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 piezo elementu.

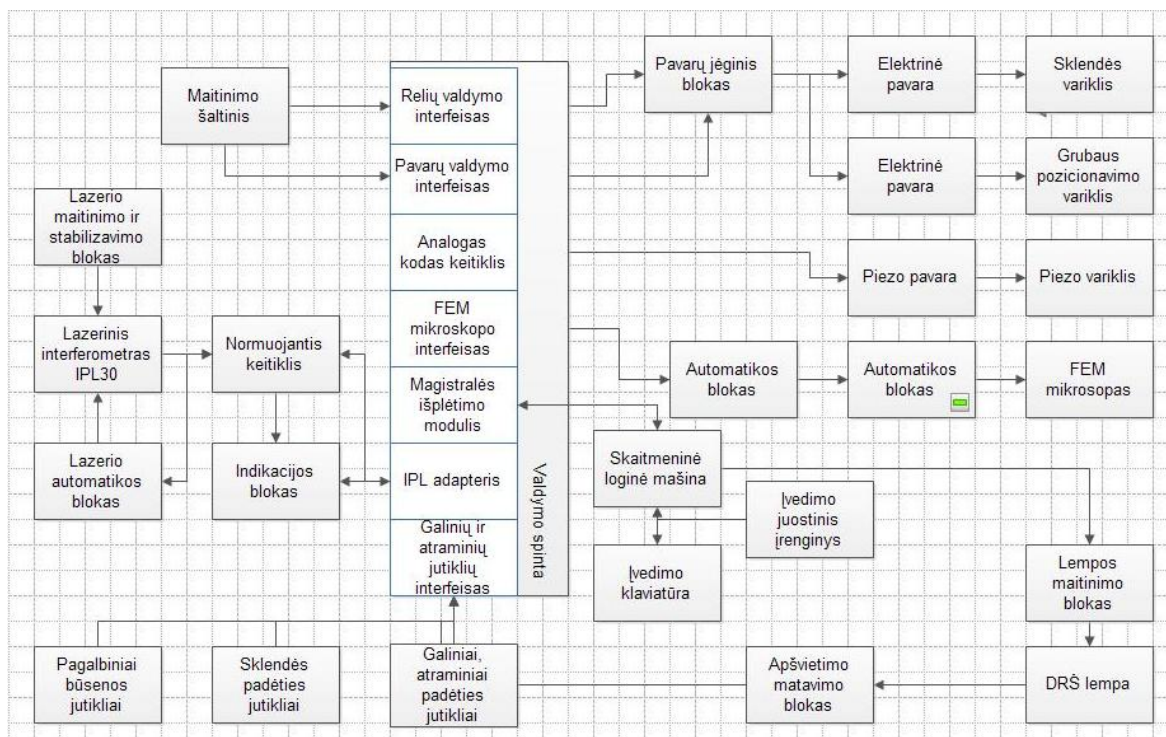
Įrengimas turi dvi matavimo sistemas: tai lazerinis interferometras ir atestuota stiklinė rastrinė liniuotė, pagal kurią kalibruojamas įrengimas. Lazerinis interferometras skirtas preciziam kariatėlės poslinkio matavimui ir kartu su skaitmenine logine mašina (SLM) bei piezo pavara, tiksliai pozicionavimui,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

Kariatėlės pozicionavimo sistemą sudarė žingsninis variklis su reduktoriumi, krumpliaistebis, elektromagnetinis stabdis, piezo elementas, pavaros, analogas-kodas keitiklis ir valdymo blokei. 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, ekspozavimo 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.

Kariatėlė perstumama krumpliaistebine pavara, sukant žingsninį motoreduktorį, ir precizine piezo pavara. Pavaros diskretų žingsnį apsprendžia variklio ir reduktoriaus parametrai. Jis lygus 5 μm . Esant didžiausiam variklio sūkių skaičiui kariatėlės greitis siekia 20mm/sec. Precizinio poslinkio piezo pavara gali 0,01 μm žingsniu perstumti kariatėlę 9 μm . Įrengimo blokinė valdymo schema pateikta 1.2pav.



2 pav. Įrengimo prieš modernizavimą blokinė valdymo schema

Fig. 2. Block management scheme of machine before modernization

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) kariatėlės pozicionavimo sistema gauna komandą perstumti kariatėlę į sekančią poziciją, 2) žingsninis variklis ir piezo pavara stumia kariatėlę, matavimo sistema perduoda duomenys apie poslinkį valdymo sistemai, 3) pasiekus užduotą poziciją, valdymo

sistema atidaro ekspozavimo sklendę ir atitinkamą laiką apšviečia ruošinį, 4) ciklas kartojamas naujai pozicijai.

Operatoriaus darbo algoritmas: 1) įjungti įrenginius ir ekspozavimo lempą, 2) parinkti ekspozavimo 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 po-

slinkį, 5) uždėti ruošinį ir užtikrinti jo paviršiaus švarumą, 6) pradėti darbinės programos vykdymą.

Modernizuoto įrengimo aprašymas

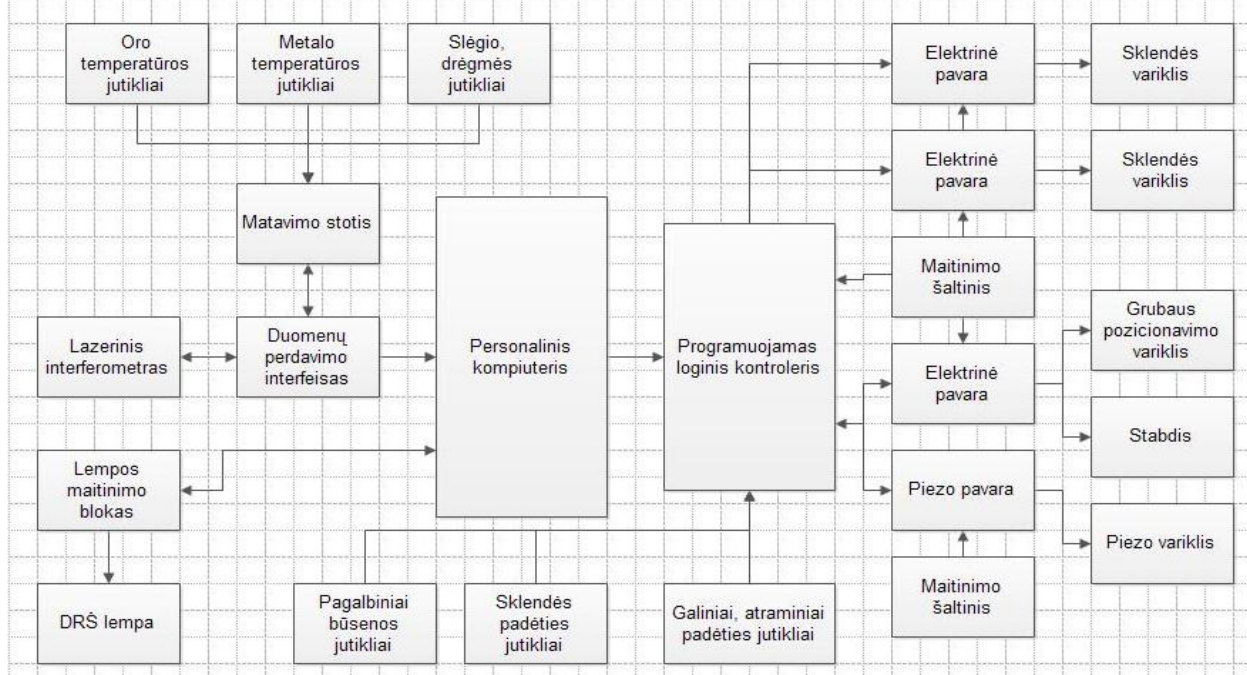
Rekonstruota sistema veikia tuo pačiu dalijimo mašinos principu, nes tai apsprendžia eksponavimo sistemos sandara. Rekonstruojant buvo pakeista dauguma automatikos elementų naujais: kariatėlės grubaus pozicionavimo žingsninis variklis, precizinio pozicionavimo piezo elementas, sklendės variklis, jų pavaros, 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 nuskaito 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 piezo elementas, pavaros, valdymo blokai. Variklis pakeistas dėl susidėvėjimo ir siekiant padidinti pozicionavimo greitį, greičių diapazoną, pozicionavimo dinamiškumą, tačiau lieka apribotas reduktoriaus dinamiinių parametrų. Piezo pavaros keitimas susijęs naujos kartos piezo 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 1.3pav.



3 pav. Modernizuoto įrengimo blokinė valdymo schema.

Fig. 3. Block management scheme of machine after modernization

Pagrindinių pakitimų ir charakteristikų palyginimas

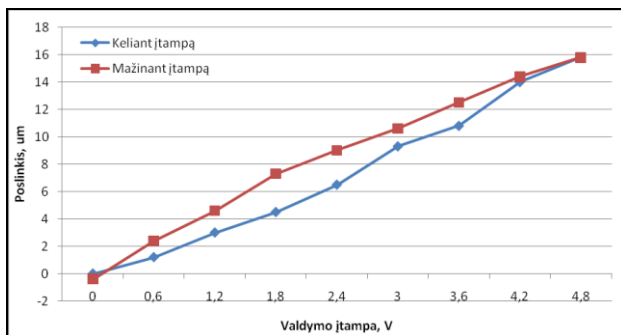
Svarbiausi pakeitimai atlikti modernizuojant fotolitografinę dalijimo mašiną:

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 piezo 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.

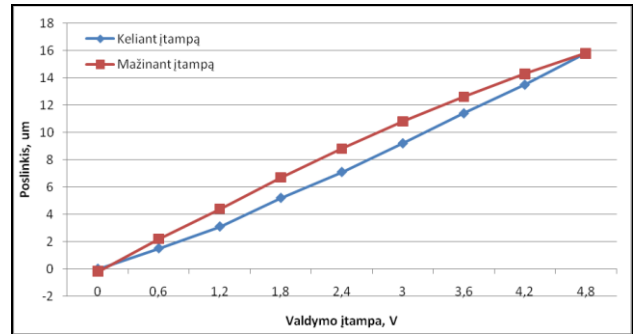
Viena iš svarbiausių dalijimo mašinos charakteristikų yra piezo elemento veikimas ir jo pastūmos mazgo histerezė [5]. Nuo piezo elemento tiesiogiai priklauso sistemos pozicionavimo tikslumas bei pozicionavimo greitis. Norint palyginti piezo elementų veikimą buvo atlikti matavimai. Matavimas buvo vykdomas abiem piezo elementams po 5 kartus, buvo matuojama naujuoju lazeriniu interferometru Renishaw ML10 ir induktyviniu kontaktiniu poslinkio matavimo prietaisu Novibra. Matavimo metu buvo kas 0,6V didinama piezo elemento valdymo įtampa, stumiant krietelę piezo elementu pirmyn, ir matuojamas jos poslinkis. Pasiekus didžiausią įtampą 4,8V, valdymo įtampa mažinama tokiu pačiu įtampos dydžiu ir užrašoma poslinkio informacija iš abiejų matavimo priemonių. Dėl trinties, bei piezo 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 piezo elementu judesio pakartojamumas pateiktas 4pav.



4 pav. Histerezės kilpa (senasis piezo elementas)

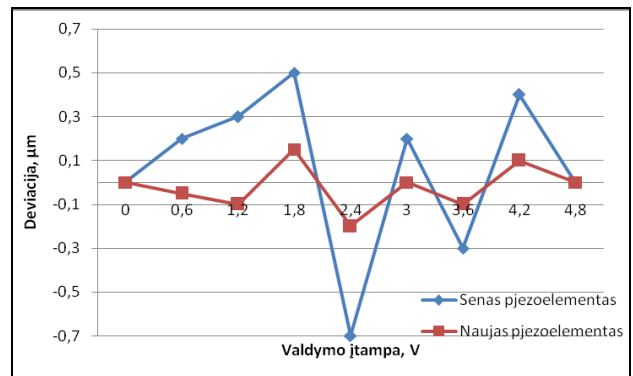
Fig. 4. Hysteresis loop (the old piezo element)

Naujasis piezo elementas pasižymi mažesnėmis valdymo įtampos savybėmis. Nustatyta modernizuoto įrengimo piezo elemento stumiančio krietelę su optine sistema histerezė ir pavaizduota histerezės kilpa 5pav.



5 pav. Histerezės kilpa (naujasis piezo elementas)

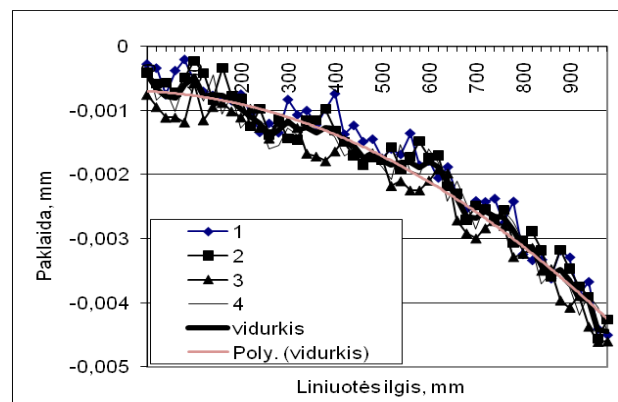
Fig. 5. Hysteresis loop (the new piezo element)



6 pav. Poslinkio didžiausia deviacija nuo vidurkio

Fig. 6. Maximum displacement deviation from the mean

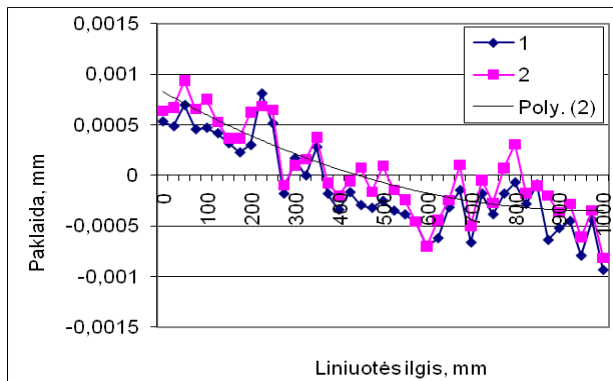
Iš gautų matavimo rezultatų galima matyti, kad naujojo piezo elemento judesio netolygumas yra mažesnis. Senojo piezo elemento maksimali deviacija nuo matavimų vidurkio 0,7μm, naujojo piezo elemento 0,2μm 1.6 pav. Didžiausia paklaida dėl piezo elemento ir sistemos histerezės bus $3,6 \pm 0,7 \mu m$, o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



7 pav. Skalės sukauptoji paklaida formuojant senu įrenginiu. 1,2 kai matavimo krietelė juda nuo interferometro, 3,4 kai matavimo krietelė juda link interferometro.

Fig. 7. Cumulative error of linear scale (old equipment)

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 $4\mu\text{m}$ sukauptoji paklaida ir matavimo sklaida $0,52\mu\text{m}$. Formuojant modernizuotu įrenginiu gauta mažesnė nei $2\mu\text{m}$ sukauptoji paklaida ir matavimo sklaida $0,35\mu\text{m}$.



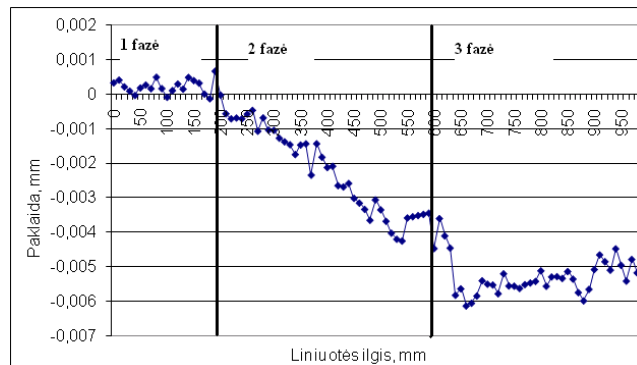
8 pav. Skalės sukauptoji paklaida formuojant nauju įrenginiu. 1- kai matavimo kareitėlė juda nuo interferometro, 2- kai matavimo kareitėlė juda link interferometro.

Fig. 8. Cumulative error of linear scale (new equipment)

Temperatūros matavimai

Visi temperatūros matavimai atlikti naudojant PP2 temperatūros matuoklį bei platininius – folinius jutiklius EN 60 751 ir platininius – lustinius jutiklius PCA 1.2010.1H, [2]. Temperatūros jutikliai, kurių metrologiniai parametrai yra tinkami matuoti su neapibrėžtimi mažesne nei 10 mK , kaip taisyklė, yra prijungiami prie elektros varžos matavimo tiltų arba nano voltmetrų, skirtų pirminiams ir antriniais temperatūros vieneto etalonams. Temperatūros matuoklis PP2 yra aukšto tikslumo temperatūros bei kitų aplinkos parametrų (pvz. drėgmės, slėgio, dujų koncentracijos ir kiti) matuoklis. Prietaisas yra pritaikytas aukšto tikslumo ilgio matavimo reikmėms. Tokius prietaisus naudoja metrologijos laboratorijos Vokietijoje, Austrijoje bei kitose Europos šalyse.

Formuojant skalės senu įrenginiu temperatūrinė kompensacija įvedama tik darbo pradžioje, todėl kintant temperatūrai darbo metu gaunamos paklaidos. Paveiksle pavaizduota skalė, kurią gaminant buvo trys patalpos temperatūros fazės. Modernizuotame įrenginyje to išvengiama aktyviai kompensuojant temperatūros, slėgio ir drėgmės įtaką matavimo sistemai.

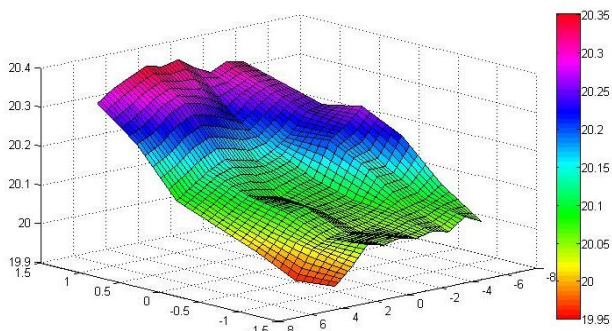


9 pav. Skalės sukauptoji paklaida formuojant senu įrenginiu, kai keičiasi patalpos temperatūra.

Fig. 9 Cumulative error of linear scale, when temperature in room changing (new equipment).

Temperatūros matavimai atlikti trijuose 1, 2, 3, lygiuose visoje termokonstantinėje patalpoje. 1 – grindų lygis, 2 – darbinis lygis (paruošos vieta), 3 – kaukės lygis. Kiekviename lygyje buvo išbuvo išdėstyti po 7 jutiklius. Atlikti tyrimai parodė patalpoje temperatūra kinta nuo $19,98^\circ\text{C}$ grindų lygyje iki $20,35^\circ\text{C}$ kaukės lygyje ties darbo vieta, nes darbo vietoje visada būna operatorius ir visai šalia yra sumontuoti visi elektronikos ir valdymo prietaisai. Temperatūros pasiskirstymas patalpoje pateiktas 10 pav. Aukščiausia temperatūra fotolitografinės dalijimo mašinos zonoje yra virš ultravioletinės ekspozavimo lempos. Atlikus matavimus 1 – lygyje didelių temperatūros pokyčių nepastebėta, 2 – lygyje temperatūra daugiausiai pakitusi virš lazerio, 3 – lygyje didžiausias temperatūros pokytis virš operatoriaus darbo vietos.

Apibendrinant atliktų tyrimų rezultatus pasitvirtino prielaida, kad pagrindiniai temperatūros pokyčių sukėlėjai yra: darbo vieta, kadangi darbo vietoje yra kompiuteris ir visi elektronikos ir valdymo prietaisai, kurie sunaudoja apie 500 W elektros energijos, šiluminiais nuostoliais virsta apie 30% sunaudojamos energijos. Darbo vietoje visada turi būti operatorius, kuris taip pat yra šiluminių pokyčių sukėlėjas. Paprastai žmogus dirbdamas fiziškai nesunkų darbą, į aplinką išskiria apie 120 W šiluminės energijos. Kitas temperatūros pokyčių sukėlėjas yra lazerinės spinduliuotės šaltinis. Jis sunaudoja apie 45 W elektros energijos ir apie 30% suvartojamos energijos paverčia šiluminiais nuostoliais. Lazerinės spinduliuotės šaltinis įrengtas taip pat toje pačioje pusėje kaip ir darbo vieta. Pats didžiausias šilumos šaltinis yra 350 W ultravioletinė ekspozavimo lempa, kuri yra pastoviai įjungta ir juda per visą fotolitografinės dalijimo mašinos ilgį. Tačiau temperatūra trikdžių zonoje nukrypsta nuo norminės oro temperatūros $-0,02^\circ\text{C}$ iki $+0,35^\circ\text{C}$.



10 pav. Erdvinio temperatūros gradiento 2 – dariniame lygyje grafikas

Fig. 10. Spatial temperature gradient 2 - Working-level schedule

Išvados

1. Sistemai įdiegus naujos kartos lazerinį interferometrą, turintį nuosavą meteorologinę stotį, supaprastėja lazerinės matavimo sistemos kalibravimas. Sistema pagal gaunamus duomenis apie aplinkos temperatūrą, drėgmę ir slėgį automatiškai kalibruoja lazerį. Išvengiama gan sudėtingo ir laiką eikvojančio sistemos kalibravimo.
2. Pakeitus skaitmeninę loginę valdymo mašiną į personalinį kompiuterį, palengvinamas operatoriaus darbas, sumažinama žmogiškojo faktoriaus įtaka originalų gamybai. Sistema tampa lankstesnė, dėl to atsiranda galimybė gaminti sudėtingesnes rastrines struktūras.
3. Naujam piezo elementui būdingas tolygesnis veikimas, bei mažesnė maksimali deviacija. Tai įgalina greičiau ir sklandžiau pozicionuoti įrengimą.
4. Pakeisti žingsniniai varikliai suteikia galimybę sistemai judėti 50mm/s greičiu. Tai yra 30mm/s greičiau nei senoji sistema. O tai kur kas sutrumpina rastrinių skalių originalų gamybos laiką.
5. Išmatuoti įrengimą supantys temperatūriniai laukai, parodo, kad patalpoje temperatūra yra stabili, bet nėra visiškai tolygi, todėl reikėtų tarp darbo ciklų karietelę su ultravioletine ekspozavimo lempa laikyti priešingoje pusėje nei darbo vieta ir kiti temperatūros pokyčių sukėlėjai.

Literatūra

1. G. Zakas, R. Bakys Projektas “Kokybiškai naujos 2D matavimo skalės sukūrimas“, Vilnius 2010.
2. Reg. Nr. VP2-1.3-ŪM-02.K 01-002
3. Kaušinis, S. Mokslinio tyrimų projekto „Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas 2007 m ataskaita (metinė)“ Kaunas 2007, 4-15p.
4. Kasparaitis, A., Skirmantas, R. Estimation of Temperature Variations during Definition of CMM Errors, Lithuanian Machine Building 22, 1991. -53p. (in Lithuanian)

5. Boensch, G., Darnedde, H. Temperature Measurement of Gauge Block Calibration. -PTB- Bericht F-17:Temperature Measurements in Dimensional Metrology. Braunschweig: PTB, 1994, 23-35p

MODERNIZATION AND TEST OF RASTER SHAPING MACHINE

K. Bardauskas, R. Lazdinas, T. Snukiškis

Summary: In Article examined photo lithographical splitting machine modernization. Presented of the old and new equipment operating principles and control logic blocks. Compare equipment performance, and speed of production. The article also taught in the original production of comparison, the temperature distribution in space, and their influence on the accuracy of scales, gives an overview of survey data. The conclusions and recommendations.

Key words: displacement of precision systems, raster scales photo lithographical splitting machine, template production, upgrading