



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Alius Galdikas

ETALONINIO SUKLIO JUDESIO PAKLAIDŲ ĮTAKA KAMPŲ

KALIBRAVIMO TIKSLUMUI

INFLUENCE OF ETALON SPINDLE MOVEMENT ERRORS TO

ANGLE CALIBRATION ACCURACY

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. Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Alius Galdikas

ETALONINIO SUKLIO JUDESIO PAKLAIDŲ ĮTAKA KAMPŲ

KALIBRAVIMO TIKSLUMUI

INFLUENCE OF ETALON SPINDLE MOVEMENT ERRORS TO

ANGLE CALIBRATION ACCURACY

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

Mechanikos studijų kryptis

Vadovas prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas A. Petrėtienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Mechatronikos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Prof. Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Aliui Galdikui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Etaloninio suklio judesio paklaidų įtaka kampų kalibravimo tikslumui

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

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2011m. birželio 3 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

.....Kampo matavimo sistemų, limbų kalibravimo metodų ir priemonių apžvalga, ir analizė.
Limbų ir keitiklių apžvalga. Precizinių suklių apžvalga. Suklio radialių sukimosi paklaidų
teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, rezultatų apdorojimas ir analizė. Kampo matavimo
sistemos kalibravimo be etaloninės sistemos metodikos sudarymas. Išvados. Literatūra.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas
(Parašas)

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

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....Alius Galdikas.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Data-.....-.....

Mechanikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Etaloninio suklio judesio paklaidų įtaka kampų kalibravimo tikslumui**

Autorius **Alius Galdikas**

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

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos kampų matavimo stendo, sukurto UAB „Precizika Metrology“, etaloninio suklio sukimosi paklaidos. Pateikta kampų matavimo sistemų, limbų kalibravimo metodų ir priemonių apžvalga. Atlikta precizinių suklių apžvalga ir analizė, pateiktos pagrindinės konstrukcinės schemos. Aprašomas tiriamas objektas, jo valdymo įrenginiai ir naudojama aparatūra. Atlikta etaloninio suklio paklaidų aproksimacija parametrinėmis funkcijomis. Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad mova, kuri jungia sliekraštį su sukliu, turi didelę įtaką radialinėms suklio sukimosi paklaidoms. Pateiktos išvados.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, analitinė dalis, teoriniai tyrimai, eksperimentiniai tyrimai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 55 p. teksto be priedų, 34 iliustr., 3 lent., 22 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai:

etaloninis suklys, kampinis komparatorius, kampinis keitiklis, mova.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of **mechanics**
Department of **machine building**

ISBN ISSN
Copies No. 1
Date-.....-.....

Final work for Master of **Mechanical Engineering**

Title: **Influence of etalon spindle movement errors to angle calibration accuracy**

Author **Alius Galdikas**

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

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

Thesis, we consider the angles of measurement bench developed by the company "Precizika Metrology ", the standard error of the spindle rotation. Submitted angle measuring systems, rotary scale calibration methods and tools for review. Performed precision spindle overview and analysis of the main design of the scheme. Describes the studied object, the control equipment and the equipment used. Performed the standard errors of the spindle function approximation parameters. Summarizing the results obtained showed that the coupling that connects the spindle to disc have a significant impact on the radial spindle rotation errors. The conclusions.

Structure: introduction, analytical part, theoretical studies, experimental studies, conclusions, references.

Thesis consist of: 55 p. text without appendixes, 34 pictures, 3 table, 22 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords:

standard spindle, angle comparator, angle converter, coupling.

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

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

(Fakultetas)

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2011 m. _____ d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema _____

patvirtintas 20 _____ m. _____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____, 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 specialistai: _____

Mano darbo (projekto) vadovas _____

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

(Parašas)

(Vardas ir pavardė)

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	10
1. KAMPO MATAVIMO SISTEMŲ IR LIMBŲ KALIBRAVIMO METODŲ IR PRIEMONIŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ	12
1.1. Kalibravimo objektų apžvalga, analizė ir sisteminimas	12
1.2. Kampo matavimo sistemų ir priemonių apžvalga	15
1.3. Aerostatinių suklių apžvalga ir analizė	21
1.4. Kampų matavimo sistemos pavara	26
2. TEORINIAI TYRIMAI	30
3. TYRIMŲ OBJEKTO IR APARATŪROS APRAŠYMAS	33
3.1. Kampo komparatoriaus sistemos komponentės ir reikalavimai joms	37
3.2. Kampo komparatoriaus matavimo sistema	38
3.3. Precizinio kampo kalibratoriaus informacinė struktūrinė schema	40
3.4. Mechaniniai mazgai ir sistemos, užtikrinančios kalibratoriaus funkcionalumą	43
3.5. Kalibravimo objektai	43
4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	45
4.1. Tyrimų rezultatai	46
5. KAMPO MATAVIMO SISTEMOS KALIBRAVIMO BE ETALONINĖS SISTEMOS METODIKA	50
5.1. Dviejų limbų A ir B tarpusavio kalibravimas	50
IŠVADOS	53
LITERATŪRA	54

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Matavimų technikoje naudojamų apskritiminių skalių ir brūkšnių pavyzdžiai	12
1.2 pav. Kodinė skalė (limbas)	13
1.3 pav. Fotoelektrinis kampinis keitiklis.....	14
1.4 pav. Didelio tikslumo kampų matavimo schemas.....	15
1.5 pav. Poligonas su aštuoniais veidrodiniais paviršiais	16
1.6 pav. Poligono/autokolimatoriaus veikimo principas	17
1.7 pav. Precizinio staliuko tikslumo matavimas poligonu/autokolimatoriumi	17
1.8 pav. Moore's Precision Index matavimo prietaisas, veikiantis žiedinių galinių dantukų ..	18
sukabinimo principu	18
1.9 pav. Kampų matavimo prietaisas – lazerinis girometras.....	19
1.10 pav. Posūkio sistema su riedėjimo guoliais ir kūginėmis V formos kreipiamosiomis	22
1.11 pav. Aerostatinis špindelis su V formos kreipiančiosiomis schema.....	23
1.12 pav. Suklio su V formos kūginiais paviršiais bendras vaizdas.....	23
1.13 pav. Suklio su aerostatiniais guoliais, turinčiais sferinius paviršius, schema	24
1.14 pav. Suklio ir jo veleno su sferiniais darbiniais paviršiais vaizdas	25
1.15 pav. Suklys su aerostatiniais guoliais turinčiais cilindrinis ir plokščius paviršius	25
1.16 pav. Aerostatinis suklys NELSON AIR RT 200L.....	26
1.17 pav. Sistemingosios paklaidos technologinio koregavimo mechanizmas	27
1.18 pav. Bronzinis precizinis sliekratis	29
2.1 pav. Radialiojo mušimo nuokrypiai	32
3.1 pav. Kalibratoriaus schema.....	35
3.2 pav. Daugiabriaunės prizmės ir autokolimatoriaus pastatymo schema	36
3.3 pav. Kalibratoriaus su kalibruojamuoju keitikliu schema	36
3.4 pav. Detali precizinio kalibratoriaus struktūrinė schema	38
3.5 pav. Informacinė struktūrinė schema.....	40
4.1 pav. Radialijų paklaidų matavimo stendo bendras vaizdas	45
4.2 pav. Pavyzdinės sferos vaizdas.....	46
4.3 pav. A – matavimų duomenys; B – pirmoji harmonika	47
4.4 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos su mova, kai P_{min}	47
4.5 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos su mova, kai P_{vid}	48
4.6 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos su mova, kai P_{max}	48
4.7 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos be movos, kai P_{min}	49
4.8 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos modernizavus mova	49
5.1 pav. Dviejų limbų A ir B tarpusavio kalibravimas.....	50
5.2 pav. Nuskaitomojo brūkšnelio padėties ženklas.....	51

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Globoidinės slieko ir sliekračio pavaros techniniai parametrai	28
5.1 lentelė. Matavimo reikšmės	52
5.2 lentelė. Padalų vertės (A-B)	52

Ivadas

Metrologija ir matavimų technologija užima svarbią vietą šiuolaikinėje visuomenėje. Matavimų mokslo uždavinys yra išplėsti objektyvių matavimų ribas. Didėjant visuomenės poreikiams nuolat tobulinamos matavimų technologijos, taikomi pažangiausi jų projektavimo ir įgyvendinimo metodai. Metrologinė infrastruktūra sudaro svarbią išsivysčiusių šalių technologinės infrastruktūros dalį.

Remiantis matavimų mokslo ir informacinių technologijų pažanga buvo gerokai išplėstos matavimų technologijų galimybės. Tai akivaizdžiai matyti panagrinėjus matavimų vaidmenį sprendžiant aplinkos bei techninių sistemų monitoringo, identifikavimo, diagnozavimo, teisinės metrologijos, metrologinės ekspertizės, gaminių ir procesų sertifikavimo, jų atitikties, kokybės užtikrinimo ir kitus klausimus.

Mechatroniniai įrenginiai taikomi precizinėse mechaninėse sistemose – labai tikslų staklių ir mašinų konstrukcijose, matavimo prietaisuose ir įrenginiuose. Dabartinėse matavimo sistemose tiesiog neįmanoma apsieiti be mechatroninių elementų panaudojimo. Šiuolaikinės mechatroninės sistemos geba jautriai reaguoti į aplinką, yra lanksčiai programuojamos ir lengvai valdomos per fiksuotą ar bevielį ryšį, pasižymi gausia taikymo įvairove, nes jų elementams naudojamos „protingos“ medžiagos.

Informacinės kampų matavimo sistemos bei jų elementai – rastrinės ir kodinės skalės, kampo keitikliai, žiediniai lazeriai (lazeriniai girometrai) yra labai plačiai naudojami automatizuotose staklėse ir mašinose, robotų valdymo sistemose, matavimo prietaisuose ir navigacijos įrenginiuose. Linijinių poslinkių mechanizmai ir mašinos bei matavimo technika yra labai gerai išnagrinėti ir aprūpinti matavimo technika bei etalonais. To negalima pasakyti apie kampinių matavimų prietaisus ir sistemas. Kampų matavimo sistemų tikslumo parametrų tikrinimas reikalauja specialios įrangos ir kampo etalonų panaudojimo, o didelė šiuolaikiniuose įrenginiuose ir prietaisuose naudojamų kampų matavimo sistemų įvairovė dar labiau apsunkina šį uždavinį [3].

Tiesės ir jų ilgiai, kampai ir apskritimai gali būti traktuojami, kaip vieni iš svarbiausių geometrinių mašinų tikslumo elementų. Geometrinių tikslumo elementų matavimo būdai ir priemonės sudaro svarbią metrologijos sritį. Tiesiaiegiai ir kampiniai poslinkiai apibūdina objekto padėties pokytį erdvėje, jais yra nustatomi šeši objekto laisvės laipsniai, apibūdinantys objekto padėtį. Ilgių ir kampų matavimai sudaro pamatą kitiems su tuo susijusiems tyrimams ir matavimams pagrįsti. Kampo komparatorius – prietaisas, naudojamas tiksliai santykiniams matavimams atlikti lyginant matuojamąjį objektą (pvz., brūkšninę apskritiminę skalę, kampinį keitiklį ir pan.) su etaloniniu tos rūšies matu.

Tyrimo objektas. Šiame darbe nagrinėjamos etaloninio suklio komparatoriuje sukimosi paklaidos.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Pagrindinis darbo tikslas – ištirti ir nustatyti suklio judesio paklaidų įtaką kampų kalibravimo tikslumui.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

- 1) Išmatuoti etaloninio suklio komparatoriuje radialines paklaidas.
- 2) Nustatyti suklio paklaidų priklausomybę nuo jį įtakojančių elementų poveikio.
- 3) Aprašyti kampo matavimo sistemos kalibravimo be etaloninės sistemos metodiką.

Temos naujumas. Sukurtas unikalus, limbų bei kampinių keitiklių, kampus matuojantis kampo kalibravimo įrenginys, kuris gali būti kampo etalonu.

Temos aktualumas. Besivystanti pramonė reikalauja vis didesnio, šiuolaikiniuose įrenginiuose ir prietaisuose naudojamo, kampinio pozicionavimo tikslumo. Kampų kalibravimo tikslumo didinimas yra vienas iš pagrindinių užduočių, siekiant sukurti pažangias technologijas.

Tyrimo metodai. Etaloninio suklio sukimosi paklaidos išnagrinėtos eksperimentinių matavimų duomenis aproksimavus parametrinėmis funkcijomis.

Darbo mokslinė vertė. Nustatytos suklio sukimosi paklaidos leidžia tiksliau įvertinti kampo komparatoriaus kalibravimo tikslumą.

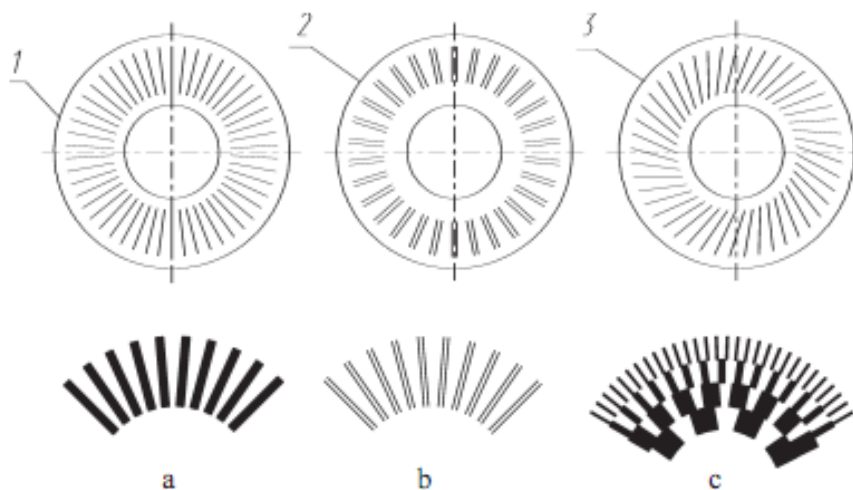
Darbo aprobacija. Keturioliktojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“, skaitytas pranešimas „Etaloninio suklio komparatoriuje tikslumo tyrimas“.

1. Kampo matavimo sistemų ir limbų kalibravimo metodų ir priemonių apžvalga ir analizė

1.1. Kalibravimo objektų apžvalga, analizė ir sisteminimas

Matavimo technikoje – atskaitymo sistemose, pasukamų optinių stalų matavimo sistemose, mikroskopuose, teodolituose, komparatoriuose ir kt. – naudojamų apskritiminių skalių ir jų brūkšnių pavyzdžiai yra parodyti 1.1 – 1.2 pav.

Informacijai apie objekto kampinę padėtį gauti yra naudojamos labai įvairių tipų apskritiminės skalės (1.1 pav., 1–3) bei brūkšniai (1.1 pav., a–c). Kodinis limbas yra parodytas 1.2 pav.



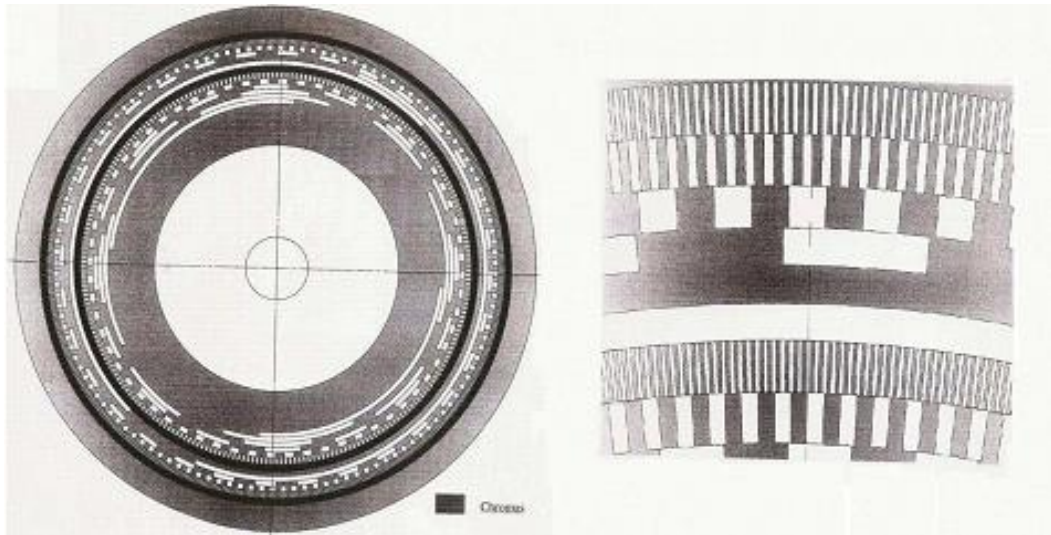
1.1 pav. Matavimų technikoje naudojamų apskritiminių skalių ir brūkšnių pavyzdžiai:

1 – rastrinė skalė; 2 – skalė, turinti dvigubus brūkšnius;

3 – rastras, kurio brūkšniai yra necentriniai; a – stačiakampiai brūkšniai;

b – dvigubi brūkšniai; c – kodinės skalės padalos

Dėl sparčios techninės pažangos labai dideli reikalavimai yra keliama kampų etalonams ir pavyzdiniams matams. Šiuolaikinių staklių ir mašinų tikslumo parametrai tiek padidėjo, kad ir žemesnio tikslumo laipsnio matai bei gamyboje naudojami darbiniai matai turi būti vienos kampinės sekundės bei vieno mikrometro tikslumo lygio atitinkamai vieno apsisukimo ir vieno metro diapazone [8].



1.2 pav. Kodinė skalė (limbas)

Kaip valstybiniai plokščiojo kampo etalonai bei pamatiniai matai daugiausia yra naudojamos iš specialių metalo lydinių arba iš kvarcinio stiklo pagamintos daugiakampės prizmės, į kurių briaunų plokštumas yra nukreipiamas autokolimatoriaus spindulys. Atsispindėjusio šviesos spindulio nuokrypa nuo optinės ašies išmatuojama autokolimatoriaus rodmenų bloke. Kaip pamatinis kampų matas yra naudojamas ir tikslus limbas, paprastai pagamintas iš kvarcinio stiklo arba specialių lydinių, garantuojančių ilgalaikį matmenų stabilumą. Prie tokio mato dar turi būti specialūs justavimo mechanizmai, fotoelektriniai mikroskopai, skirti tiksliai limbo brūkšnių padėčiai matuoti, be to – ir limbo pasukimo įrenginys. Kaip ir daugelyje labai tikslų matavimo prietaisų, pamatinio mato skalės yra sužymėtos ant kvarcinio stiklinio disko galinio paviršiaus arba naujasidabrio (neizilberio, vok., *neusilber*, pažodžiui, naujasis sidabras – vario lydinys, turintis 20 % cinko ir 15 % nikelio) arba sidabro juostelių, įpresuotų į griovelį esantį kito metalo (dažniausiai, bronzos) disko paviršiuje. Labai tikslios skalės, skirtos optinėms matavimo sistemoms bei kampo keitikliams, yra pagamintos chromo, sidabro, aukso dangose ant stiklo, bronzos bei metalo lydinių diskų paviršių.

Pagal valstybinius standartus pirminį plokščiojo kampo etaloną sudaro komplektas šių matavimo priemonių: interferencinis egzaminatorius, skirtas kampo vienetams nustatyti ir jiems perduoti mažų kampų diapazone; kampų matavimo stendas vieneto vertei perduoti su autokolimatoriumi; dvylikos arba daugiau kampų kvarco prizmė, naudojama etalono stabilumui tikrinti. Plokščiojo kampo reikšmė nuo 0° iki 360° pradedant nuo etalono žemesnio laipsnio matams yra perteikiama 10° diskretiškumu. Kai kada kaip plokščiojo

kampo etalonas yra naudojamas kampų matavimo prietaisas, turintis galinių dantukų žiedinius susikabinančius diskus (prietaisas, žinomas kaip *Moore's 1440 Precision Index*) [9].

Precizinės apskritiminės skalės yra montuojamos į fotoelektrinius kampų matavimo keitiklius. Vieno iš jų, A110, pavyzdys yra parodytas 1.3 pav. (pagamintas UAB „PRECIZIKA METROLOGY“).



1.3 pav. Fotoelektrinis kampinis keitiklis

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

Fotoelektriniai kampinių poslinkių keitikliai yra skirti poslinkiams registruoti, matuoti ir keisti į elektrinius signalus, suteikiančius informaciją apie poslinkio kryptį ir dydį. Informacija apie kontroliuojamąjį dydį pateikiama šviesos srauto Φ intensyvumu.

Kampo keitikliai yra naudojami metalo pjovimo staklių sukamųjų stalų pasukimo kampams matuoti ir valdyti, matavimo prietaisų kampų atskaitymo ir matavimo sistemose, pramoninių robotų kampinių dydžių matavimo ir valdymo sistemose. Robototeknikoje yra itin reikalingas didelis informacijos kiekis apie atliekamą judesį, todėl yra duomenų apie kampo keitiklio, duodančio 100000 impulsų vieno apsisukimo metu, naudojimą roboto griebtuvo konstrukcijoje.

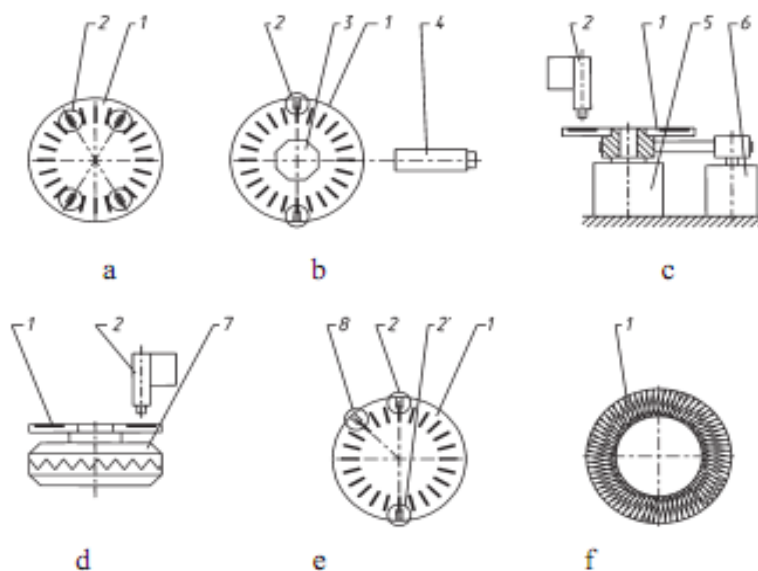
Naudojamų pramonėje kampo keitiklių impulsų vieno apsisukimo metu skaičius būna tokių dydžių: 100; 250; 500; 600; 1024; 1500; 2000; 2500; 5000; 25000; 32400 ir kt. Generuojamų impulsų skaičius būna dvejetainės, dešimtainės bei šešiatainės laipsnių sistemose.

Siekiant užtikrinti pagaminto limbo kokybę bei fotoelektrinio kampinio keitiklio parodymų tikslumą, juos būtina kalibruoti. Kokybės tikrinimas atliekamas kampo komparatoriumi lyginant limbus bei kampo keitiklius su aukštesnio lygio etalonu.

1.2. Kampo matavimo sistemų ir priemonių apžvalga

Žemiau pateiktos kai kurios matavimų technikoje naudojamos kampų matavimo schemas (1.4 pav.). Bendrieji elementai, kurie yra būdingi kiekvienam iš schemoje nurodytų matavimų yra šie:

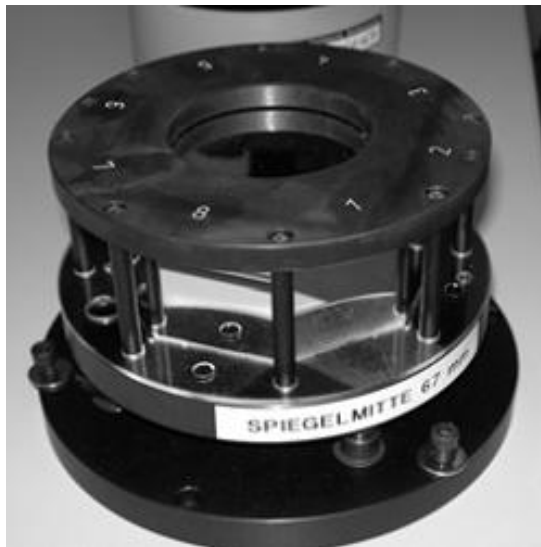
- matuojamasis objektas – kampų sukamas objektas, limbas arba apskritiminė skalė;
- pamatinis etalonas;
- atskaitos priemonė arba prietaisas;
- sukimo pavara.



1.4 pav. Didelio tikslumo kampų matavimo schemas: 1 – matuojamasis limbas; 2 – mikroskopai; 3 – daugiakampė prizmė; 4 – autokolimatorius; 5 – kampo keitiklis; 6 – pavara; 7 – kampų matavimo prietaisas; 8 – papildomas mikroskopas;
 a – matavimas kalibruojant pasirinkto pastovaus kampo vertę visame apskritime;
 b – matavimas daugiakampe prizme ir autokolimatoriumi; c – matavimas stabilaus matuojamosios skalės sukimo metu; d – matavimas naudojant didelio tikslumo kampų matavimo prietaisą; e – matavimas padalų simetrijos (pusės apskritimo) būdu;
 f – matavimas muariniu būdu

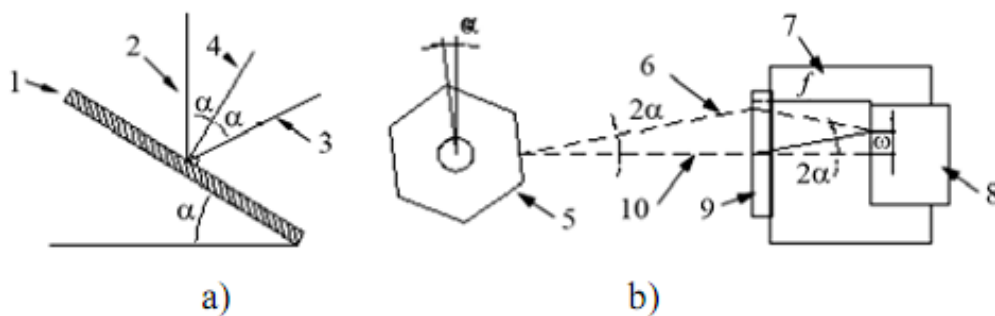
Matuojamieji objektai, be skalių ir limbų, gali būti staklių pasukamieji stalai ir dalijimo galvutės, apskritiminių skalių gamybos įrenginiai, kiti kampų matavimo prietaisai. Schemoje parodyta, jog kaip pamatiniai etalonai yra naudojamos kitos didelio tikslumo apskritiminės skalės ir limbai. Be to, kaip pamatinis etalonas gali būti naudojamas pastovus kampas, sudaromas atskaitos priemonėmis matavimo metu. Šiuo kampu skalė yra kalibruojama pilname apskritime, kaip tokie etalonai naudojami ir didelio tikslumo kampo keitikliai bei kampų matavimo prietaisai. Specialų pamatinį etaloną sudaro stabiliai sukama pavara ir generuojami etaloniniai laiko intervalai, kurių atžvilgiu yra registruojami impulsai, gaunami nuo apskritiminės skalės brūkšnių praslenkančių po nejudamą atskaitos prietaisą (fotoelektriniu mikroskopu). Tuo atveju padalų tikslumas yra nustatomas pagal impulsų pasirodymo tolygumą laiko skalėje, įvertinant sukimosi pokyčius.

Poligonas/autokolimatorius. Stendo centre bazuojama precizinio tikslumo daugiakampė prizmė – poligonas. Precizino tikslumo daugiakampė prizmė turi veidrodinius paviršius, tarp kurių yra labai tikslus kampas. Dažniausiai daugiakampę prizmę sudaro 12, 20 arba 24, 36, o kartais net 72 paviršiai (1.5 pav.). Daugiakampės prizmės dažniausiai gaminamos iš plieno arba kvarcinio stiklo [10].



1.5 pav. Poligonas su aštuoniais veidrodiniais paviršiais

Autokolimatorius – tai prietaisas naudojamas tikslų kampų palyginimui, naudojant veidrodžio atspindį. Autokolimatoriaus veikimo principas pagrįstas šviesos šaltinio atspindžiu nuo veidrodinio paviršiaus (1.6 pav.).



1.6 pav. Poligono/autokolimatoriaus veikimo principas: a) šviesos atspindys nuo veidrodžio;
b) autokolimatoriaus veikimo principas

Kampas tarp siunčiamo ir atspindėjusio šviesos srauto yra lygus 2α . Kampas matavimas tarp siunčiamo ir atspindėjusio šviesos srauto leidžia nustatyti veidrodinio paviršiaus padėtį. Autokolimatoriaus šviesos srautas (taškas, linija ar kokia kita forma) siunčiamas į daugiakampės prizmės paviršiaus plokštumą 5, tuo pat metu jis grįžta į autokolimatoriaus okuliarą. Jei daugiakampės prizmės veidrodinio paviršiaus statmuo 4 nėra vienoje linijoje su autokolimatoriaus ašimi, t.y. su iš autokolimatoriaus išleidžiamu siunčiamu šviesos srautu 10, tai tada prizmės statmuo su autokolimatoriaus ašimi sudarys kampą α . Atspindėjęs šviesos srautas 6 su autokolimatoriaus ašimi 10 sudarys kampą 2α . Atspindėjęs šviesos srautas per objektyvą 9 patenka į okuliarą 8. Paskaičiavus atstumą tarp siunčiamo grįžusio į okuliarą šviesos srauto galima nustatyti daugiakampės prizmės kampinę padėtį.

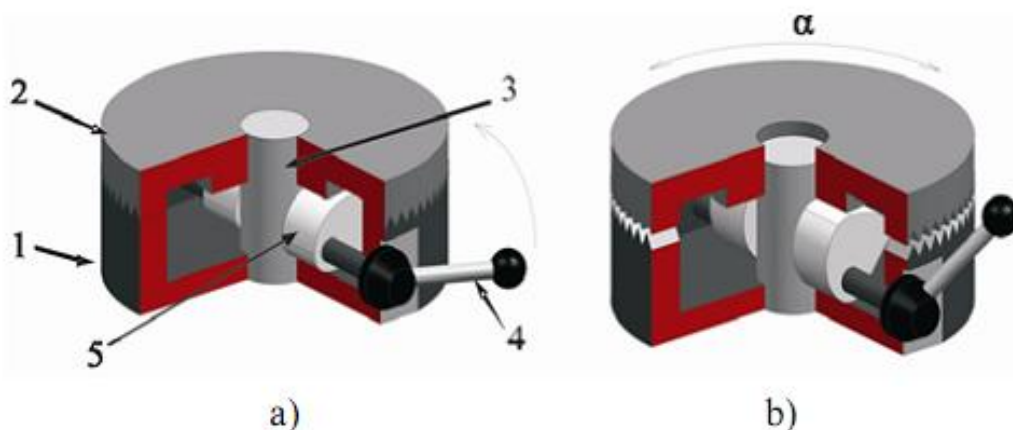
Bendras precizinio staliuko tikslumo matavimo poligonu/autokolimatoriumi vaizdas pateiktas 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Precizinio staliuko tikslumo matavimas poligonu/autokolimatoriumi

Poligonai turi ribotą skaičių kampų todėl kyla problemų dėl didesnio kampų kalibravimo tikslumo, diskretiškumo ir matavimų sieties užtikrinimo.

Labai didelis kampo pozicionavimo tikslumas, kurio paklaida neviršija 0,1", yra pasiekiamas kampų dalijimo ir matavimo prietaisu *Moore's Precision Index* (1.8 pav.), kurio pagrindinę dalį sudaro dviejų disko pavidalo detalių sukabinimas dantukais, esančiais galiniuose šių diskų paviršiuose. Šio prietaiso principinis išradimas buvo patentuotas firmoje *Moore* (JAV), o jo pagrindu buvo sukurti kampų matavimo prietaisai ir Lietuvoje [2].



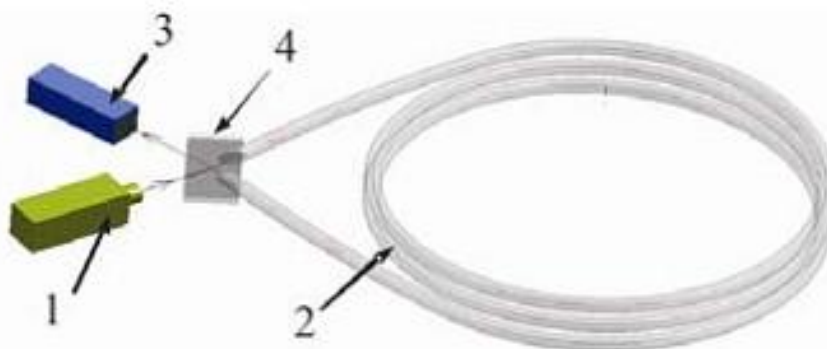
1.8 pav. Moore's Precision Index matavimo prietaisas, veikiantis žiedinių galinių dantukų sukabinimo principu: matavimo padėtis (a); kampo keitimo padėtis (b);

1 – pagrindas; 2 – viršutinis diskas; 3 – kreipiamoji;

4 – rankenėlė ir velenas; 5 – kumštelis

Prietaiso pagrindo 1 viršutinėje žiedinėje dalyje yra įpjauti maži dantukai, turintys trikampį, plokščią arba rutulio dalies profilį, o dantukų pašaknyse – griovelius, kad dantukų sukabinimas būtų laisvas ir garantuotas, nebūtų ribojamas dantukų viršūnių netikslumų. Toks pat skaičius dantukų įpjautas viršutinio disko 2 žiediniame galiniame paviršiuje. Pasukus rankenėlę 4, kumštelis 5 pakelia viršutinį diską 2, dantukai atsiskiria ir diską galima pasukti norimu kampu. Po to jis vėl nuleidžiamas, dantukai susikabina, fiksuodami tikslią kampo padėtį. Paprasčiausia staliuko konstrukcija turi 1440 dantukų kurie yra įpjauti kas 15 kampo minučių. Dantukų paviršiai yra pritrinami, naudojant specialią technologiją. Bet kurioje apskritimo dalyje kampinė padėtis yra nustatoma susikabinant visiems dantukams vadinamuoju integraliniu principu. Taip pat yra gaminami diferencialiniai matavimo staliukai su dviem susikabinančių žiedų poromis, pavyzdžiui, turinčiomis apskritime 1440 ir 1080 dantukų t.y. kas 15" ir 20". Tokiu įtaisu galima apskritimą padalyti kampais kas 5', sudarančiais abiejų dantukų porų žingsnių skirtumą.

Tobuliausiu šiuolaikiniu kampų matavimo prietaisu reikėtų laikyti lazerinį girometrą dar vadinamą optiniu giroskopu arba žiediniu lazeriu (1.9 pav.).



1.9 pav. Kampų matavimo prietaisas – lazerinis girometras: 1 – šviesos šaltinis (lazeris);
2 – optinis šviesos kreiptuvas; 3 – šviesos priėmėjas (fotodiodas);
4 – optinė prizmė

Šis prietaisas dėl optinių šviesolaidžių (du šviesos spinduliai juda priešingomis kryptimis susuktame šviesolaidyje) naudojimo tapo itin kompaktiškas, teikiantis labai didelio diskretiškumo informaciją. Tai labai plačiai techniniams matavimams naudojamas prietaisas. Jo principinę schemą sudaro klasikinio girometro konstrukcija. Kvarcinio stiklo prizmės vidiniame paviršiuje du priešingomis kryptimis einantys lazerio spinduliai interferuoja, fotoelementas registruoja interferencinių juostų kitimą o interferencijos periodas dar gali būti interpoliuojamas. Kampo vertę ir jos pokytį galima išmatuoti 0,1" arba net 0,01" diskretiškumu. Matavimo tikslumas taip pat yra labai didelis, sistemingoji matavimo paklaida neviršija kelių dešimtųjų kampo sekundės. Yra siūlymų lazerinio girometro principu sukurti plokščiojo kampo etalonus ir juos plačiau naudoti kampų matavimo technikoje, tačiau tam kiek trukdo iš esmės dinaminis šio prietaiso veikimo principas. Pateiktoje schemoje pavaizduotas optinis giroskopas (girometras), vietoj kvarco prizmės turintis susuktą šviesolaidį, į kurį yra nukreipiamas šviesos srautas, pusiau pralaidžia šviesai plokštele skaidomas į du pluoštus, einančius vienas prieš kitą. Veikimo principas yra tas pats – priešingų krypčių srautai interferuoja, o visam objektui judant apskritimine trajektorija, į fotoimtuvą patenkantis interferencinis vaizdas slenka imtuvo atžvilgiu, ir šis kampo pokytis yra išmatuojamas. Prietaisas tinka naudoti navigacijos tikslams, juo galima matuoti sukimosi kampą, kampinius greičius ir pagreičius. Girometru galima matuoti kampinius greičius iki 5000 aps./min. $\pm 1\%$ tikslumu.

Apskritiminių skalių matavimo būdų ir priemonių apžvalgos, vertinimai ir analizės, rodo, kad nuolatinė skalių matavimo tendencija krypta tikslumo ir matavimų efektyvumo didinimo bei matavimo intervalų mažinimo linkme. Šiuolaikinės techninės priemonės leidžia sukurti labai didelio skaičiaus diskretinių verčių etalonines matavimo priemones, pvz., limbą, turintį 162 000 brūkšnių (diskretiškumas – 8"). Limbas, pagamintas ant 400 mm diametro stiklo ruošinio, turi sekundės padalos vertę, labai artimą vieno mikrometro linijinei vertei (šiuo atveju $1'' \sim 1 \mu\text{m}$). 8" diskretinę vertę interpoliuojant į 800 dalių gaunama 0,01" padalos vertė. Įrenginys privalo būti laikomas specialioje patalpoje, maksimaliai mažinant aplinkos poveikius (vibracijas, temperatūros, drėgmės ir slėgio pokyčius). Atlikta matavimo būdų ir priemonių analizė leidžia išskirti esmingiausius funkcinius didelio tikslumo kampų matavimo įrenginių elementus, lemiančius matavimų tikslumą našumą ir informacinio neapibrėžtumo esminį mažinimą. Taip pat dideli reikalavimai yra keliami ir didelio tikslumo skalių matavimo įrenginių pavaroms. Kai kuriais atvejais tam naudojama didelio diapazono reguliuojama skalės sukimo pavara ir sukimosi judesio stabilizavimo priemonės. Itin dideli reikalavimai keliami limbų centravimo ir niveliavimo bei linijinių skalių justavimo įrenginiams, kurie privalo perduoti mikrometro dalių poslinkius ir, juos atlikus, patikimai fiksuoti matuojamąjį objektą. [8].

Limbų ir kampo keitiklių matavimo analizė rodo, kad turint omenyje šiuolaikinius matavimo technikos reikalavimus bei laimėjimus, šioje srityje lieka aktualūs ir toliau sprendini tokie teoriniai ir techniniai klausimai:

- limbų matavimo būdų ir priemonių kūrimas, leidžiantis didinti matuojamųjų verčių skaičių bei sudaryti galimybes gauti tiek diskretinę, tiek ir analoginę matavimo informaciją;
- plačiau taikyti teorinį pamatą ir praktinę patirtį automatizuojant keitiklių matavimą;
- spręsti mažo diametro limbų matavimo problemas;
- kurti naujus informacinių matavimo sistemų ir kampų tikslumo didinimo metodus ir priemones.

Suformuluotas problemas galima spręsti pasitelkiant šiuolaikinius tiksliosios mechanikos ir mechatronikos laimėjimus, taip pat ir galimybes, glūdinčias pačių rastrų struktūros, jų geometrijos ir optikos prietaisų savybėse.

Limbų ir rastrinių skalių metrologijos srityje iki šiol neatsisakoma klasikinių limbų matavimo būdų pagrįstų kalibravimu pastoviuoju kampu apskritiminėje skalėje. Šių būdų taikymas schematiškai pavaizduotas 1.4 pav. a. Matavimo trūkumas yra tas, kad keturi mikroskopai netelpa į matuojamųjų limbų diametrą, jei jis nėra didelis (100 mm ir mažiau).

Kai limbo diametras yra 120 – 150 mm, sunku sudaryti matavimo serijų kampus (36° , 45° , 60°). Kitas 1.4 pav. b pavaizduotas būdas, matuojant limbą daugiakampe prizme ir autokolimatoriumi, o limbo brūkšnių padėtį – vienu mikroskopu, taip pat riboja galimų matuoti limbų diametrą. Didelę limbo centro dalį užima daugiakampė prizmė (apie 100 mm ir daugiau). Limbo centravimas ir niveliavimas, taip pat ir prizmės justavimas yra nepatogus. Justavimo įrenginiai vienas kitam trukdo. Šiuo požiūriu progresyvesnis yra matavimas, naudojant stabilizuotą limbo sukimą ir formuojant signalą, kai brūkšniai slenka pro mikroskopo optinę ašį, o tarpus tarp šių signalų užpildo aukštojo dažnio impulsai. Schema, parodyta 1.4 pav. c, tinka šiam, taip pat ir kitam būdai iliustruoti, kai kaip pamatinis etalonas yra naudojamas didelio tikslumo kampo keitiklis. Pirmuoju atveju sunkiai sprendžiama techninė problema yra sukimosi stabilizavimo sistema. Mažų diametrų limbų sukimo netolygumo paklaidos sudaro $1'' - 3''$ vertę, o tokios paklaidos nepriimtinos tikslųjų limbų metrologijoje, be to, jos būna ne sistemingosios, o atsitiktinės, tai reiškia – sunkiai eliminuojamos arba koreguojamos. Matavimas, naudojant galinių dantukų sąveikos principu veikiantį matavimo prietaisą (1.4 pav. d), leidžia supaprastinti arba net išspręsti daugelį išvardintų problemų tačiau būdas yra sunkiai automatizuojamas, galimi limbo padėties išderinimai viršutinės staliuko platformos pakėlimų ir nuleidimų metu. Pakartotinių smūgių metu kartais būna pažeidžiamas tikslus limbo centravimas arba niveliavimas, ir matavimo procesą būtina kartoti [9].

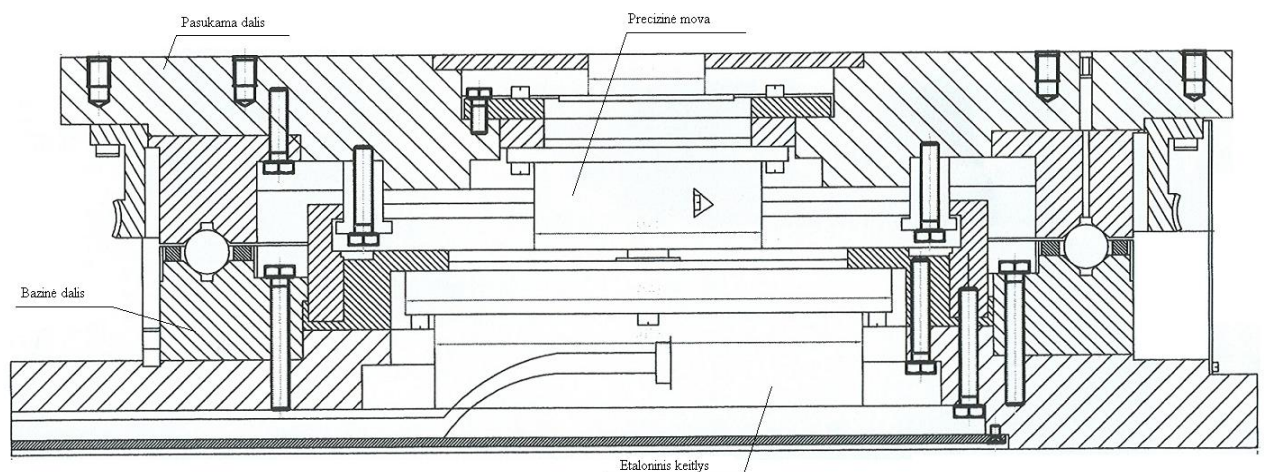
1.3. Aerostatinių suklių apžvalga ir analizė

Kampo komparatoriuose dažnai naudojami aerostatiniai sukliai (špindeliai), kurių bazinės detalės turi rutulinius, kūginius, cilindrinus ir plokščius paviršius. Lietuvoje sukurtų staklių kampinio pozicionavimo paklaida neviršija vienos kampo sekundės, o ruošinio sukimo ašies trajektorijos paklaida yra apie $0,1 \mu\text{m}$.

Ankstyvųjų komparavimo mašinų konstrukcijų ašys dažniausiai buvo projektuojamos ir gaminamos remiantis slydimo trintimi. Jos sudarytos iš cilindrinų kūginių paviršių tarp kurių yra labai plonas specialaus tepalo sluoksnis. Ašies kryptimi tos atramos turi specialius reguliavimo mechanizmus tam, kad maksimaliai būtų sumažinta ašį veikianti masė, užtikrinamas tam tikras tarp slydimo paviršių esantis tarpelis ir kad būtų galima optimaliai reguliuoti ašies sukimosi tikslumą.

Matavimo mašinose buvo naudojamos vadinamosios „grynojo riedėjimo“ kreipiamosios (1.10 pav.). Jas sudaro judantys rutuliukai grioveliuose, kurių kampas yra parenkamas 90° arba 100° , tačiau šio griovelio simetrijos ašis yra pakreipta nedideliu kampu į

visos ašies horizontaliąją plokštumą. Šis kampas yra parenkamas taip, kad priklausomai nuo ašies griovelių ir ašyje naudojamų rutuliukų diametro, pastarųjų riedėjimo trajektorija vyktų be slydimo trinties į griovelio šonus. Rutuliukai rieda grioveliuose liesdamiesi dviem taškais apatiniame ir dviem taškais viršutiniame griovelyje. Šie taškai riedėjimo metu sudaro apskritimines trajektorijas, kurių diametrai dėl griovelio kampo pakreipimo yra skirtingi. Išorinio rutuliukų riedėjimo apskritimo diametras yra didesnis už vidinio apskritimo diametrą. Visų taškų kampinis greitis tuose apskritimuose turi būti vienodas, ir tai užtikrina jų riedėjimą neslystant [8].



1.10 pav. Posūkio sistema su riedėjimo guoliais ir kūginėmis V formos kreipiamosiomis

Posūkio sistema su riedėjimo guoliais parodė gana prastus rezultatus. Šio suklio radialinė sukimosi paklaida viršija $1\ \mu\text{m}$, keičiant sukimosi kryptį pasireiškia histereziniai reiškiniai, paklaidai būdingos aukšto dažnio komponentės. Pastarąsias sudėtinga kompensuoti matematiniais metodais.

Geriausio tikslumo rezultatai buvo gauti su aerostatiniais guolius turinčiais sukliais.

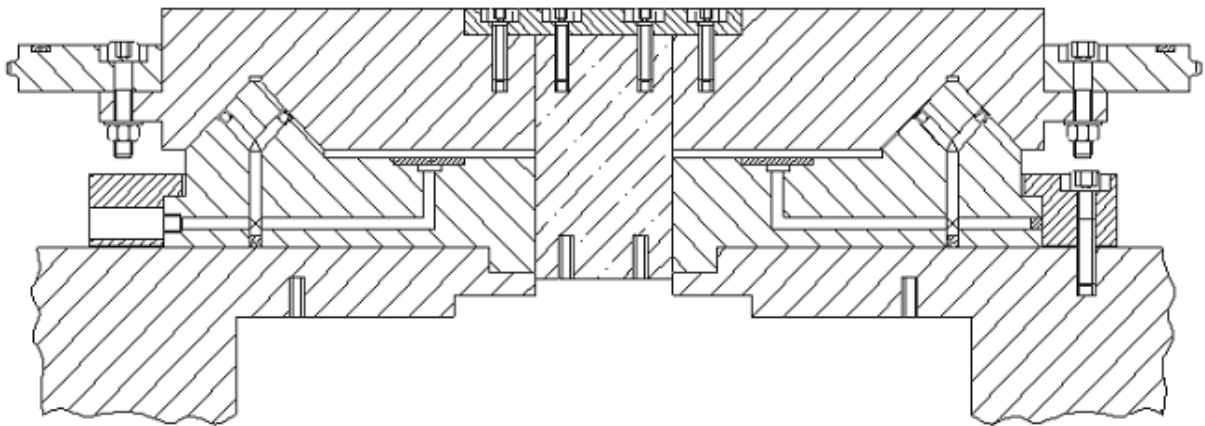
Tai pagrindžiama išskirtinai naudingomis preciziniams judesiams realizuoti suspausto oro plėvelės savybėmis:

- efektyviu aukšto dažnio formos paklaidų vidurkinimu;
- ypač maža trintimi guoliuose;
- histerezinių reiškinių mažumu;
- plačiu judesių greičio keitimo diapazonu, galimybe realizuoti judesius, kurių greitis artimas nuliui be strik proceso pasireiškimo.

Žinoma, kad suklių su aerostatiniais guoliais sukimosi radialinis ir ašinis tikslumas daugiausia priklauso nuo šių faktorių:

- besisukančių suklio elementų formos paklaidų dydžio ir jų harmoninių komponentų dažnio;
- oro plėvelės slėgio dydžio ir jo pasiskirstymo epiūrų;
- išorinių jėgų dydžio, krypties ir šių parametrų pastovumo.

Tikslus aerostatinis suklys su „V“ formos kreipiančiosiomis (1.11 pav.) susideda iš dviejų pagrindinių dalių: apatinės ir viršutinės suklio dalies. 1.12 paveiksle pateiktas bendras tokios konstrukcijos suklio vaizdas.



1.11 pav. Aerostatinis špindelis su V formos kreipiančiosiomis schema



1.12 pav. Suklio su V formos kūginiais paviršiais bendras vaizdas

1. Atviros konstrukcijos guoliai neužtikrina reikiamo suklio standumo ir jis yra ypač jautrus išoriniam poveikiui;
2. Technologiškai sunku pagaminti reikiamo tikslumo kūginius V formos paviršius.

Technical cross-section drawing of a mechanical assembly. The drawing shows a central vertical shaft with a central nut and a central bearing. The shaft is supported by two bearings, one at the top and one at the bottom. The top bearing is labeled "M30x1". The shaft has a diameter of "Ø245". The top bearing has a diameter of "Ø290". The bottom bearing has a diameter of "Ø290". The shaft is connected to a central nut with a diameter of "5 H6". The central nut is labeled "Kamstis". The shaft is supported by two bearings, one at the top and one at the bottom. The top bearing is labeled "M30x1". The shaft has a diameter of "Ø245". The top bearing has a diameter of "Ø290". The bottom bearing has a diameter of "Ø290". The shaft is connected to a central nut with a diameter of "5 H6". The central nut is labeled "Kamstis". The shaft is supported by two bearings, one at the top and one at the bottom. The top bearing is labeled "M30x1". The shaft has a diameter of "Ø245". The top bearing has a diameter of "Ø290". The bottom bearing has a diameter of "Ø290". The shaft is connected to a central nut with a diameter of "5 H6". The central nut is labeled "Kamstis".

Labels in the drawing include:

- Sferinis stiklinis diskas (nejudus)
- Diskas
- Jungiamas velenas
- Ø245
- sesiakampe skylė raktui 27mm
- Kamstis
- Sferinis stiklinis diskas (suklus)
- Suklijuota
- Ø290
- 5 H6
- Suspaustas oras
- Kampinio reguliavimo poveržle
- Keturkampe skylė raktui 27mm

Dimensions shown:

- 186
- 154
- 34
- 16

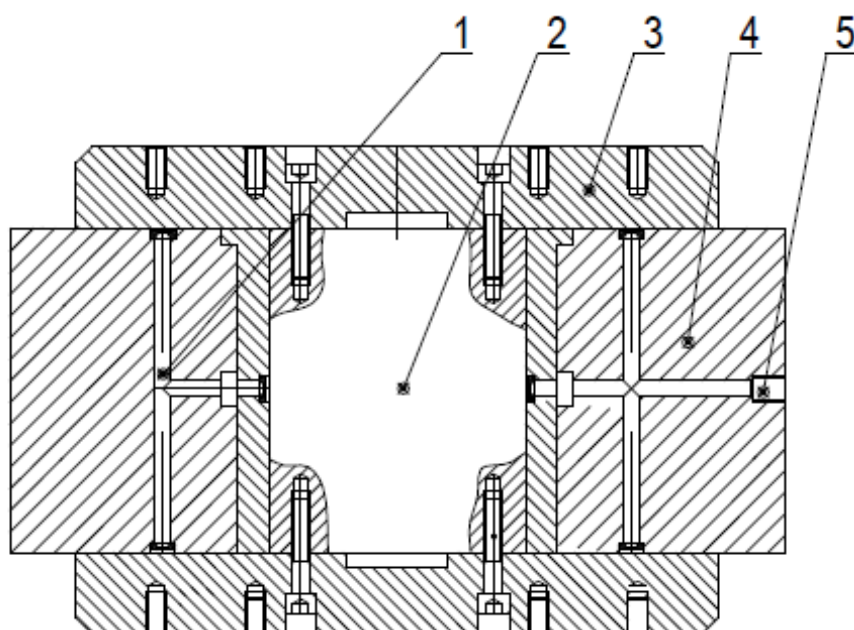
Pagaminus šio suklio stendinį pavyzdį ir atlikus jo tyrimus, išryškėjo gana analogiškai pirmajam sukliui trūkumai:

- 24



1.14 pav. Suklio ir jo veleno su sferiniais darbiniais paviršiais vaizdas

Kompleksiškai vertinant tiksluminius parametrus ir gamybos technologinius aspektus, geriausi rezultatai gauti tiriant suklius su cilindrinų ir plokščių paviršių kombinacija. Tokio suklio schema pateikta 1.15 paveiksle. Šio suklio konstrukcija nesudėtinga. Sudėtinės dalys yra du diskai (3) sujungti su cilindru (2) varžtais. Suklio korpuse yra suslėgto oro tiekimo kanalai (1). Oro žarna pajungiama per srieginę skylę (5). Tokio špindelio konstrukcija lyginant su kitomis yra geriausia, nes dėka dviejų diskų jis yra stabilus nepriklausomai apkrautas jis ar ne. Aerostatiniai špindeliai turi savybę pakilti, jei neapkraunamas, ir nusileisti, kai apkraunamas, jei konstrukcija būtų vieno disko. Tuo tarpu dviejų diskų konstrukcijos suklys, dėl oro tiekimo apačioje, ir viršuje yra stabilus.



1.15 pav. Suklys su aerostatiniais guoliais turinčiais cilindrinus ir plokščius paviršius

Įvertinus paskutiniojo špindelio pranašumus, buvo pasirinktas firmos NELSON AIR RT 200L aerostatinis suklys, kurio radialinė ir ašinė sukimosi paklaidos $\pm 0,025 \mu\text{m}$, jo bendras vaizdas pateiktas 1.16 paveiksle.



1.16 pav. Aerostatinis suklys NELSON AIR RT 200L

Šis suklys pasižymi savo funkcionalumu, mažomis sukimosi paklaidomis, geru sukimosi pasikartojamumu, nereikalauja priežiūros, lengvai montuojamas.

1.4. Kampų matavimo sistemos pavara

Matavimo mašinose galutinė kinematinė grandis ir kampo matas, užtikrinantis matavimo tikslumą, yra globoidinė slieko – sliakračio pavara. Jai keliami gana griežti reikalavimai:

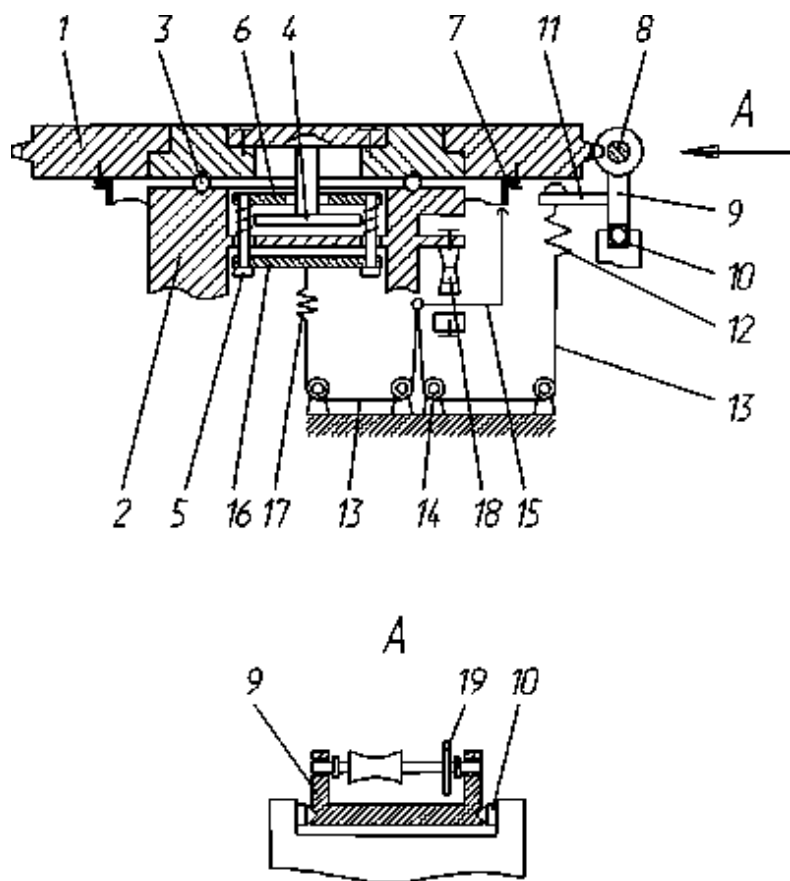
1. Ji turi užtikrinti pastovų suklio greitį ir sudaryti tikslaus pozicionavimo galimybę bei užtikrinti stabilią kampinę padėtį laike;
2. Pavara turi nesukelti jėgų, veikiančių į suklių, išskyrus tangentinę sukimosi jėgą;
3. Negali būti intensyvios temperatūros spinduliuotės ir virpesių šaltinių.

Straipsniuose pateikti tyrimų rezultatai, susiję su globoidinės pavaros elementų savitarpio sąveika ir jų bendru poveikiu pasukamo kampo smulkiaperiodinėms (ciklinėms) paklaidoms, t. y. paklaidoms, kurios yra viename slieko apsisukime. Tokių elementų, kaip globoidinis sliėkas, pakabos centrai, tikslumas ir pradinės įvaržos turi tiesioginę įtaką

matavimo tikslumui. Būtinai šių elementų geometrinių parametrų dydžiai buvo apskaičiuoti ir normuojami pavarų gamybos metu.

Originalus technologinio koregavimo mechanizmas, kuris buvo naudojamas precizinių dalijimo mašinų BE 44-1 ir BE 43-05 globoidinės pavaros sistemingajai paklaidai koreguoti, yra parodytas 1.17 paveiksle. Atsižvelgiant į išmatuotą sistemingąją stalo pasukimo paklaidą buvo pagamintas kopyras 7, su kuriuo sąveikaudama svirtelė 15 veikia globoidinės pavaros sliekratį ir slieką, taip sukeliamas papildomas sliekračio sukimo pasipriešinimo momentas, proporcingas sistemingajai paklaidai.

Keičiant stalo sukimosi kryptis, koregavimo metu yra pašalinamas 10–20 mm storio sluoksnis kairiojoje arba dešiniojoje sliekračio profilio pusėje, o po šios operacijos sliekas – trintuvas yra keičiamas darbiniu slieku. Trynimas vyksta 16-20 aps./min. dažniu. Slieko prispaudimas tolygiai didinamas, kol pasiekiami reikiami tikslumo parametrai.



1.17 pav. Sistemingosios paklaidos technologinio koregavimo mechanizmas:

- 1 – sliekratis; 2 – korpusas; 3 – rutulinė ašis; 4–6, 16 – stabdžio detalės;
- 7 – kopyras; 8 – globoidinis sliekas; 9–10 – slieko pakaba; 11 – svirtelė;
- 12–14, 17 – traukos; 15 – sekiklis; 18 – atrama

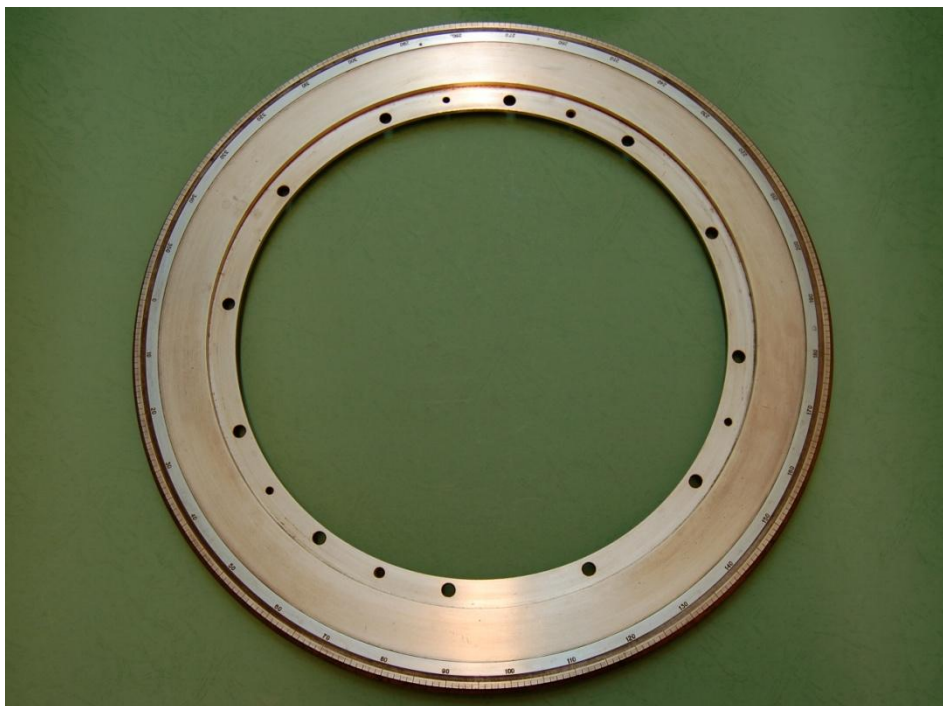
Precizinių įrenginių projektavimo metu tenka numatyti technologines operacijas, kurios turi užtikrinti įrenginio tikslumą. Aprašytoji precizinė pavara, skirta tikslams kampo pasukimams, ji turi būti atitinkamai surenkama, matuojama, o tikslumo parametrai pasiekiami ilgai truncančiu matavimo, technologinio koregavimo (trynimo) procesu.

Galutiniai pavaros parametrai parodyti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Globoidinės slieko ir sliekračio pavaros techniniai parametrai

Techninis parametras	Prieš korekciją	Po korekcijos
Perdavimo koeficientas	2160	2160
Radialusis mušimas, μm		
– slieko vijų	3...5	1,5
– sliekračio sukimosi ašies trajektorijos	0,2	0,2
– sliekračio dantukų dalijimo apskritimo	9	3
Paviršiaus šiurkštumas, R_a , μm		
– slieko vijų	1,0	0,25
– sliekračio dantukų	1,0	0,25
Dantukų sukabinimo plotų kontakto dėmių kiekis, %		
– vertikaliaja kryptimi	60	85
– skersai dantuko	60	85
Sisteminioji sliekračio pasukimo kampo paklaida, esant abiejų profilių sukabinimui, (")	3,30	1,80

Pagrindiniu ir technologiškai sudėtingiausiu tokios pavaros konstrukciniu elementu yra sliekratis. Jis žymia dalimi lemia posūkio tikslumą ir padėties stabilumą. 1.18 paveiksle parodytas iš bronzos pagamintas precizinis sliekratis.



1.18 pav. Bronzinis precizinis sliekratis

2. Teoriniai tyrimai

Matuojant radialines sukimosi paklaidas pagal pasirinktą matavimo metodą naudojamas pamatinis etalonas t. y. pavyzdinė sfera. Visais atvejais matuojant suklį su sfera negalime išvengti ekscentriciteto. Jis atsiranda dėl įvairių priežasčių, kaip kad dėl prasto sferos centravimo metodo pasirinkimo, sulenкто suklio veleno arba atskirų paviršių ekscentriciteto. Kai suklio ašies spindulio trajektoriją sudaro dešimtosios arba šimtosios mikrometro dalys, tai ekscentricitetas tampa spindulio dalimi. Be to neįmanoma nustatyti ekscentriškumo dydžio ir krypties suklio ašies atžvilgiu. Todėl pavyzdinės sferos centro ir suklio sukimosi ašies trajektorijos matavimo plokštumoje nesutampa.

Nuokrypiams klasifikuoti naudojama Furjė eilutė. Tam tikslui pateiktus nuokrypius galima nagrinėti stačiakampėje, polinėje, cilindrinėje koordinačių sistemoje arba kitose krėvinėse koordinatėse. Tokiu būdu nuokrypius patogų apibūdinti nuokrypių harmoninių dedamųjų visuma, t.y. skirtingo dažnio nuokrypių visuma. Analitiniu būdu tikrąjį profilį galima vaizduoti funkcija $f(\varphi)$, išskleista Furjė eilute.

Naudojantis poline koordinačių sistema patogų naudotis Furjė eilute su ribotu narių skaičiumi, t.y. trigonometriniu polinomu:

$$f(\varphi) = \frac{C_0}{2} + \sum_{k=1}^{k=n} C_k \cos(k\varphi + \varphi_k), \quad (1)$$

čia: $\frac{C_0}{2}$ – nulinis Furjė eilutės narys;

k – harmonikos dedamosios eilės numeris;

C_k – k -tosios harmonikos amplitudė;

φ_k – pradinė fazė;

n – polinomo aukščiausios harmonikos eilės numeris.

Iš Furjė eilučių išplaukia, kad nulinis narys lygus:

$$\frac{C_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

čia: $\frac{C_0}{2}$ – bendru atveju funkcijos $f(\varphi)$ periodu $T = 2\pi$ vidutinė reikšmė.

Taigi nulinis narys $\frac{C_0}{2}$ yra kintamojo matmens nuokrypis.

Pirmasis eilutės narys

$$C_1 \cos(\varphi + \varphi_1), \quad (3)$$

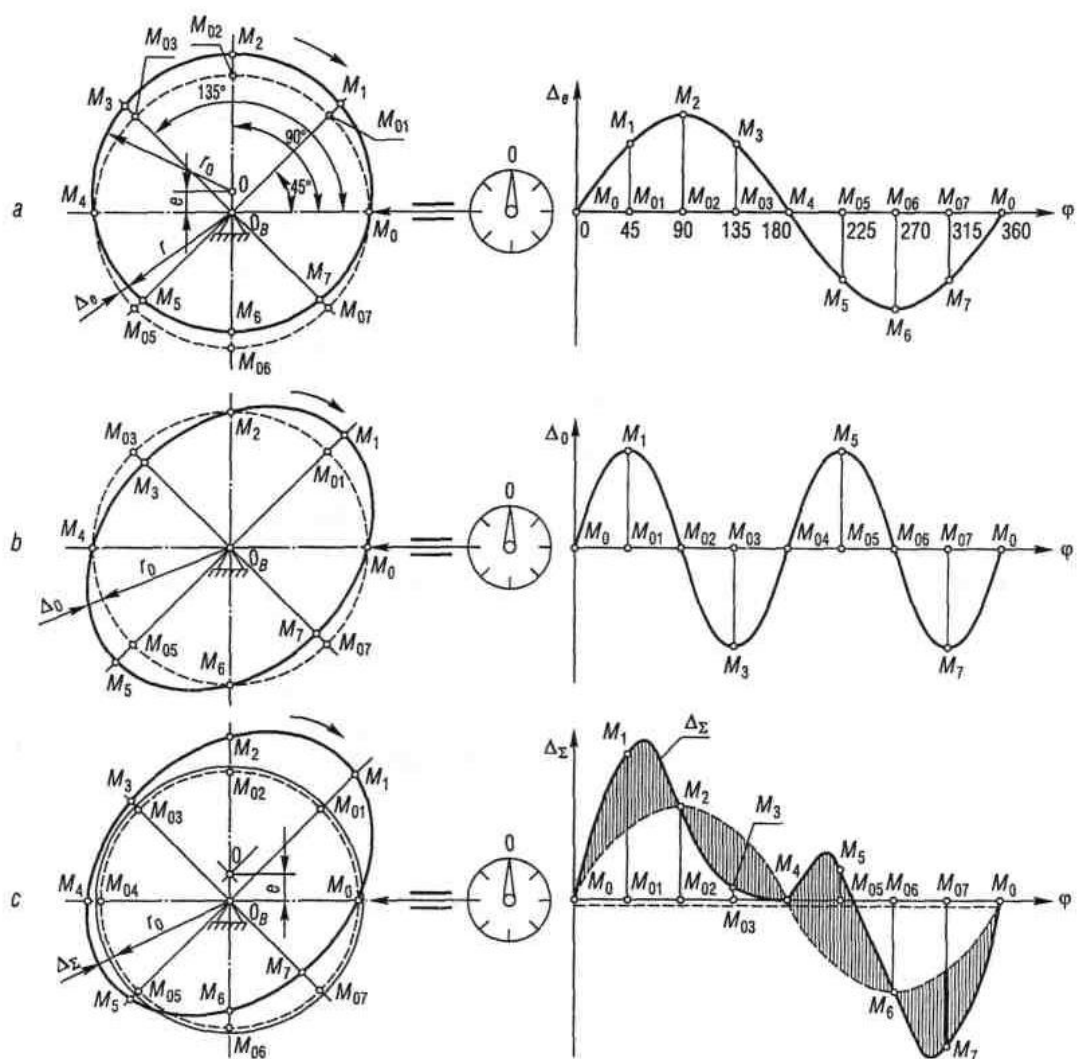
rodo sukimosi centro O' nesutapimą su geometriniu centru O , t.y. paviršių padėties nuokrypį (ekscentricitetą e).

Nariai, pradedant antruoju, išsidėsto tokia tvarka:

$$C_2 \cos(2\varphi + \varphi_2) + C_3 \cos(3\varphi + \varphi_3) + \dots + C_{n-1} \cos[(n-1)\varphi + \varphi_{n-1}]. \quad (4)$$

Šie nariai reiškia makrogeometrinius nuokrypius. Antrasis narys nusako ovalumą, trečiasis – briaunuotumą su trijų viršūnių profiliu ir t. t. Didelių harmonikų skleidimo nariams atskirti neužtenka matavimo priemonių skiriamosios gebos.

Radialinis mušimas bazinės ašies atžvilgiu atsiranda dėl bendrų formos ir padėties nuokrypių. Radialinis mušimas reiškiamas didžiausiu prietaiso rodmenų skirtumu sukliui apsisukus vieną kartą. Tuo atveju, kai yra ekscentricitetas e (2.1 pav., a), spindulys vektorius kinta pagal sinusoidę. Radialinis mušimas šiuo atveju bus $2e$. Tuo atveju, jei yra ovalumas (formos nuokrypis), per vieną sūkį kreivėje susidaro du maksimumai ir du minimumai (2.1 pav., b). Esant briaunuotumui, maksimumų ir minimumų skaičius atitinka briaunų skaičių. Kai yra ir ekscentricitetas, ir ovalumas, kreivė esti sudėtingesnio pavidalo (2.1 pav., c) [10].



2.1 pav. Radialinio mušimo nuokrypiai

Pagrindinės suklio matavimo paklaidos yra:

1. Variklio ir reduktoriaus paklaidos;
2. Globoidinio slieko ir sliekračio dantukų susikabinimo paklaidos;
3. Movos paklaidos;
4. Suklio sukimosi paklaidos;
5. Sferos formos paklaidos;
6. Sferos išstatymo paklaidos;
7. Matavimo galvutės paklaidos
8. Matuotojo paklaidos
9. Rodmenų pateikimo paklaidos.

3. Tyrimų objekto ir aparatūros aprašymas

Kampo komparatoriumi bus atliekamas:

- a. UAB „Precizika Metrology“ gaminamų limbų kalibravimas;
- b. UAB „Precizika Metrology“ gaminamų precizinių keitiklių kalibravimas;
- c. Kitų gamintojų limbų ir keitiklių, turinčių sinusinius neformuotus ir TTL (5V) formuotus išėjimo signalus, kalibravimas.

Neapibrėžtys (2S, 95 %):

- a. kampo atkūrimo $\pm 0,3''$;
- b. limbų kalibravimo $\pm 0,35''$;
- a. keitiklių kalibravimo $\pm 0,35''$;
- b. limbų dviejų takelių susietumo matavimo $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

Kampo sistis užtikrinama panaudojant, su neapibrėžtimi $\pm 0,2''$, kalibruotą daugiabriaunę prizmę ir autokolimatorių.

Sisteminę paklaidą nustatoma pagal daugiabriaunę prizmę ir kompensuojama ją aproksimavus parametrine funkcija.

Kalibravimo metodas:

- a. dinaminis;
- b. maksimalus kampinis kalibravimo greitis 0,006 aps./s (0,36 aps./min.), kai rastro skersmuo $d = 75 \text{ mm}$, $z = 36\,000$;
- c. maksimalus derinimo posūkio kampinis greitis 0,3 aps./s (18aps./min.);
- d. maksimalus kampo reikšmių skaičius paklaidai įverti 36 000;
- e. limbai kalibruojami vienu – dviem mikroskopais, kalibravimo metodika sudaroma vėliau;
- f. keitiklių paklaida vertinama pagal formuotus ir interpoliuotus signalus;
- g. kalibruojant keitikius, jeigu jų analoginiai išėjimo signalai, jie formuojami į TTL (5V) signalus;
- h. skaičiuojama: kelių realizacijų vidutinės kvadratinės reikšmės, rezultatų sklaida S vidutinių reikšmių atžvilgiu, matavimo rezultatai pateikiami protokolu ir grafiškai;
- i. paklaida kalibruojama vieno ar kelių apsisukimų ribose, suklį sukant viena kryptimi; vieno ar kelių apsisukimų ribose viena kryptimi ir pakeitus sukimosi kryptį; suklį sukant nustatytu žingsniu viena kryptimi ir pakeitus sukimosi kryptį vieno ar kelių apsisukimų ribose.

Precizinės kampo kalibravimo sistemos struktūra

Įvertinant dvigubą paskirtį – kampinių skalių (limbų) ir kampinių poslinkių matavimo keitiklių kalibravimą, pagrindinės kalibratoriaus komponentės yra:

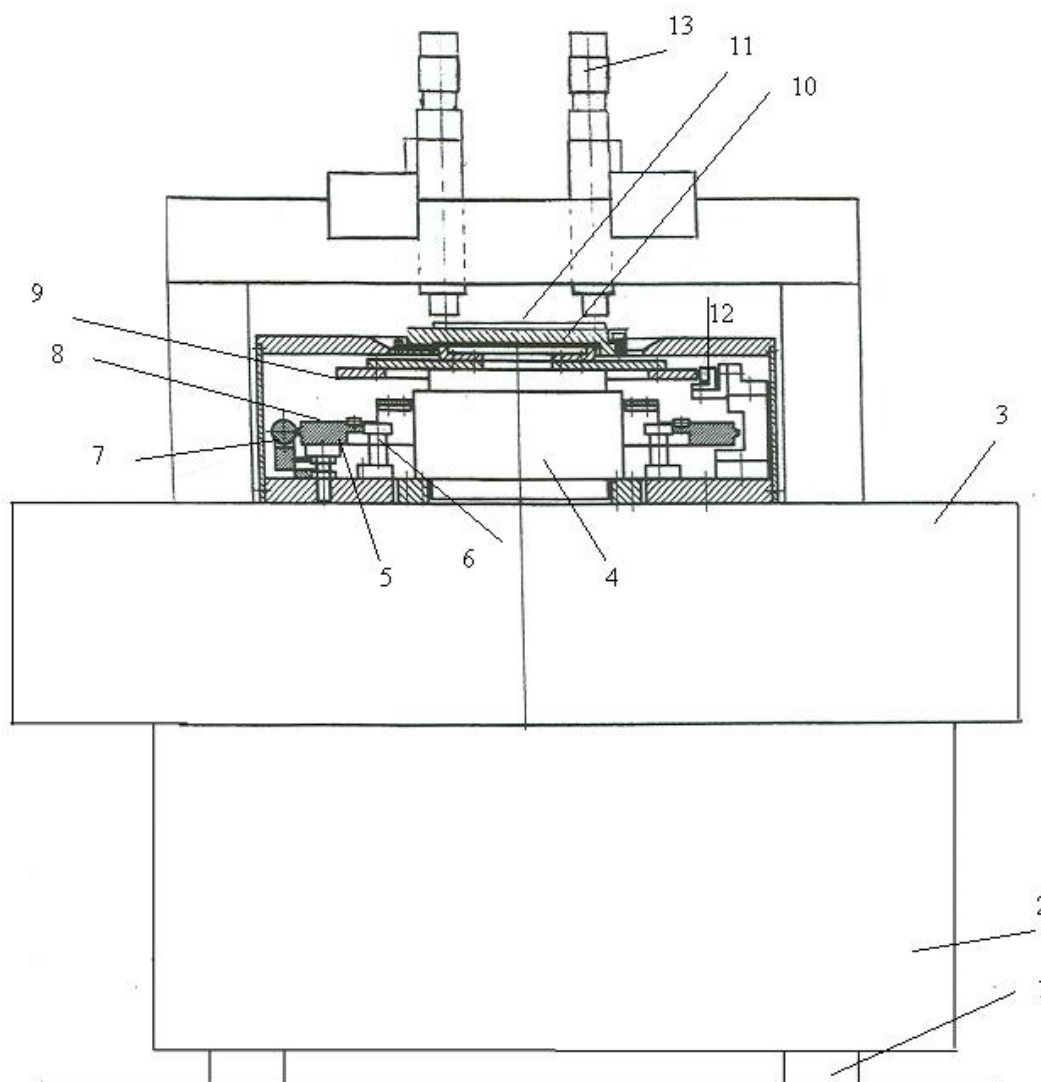
- a. vibrostabili bazė;
- b. precizinio posūkio sistema, sudaryta iš precizinio suklio ir pavaros;
- c. pavyzdinio kampo sistema;
- d. limbo brūkšnių padėties nustatymo sistema;
- e. mechaniniai mazgai ir sistemos, užtikrinantys kalibratoriaus funkcionalumą;
- f. skaičiavimo – valdymo kompleksas.

Sudarant struktūrinę schemą esminis klausimas yra pavyzdinio kampo sistemos parinkimas ir sieties su kampo vieneto etalonais užtikrinimas.

Realiai šiuo metu sietis gali būti pasiekta tik per kalibruotą daugiabriaunę prizmę (poligoną). Tad ji turi būti integruota į bet kurią pavyzdinio kampo sistemą siečiai užtikrinti. Tačiau daugiabriaunė prizmė, dėl didelio diskretiškumo, negali būti naudojama betarpiškam limbų ir kampinių keitiklių kalibravimui. Tam reikalinga didesnės skyros sistema.

Suprojektuota pavyzdinio kampo sistema su pavyzdiniu keitikliu. Pavyzdinės kampo matavimo sistemos limbas tvirtinamas tiesiogiai prie precizinio suklio veleno. Principinė kalibratoriaus schema su tokia pavyzdinio kampo matavimo sistema parodyta 3.1 ir 3.2 paveiksluose. Ten pat nurodytos ir pagrindinės jos komponentės.

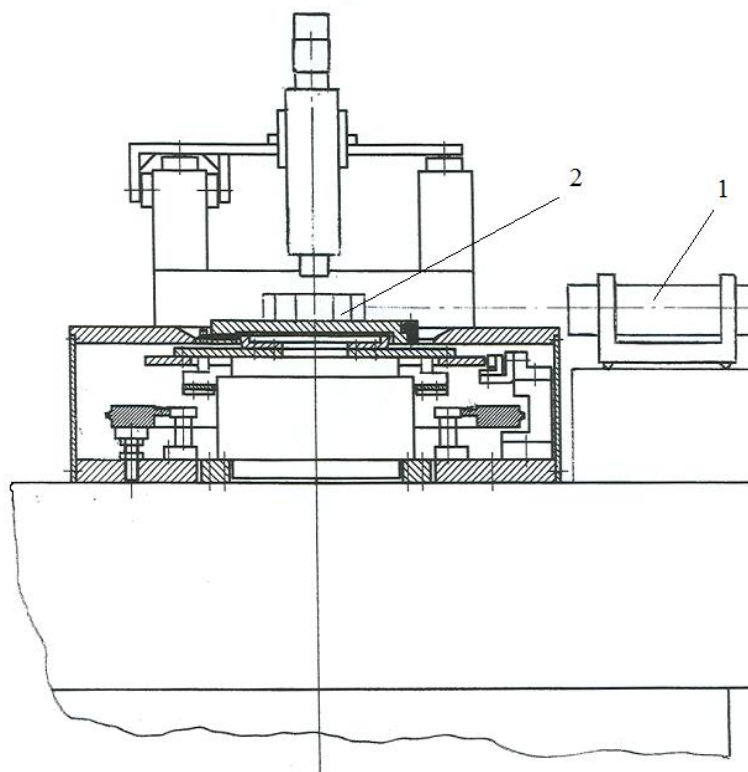
Sistema su pavyzdiniu limbu ir poligonu gali užtikrinti ypač aukštą komparatoriaus tikslumą, kalibravimo stabilumą. Vienas kampo matas – limbas gali būti panaudotas kampui nustatyti optoelektroniniu būdu tiek mikroskopais, tiek ir optoelektroninėmis matavimo keitiklių galvutėmis.



3.1 pav. Kalibratoriaus schema:

- 1 – vibroizoliacinės atramos; 2 – stovas; 3 – granitinė plyta; 4 – aerostatinis suklys;
 5 – aerostatinis guolis; 6 – guolis; 7 – pavaros sliekas; 8 – pavaros sliekratis;
 9 – etaloninė apskritiminė skalė; 10 – centravimo – niveliavimo staliukas;
 11 – kalibruojamoji apskritiminė skalė; 12 – skanavimo galvutė;
 13 – mikroskopas

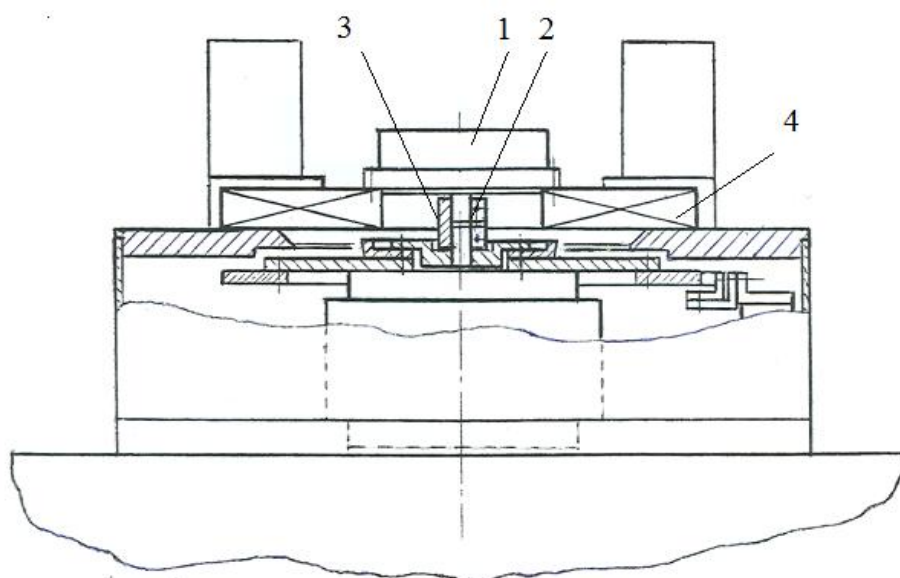
Precizinis kampo kalibratorius turi turėti ranka centruojamą ir niveliuojamą staliuką su operatyviai keičiamu / perreguliuojamu limbų bazavimo įtaisu ir patogiai uždedamą kalibruojamų keitiklių bazavimo įtaisą. Prioritetas teikiamas variantui, kad, uždedant keitiklių bazavimo įtaisą, nereiktų nuimti centravimo – niveliavimo staliuko.



3.2 pav. Daugiabriaunės prizmės ir autokolimatoriaus pastatymo schema:

1 – autokolimatorius; 2 – daugiabriaunė etaloninė prizmė

3.3 paveiksle parodyta kalibratoriaus schema su kalibruojamuoju keitikliu.



3.3 pav. Kalibratoriaus su kalibruojamuoju keitikliu schema:

1 – kalibruojamasis kampinis keitiklis; 2 – mova; 3 – aerostatinis sūklės velenas;

4 – kalibruojamojo kampinio keitiklio bazavimo įtaisas

3.1. Kampo komparatoriaus sistemos komponentės ir reikalavimai joms

Kampo komparatorius sumontuotas vibrostabilioje aplinkoje t. y. laboratorijoje, kurioje:

- a. temperatūra $20 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$;
- b. temperatūros kitimas kalibravimo metu: 0,5 h laikotarpiui $0,1 - 1^{\circ}\text{C}$, 12 h laikotarpiui $0,2 - 1^{\circ}\text{C}$;
- c. santykinė oro drėgmė $60 \pm 15\%$;
- d. pagrindo virpesių amplitudė $\leq 5 \mu\text{m}$, esant $\leq 4 \text{ Hz}$ dažniui.

Visas matavimo įrenginys stovi ant pasyvių guminių atramų. Komparatoriaus stovo konstrukcija yra standi, virinta iš plieninių kampinių. Ant stovo uždėta granitinė plyta, tai smulkiagrūdis pilkasis granitas, matmenys $1174 \times 1036 \times 250 \text{ mm}$. Ant granitinės plytos sumontuota precizinio posūkio sistema, sudaryta iš precizinio suklio ir pavaros.

Aerostatinis suklys – firmos NELSON AIR, RT 200L, radialinė ir ašinė sukimosi paklaidos $\pm 0,025 \mu\text{m}$.

Mechaninė pavara – sliekas–sliekratis. Jos perdavimo santykis 1:1080. Maksimalus kampinis sukimosi greitis 4, 5 sūkliai per minutę.

Sliekratis montuojamas ant aerostatinių guolių, su preciziniu sukliu sujungiamas per movą, sukuriančią suklio sukimosi momentą ir nesukuriančią suklių veikiančių radialinių ir ašinių jėgų.

Elektrinė pavara turi garantuoti greičio kitimą ne daugiau 5% nuo minimalaus kampinio greičio. Siūlomas 100W nuolatinės srovės bešepetėlinis sinchroninis servo variklis su retųjų žemės elementų nuolatiniais magnetais kartu su reduktoriumi, kurio perdavimo skaičius 1:10, ir jam skirtu servo valdikliu. Pavaros valdymui reikalingas RS485 prievadas arba RS485 keitiklis į USB prievadą.

Sinchroninio variklio parametrai:

1. Sukimosi greitis nuo 0,167 aps./s (10 aps./min.) iki 50 aps./s (3000 aps./min.);
2. Greičio reguliavimo diapazonas 300 kartų;
3. Variklio pozicionavimo diskreta 10000 impuls./aps.

Sinchroninio variklio parametrai, kai jis sujungtas su preciziniu planetiniu reduktoriumi:

1. Reduktoriaus perdavimo skaičius 10:1;
2. Reduktoriaus laisvoji eiga (klibėjimas) mažiau nei 3 arcmin;
3. Variklio sukimosi greitis: nuo 0,0167 aps./s (1 aps./min.) iki 5 aps./s (300 aps./min.);

4. Variklio pozicionavimo diskreta: 100000 impuls./aps.

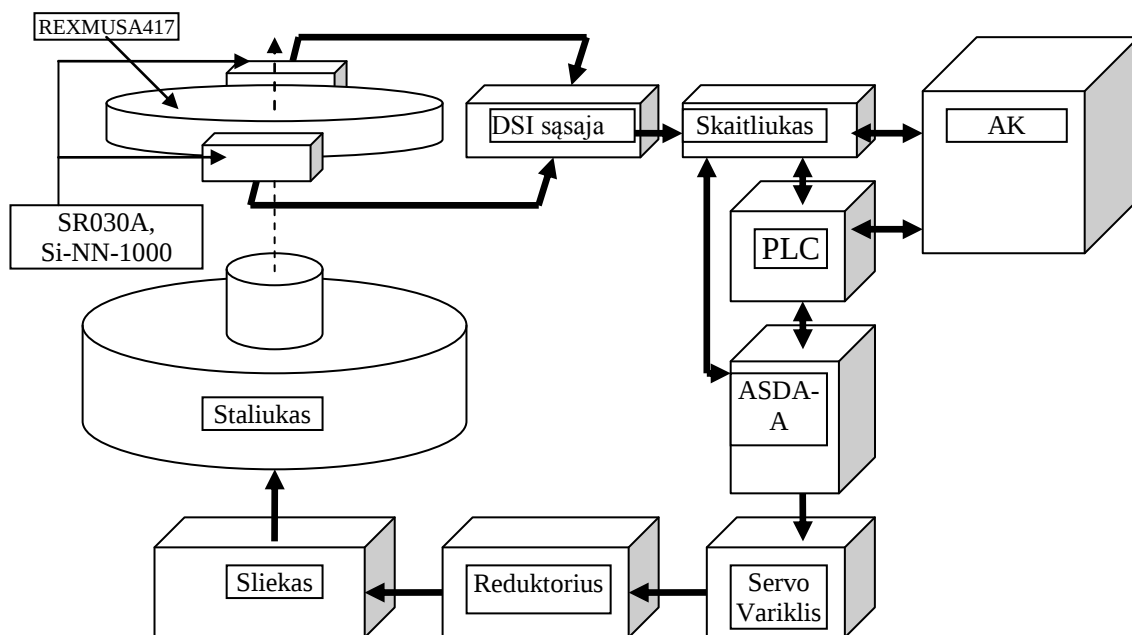
Sinchroninio variklio parametrai, kai jis sujungtas su preciziniu planetiniu reduktoriumi ir pavara sliekas – sliekratis:

1. Pavaros sliekas – sliekratis perdavimo skaičius 1080:1;
2. Variklio sukimosi greitis nuo 2 arcsek./s (120 arcsek./min.) iki 1,67 °/s (100°/min.);
3. Variklio pozicionavimo diskreta 108000000 impuls./aps. = 83,33 impuls./arcsek. arba 0.012 arcsek./impuls. ir yra mažesnė nei etaloninio precizinio limbo matavimo diskreta su x1000 elektronine interpoliacija (0,0198 arcsek./impuls.).

Kalibravimo kampinio greičio pastovumas ne blogesnis už 5%.

3.2. Kampo komparatoriaus matavimo sistema

Detali precizinio kalibratoriaus struktūrinė schema pavaizduota 3.4 paveiksle. Pavyzdinis limbas (REXMUSA417), du matavimo keitikliai (SR030A) su signalų formuotuvais ir interpoliatoriais (SIGNUM Si-NN-1000), DSI sąsaja (A-9568-1807), spartusis kvadratinis skaitliukas (NI PCI-662). PLC – valdiklis, ASDA-A – variklio dažninė pavarą, AK – asmeninis kompiuteris.



3.4 pav. Detali precizinio kalibratoriaus struktūrinė schema

Pagrindiniai parametrai:

a) Kampo matavimo paklaida:

- sistemingoji (sukauptoji) $\pm 0,38''$;
- aukšto dažnio(žingsnio vidaus) $\pm 0.03''$;
- rodmenų pasikartojamumo (1S, 68 %) $\pm 0,008''$;
- brūkšnių išdėstymo $\pm 0,38''$;
- diskreta $0,0198''$.

b) Išėjimo signalas formuotas kvadratūrinis – TTL;

c) Keitiklio rastro linijų skaičius 65536;

d) Interpoliacijos skaičius 1000;

e) Nulinis signalas – vienas;

f) Maksimalus kampinis sukimosi greitis 0,18 aps./s (11 aps./min.), (linijinis greitis: 240,17 mm/s, skaitliuko dažnis ~ 13 MHz) (maksimalūs staliuko apsisukimai $\sim 0,278$ aps./min.).

Pavyzdinis limbas:

- limbo skersmuo 417 mm.;
- brūkšnių skaičius 65536;
- diskreta $19,78''$;
- deklaruojama sisteminė paklaida $\leq \pm 1''$.

Matavimo keitikliai:

- Du „Renishaw“ „SIGNUM“ matavimo keitikliai – SR030A (3 metrų laidas) su signalų formuotuvais ir interpoliatoriais – Si-NN-1000. Maksimalus matavimo linijinis greitis 12,5 m./sek. Signalas formuotas kvadratūrinis. Interpoliacija – 1000. Maksimalus signalo priėmimo dažnis – 20 MHz.

DSi sąsaja

DSi sąsaja skirta priimti formuotus signalus iš dviejų vienodų „SIGNUM“ matavimo keitiklių ir jų signalus apdoroti taip, kad pasinaikintų ekscentriciteto paklaidos. Maksimalus signalų priėmimo dažnis – 20 MHz. Yra galimybė pasirinkti vieną iš keturių DSi variantų:

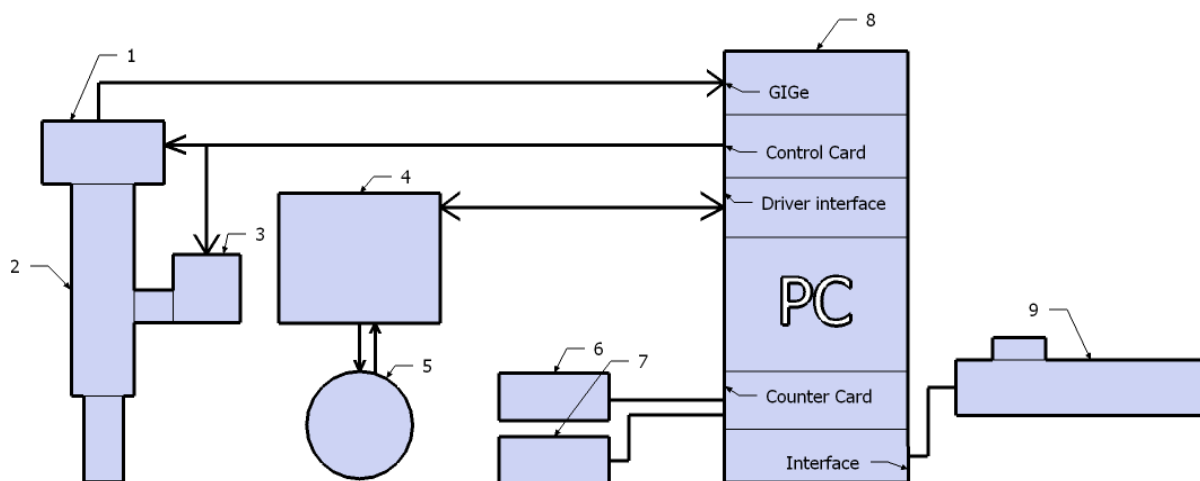
- DSi jungiamas be kabelio, su diferencialiniu aliarmu – A-9568-1607;
- DSi jungiamas be kabelio, su 3-būsenų aliarmu – A-9568-1707;
- DSi jungiamas su kabeliu, su diferencialiniu aliarmu – A-9568-1807;
- DSi jungiamas su kabeliu, su 3-būsenų aliarmu – A-9568-1907.

Spartusis kvadratinis skaitliukas

Renishaw REXM precizinė kampo matavimo sistema, kurios nerūdijančio plieno precizinio disko diametras 417 mm., jis turi 65536 brūkšnių per apsisukimą. Nuskaitymo galvutė interpoliuoja signalą 1000 kartų. Esant maksimaliems staliuko 0,00643 aps./s (0,278 aps./min.), signalo dažnis 303,4 kHz. Jei skaitliukas priimtų signalą iki 20MHz, tai maksimalus staliuko greitis, prie kurio skaitliukas dar nepamestų priimtų impulsų skaičiaus, yra 0,305 aps./sek. Todėl atjungus slieką ir staliuką sukančią ranką reiktų neviršyti ~ 0,3 aps./sek.).

3.3. Precizinio kampo kalibratoriaus informacinė struktūrinė schema

Kampinio komparatoriaus informacinė struktūrinė schema pavaizduota 3.5 paveiksle. Pagrindinis valdymo ir duomenų surinkimo bei saugojimo įrenginys bus asmeninis kompiuteris. Sąsajos su kitais įrenginiais sudaromos per integruojamas sąsajų ir valdymo plokštes. Reikalingos 5 integruojamų plokščių: skaitmeninės kameros sąsajos, RS-232 sąsaja su valdymo sistemos valdikliu (blykstė, oro sklendės, informacija iš daviklių), RS-485 sąsajos su elektrinės pavaros keitikliu, greito kvadratinio signalų skaitliuko, autokolimatoriaus sąsajos.



3.5 pav. Informacinė struktūrinė schema: 1 – skaitmeninė kamera; 2 – mikroskopas;
3 – apšvietimo blykstė; 4 – servo variklio keitiklis; 5 – servo variklis;
6,7 – kampinio keitiklio nuskaitymo galvutės; 8 – asmeninis kompiuteris;
9 – autokolimatorius

Limbo brūkšnių nuskaitymo sistema

Limbo išstatymui ir brūkšnių nuskaitymui reikalinga optinė sistema. Ją sudaro du mikroskopai su mišriu apšvietimu iš viršaus bei skaitmeninės vaizdo kameros. Vamzdinio tipo mikroskopas su keičiamais objektyvais, tinkamais subpikselinių vaizdo elementų matavimui. Mikroskopo objektyvo didinimai reikalingi darbui: 10x, 20x bei 50x. Mikroskopas turi įėjimą episkopiniam pašvietimui per optinių skaidulų kabelį. Apšvietimui naudojamas mišrus pašvietimas. Limbo išstatymui pagal brūkšnių kraštą arba pagal centravimo linijas reikalingas pastovus apšvietimas. Tokį apšvietimą galima gauti šviečiant didelio intensyvumo LED elementais, halogeninės blykstės arba naudojant mažo galingumo kolimuotą lazerio spindulį. Limbo brūkšnio pozicijos nustatymui dinaminiam režime reikalingas impulsinis pašvietimas. Šiam uždaviniui tinka galingos fotoblykstės su trumpu pašvietimo laiku, tačiau gamyklinių fotoblyksčių pakankamai dideli matmenys. Abu kolimuotus šviesos šaltinius reikia nukreipti per optinę prizmę į optinių skaidulų kabelį.

Mikroskopas tinkamas C-mount tipo kameroms arba adapteriams pajungti. Po signalo gavimo užfiksuoti vaizdą, sudirba fotoblykstė ir per mikroskopo objektyvą ir optinę sistemą vaizdas patenka į skaitmeninę vaizdo kamerą. Kompiuteris duoda užklausą nuskaityti kameros vaizdo atminties buferį ir gavus sutikimą iš kameros kontrolerio per skaitmeninę sąsają vaizdas perrašomas į kompiuterio atminties dalį, kurią tuo metu naudoja atitinkama programinė įranga. Tokiu būdu iš skaitmeninės kameros galima nuskaityti keliolika pilnos raiškos paveikslų per sekundę, tačiau tokiu dažniu nedirba apšvietimo šaltinis. Dėl apšvietimo šaltinio greičio apribojimų, dinaminiam režime paveiksluojama ne dažniau kaip kas 1 sekundę. Norint ant limbo nuskaityti 3600 brūkšnių paveikslų, reikia vienos valandos. Tokiu būdu žinant matuojamų taškų skaičių, galima parinkti limbo kalibravimo greitį.

Skaitmeninė kamera

Kameros vaizdo sensoriaus pikselio dydis turėtų būti kuo mažesnis, tačiau jam mažėjant, silpnėja kameros jautrumas, bei ilgėja ekspozicijos laikas. Šiuo metu rinkoje yra dviejų technologijų vaizdo sensoriai: CCD ir CMOS. CCD technologijos pradininkė ir lyderė yra SONY kompanija. Jos pagrindiniai konkurentai Kodak ir Micron. CMOS technologijos sensorių gaminama daugelyje kompanijų. CCD sensoriai turi nedidelių pranašumų prieš CMOS. Todėl siūloma parinkti skaitmeninę kamerą su CCD sensoriaus tipu, pagamintus Super HAD ar Ex-view HAD technologijomis.

Kadangi mikroskopas ir jo objektyvai pritaikyti dirbti su 1/2“ colio jautriosiomis matricomis, tai reikia parinkti atitinkamą vaizdo kamerą. Didesnis sensoriaus įstrižainės dydis nebeduos gero vaizdo, nes bus ribojamas optinės sistemų parametrai. Mažesnės įstrižainės sensoriaus matomas laukas bus mažesnis, todėl bus sunkiau išstatyti kamerą. Kadangi esami

prekyboje monitoriai leidžia netransformuojant vaizdo rodyti 1-2MPix vaizdą. Tam, kad išstatant limbą nesusidarytų klaidingas vaizdas, reikia parinkti panašios raiškos vaizdo kamerą.

Projektuojamam didžiausiam kalibravimo greičiui vaizdas užfiksuojamas kameros per ekspozicijos laiką, kuris neturėtų viršyti $1/10$ brūkšnio pločio poslinkio per tą laiką. Todėl šis kameros ekspozicijos laikas turi neviršyti $15\mu s$. Fotoblykstės šviesos impulso trukmė turi būti tos pačios reikšmių eilės.

Nuskaitytas paveikslas yra apdorojamas skaitmeniniu filtru, normalizuojamas, išplečiamas dinaminis diapazonas. Tada skaičiuojamas brūkšnio intensyvumo profilis, kiekvienas jo frontas aproksimuojamas algebriniu polinomu, bei randami šių polinomų antros išvestinės nulinio kirtimo taškai. Tų taškų vidurkis yra menamas brūkšnio centras. Gauta koordinatė pervedama į polinę koordinačių sistemą ir gautas kampas pridedamas prie išskaičiuotos kampo iš precizinio keitiklio reikšmės.

Projektavimo pagrindiniai duomenys pasirenkant skaitmeninę kamerą yra precizinio limbo linijinis rastro greitis. Esant 400 mm limbo diametru ir 0,1 sūčio per minutę linijinis greitis yra 2 mm/s. Naudojant intensyvų blykstės apšvietimą ir trumpą ekspozicijos laiką (apie $10\mu s$) tinkamos yra CMOS ir CCD sensorių turinčios skaitmeninės kameros. Norint perduoti kuo didesnę duomenų kiekį į duomenų surinkimo įrenginį reikia naudoti ypač greitas duomenų perdavimo sąsajas (GIGe, CameraLink, Firewire-1394a) ir nespaltoto vaizdo kameras. Kameros sensorius neturėtų būti aušinamas Peltje elementais ar kitu priverstiniu būdu ir neviršyti 5W galingumo. Viena iš galimų kamerų yra Prosilica GC serijos kamerų su GIGe sąsaja.

Turi būti galimybė prijungti skaitmeninį oscilografą keitiklio pirminių neformuotų signalų kontrolei

Be kitų atliekamų funkcijų, sistema turi indikuoti suklio posūkio kampo rodmenis.

Programinė įranga

Programinės įrangos rašymui reikalingos OCX komponentai arba DLL bibliotekos bei programavimo aplinka (Visual NET). Kalibravimas autokolimatoriumi daromas statiniame režime, todėl čia yra reikalavimas tik sąsajos tipui.

Programinė įranga kompensuoja kampo sistemos paklaidas, aproksimuojamas dvimate parametrine funkcija realiame laike, skaičiuojamas užduotoms suklio pasisukimo kampo reikšmėms. Antras parametrinės funkcijos argumentas – temperatūra.

3.4. Mechaniniai mazgai ir sistemos, užtikrinančios kalibratoriaus funkcionalumą

Centruojamas – niveliuojamas staliukas limbo bazavimui

Rankinis limbo matuojamojo paviršiaus statmenumo išstatymas suklio sukimosi ašies atžvilgiu. Leistinas statmenumo nuokrypis ne daugiau $2\ \mu\text{m}$ 100mm spinduliui.

Rankinis limbo rastrinio takelio centravimas suklio sukimosi ašies atžvilgiu. Centravimas atliekamas pagal brūkšnių šonus arba centravimo apskritimą. Leistinas nuokrypis ne daugiau $0,5\ \mu\text{m}$. Staliuko darbinio paviršiaus skersmuo 200mm.

Operatyvaus limbų bazavimo įrenginys:

- Turi įgalinti įvairių matmenų limbų, gaminamų PM (PRECIZIKA METROLOGY), pastatymą ant staliuko be papildomo išstatymo taip, kad būtų užtikrinta jo padėtis, reikalinga jo matavimui be papildomo centravimo;
- Staliuko ir bazavimo įtaisų konstrukcija turi užtikrinti limbo padėties stabilumą po centravimo, kad neatsirastų papildomų kalibravimo paklaidų dėl limbo padėties pasikeitimo;
- Kalibruojamųjų keitiklių bazavimo įtaisas turi užtikrinti nurodytų kalibruojamųjų keitiklių reikalingą kalibravimui padėtį be papildomo jų padėties reguliavimo bei pakankamą jų kampinį standumą;
- Kalibruojamas limbas turi būti bazuojamas trimis mažo ploto tolygiai išdėstytomis atramomis;
- Staliuko ir atramų paviršiai turi minimaliai atspindėti šviesos spindulius.

3.5. Kalibravimo objektai

Limbai

(PRECIZIKA METROLOGY, GPI, FAGOR, GIVI MISURE, ELCIS)

1. Limbų tipas:

- inkrementiniai;
- su Grėjaus kodu;
- su barkodu.

2. Matmenys:

- didžiausias išorinis skersmuo 200 mm;
- mažiausias vidinis skersmuo 0 mm;
- rastrinių takelių skersmuo – didžiausias 200mm, mažiausias 5 mm;
- stiklo storis $0,5 - 5\ \text{mm}$.

3. Paviršių formos ir tarpusavio padėties nuokrypiai:
 - formos nuokrypiai 2-5 μm ;
 - tarpusavio padėties (lygiagretumo) nuokrypiai 5 μm .
4. Limbo rastrų paklaida 1“ (kai takelio skersmuo ne mažesnis 125mm);
5. Susietų takelių skaičius 2 (inkrementinių ir visų barkodų limbų) ir 16 (limbų su Grėjaus kodu);
6. Atskirų takelių rastrų susietumas, leistina susietumo paklaida 0,2 μm (lanko ilgiui).

Keitikliai

Preciziniai A90, A110 A170 ir analogiški jiems.

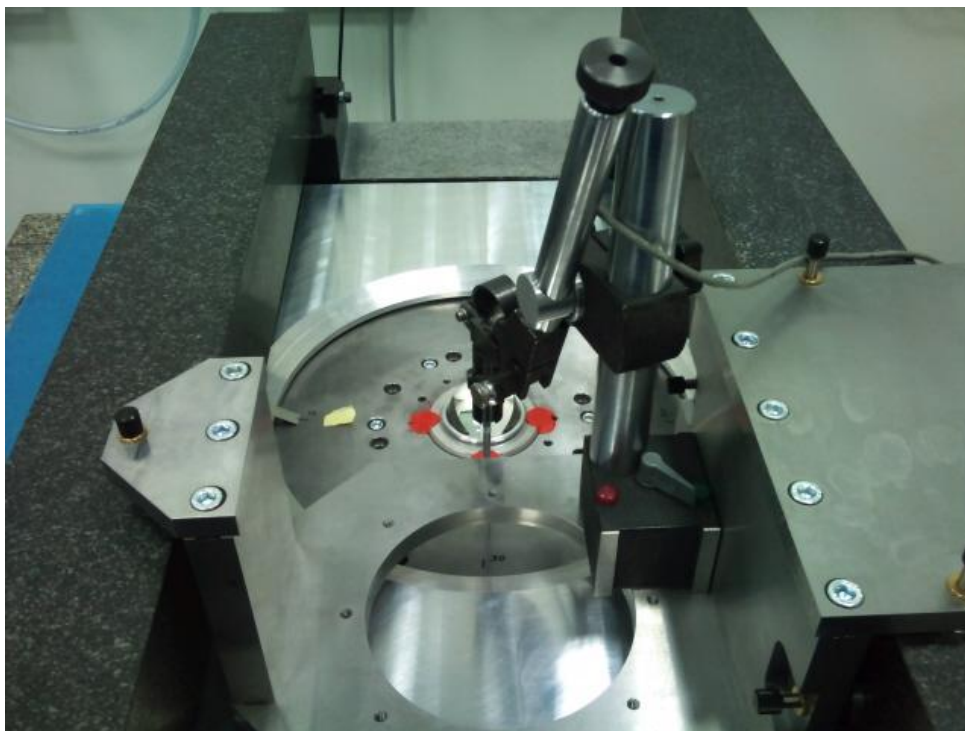
4. Eksperimentiniai tyrimai

Suklio matavimui naudotas apskritumo matas – sfera, TAYLOR HOBSON mažų poslinkių matavimo prietaisas su savirašiu prietaisu.

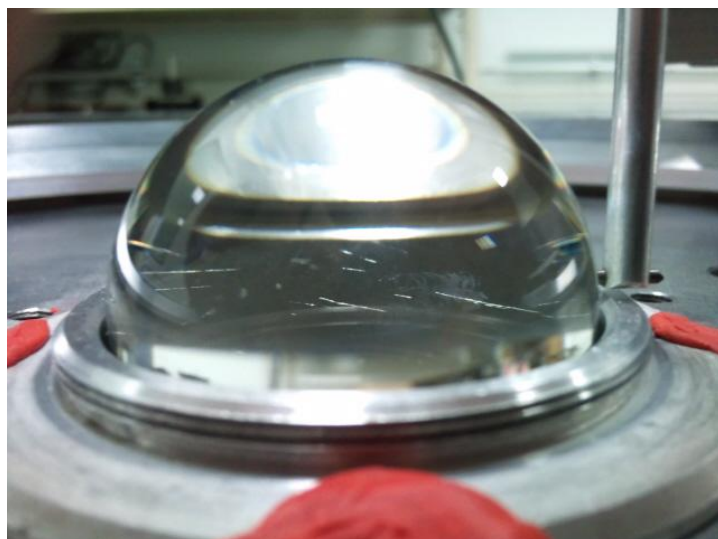
Nagrinėjant precizinio suklio tikslumą, išskiriamos radialinės, ašinės ir kampinės sukimosi paklaidos.

Precizinių suklių ašinės ir kampinės paklaidos yra eile mažesnės už limbų formos paklaidas, kurių įtakos kalibravimo tikslumo eliminavimui komparatoriuje numatomos autofokusavimo sistemos. Todėl jų nagrinėjimas ir matavimas yra neaktualūs komparatoriaus ir jo posūkio sistemos sukūrimui, remiantis aukščiau išdėstytais argumentais bus nagrinėjamos tik radialinės sukimosi paklaidos.

Radialinių paklaidų matavimui buvo pasirinktas pavyzdinio apskritumo mato metodas suprojektuotame kampo komparatoriuje. Radialinių paklaidų matavimo bendras vaizdas bei pavyzdinės sferos vaizdas parodytas 4.1 ir 4.2 paveiksluose.



4.1 pav. Radialinių paklaidų matavimo stendo bendras vaizdas



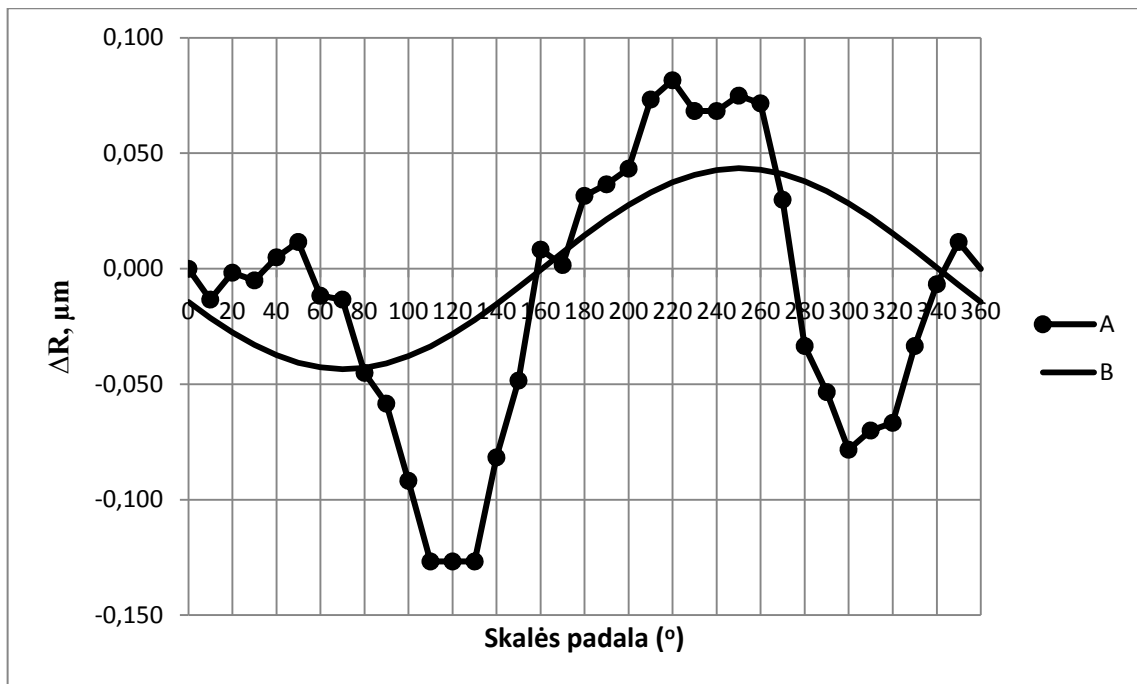
4.2 pav. Pavyzdinės sferos vaizdas

Radialinių paklaidų matavimui pavyzdinė sfera, kurios formos paklaidos neviršija $0,01\text{--}0,02\text{ }\mu\text{m}$, plastilino ir vaško mišiniu tvirtinama prie suklio. Pusės apskritimo metodu išstatoma sfera, kad būtų aerostatinio suklio centre t.y. nustatoma suklio nulinė padėtis ir nuskaitomi duomenys pasukus sferą 180° vėl nuskaitomi duomenys, jei nesutampa sfera centruojama tol kol duomenys susivienodina, tą patį veiksmą atliekame ties $90\text{--}270^\circ$. Matavimas remiasi pastovaus kampo kartojimu apskritime, pradedant nuo vieno kurio nors taško ir baigiant tuo pačiu tašku. Matavimai atliekami keletą kartų, tolesniems skaičiavimams naudojamas kelių matavimų vidurkis. Apskaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis. Preciziniu mažų poslinkių matuokliu su užrašančiu prietaisu registruojamas radialinis sferos mušimas. Radialinė suklio sukimosi paklaida nustatoma pagal radialinio sferos mušimo grafiką.

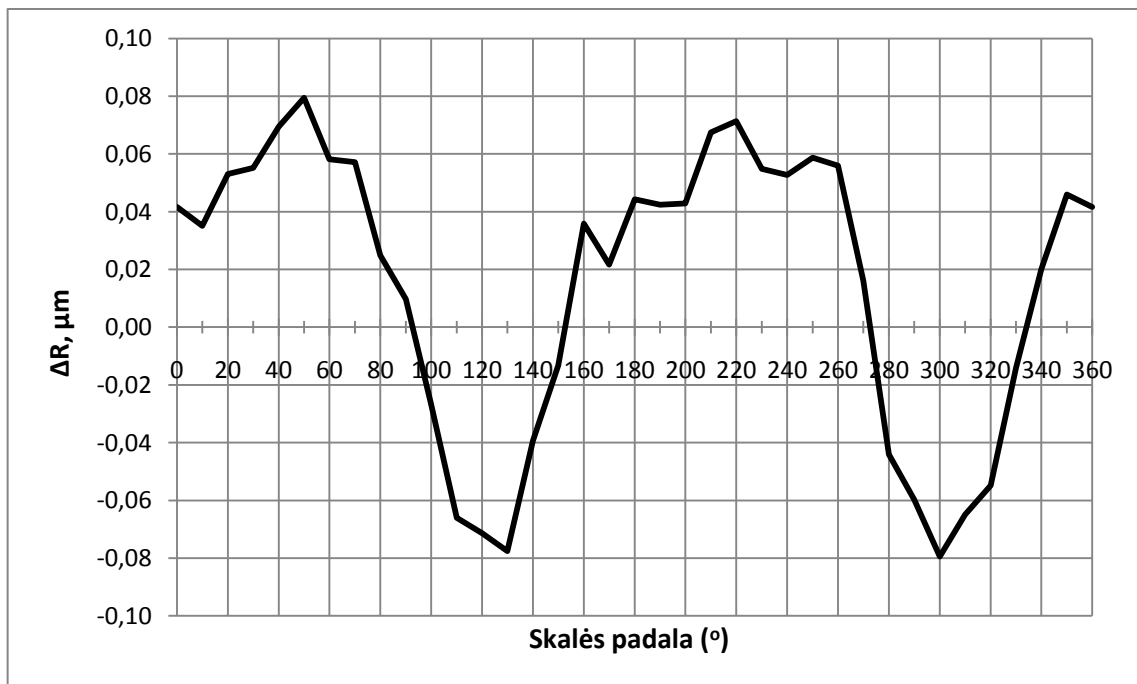
4.1. Tyrimų rezultatai

Tyrimui suklio paklaidų duomenys buvo nuskaitomi kas dešimt laipsnių (0° , 10° , 20° , 30° ,), statistiškai duomenims įvertinti buvo skaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis, matavimų vidutinės reikšmės aproksimuotos trigonometriniu polinomu (Furjė eilute).

Sferos išstatymo paklaida kompensuojama iš matavimų rezultatų eliminavus pirmąją harmoniką (ekscentricitetą) (4.3 pav.), matavimo rezultate lieka nekompensuotas dydis – suklio radialinės sukimosi paklaidos (4.4 pav.).

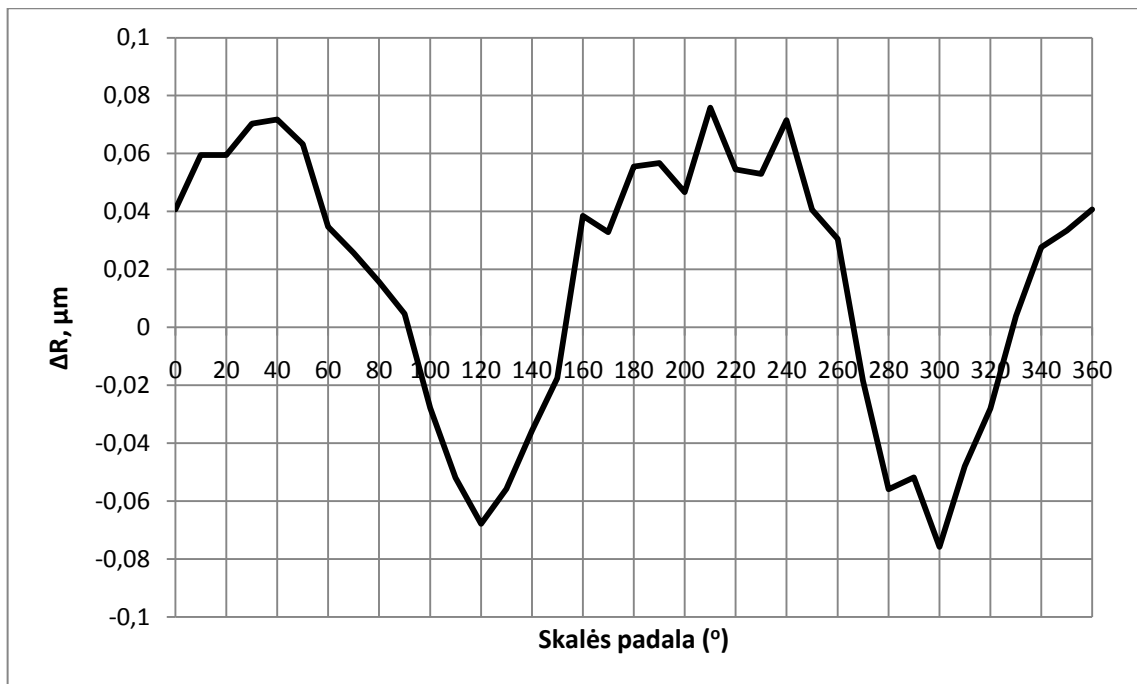


4.3 pav. A – matavimų duomenys; B – pirmoji harmonika

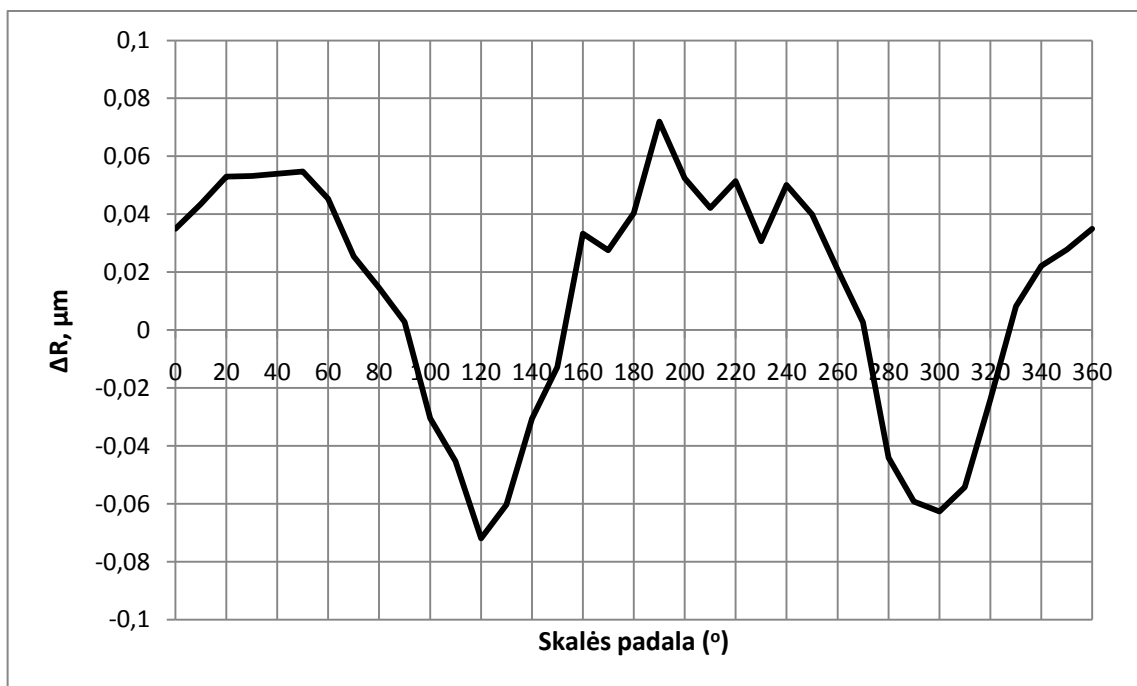


4.4 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos su mova, kai $P_{\min}$.

Gautos suklio sukimosi paklaidų reikšmės $\pm 0,08 \mu\text{m}$ (4.4 pav.) yra ženkliai didesnės už gamintojo nurodytas reikšmes $\pm 0,025 \mu\text{m}$. Šio matavimo metu sukliui buvo tiekiamas $P_{\min.} = 4.2$ bar. oro slėgis. Suklio sukimosi paklaidos, kai slėgis $P_{\text{vid.}} = 4.6$ bar. ir $P_{\max.} = 5$ bar. matavimo rezultatai pateikti 4.5 ir 4.6 paveiksluose.



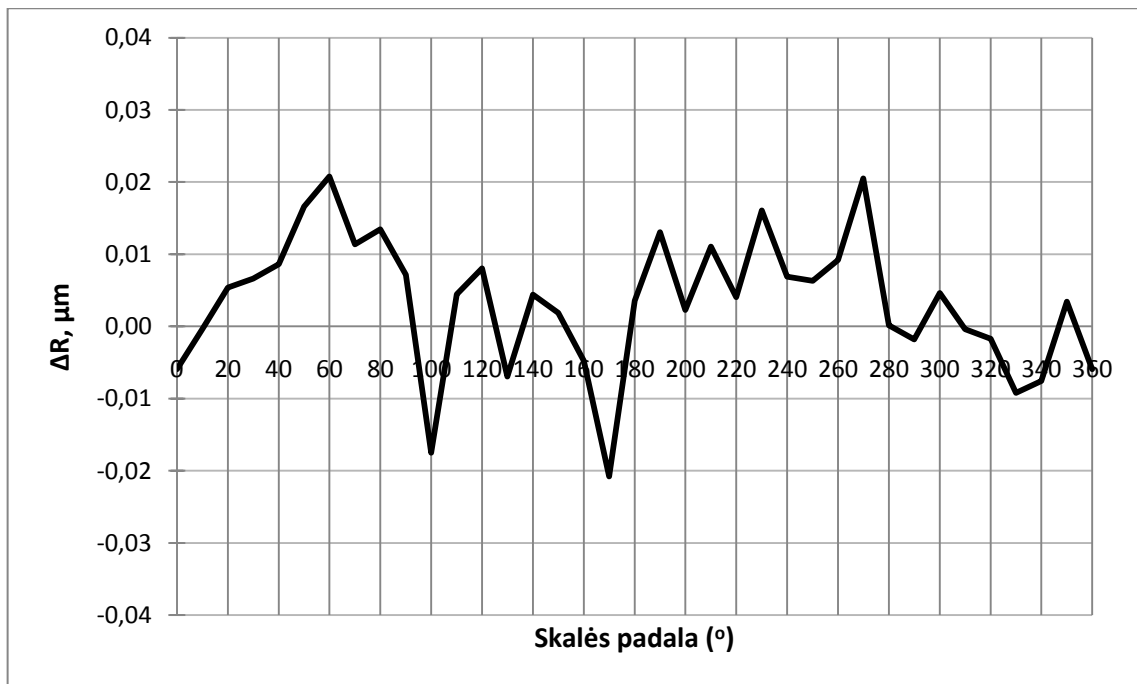
4.5 pav. Suklio radialinės sukimosi paklaidos su mova, kai $P_{vid.}$



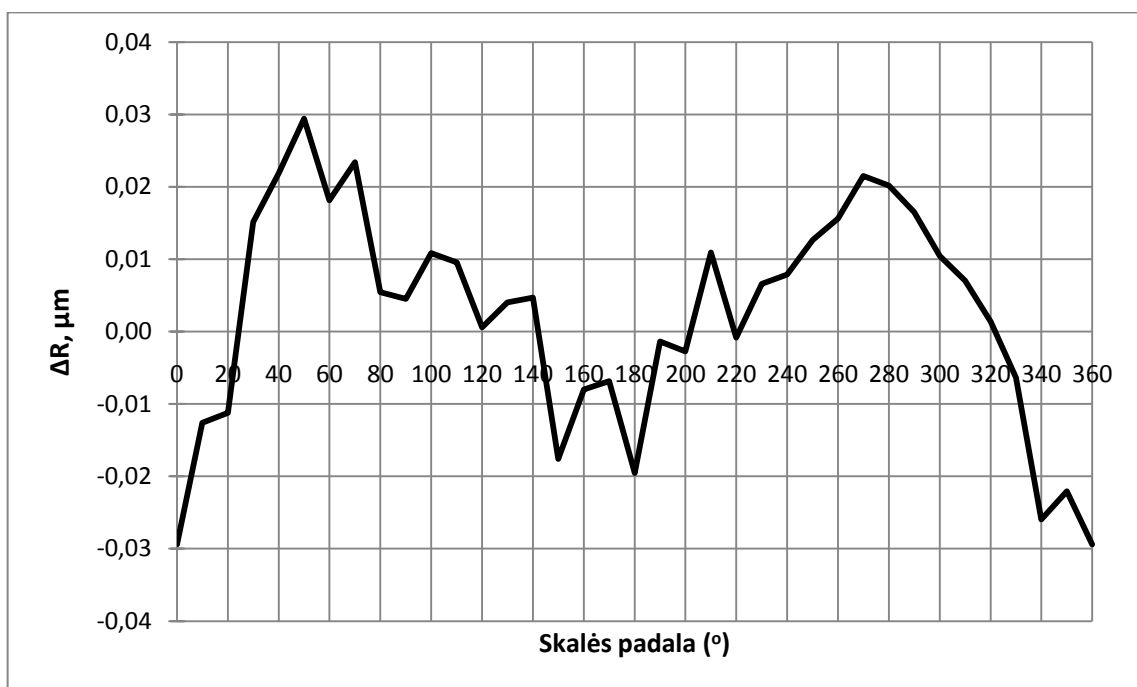
4.6 pav. Suklio radialiosios sukimosi paklaidos su mova, kai $P_{max.}$

Padidinus oro slėgį pastebėta, jog paklaidos mažėja nuo $\pm 0,08 \mu m$ esant $P_{min.}$ iki $\pm 0,072 \mu m$ esant $P_{max.}$

Siekiant įsitikinti, ar gamintojo nurodytos paklaidos yra teisingos, buvo pamatuotas suklys, gauti rezultatai pateikti 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Suklio radialinės sukimosi paklaidos be movos, kai $P_{\min}$.



4.8 pav. Suklio radialinės sukimosi paklaidos modernizavus movą

Suklio sukimosi paklaidų įtaka kampų kalibravimo tikslumui apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta = \Delta R * 412,5/D \quad (5)$$

čia: ΔR – suklio radialinės sukimosi paklaidos μm ;

D – kampinio keitiklio (žiedo) skersmuo 417 mm.

5. Kampo matavimo sistemos kalibravimo be etaloninės sistemos metodika

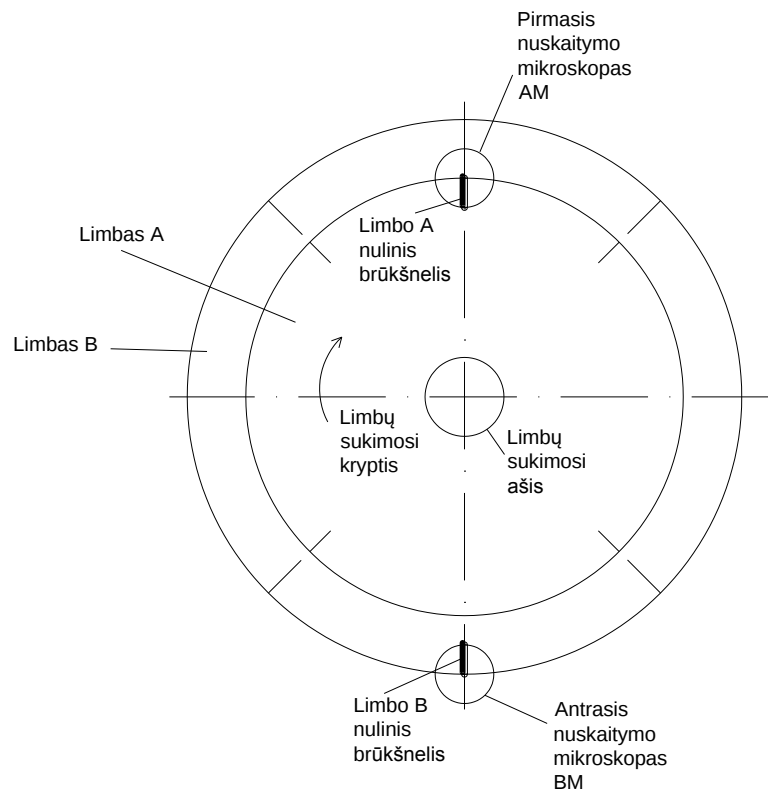
5.1. Dviejų limbų A ir B tarpusavio kalibravimas

Nuo pat kampo komparatoriaus kūrimo pradžios buvo sprendžiamas klausimas, kaip susikalibruoti kampo komparatorių be etaloninės sistemos. Toks metodas buvo rastas, tai dviejų neetaloninių limbų tarpusavio kalibravimas.

Matavimų rezultatai nuskaitomi dviem diametraliai priešingose pusėse išdėstytais mikroskopais (5.1 pav.). Jei leidžia techninės galimybės, mikroskopas gali būti vienas arba keli vienoje pusėje (arba kt.).

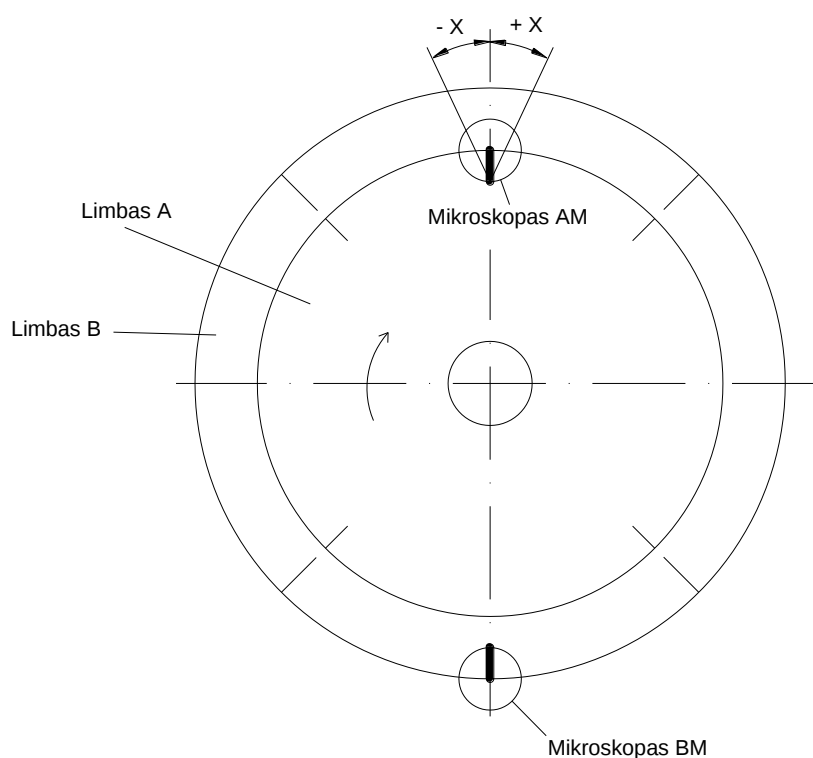
Dviejų limbų A ir B tarpusavio kalibravimas atliekamas tokia tvarka:

1. Matavimo metu limbai pasukami pagal laikrodžio rodyklę 5.1 pav.;
2. Limbas A pasukamas limbo B atžvilgiu, taip pat pagal laikrodžio rodyklę;
3. Limbo B brūkšneliai nustatomi kiekvieną kartą tik į mikroskopo BM nulinę padėtį;
4. Diametraliai priešingoje pusėje esančiu mikroskopu AM nuskaitomas limbo A brūkšnelių padėtys, kai limbo B brūkšneliai yra mikroskopo B nulinėje padėtyje.



5.1 pav. Dviejų limbų A ir B tarpusavio kalibravimas

Nuskaitomojo brūkšnelio padėties ženklų nustatymas pateiktas 5.2 paveiksle.



5.2 pav. Nuskaitomojo brūkšnelio padėties ženklas

Sukant abu sujungtus limbus pagal laikrodžio rodyklę, nuskaitymos limbo A brūkšnelių padėtys. Tai lentelės pirmoji eilutė, kuri žemiau parodyta. Po to limbas A prasukamas limbo B atžvilgiu pagal laikrodžio rodyklę ir matavimas pakartojamas. Ši matavimų eilutė surašoma pirmosios eilutės apačioje ir t. t., kol limbas A apsisuks vieną kartą (2π) limbo B atžvilgiu. Gaunama reikšmių lentelė, kuri toliau turi būti apdorojama. Šalia pateiktas ir konkretus pavyzdys.

Toliau lentelėje esančios brūkšnelių padėčių vertės perskaičiuotos į padalų vertes ir atitinkamai surašytos į kitą lentelę. Padalų verčių stulpeliai sumuojami ir dalinami iš matavimų skaičiaus, t. y. 8 ir taip yra gaunamos limbo B paklaidos. Kadangi limbai yra du, norint gauti A limbo paklaidas, reikia iš limbo B gautų paklaidų atimti padalų verčių B-A pirmosios eilutės reikšmes $[B - (B - A) = A]$.

5.1 lentelė. Matavimo reikšmės

0	0	-11	-6	+8	-5	+9	-7
0	-7	0	-10	+3	+3	+4	-5
-7	+4	-4	-15	+11	-2	+6	-5
+4	0	-9	-7	+6	0	+6	-12
0	-5	-1	-12	+8	0	-1	-1
-5	+3	-6	-10	+8	-7	+10	-5
+3	-2	-4	-10	+1	+4	+6	-10
-2	0	-4	-17	+12	0	+1	-2

Teorinis būdas

X_1^1	X_2^1	X_3^1	X_4^1	X_5^1	X_6^1	X_7^1	X_8^1
X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2	X_5^2	X_6^2	X_7^2	X_8^2
X_1^3	X_2^3	X_3^3	X_4^3	X_5^3	X_6^3	X_7^3	X_8^3
X_1^4	X_2^4	X_3^4	X_4^4	X_5^4	X_6^4	X_7^4	X_8^4
X_1^5	X_2^5	X_3^5	X_4^5	X_5^5	X_6^5	X_7^5	X_8^5
X_1^6	X_2^6	X_3^6	X_4^6	X_5^6	X_6^6	X_7^6	X_8^6
X_1^7	X_2^7	X_3^7	X_4^7	X_5^7	X_6^7	X_7^7	X_8^7
X_1^8	X_2^8	X_3^8	X_4^8	X_5^8	X_6^8	X_7^8	X_8^8

5.2 lentelė. Padalų vertės (A-B)

0	-11	+5	+14	-13	+14	-16	+7
-7	+7	-10	+13	0	+1	-9	+5
+11	-8	-11	+26	-13	+8	-11	-2
-4	-9	+2	+13	-6	+6	-18	+16
-5	+4	-11	+20	-8	-1	0	+1
+8	-9	-4	+18	-15	+17	-15	0
-5	-2	-6	+11	+3	+2	-16	+13
+2	-4	-13	+29	-12	+1	-3	0

Teoriškai (A-B)

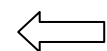
$X_2^1 - X_1^1$	$X_3^1 - X_2^1$	$X_4^1 - X_3^1$	$X_5^1 - X_4^1$	$X_6^1 - X_5^1$	$X_7^1 - X_6^1$	$X_8^1 - X_7^1$	$X_1^1 - X_8^1$
$X_2^2 - X_1^2$	$X_3^2 - X_2^2$	$X_4^2 - X_3^2$	$X_5^2 - X_4^2$	$X_6^2 - X_5^2$	$X_7^2 - X_6^2$	$X_8^2 - X_7^2$	$X_1^2 - X_8^2$
$X_2^3 - X_1^3$	$X_3^3 - X_2^3$	$X_4^3 - X_3^3$	$X_5^3 - X_4^3$	$X_6^3 - X_5^3$	$X_7^3 - X_6^3$	$X_8^3 - X_7^3$	$X_1^3 - X_8^3$
$X_2^4 - X_1^4$	$X_3^4 - X_2^4$	$X_4^4 - X_3^4$	$X_5^4 - X_4^4$	$X_6^4 - X_5^4$	$X_7^4 - X_6^4$	$X_8^4 - X_7^4$	$X_1^4 - X_8^4$
$X_2^5 - X_1^5$	$X_3^5 - X_2^5$	$X_4^5 - X_3^5$	$X_5^5 - X_4^5$	$X_6^5 - X_5^5$	$X_7^5 - X_6^5$	$X_8^5 - X_7^5$	$X_1^5 - X_8^5$
$X_2^6 - X_1^6$	$X_3^6 - X_2^6$	$X_4^6 - X_3^6$	$X_5^6 - X_4^6$	$X_6^6 - X_5^6$	$X_7^6 - X_6^6$	$X_8^6 - X_7^6$	$X_1^6 - X_8^6$
$X_2^7 - X_1^7$	$X_3^7 - X_2^7$	$X_4^7 - X_3^7$	$X_5^7 - X_4^7$	$X_6^7 - X_5^7$	$X_7^7 - X_6^7$	$X_8^7 - X_7^7$	$X_1^7 - X_8^7$
$X_2^8 - X_1^8$	$X_3^8 - X_2^8$	$X_4^8 - X_3^8$	$X_5^8 - X_4^8$	$X_6^8 - X_5^8$	$X_7^8 - X_6^8$	$X_8^8 - X_7^8$	$X_1^8 - X_8^8$

0	-32	-48	+144	-64	+48	-88	+40
---	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----



Stulpelių sumos dalinamos iš matavimų skaičiaus t.y. 8

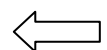
0	-4	-6	+18	-8	+6	-11	+5
---	----	----	-----	----	----	-----	----



Limbo B paklaidos

-

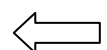
0	-11	+5	+14	-13	+14	-16	+7
---	-----	----	-----	-----	-----	-----	----



B-A (pirmoji eilutė);

=

0	+7	-11	+4	+5	-8	+5	-2
---	----	-----	----	----	----	----	----



Limbo A paklaidos

$B - (B - A) = A$

Išvados

1. Atlikus precizinių suklių apžvalgą nustatyta, kad mažiausias sukimosi paklaidas turi sukliai su cilindrinų ir plokščių paviršių kombinacija. Jų radialinė ir ašinė sukimosi paklaidos neviršija $\pm 0,025 \mu\text{m}$.
2. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad radialinės suklio sukimosi paklaidos priklauso nuo movos konstrukcinių elementų, kurie neigiamai veiks etaloninį suklių didindami radialinę sukimosi paklaidą.
3. Išsprendus movos konstrukcines problemas ir atlikus pakartotinius matavimus gauti rezultatai $\pm 0,030 \mu\text{m}$ tenkinami, t. y. artimi gamintojo nurodytiems tikslumams $\pm 0,025 \mu\text{m}$.
4. Etaloninio suklio radialinėms paklaidoms nustatyti pagal naudotą metodiką duomenis nuskaityti pakanka kas 10 laipsnių, matavimų vidutinės reikšmės aproksimuotos trigonometrinio polinomu (Furjė eilute).
5. Tyrimų metu pastebėta, kad temperatūra turi didelę įtaką matavimo tikslumui.

Literatūra

1. Bručas, D., V. Giniotis, P. Petroškevičius. Basic construction of the flat angle calibration test bench for geodetic instruments. *Geodesy and cartography*, 2006, p. 66 – 70.
2. Bručas D., Skeivalas J., Giniotis V. The correlation analysis of the angle measurements. *Geodesy and cartography*, 2007.
3. Bručas D., V. Giniotis. Preliminary Accuracy Analysis of the Angular Test Bench. Kaunas: Technologija, 2007.
4. Dailidė S. Technologiniai matavimai. Vilnius: Mokslo, 1993. 357 p.
5. Dongshot H., Ernst A. Accuray angle comporator. *Messtechnik*, 1996.
6. Eitutis A., Kaušinis S. Mechaninių dydžių matavimai. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008. 574 p.
7. Giniotis V. Padėties ir poslinkių matavimas. Vilnius: Technika, 2005. 216 p.
8. Giniotis V., Grattan K.T.V., Rybokas M., Kulvietienė, R. Uncertainty and indeterminacy of measurement data. *Measurement*, 2004.
9. Giniotis V. Investigations in the field of length and angle measurements. Lietuvos mokslas. Virpesių mechanika ir technika (Science and arts of Lithuania. Vibroengineering). Monografija, 1998.
10. Just A., Krause M., Probst R., Witterkopf R. Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator. *Metrologia*, 2003, p. 288-294.
11. Jelisejev S. V. Geodezičeskyje instrumenty i pribory. Osnovy rasčeta, konstrukcii i osobennosti izgotovlenija. Moskva: Nedra, 1973. 392 p.
12. Ingensand H. A new method of theodolite calibration. XIX International Congress Helsinki Finland, 1990.
13. Martin D. The Analysis of Parasitic Movements on a High Precision Rotation Table. MEDSI. Himeji Japan, 2006.
14. Probst R., Witterkopf R., Krause M., Dangschat H., Ernst A. The New PTB Angle Comparator. *Measurement Science Technology*, IOP 1998, p. 1059 – 1066.
15. Rybokas M., Giniotis V., Petroškevičius R., Kulvietienė D., Bručas D. Performance and Accuracy Monitoring of Geodetic Instruments. *Proceedings of Intern. Conf. on Condition Monitoring*, Cambridge, UK, 2005.
16. Rybokas M., Gyniotis V., Petroškevičius P., Kulvietienė R., Bručas D.: Performance monitoring of geodetic instruments. *Insight*, 2006, Vol. 48, No 8, p. 288-291.
17. Seilius A. Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai. Vilnius: Technika, 2001. 271 p.

18. Sim P. J. Angle Standards and their Calibration. Modern Techniques in Metrology. World Scientific, 1976.
19. Vekteris V., Jurevičius M., Kilikevičius A. Matavimų teorija ir praktika. Vilnius: Žiburio leidykla, 2009.
20. Vekteris V., Kasparaitis A., Kaušinis S., Kanapėnas R. Matavimų teorija ir praktika. Vilnius: Žiburio leidykla, 2000. 380 p.
21. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Kojitoni M., Masuda T. Calibration of a polygon mirror by the rotory encoder calibration sysytem. Dubrovnik, 2003.
22. Эйдинов В. Я. Измерение углов в машиностроении. Москва: Государственное издательство стандартов. 1963. 415 p.