



PRECIZINIŲ RASTRŲ FORMAVIMO SISTEMŲ ANALIZĖ

Antanas FURSENKO¹, Artūras KILIKEVIČIUS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹antanas.fursenko@vgtu.lt; ²arturas.kilikevicius@vgtu.lt

Santrauka. Atliekant tikslumo tyrimus padaryta didelė pažanga, tačiau precizinės rastrų formavimo sistemos dažnai yra per daug sudėtingos ir skirtingos, todėl sunku ar beveik neįmanoma perkelti ir pritaikyti joms šių tyrimų pasiekimų tiesiogiai. Tokių sistemų kūrimas ir tobulinimas turi remtis tyrimais specifinėje darbo aplinkoje. Precizinė rastrų formavimo sistema leidžia neidealiomis metrologinėmis sąlygomis dinamiu kalibravimo būdu pasiekti didelį kalibravimo tikslumą. Straipsnyje nagrinėjamos problemos, susijusios su precizinės rastrų formavimo sistemos mechaninės struktūros projektavimu ir jo metu kylančiais sunkumais. Remiantis mokslininkų atliktais darbais aprašomos tikslios precizinės sistemos, dirbančios dinamiu režimu.

Reikšminiai žodžiai: rastrų formavimas, kalibravimas, dinaminis režimas.

Įvadas

Aukštųjų technologijų pažanga kelia vis didesnius rastrų matavimo tikslumo reikalavimus. Brūkšniniai ilgio matai (rastrinės liniuotės iš stiklo ir metalo) plačiai naudojami kaip palyginimo matai linijiniams poslinkiams didelio tikslumo įrenginiuose: skaitmeninio valdymo staklėse, koordinatinėse ir kitose matavimo priemonėse, daugelyje kitų technologinių, automatizacijos ir kitos paskirties tikslųjų įrenginių (Jakštas 2006; Jakštas *et al.* 2008). Viena iš svarbiausių jų charakteristikų – brūkšnių padėties paklaidų dydžiai. Realios brūkšninių ilgio matų reikšmės gali būti nustatomos tik kalibruojant (Bodermann *et al.* 2003). Todėl tokių matų gamyba įmanoma tik išsprendus sieties su ilgio vieneto etalonu klausimą. Gamybą užtikrinantis kalibravimas turi būti realizuotas įterptinės metrologijos sąlygomis, t. y. kai nesudaromos etaloninės kalibravimo sąlygos (Kasparaitis *et al.* 2006). Kartu turi būti tenkinami našumo reikalavimai. Augantis pasaulio gamybos robotizavimo lygis sukelia tikslų brūkšninių ilgio matų poreikį, kuris savo ruožtu skatina tokių matų gamybos procesų greitinimą (Barakauskas *et al.* 2008). To neįmanoma realizuoti be didelio precizinių skalų kalibravimo našumo (Jakštas *et al.* 2008). Reikalaujamam našumui pasiekti kuriamos naujos matavimo sistemos ir metodai, leidžiantys neidealiomis metrologinėmis sąlygomis dinamiu kalibravimo būdu pasiekti didelį kalibravimo tikslumą. Šias problemas įmanoma išspręsti atlikus kompleksinius proceso tyrimus ir optimizavimą (Kilikevičius *et al.* 2010).

Vienas sudėtingų iššūkių, su kuriais susiduria mokslas ir aukštųjų technologijų pramonė, yra vis didėjantis poreikis įterpti susietą metrologiją tiesiogiai į technologinius procesus, atliekant tikslus dinامينius matavimus gerokai sudėtingesnėje negu kalibravimo laboratorijų aplinkoje. Ši užduotį įmanoma išspręsti tik gerai suprantant paklaidų fiziką, atlikus nuodugnius ir išsamius tikslumo tyrimus, kuriais remiantis galima pagrįsti rastrų formavimo sistemų tobulinimo kryptis ir sudaryti bandymo metodologijas.

Tikslumo tyrimai padarė didelę pažangą, tačiau precizinės rastrų formavimo sistemos dažnai yra per daug sudėtingos ir skirtingos, todėl sunku ar beveik neįmanoma perkelti ir pritaikyti joms šių tyrimų pasiekimus tiesiogiai, tokių sistemų kūrimas ir tobulinimas turi remtis tyrimais specifinėje darbo aplinkoje (Kilikevičius *et al.* 2009). Kalibravimo neapibrėžties sandara yra individuali precizinės rastrų formavimo sistemos charakteristika, nustatoma atlikus išsamų jos sandų tyrimą konkrečiomis matavimo sąlygomis.

Rastrų formavimo galimybių analizė

Linijinės skalės yra ilgio matavimo priemonės, turinčios periodinę gradaciją. Gradacija daroma ant substrato – stiklinės, metalinės ar kitos medžiagos liniuotės ar juostos. Labai ilgoms linijinėms skalėms naudojama plieninė, dažniausiai nerūdijančiojo plieno juosta. Trumpoms nedidelio tikslumo liniuotėms naudojamas polimerinis substratas, ant kurio gradacija spausdinama. Gradaciją sudaro vienodo pločio

brūkšniai ir tarpai tarp jų. Kai brūkšnio plotis ir tarpo plotis lygus, toks brūkšnių išdėstymas vienoje linijoje vadinamas rastru (Kilikevičius 2009).

Yra labai įvairių būdų norint išgauti rastrinę struktūrą ant substrato. Tai priklauso nuo reikalaujamo linijinės skalės tikslumo, gamybos kainos ir kitų rodiklių. Šiuo metu naudojami lazeriniai dangų obliavimo įrenginiai (Račiukaitis *et al.* 2007), spausdinimo ir kitos dažų užtepimo technologijos, mechaninio įbrėžimo, išpaudimo įrenginiai. Precizinė rastrinė struktūra ypač tikslioms ilgoms liniuotėms, naudojamoms pramoniniuose įrenginiuose, dažniausiai gaminama litografijos būdu (Flatscher 2003). Precizinės skalės gaminamos ant ilgos stiklinės liniuotės, kurios viena plokštuma padengta ypač kieta chromo plėvele, arba plieninės juostos su aukso plėvelės danga. Abiem atvejais litografijos proceso metu suformuojamos tam tikrų brūkšnio matmenų skalė ar kelios skalės per visą liniuotės ilgį.

Šiuo metu dažniausiai gaminamos precizinės liniuotės skalės rastro struktūros periodas yra nuo 1 μm iki 40 μm, o brūkšnio ilgis siekia iki keliolikos milimetrų. Esant tokiam tankiam brūkšnių išdėstymui ir mažam brūkšnių pločiui, brūkšnių kraštams keliami ypatingi reikalavimai. Skenuojant precizinę liniuotę fotoelektrinėmis matavimo galvutėmis, brūkšnių kraštų parametrai daro tiesioginę įtaką matavimo galvutės signalui.

Litografijos metu etaloninis piešinys perkeliamas ant gaminamos liniuotės ruošinio. Etaloninis piešinys formuojamas ant skaidraus, iš vienos pusės padengto chromo plėvele, dažniausiai stiklinio substrato, kurio storis būna nuo 4 mm iki 12 mm, bei padengto fotorezisto plėvele, multiplikuojant nedidelį kelių šimtų mikrometrų brūkšnių fragmentą. Fragmentas dažniausiai būna išdidintas du ar keturis kartus, nes multiplikavimo įrenginys turi atitinkamai mažinti objektyvą. Multiplikuojant sumažinama fragmento žingsniavimo paklaida, tačiau dėl to gali pablogėti brūkšnio krašto kokybė. Jei ant liniuotės turi būti kelios skalės, mašina grąžinama į pradinį atskaitos tašką, pakeičiamas fragmentas ir formuojama kita skalė. Dėl to, esant dideliui ilgiui, gali atsirasti tarp suformuotų skalių brūkšnių fazinis poslinkis. Paskui atliekamos fotorezisto plėvelės fiksavimo, plovimo, piešinio ėsdinimo, plovimo ir valymo procedūros. Tokiu būdu pagaminamas skalės originalas (kaukė), kurio piešinys bus perkeliamas ant produkcijos.

Jau apie dešimtmetį originalai gaminami kietojo kūno lazeriais. Nanosekundiniai ar pikosekundiniai nedidelės ir vidutinės galios lazeriai geba obliuoti ploną chromo dangos plėvelę ir tokiu būdu skalėje sukurti rastrinį ar kodinį brūkšnių piešinį (Brikas *et al.* 2007). Tokiam piešiniui formuoti reikia ne tik sudėtingų programuojamų elektronikos

įrenginių, bet ir optinių elementų sistemos. Optinė sistema leidžia vienu metu formuoti kelias skalės linijas iš karto, todėl visame skalės ilgyje neatsiranda fazinio poslinkio tarp suformuotų brūkšnių linijų.

Litografijos proceso privalumai:

- procesas lengvai suderinamas;
- gaunama labai gera brūkšnio formos kokybė (kampanai nesusiapvalina, brūkšnio kraštas tolydus);
- brūkšnius galima formuoti įvairiu kampu (tai nepriklauso nuo multiplikavimo mašinos pirminio rastrinio elemento pozicionavimo).

Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištiesiniu lazeriniu metodu privalumai:

- procesas greitas ir užtikrina didelį našumą;
- kodinė struktūra formuojama dinaminio režimu;
- visų brūkšnių orientacija vienoda.

Originalo skalės vaizdas perkeliamas ant gaminio specialia mašina, ant kurios originalas pritvirtinamas ir ant viršaus uždedamas gaminamosios liniuotės ruošinys. Ruošinys atremiamas į specialiai paruoštas atramas ir apšviečiamas ultravioletine šviesa. Ruošinio prigludimas prie originalo ir atramų veikia kopijuojamos liniuotės brūkšnių išsidėstymą ir kraštų kokybę.

Rastrinių skalių paklaidos priklauso ne tik nuo nuskaitymo sistemos, bet ir nuo jų gamybos technologijos daromų paklaidų. Gamybos technologijai ekonomiškai racionaliausias ir užtikrinantis pakankamą skaičiavimo patikimumą taikomas tikimybinis suminės paklaidos skaičiavimo metodas. Suminė paklaida $\Delta\Sigma$ skaičiuojama pagal tokią formulę:

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

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

Ši metodika yra universalī skalių tikslumo analizei ir taikoma įvairių skalių formavimo metodų tikslumui įvertinti. Toliau vardijami gauti bendrieji skalių formavimo paklaidų skaičiavimo rezultatai.

Tikslaus originalo fragmento pozicionavimo metodu

$\Delta_{\Sigma tp} = \pm 3,09 \mu m$. Pagrindiniai šios paklaidos sandai:

- originalo fragmento rastrinio piešinio padėties jo bazinių paviršių atžvilgiu paklaida;
- originalo fragmento sugriebimo paklaida, manipulatoriaus pozicionavimo paklaida.

Originalo fragmento ir ruošinio žymių sutapdinimo metodui $\Delta_{\Sigma zi} = \pm 1,40 \mu\text{m}$. Pagrindinis paklaidos sandas – sutapdinimo žymių ant ruošinio išdėstymo paklaida.

Ištisiam fotolitografiniam metodui $\Delta_{\Sigma fc} = \pm 1,03 \mu\text{m}$. Pagrindiniai šios paklaidos sandai:

- originalo formavimo įrenginio tiesaus judesio linijinė paklaida rastro formavimo plokštumoje statmenai pagrindiniam judesiui; mechaninis ir terminis dreifas išilgai formuojamos skalės, vykstantis tarp atskirų rastrinių takelių eksponavimo pradžių;
- rastro formavimo sistemos ir ruošinio santykinio poslinkio matavimo paklaida.

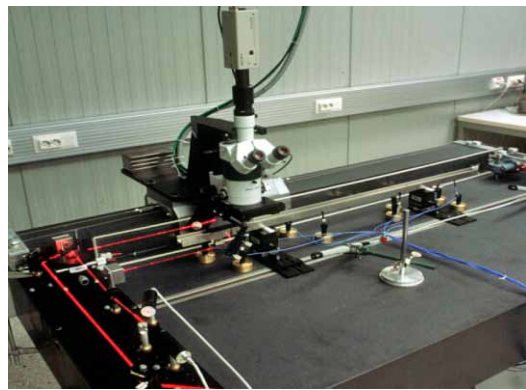
Ištisiam lazeriniam metodui $\Delta_{\Sigma li} = \pm 0,84 \mu\text{m}$. Pagrindiniai paklaidos sandai: mechaninis ir temperatūrinis dreifas išilgai formuojamos skalės, vykstantis tarp atskirų rastrinių takelių eksponavimo pradžių; originalo formavimo įrenginio tiesaus judesio linijinė paklaida rastro formavimo plokštumoje statmenai pagrindiniam judesiui; rastro formavimo sistemos ir ruošinio santykinio poslinkio matavimo paklaida.

Tikslų ilgio matų kalibravimo sistemų analizė

Ilgio matavimo komparatoriaus tobulinimo galimybes galima įvertinti, remiantis dvylikos šalių dalyvavusių linijinių skalių kalibravimo palyginimuose NANO-3 (2003 m.), programos ataskaitoje pateiktais detaliais duomenimis apie matavimo duomenų neapibrėžties sandų reikšmes. Šių duomenų analizė rodo, kad nuo ilgio nepriklausantys neapibrėžties sandai, lemiantys kartojimosi paklaidos dydį, gali būti sumažinti, padidinant kalibruojamos linijos vaizdo fokusavimo tikslumą, jos detektavimo sistemos skyrą, kompensuojant atsitiktinių geometrinų, temperatūrinių ir kt. paklaidų įtaką. Nuo ilgio priklausantiems sandams sumažinti sugriežtinamos tolerancijos paveikiesiems dydžiams, ypač aplinkos sąlygoms, arba naudojami brangūs vakuuminiai komparatoriai.

Tikslumo tyrimams, siekiant pagerinti metrologines etaloninių ilgio kalibravimo sistemų savybes ir patikslinti jų neapibrėžties sandarą, daug dėmesio skiria išsivysčiusių šalių nacionaliniai metrologijos institutai ir precizinę produkciją gaminančios firmos. Remiantis atliktais tyrimais tobulinamos esamos sistemos ir komponentai, kuriams nauji inovatyvūs sprendimai, kurie patentuojami. Tyrimų rezultatai neskelbiami arba skelbiami labai ribotai, ypač pramoninių firmų. Tačiau šie tyrimai nėra sistemiški ir liečia daugiausia struktūrinius sistemų komponentus.

Suomijos NMI linijinių skalių komparatoriuje panaudotas fotoelektrinis mikroskopas su CCD kamera, dirbantis dinaminio režimu, parodytas 1 pav. (Kaušinis 2007). CCD matricoje pateikiamas vaizdas $0,2 \times 0,2 \text{ mm}$. Matricos

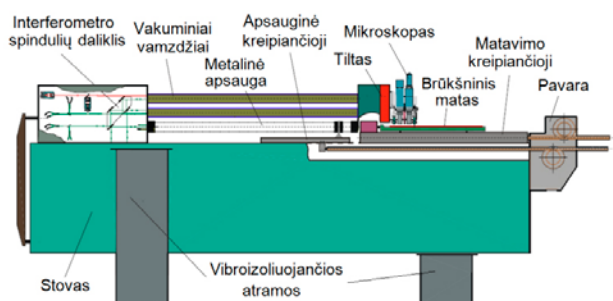


1 pav. Suomijos NMI interferometrinis komparatorius su fotoelektriniu mikroskopu ir CCD kamera (Kilikevičius 2009)

Fig. 1. Interferometrical comparator with photoelectric microscope and with CCD camera of Finland National Measurement Institute

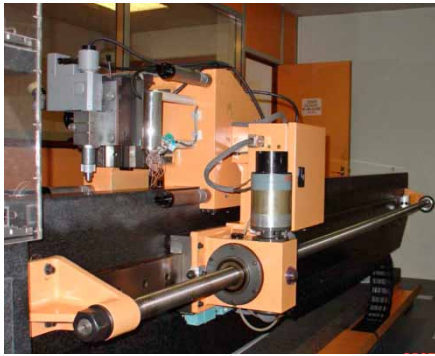
eilučių žingsnis atitinka 554 nm atstumą skalės paviršiuje. Kamera pateikia du vaizdo laukus, įkraunamus per 1 ms. Kitas laukas gaunamas po 20 ms. CCD kameros jautris pakankamas ryškiam linijos vaizdui gauti, esant 1/1000 s eksponavimo laikui.

Metrologinės programos ilgio matavimo srityje nuolat vykdomos JAV, Japonijoje, Anglijoje, Vokietijoje. Programos padeda sukurti metrologinę infrastruktūrą, didinančią pramonės konkurencingumą, palaikančią inovacijas pramonėje ir gerinančią gamybos procesų ir kokybės valdymą. Pvz., sisteminiai vakuuminio nanokomparatoriaus tikslumo tyrimai, atlikti Vokietijos nacionaliniame metrologijos institute (PTB) 2000–2006 m., leido sumažinti matavimų kartojimosi paklaidą nuo 14 iki 0,2 nm. JAV nacionaliniame metrologijos institute (NIST) kuriamas naujos kartos ilgio komparatorius, kurio matuojamasis ruožas $1 \times 10^{-7} \text{ m} \leq L \leq 1 \text{ m}$, o atitinkama kalibravimo neapibrėžtis – nuo 1 iki 10 nm. PTB nanokomparatorius (2 pav.) plačiai aprašytas kai kuriuose šaltiniuose (Kaušinis 2007; Flügge, Dai 2000; Flügge *et al.* 1999; Koenig *et al.* 2005; Bosse, Flügge 2001). Mechaninę dalį sudaro masyvus granito blokas, kurio masė – apie 6000 kg. Stovo paviršių, naudojamų oro kreipikliams, nuokrypiai nuo plokštumo neviršija 1 μm .



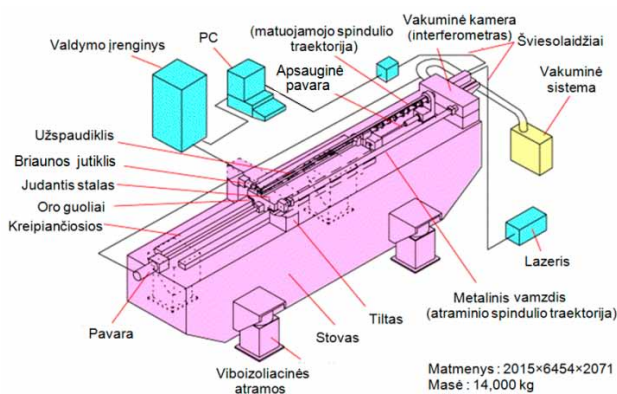
2 pav. PTB nanokomparatoriaus schema (Kilikevičius 2009)

Fig. 2. Scheme of the PTB Nanocomparator



3 pav. LNE linijinių skalų komparatorius (Kilikevičius 2009)

Fig. 3. LNE line scale comparator



4 pav. Principinė vakuuminio komparatoriaus schema (Sawabe *et al.* 2004)

Fig. 4. The principal scheme of the vacuum comparator

Nacionaliniame Prancūzijos metrologijos institute, skirtingai nei prieš tai minėtuose ilgio matų kalibravimo įrenginiuose, kalibravimo įrenginyje (LNE) naudojama riedėjimo sraigto ir veržlės pavara (3 pav.) (Kaušinis 2007).

Pramonės įmonės taip pat vykdo intensyvius taikomuosius tyrimus ir tobulina ilgio matavimo sistemas. Japonijos firma „Mitutoyo“ yra sukūrusi vakuuminį komparatorių (4 pav.) brūkšniniams (iki 1,6 m ilgio) matams kalibruoti, kai neapibrėžtis ≤ 40 nm/m (Sawabe *et al.* 2004). Ji sukūrė inovatyvią greito linijos detektavimo sistemą, naudodama fotoelektrinį mikroskopą su trimis analizavimo plyšiais, ir pasiekė 20 mm/s dinaminio kalibravimo greitį. Vokietijos firma „Dr. Johannes Heidenhain GmbH“ taip pat kuria vakuuminių komparatorių brūkšniniams matams iki $L \leq 3$ m kalibruoti. Tačiau pramoninių firmų tyrimo rezultatai dažniausiai neskelbiami arba pristatomi labai ribotai, o inovatyvūs sprendimai patentuojami.

Brūkšnio detektavimo aparatūrinė realizacija: CCD mikroskopas, plyšinis fotoelektrinis skenuojantysis mikroskopas. Brūkšniui detektuoti profilis nupjaunamas tam tikrame lygyje tiesiškai aproksimuojant, naudojamas gradiento operatorius ir kt. (PTB 2003).

Daugumos minėtų komparatorių matavimo ilgis siekia tik 1 m. Vokietijos firma „Dr. Johannes Heidenhain GmbH“ kuria vakuuminį komparatorių brūkšniniams matams iki 3 m ilgio kalibruoti, tačiau tyrimo rezultatai pristatomi labai ribotai (Kilikevičius 2009). Daugumos komparatorių išplėstinės neapibrėžties komponentė, priklausanti nuo ilgio, yra didesnė nei 0,08 μ m tik PTB2. Nanokomparatoriaus, veikiančio ypač aukšto stabilumo termokonstantinės patalpos sąlygomis, ši neapibrėžties dedamoji nuo ilgio siekia 0,015 μ m.

Išvados

Atlikus rastrų formavimo ir kalibravimo įrenginių apžvalgą nustatyta, kad dinaminio rastrų formavimo ir kalibravimo problematika aktuali, mažai tyrimų skirta realios brūkšninių matų kalibravimo sistemos formavimo ir kalibravimo paklaidoms. Literatūroje pažymima, kad kiekvienos kalibravimo sistemos struktūra, konstrukcija ir matematinė programinė įranga individualiai veikia sistemos tikslumą, todėl kitų tyrimų rezultatai tiriamoje sistemoje gali nepasitvirtinti.

Literatūra

- Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Kojelavičius, P.; Šukys, A. 2008. Compensating accuracy of ABBE errors of linear laser calibrator, in *Proceedings of 13th International Conference Mechanika – 2008*, 3–4 April 2008, Kaunas, Lithuania, 39–43. ISSN 1822–2591.
- Bodermann, B.; Buhr, E.; Mirande, W. 2003. *Quantitative Mikroskopie: Dimensionelle Messtechnik an Mikro- und Nanostrukturen*. PTB Mitteilungen. Heft 4: 113.
- Bosse, H.; Flügge, J. 2001. Requirements and recent developments in high precision length metrology, in *Proceedings of the 159 PTB-Seminar*, 28–29 November 2001, Braunschweig, Germany. 180 p.
- Brikas, M.; Račiukaitis, G.; Gedvilas, M. 2007. Accumulation effects during processing of metals and silicon with repetition-rate lasers, *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 273: 645–656.
- Flatscher, G. 2003. *Reflective measuring scale graduation and method for its manufacture*. US patent number 6671092. 30 December 2003. Dr. Johannes Heidenhain GmbH.
- Flügge, J.; Dai, G. 2000. Design of the temperature measurement and control system at the PTB nanometer comparator, in *Proc. of the 1st Euspen Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology 2*: 303–309.
- Flügge, J.; Dangschat, H.; Spies, A.; Tschirnich, J.; Piele, H. 1999. Concept of a interferometric length comparator with measurement uncertainties in the nanometer scale, in *1st Euspen international Conference*, 31 May – 4 June 4 1999, Bremen, Germany, 227–230.
- Jakštas, A. 2006. *Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas: daktaro disertacija*. KTU, Kaunas, Lietuva.

- Jakštas, A.; Kaušinis, S.; Barauskas, R.; Barakauskas, A.; Kasparaitis, A. 2008. Software based control techniques for precision line scale calibration, in *Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference* 5(8): 223–226. <https://doi.org/10.1109/bec.2008.4657520>
- Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevichius, A. 2006. A vibration source in comparator, in *Seventh International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Proc. of SPIE*, 6345: 6345O-1.
- Kaušinis, S. 2007. *Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas*. Aukštųjų technologijų plėtros programos projektas, Reg. Nr. B-07039. Ataskaita. 178 p.
- Kilikevičius, A. 2009. *Ilgio matavimo mechatroninio komparatoriaus dinaminis paklaidų tyrimas*: daktaro disertacija. VGTU, Vilnius.
- Kilikevičius, A.; Jurevičius, M.; Berba, M. 2010. Research of dynamics of a vibration isolation platform, *Journal of Vibroengineering* 12(3): 361–367.
- Kilikevičius, A.; Petraška, A.; Juraitis, S. 2009. Measurement errors of comparator on carriage vibrations, *Journal of Vibroengineering* 11(4): 658–664.
- Koenig, R.; Fluegge, J.; Bosse, H. 2005. Characterising the performance of the PTB line scale interferometer measuring photoelectric encoders, in *Proc. SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements* 5879: 08–1–08–9. <https://doi.org/10.1117/12.616332>
- PTB. 2003. *WGDM-7 Preliminary comparison on nanometrology according to the rules of CCL key comparisons Nano3, Line Scale Standards*. Final Report. Braunschweig. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 119 p.
- Račiukaitis, G.; Brikas, M.; Darčianovas, G.; Ruthe, D.; Zimmer, K. 2007. Laser structuring of conducting films on transparent substrates, in *Proc. SPIE 6732, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies*, 28 May 2007, Minsk, Belarus, 67320C. <http://dx.doi.org/10.1117/12.751895>
- Sawabe, M.; Maeda, F.; Yamaryo, Y.; Simomura, T.; Saruki, Y.; Kubo, T.; Sakai, H.; Aoyagi, S. 2004. A new vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear encoders and scales, *Precision Engineering* 28: 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2003.11.007>

ANALYSIS OF THE PRECISE RASTER-FORMING SYSTEMS

A. Fursenko, A. Kilikevičius

Abstract

The precision raster-forming systems creation and development must be based on research in the specific work environment. In not ideal metrological conditions the precision raster-forming system allows to achieve high accuracy of the calibration, when used dynamic calibration method. The article discusses about mechanical design of precision raster-forming systems. According to the scientists' works describes the precision systems, which working in the dynamic mode.

Keywords: raster formation, calibration, dynamic mode.