



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Vytautas Rudokas

**PRECIZINIO KAMPO KOMPARATORIAUS VIDINIŲ IR IŠORINIŲ
TRIKDŽIŲ TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMAS
RESEARCH OF INTERNAL AND EXTERNAL DISTURBANCE
TEMPERATURE GRADIENTS OF A PRECISION ANGLE COMPARATOR**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Vytautas Rudokas

**PRECIZINIO KAMPO KOMPARATORIAUS VIDINIŲ IR IŠORINIŲ
TRIKDŽIŲ TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMAS
RESEARCH OF INTERNAL AND EXTERNAL DISTURBANCE
TEMPERATURE GRADIENTS OF A PRECISION ANGLE COMPARATOR**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas

prof. habil. dr. A. Kasparaitis

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. A. Petrėtienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Mindaugas Jurevičius
(Vardas, pavardė)
2013-05-02
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2013-05-02 Nr.
Vilnius

Studentui Vytautui Rudokui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių temperatūrinių gradientų tyrimas
patvirtinta 2013 m. balandžio 5d. dekanų įsakymu Nr. 95me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. gegužės mėn. 21 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Temperatūrinių paklaidų įtaka precizinių komparatorių tikslumui.
2. Temperatūros matavimo metodų ir priemonių, temperatūrinių laukų modeliavimo metodų apžvalga.
3. Temperatūrinių gradientų tyrimo metodika.
4. Eksperimentiniai temperatūrinių gradientų erdvėje ir priklausančių nuo laiko tyrimai, tyrimo rezultatų apdorojimas, pateikimas
5. Temperatūrinių laukų ir deformacijų analitinio tyrimo (modeliavimo) iliustracijos. Išvados, rekomendacijos kalibravimui. Literatūra.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas
(Parašas)

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

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
Vytautas Rudokas
(Vardas, pavardė)
2013-05-02
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk.

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

Mechatronikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių temperatūrinių gradientų tyrimas**

Autorius **Vytautas Rudokas**

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

Kalba

☒ x

lietuvių



užsienio

Anotacija

Darbas skirtas precizinių kampo komparatorių išoriniams ir vidiniams temperatūriniams trikdžiams tirti. Jame sudarytas kalibravimo neapibrėžties modelis, identifikuoti ir išnagrinėti pagrindiniai kampo kalibravimo neapibrėžties sandai, apžvelgti precizinių matavimo įrenginių temperatūrinių paklaidų tyrimo metodai ir priemonės, pasirinkta temperatūrinių gradientų tyrimo metodika ir įranga. Remiantis pateiktomis precizinių kampo komparatorių schemomis, identifikuoti pagrindiniai temperatūrinių paklaidų šaltiniai. Atlikti temperatūrinių gradientų komparatoriaus ir atskirų jo šilumos šaltinių aplinkoje eksperimentiniai tyrimai. Tyrimų rezultatai statistiškai apdoroti, apibendrinti ir padarytos reikiamos išvados. Pateikti temperatūrinių komparatoriaus bazinių elementų temperatūrinių laukų ir deformacijų skaičiavimo rezultatai, atlikti remiantis eksperimentiniais tyrimais. Teikiamos rekomendacijos temperatūriniams kalibravimo paklaidoms mažinti.

Darbo apimtis – 74 p. teksto be priedų, 44 iliustracijos, 21 bibliografinis šaltinis.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: precizinis kampo komparatorius, modeliavimas, temperatūriniai laukai, įtaka, temperatūros gradientas, išoriniai ir vidiniai temperatūriniai trikdžiai, jutikliai, matavimai, paklaidos.

Vilnius Gediminas Technical University

Mechanics faculty

Machine production department

ISBN

ISSN

Copies No.

Date-....-....

Mechatronics study programme bachelor (master) thesis.

Title: Research of internal and external disturbance temperature gradients of a precision angle comparator

Author **Vytautas Rudokas**

Academic supervisor **Albinas Kasparaitis**

Thesis language

☐

Lithuanian

☒

Foreign (English)

Annotation

The research investigates external and internal temperature disturbance in precision angle comparators. The research consists of the model of calibration uncertainty, identification and analysis of the main components of calibration uncertainty, the review of the methods and implements used for the analysis of the measurement errors which occur in precision measurement mechanisms; furthermore, there is indicated choice of methodology and equipment necessary for the analysis of temperature gradient investigation. According to the given schemes of precision angle comparators, there are identified the basic source of temperature errors. The experimental research of temperature gradient comparator and its separate source of warmth has been carried out. The results were produced and summarized as well as some respective conclusions were reached. According to the experimental research, there are produced some computation results concerning the temperature fields of base elements of temperature comparators. Finally, some recommendations are formulated concerning the reduction of the errors of temperature calibration.

Thesis consist of: 74 p. text without appendixes, 44 pictures, 21 bibliographical entries.
Appendixes included.

Keywords: precision angle comparator, simulation, temperature fields, influence, temperature gradient, external and internal temperature disturbance, sensors, measurements, errors.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų,
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vytautas Rudokas, 20075212

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Mechanikos inžinerija, Mtfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

**Baigiamojo darbo (projekto)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. gegužės 14 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių temperatūrinių gradientų tyrimas“ patvirtintas 2013m. balandžio 5d. dekanų potvarkiu Nr. 95me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Angelika Petrėtienė. Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis.

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

(Parašas)

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

SANTRUMPŲ SARAŠAS	9
PAVEIKSLŲ SARAŠAS	10
LENTELIŲ SARAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS	16
1.1 Temperatūrinių laukų modeliavimas skaitiniu metodu	16
1.2 Temperatūrinių laukų modeliavimas analitiniu metodu	16
1.3 KMM paklaidų aproksimacija ir kompensacija atsižvelgiant į mazgų temperatūrinę inerciją	16
1.3.1 Plokštelės tipo detalių temperatūrinis laukas	20
1.4 Kalibravimo neapibrėžties analizė	23
2. TEMPERATŪRINIŲ TRIKDŽIŲ IDENTIFIKAVIMAS, TYRIMO METODIKA	27
2.1 Temperatūros matuoklis PP2	27
2.2 Temperatūros jutikliai	28
2.3 Temperatūros matavimo metodika	30
3. TYRIMO OBJEKTAS	32
3.1 Kampo matų ir kampinių poslinkių kalibravimo komparatorius	32
3.2 Pavyzdinio kampo sistema	34
4. EKSPERIMENTINIS APLINKOS TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMAS	36
5. EKSPERIMENTINIS KOMPARATORIAUS VIDINIŲ TEMERATŪRINIŲ TRIKDŽIŲ TYRIMAS	43
5.1 Temperatūros gradientų variklio ir pavaros aplinkoje eksperimentinis tyrimas	43
5.2 Temperatūros gradientų CCD kameros aplinkoje eksperimentinis tyrimas	48
5.3 Temperatūros gradientų aerostatinio guolio aplinkoje eksperimentinis tyrimas	56
6. TEMPERATŪRINIŲ DEFORMACIJŲ MODELIAVIMAS PAGAL TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMO REZULTATUS	58
6.1 Modeliavimo pradmenys	58
6.1.1 Šilumos perdavimas šilumos laidumo ir paviršinės konvekcijos būdu	59

6.1.2 Šilumos perdavimas šilumos laidumo būdu, BE modelyje aplinkos orą traktuojant kaip PKK konstrukcijos „dalį“	59
6.1.3 Šilumos perdavimas šilumos laidumo būdu, BE modelyje aplinkos orą traktuojant kaip šilumos ir masės mainų veikimu paremtą modelį	60
6.1.4 Temperatūrinių deformacijų modelis.....	61
6.2 PKK baigtinių elementų lygtys	61
6.2.1 Šilumos laidumo ir konvekcijos baigtiniai elementai	61
6.3 Modeliavimo rezultatai	65
6.4 Modeliavimo rezultatų išvados	71
IŠVADOS	72
LITERATŪRA	73
PRIEDAI	75
1 PRIEDAS. Konferencijos straipsnis.....	76
2 PRIEDAS. Temperatūros matavimo duomenys.....	81

SANTRUMPŲ SARAŠAS

PT – platina (periodinės cheminių elementų lentelės VIII grupės cheminis elementas).

PKK – precizinis kampo komparatorius.

SVK – skaičiavimo–valdymo kompleksas.

CCD – krūvio sąsajos įtaisas (angl. charge-coupled device).

ITS – tarptautinė temperatūros skalė (angl. international temperature scale).

KMM – koordinatinė matavimo mašina.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Temperatūros pokyčiai aplinkoje Ta ir pagrindai esant skirtingiems ξ ir $T0$	22
1.2 pav. Aplinkos temperatūros Ta pasikeitimai ir portalas taške 1 – $(x2/3, y2/2, z2)$, taške 2 – $(x2/3, y2, z2/2)$, Tsv – vidutinė viso kūno temperatūra.....	23
1.3 pav. Aplinkos temperatūros Ta pasikeitimai ir pinolės taške 1 – $(x3/2, y3, z3/3)$, Tsv – vidutinė viso kūno temperatūra	23
1.4 pav. Kampo kalibravimo paklaidų modelis	24
2.1 pav. Jutiklis EN 60 751	28
2.2 pav. Jutiklis PCA 1.2010.1H.....	29
2.3 pav. Skaitmeninis termometras „OMEGA HH41“	29
2.4 pav. Atliktų matavimų blokinė schema.....	31
3.1 pav. Kampinio komparatoriaus schema	32
3.2 pav. Kampinis komparatorius	34
4.1 pav. Apibendrintas erdvinio temperatūros gradiento darbinėje plokštumoje grafikas	36
4.2 pav. Jutiklių išdėstymo schemas	37
4.3 pav. a) Jutiklių gauti temperatūros duomenys apatinėje plokštumoje	38
4.3 pav. b) Jutiklių gauti temperatūros duomenys darbinėje plokštumoje.....	39
4.3 pav. c) Jutiklių gauti temperatūros duomenys viršutinėje plokštumoje.....	40
4.4 pav. Temperatūrų pokyčiai renkantis darbuotojams	41
4.5 pav. Aplinkos temperatūrų reakcija į durų atidarymą.....	42
5.1 pav. Jutiklių išdėstymas variklio aplinkoje	44
5.2 pav. Variklio ir kampo matavimo sistemos aplinkų temperatūrų grafikas	44
5.3 pav. Variklio aplinkos šilimas jo vidurio plokštumoje	45
5.4 pav. Variklio aplinkos šilimas plokštumoje virš jo.....	46
5.5 pav. Kampo matavimo sistemos jutiklių išdėstymas	47
5.6 pav. Kampo matavimo sistemos aplinkos šilimas dirbant varikliui.....	47
5.7 pav. Variklio šilimas dirbant	48
5.8 pav. Kameros aplinkos jutiklių išdėstymas.....	49

5.9 pav. Kameros aplinkos šilimas.....	50
5.10 pav. Kameros šilimas pirmą valandą	51
5.11 pav. Apatinės plokštumos šilimas	51
5.12 pav. Vidurinės plokštumos šilimas	52
5.13 pav. Viršutinės plokštumos šilimas.....	53
5.14 pav. Aplinkos šilimas virš kameros	53
5.15 pav. Mikroskopo korpuso šilimas nuo kameros.....	54
5.16 pav. Pačios kameros šilimas.....	55
5.17 pav. Kameros ir mikroskopo korpuso aušimas	55
5.18 pav. Granito temperatūros veikiant oro guoliui	56
5.19 pav. Jutiklių išdėstymo schema šalia oro guolių.....	57
6.1 pav. Precizinio kampo komparatoriaus poslinkių ir temperatūrinių deformacijų modeliavimo etapų schema.....	61
6.2 pav. Tiriama sritis ir jos baigtiniai elementai.....	62
6.3 pav. Šilumos laidumo ir konvekcijos baigtinis elementas	63
6.4 pav. Ekvivalentinių šilumos galių kitimo laike priklausomybės	67
6.5 pav. Eksperimentiškai išmatuotos temperatūrų priklausomybės nuo laiko po granitu, ant korpuso ir ore netoli nuo CCD kameros.....	68
6.6 pav. Temperatūrinių deformacijų įtakotos mikroskopo galo poslinkių priklausomybės nuo laiko, kai skaičiuojama PKK temperatūros kitimo priklausomybė pridėjus 7.4 pav. pateiktas šilumos galias	68
6.7 pav. a) - PKK temperatūros b) - ir suminiai temperatūriniai poslinkiai laiko momentu $t=7380s$	69
6.8 pav. a) - Temperatūrų pasiskirstymas PKK korpuse b) - ir temperatūros sukelti absoliutiniai poslinkiai, CCD matricos temperatūrai pakilus $1^{\circ}C$	70

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Jutiklio EN 60 751 techninės charakteristikos	28
2 lentelė. Jutiklio PCA 1.2010. 1H techninės charakteristikos	29
3 lentelė. Skaitmeninio termometro „OMEGA HH41“ techninės charakteristikos.....	30
4 lentelė. Apatinės plokštumos jutiklių statistiniai duomenys	38
5 lentelė. Darbinės plokštumos jutiklių statistiniai duomenys.....	39
6 lentelė. Viršutinės plokštumos jutiklių statistiniai duomenys.....	40
7 lentelė. Durų darinėjimo laikai.....	42
8 lentelė. Variklio ir kampo matavimo sistemos jutiklių statistiniai duomenys	44
9 lentelė. Kameros aplinkos jutiklių pilno matavimo statistiniai duomenys	50
10 lentelė. Aerostatinio guolio jutiklių statistiniai duomenys.....	57

IVADAS

Reikalavimai poslinkių matavimo sistemoms auga įvairiais aspektais – jų patikimumo, informuotumo ir kitais. Ypač aktualūs yra tikslumo reikalavimai, jų nuolatinis griežtėjimas. Šio parametro tobulinimas yra tampriai susijęs su galimybe jį kontroliuoti, kurti jo valdymo realiomis darbo sąlygomis modelius.

Pramonėje poslinkių matavimo sistemų kalibravimas vyksta įterptinės metrologijos sąlygomis, kai negalima sukurti idealizuotų kalibravimo sąlygų, veikia išoriniai aplinkos ir vidiniai tikslumą mažinantys trikdžiai, specifiniai gamybos reikalavimai. Tačiau kalibravimo tikslumas turi būti garantuojamas ir šiomis sąlygomis.

Labai svarbia šios srities tyrimų užduotimi yra precizinių kampo komparatorių išorinių ir vidinių temperatūrinių trikdžių tyrimui, kalibravimo realiomis įterptinės metrologijos sąlygomis neapibrėžties modeliavimas. Tuo tikslu turi būti identifikuoti ir išnagrinėti pagrindiniai kampo kalibravimo neapibrėžties sandai, apžvelgti precizinių matavimo įrenginių temperatūrinių paklaidų tyrimo metodai ir priemonės, pasirinkta temperatūrinių gradientų tyrimo metodika ir įranga. Remiantis pateikta precizinio kampo komparatoriaus schema (3.1 pav.), turi būti identifikuoti pagrindiniai temperatūrinių paklaidų šaltiniai, atlikti temperatūrinių gradientų komparatoriaus ir atskirų jo šilumos šaltinių aplinkoje eksperimentiniai tyrimai. Tyrimų rezultatai turi būti statistiškai apdoroti, apibendrinti, padarytos praktikai, paklaidų mažinimui reikalingos išvados ir rekomendacijos.

Tyrimo objektas

Kampinis komparatorius skirtas kampo matų (limbų) ir kampinių poslinkių (posūkių) matavimo sistemų paklaidoms kalibruoti. Paklaidoms nustatyti matų brūkšnių ar kampą sudarančių paviršių kampinės koordinatės arba kampinių poslinkių matavimo sistemų rodmenys sulyginami su etaloniniu kampo matu arba etaloninės posūkio matavimo sistemos rodmenimis. Sulyginama arba statiniu režimu, paslankią komparatoriaus sistemą (pasukamą stalą) pozicionavus į nustatytą poziciją, arba dinaminiu režimu, judant (sukantis) paslankiai komparatoriaus sistemai. Analogišką struktūrą turi ir analogišku principu veikia ir kampo vieneto etalonai (Vekteris *et al.* 2012).

Darbo tikslas ir uždaviniai

Temperatūrinės paklaidos atsiranda dėl šilumos šaltinių temperatūrų sukeltų deformacijų mašinos elementuose. Šie šaltiniai - tai elektrinių elementų darbo metu išskiriama šiluma, mašinos energijos nuostoliai, aplinkos šiluminė talpa, žmonių spinduliuojama šiluma, aušinimo sistemų elementai. Taigi šio darbo tikslas – ištirti precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių temperatūrinius gradientus.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti temperatūrinių paklaidų įtaką precizinių komparatorių tikslumui.
2. Apžvelgti temperatūros matavimo metodus ir priemones, taip pat temperatūrinių laukų modeliavimo metodus.
3. Atlikti temperatūrinių gradientų tyrimo metodikos analizę.
4. Ištirti komparatoriaus elementines dalis, kurios turi įtaką temperatūriniams vidaus ir išorės trikdžiams.
5. Pateikti eksperimentinius temperatūrinių gradientų erdvėje ir priklausančių nuo laiko tyrimo apdorotus rezultatus.
6. Pateikti temperatūrinių laukų ir deformacijų analitinio tyrimo (modeliavimo) iliustracijas.
7. Apibendrinti tyrimo rezultatus, pateikti rekomendacijas kalibravimui.

Temos naujumas

Darbo naujumą sudaro tai, kad nustatyti temperatūros kitimo dėsningumai naujai kuriamo aukšto tikslumo komparatoriaus aplinkoje, kuris patalpintas termokonstatntinėje erdvėje. Nustatyti temperatūros gradientai erdvėje ir priklausantys nuo laiko veikiant aplinkos (termokonstantinės laboratorijos) ir vidiniams komparatoriams temperatūriniais trikdžiams. Remiantis šiais tyrimais sumodeliuoti temperatūriniai laukai, temperatūrinės deformacijos ir kalibravimo paklaidos.

Temos aktualumas

Precizinėse sistemose temperatūrinės paklaidos, kurios turi įtakos mašinos elementų deformacijoms ir kito pobūdžio paklaidoms, sudaro apie 40-70 % visos paklaidų sumos. Šio tipo paklaidos yra sunkiai prognozuojamos, nes temperatūriniai laukai nuolat keičiasi priklausomai nuo mašinos darbo režimo ir aplinkos sąlygų (Bryan 1990, Li *et al.* 2009).

Precizinėse kampo matavimo sistemose svarbu identifikuoti ir įvertinti paklaidas, kurios gali lemti jos tikslumą. Tam reikalingas didelis žinių kiekis, praktinė patirtis ir praktiniai eksperimentai. Matavimo sistemos elementų geometrinių matmenų pokytis sukelia matavimo paklaidas. Kampinių poslinkių mechanizmai ir mašinos bei matavimo technika nėra labai gerai ištirti. Siekiant atkurti kampo vieneto vertę ir perduoti valstybiniais etalonams, atlikti tarptautinius palyginimus ir tuo užtikrinti matmenų vienovę kuriami preciziniai kampo matavimo komparatoriai (Kausinis *et al.* 2009).

Tyrimo metodai

Nuo įvairių šilumos šaltinių įtakos, preciziam mašinų darbo tikslumui užtikrinti yra taikomi du skirtingi metodai: temperatūrinių paklaidų eliminavimo ir kompensavimo. Temperatūrinių paklaidų eliminavimo tikslas – išvengti paklaidų mažinant išskiriamą šilumos kiekį (Li *et al.* 2009). Paklaidų kompensacija yra efektyviausias metodas užtikrinti mašinos tikslumą darbo metu. Paklaidų kompensavimo metodikoje svarbiau yra paklaidų tarpusavio ryšiai nei individualių paklaidų dydis, todėl nesistengiama sumažinti absoliučių paklaidų verčių, bet kompensuojama jų įtaka galutiniam matavimo rezultatui.

Tyrimams panaudoti eksperimentiniai ir analitiniai metodai, statistiniai metodai eksperimentinių tyrimų rezultatų analizei ir apdorojimui, baigtinių elementų metodas temperatūrinių paklaidų modeliavimui.

Norint kompensuoti temperatūrinės paklaidas reikia tiksliai matuoti laike kintančią temperatūrą, parinkti jutiklių skaičių, jų vietą bei paklaidų įvertinimo modelius. Parametrų matavimo metodu yra tiesiogiai matuojamos temperatūros reikšmės. Metodas yra efektyvus, kai temperatūra laiko atžvilgiu pakinta nedaug, tada temperatūros jutiklių inercija neturi didelės įtakos.

Darbo mokslinė vertė

Tyrimo rezultatus galima panaudoti modeliuojant kampinio komparatoriaus temperatūrinius gradientus. Galima daryti išvadas, kas turi didžiausią įtaką sistemos šilumai, tam tikslui parenkant šių elementų izoliavimą nuo aplinkos.

Darbo aprobacija

Tyrimo rezultatai yra paskelbti straipsnyje „Precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių temperatūrinių gradientų tyrimas“, kuris buvo pristatytas 16-oje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“.

1. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS

Temperatūra turi įtakos kūnų deformavimuisi, kaip žinoma, šildant kūnai plečiasi, o šaldant traukiasi. Įvairios medžiagos turi skirtingus temperatūrinius plėtimosi koeficientus. Precizinės matavimo mašinos laikomos termokonstantinėse patalpose, kad matavimas turėtų kuo mažesnes temperatūros įtakos paklaidas, kur norminė temperatūra yra $20 \pm 0,2$ °C, tačiau šiose patalpose temperatūra nėra pasiskirsčiusi vienodai. Temperatūriniai laukai yra modeliuojami skaitiniu ir analitiniu metodais.

1.1 Temperatūrinių laukų modeliavimas skaitiniu metodu

Baigtinių elementų metodas – skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta nesudėtingu dėsnio ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas. Atliekant temperatūrinę analizę ir sprendžiant šilumos srauto perdavimo uždavinį pagrindinis ieškomasis dydis yra temperatūrinis laukas, kuris randamas išsprendus lygtis kiekviename baigtinio elemento mazge. Temperatūriniai laukai gali būti skaičiuojami naudojantis baigtinių elementų programiniais paketais COSMOS/M arba ANSYS.

1.2 Temperatūrinių laukų modeliavimas analitiniu metodu

Vienas iš plačiausiai temperatūrinių laukų analizėje taikomų metodų yra Vikstromo metodas (angl. Wickström's method), kurį taikant galima gauti temperatūrų reikšmes pasirinktoje skerspjūvio vietoje, pasirinktu laiko momentu (Purkiss 2007).

Įvairiuose literatūros šaltiniuose pateikiama, kad Vikstromo metodas tinkamas skaičiuojant temperatūras skerspjūvyje, kurio forma yra paprasta ir skaičiuojant įvertinamas tik vienašis šilumos srauto sklaidimas. Nagrinėjant sudėtingo skerspjūvio elementus patartina naudoti skaitinius metodus ir skerspjūvį modeliuoti baigtinių elementų programų paketais, tokiu būdu rezultatai yra tikslesni.

1.3 KMM paklaidų aproksimacija ir kompensacija atsižvelgiant į mazgų temperatūrinę inerciją

Nagrinėjama paklaidų kompensacija, kai temperatūra – t. KMM aplinkos mazgų temperatūra kinta laike, kuris priklausomas nuo temperatūros pokyčių bei priklausomas nuo temperatūros inercijos šiuose mazguose. Vadinasi, aproksimacijos bei kompensacijos metodika esant tokioms KMM darbo sąlygoms turi atsižvelgti į temperatūros nuokrypius nuo normalios

$T_i(t) - T_H$, tipinių KMM taškų arba aplinkos, išvestinės $\partial T_i(t)/\partial t$ bei $\partial^2 T_i(t)/\partial t^2$, taip pat temperatūrinės histerizės (Kasparaitis *et al.* 1991).

Temperatūros matuojamos laiko momentais

$$t = t_0, t_0 + \Delta_t, t_0 + 2\Delta_t, \dots, t_0 + k\Delta_t, \dots \quad (1.1)$$

čia Δ_t – laiko diskretizacijos žingsnis.

Priimta, kad

$$T_j(t) = T_j(k\Delta_t), \text{ čia } k\Delta_t \leq t < (k+1)\Delta_t. \quad (1.2)$$

Fiksuojamos paklaidos $\delta \in \{\Delta_{iQ}, \beta_{iQ}\}$. Parametrinės funkcijos, aproksimuojančios šias paklaidas, žymimos F_δ .

Paklaida δ , kuri susideda iš geometrinės paklaidos, temperatūrinės paklaidos bei temperatūrinės histerizės paklaidos, bendru atveju išreiškiama taip:

$$\delta = \delta(q; T - T_H; \frac{\partial T}{\partial t}; \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}; Sgn \frac{\partial T}{\partial t}; Sgn(-\frac{\partial T}{\partial t})), \quad (1.3)$$

čia $T = T(t)$ – viena iš temperatūrų $T_1(t), T_2(t), \dots, T_n(t)$, t – laikas.

$$q = \begin{cases} x, & i = 2, \\ y, & i = 1, \\ z, & i = 3; \end{cases} \quad (1.4)$$

$$Sgn x = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (1.5)$$

Pagal daugianarės funkcijos išskaidymą $t(x)$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ remiantis Teiloro formule, paklaidą δ siūloma pavaizduoti taip:

$$\delta = \delta(q, T_H, 0, 0, 0, 0) + C_0(q, T_H)(T - T_H) + C_1(q, T_H) \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + C_2(q, T_H) \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \alpha(q, T_H Sgn \frac{\partial T}{\partial t}) + \beta(q, T_H Sgn - \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}). \quad (1.6)$$

Temperatūra fiksuojama diskretiniais laiko momentais, todėl laikoma, kad

$$\frac{\partial T}{\partial t}(t) \approx \frac{T_0 - T_1}{\Delta_t} \quad (1.7)$$

ir

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} \approx \frac{1}{\Delta_t} \left(\frac{T_0 - T_1}{\Delta_t} - \frac{T_1 - T_2}{\Delta_t} \right) = \frac{T_0 - 2T_1 + T_2}{\Delta_t^2}, \quad (1.8)$$

čia $T_0 = T(t)$, $T_1 = T(t - \Delta_t)$, $T_2 = T(t - 2\Delta_t)$.

Išanalizavus fizinius reiškinius, kurie vyksta bazinėse KMM detalėse matuojant aplinkos temperatūrą, paklaidų δ pokyčiai tokiomis sąlygomis vietoj funkcijų $C_i(q)$, $\alpha(q)$, $\beta(q)$ priimamos parabolės:

$$\begin{aligned} C_i(q) &= C_{i0} + C_{i1}q + C_{i2}q^2, \\ \alpha(q) &= \alpha_0 + \alpha_1q + \alpha_2q^2, \\ \beta(q) &= \beta_0 + \beta_1q + \beta_2q^2. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Atsižvelgiant į pateiktus apmąstymus, funkcija F_δ , aproksimuojanti KMM paklaidą, esant kintamai temperatūrai aplinkoje, išreiškiama:

$$F_\delta = G_\delta(q) + (C_{00} + C_{01}q + C_{02}q^2)(T_0 - T_H) + (C_{10} + C_{11}q + C_{12}q^2)\frac{1}{\Delta_t}(T_0 - T_1) + \\ + (C_{20} + C_{21}q + C_{22}q^2)\frac{1}{\Delta_t^2}(T_0 - 2T_1 + T_2) + (\alpha_0 + \alpha_1q + \alpha_2q^2)\text{Sgn}(T_0 - T_1) + \\ + (\beta_0 + \beta_1q + \beta_2q^2)\text{Sgn}(T_1 - T_0) \quad (1.10)$$

čia $G_\delta(q)$ – geometrinių paklaidų aproksimacija.

komponentai su koeficientu c – temperatūros paklaidų aproksimacija.

komponentai su koeficientu α ir β – temperatūrinės histerizės paklaidų aproksimacija.

KMM atestacijos metu registruojamos temperatūros išraiškos:

$$T_{0j} = T(t_j), \quad T_{1j} = T(t_j - \Delta_t), \quad T_{2j} = T(t_j - 2\Delta_t)$$

čia $j = 1, 2, \dots, N$, bei paklaidų išraiškos

$$\delta_{ij} = \delta(q_i, T_{0j}, T_{1j}, T_{2j}), \quad i = 1, 2, \dots, M.$$

Funkciją F_δ galima išreikšti

$$F_\delta = G_\delta(q) + H_\delta(q; T_0, T_1, T_2), \quad (1.11)$$

čia $G_\delta(q)$ – geometrinių paklaidų aproksimacija esant $T(t) = T_H$,

$H_\delta(q; T_0, T_1, T_2)$ – temperatūros paklaidų kompleksinė aproksimacija.

Skaičiuojant funkcijos F_δ parametrus, iš pradžių pagal anksčiau pateiktą metodiką, apskaičiuojami funkcijos $G_\delta(q)$ parametrai, aproksimuojančios geometrinės paklaidos. Tada apskaičiuojami parametrai

$$C_{ij}, \quad \alpha_j, \quad \beta_j, \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3.$$

funkcijos $H_\delta(q; T_0, T_1, T_2)$, minimizuojant standartinį nuokrypį

$$S_F = S_{\pi F} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [\delta_{ij} - G_\delta(q_i) - H_\delta(q_i; T_{0j}, T_{1j}, T_{2j})]^3 \right\}, \quad (1.12)$$

Be to, apskaičiuojamas maksimalus nuokrypis

$$M_F = M_{\pi F} = \max_{\substack{1 \leq i \leq M \\ 1 \leq j \leq N}} [\delta_{ij} - G_\delta(q_i) - H_\delta(q_i; T_{0j}, T_{1j}, T_{2j})] \quad (1.13)$$

S_f ir M_f yra elementarių paklaidų δ charakterizuota aproksimacijos kokybė parametrinės funkcijos F_δ .

Norint rasti paklaidų kompensacijas atliekant kiekvieną matavimą reikia žinoti:

$$q, \quad T_0 = t(t), \quad T_1 = T(t - \Delta_t), \quad T_2 = T(t - 2\Delta_t)$$

bei funkcijos F_δ parametrus. Pagal juos apskaičiuojamos aproksimacijos $F_\delta(q; T_0, T_1, T_2)$ elementarios paklaidos. Tai atlikus su visomis svarbiausiomis elementariomis paklaidomis, per jų

aproksimacijas pagal ryšių formules apskaičiuojami suminių paklaidų $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ kompensaciniai pataisymai $F_{\Delta x}, F_{\Delta y}, F_{\Delta z}$.

Modelio pritaikymas bei temperatūros paklaidų kompensacijos efektyvumas esant kintamai temperatūrai išmėginta ir įrodyta eksperimento metu ant vidutinių gabaritų tikslios KMM.

Dėl temperatūrinės inercijos, matuojant aplinkos temperatūrą, bazinių KMM detalių temperatūra visu tūriu yra nevienoda ir skiriasi nuo aplinkos temperatūros. Norint patikslinti paklaidų tikslumą lemiančias aproksimacijas ir kompensacijas, reikia nustatyti tokius elementų KMM taškus, kurių temperatūros geriausiai atspindės jų temperatūros deformacijas. Bandymų rezultatai yra parodomi, pavyzdžiui, tiksliais vidutiniais KMM dydžiais.

Bazinių elementų temperatūra, apibūdinanti KMM tikslumą, keičiasi dėl paties KMM šilumos šaltinių poveikio. Konvertuoto šilumos apsikeitimo su aplinka, šilumos keitimosi spinduliavimo būdu, taip pat šiluminiu keitimusi tarp kontaktuojančių detalių. Eksperimentai liudija, kad svarbiausi yra linijinės deformacijos matavimo sistemų priemonių, nukreipiančių korpusų lankstus, storis bei kraštinės.

Apžvelgiama, kaip keičiasi nurodytų detalių temperatūra matuojant kintamą aplinkos temperatūrą. Šiam tikslui naudojamas skaitmeninis eksperimentas, fizikinio uždavinio matematinis modeliavimas.

Temperatūros paskirstymas keliuose izotopiniuose kūnuose apskaičiuojamas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W}{c\gamma}, \quad P \in \Omega \quad (1.14)$$

čia $T = T(P, t)$ – kūno temperatūra $P = \{x, y, z\}$ taške laiko momentu t .

$a = \lambda / c\gamma$ – temperatūros laidumo koeficientas;

W – vidaus šilumos šaltinių galios tankis;

c – savitoji šiluminė talpa;

γ – tankis;

λ – šilumos laidumo koeficientas;

Ω – plotas.

Pirmoji sąlyga nurodoma funkcija $T_0(P)$ temperatūros pasiskirstymo kūne Ω pirmuoju laiko momentu.

$$T(P, 0) = T_0(P), \quad P \in \Omega \quad (1.15)$$

Ribinė sąlyga nustatoma konvektuotos šilumos perdavimo tiese su aplinka per kūno paviršių G .

$$\frac{\partial T(P, t)}{\partial n} = H(T_A - T(P, t)), \quad P \in G \quad (1.16)$$

čia n – normalė kūno paviršiumi;

$H = \xi / \lambda$ – santykinis šilumos perdavimo koeficientas;

$T_A = T_A(P, t)$ – aplinkos šilumos pasikeitimo funkcija.

Kai elementas susideda iš dviejų kūnų, turinčių bendrą kontaktuojantį paviršių, užrašomos papildomos sąlygos

$$\lambda_1 - \frac{\partial T_1}{\partial n_1} = -\frac{1}{R}(T_2 - T_1), \quad (1.17)$$

$$\lambda_1 - \frac{\partial T_1}{\partial n_1} = \lambda_2 - \frac{\partial T_2}{\partial n_1}, \quad (1.18)$$

kur R – kontaktinė šilumos varža;

n_1 – išorinė pirmo kūno normalė.

Tokia užduotis sprendžiama diferencijuotu būdu remiantis schemomis.

Nagrinėjant matematinį modelį temperatūrinio lauko elgsena priklausomai nuo aplinkos temperatūros pokyčių, iškelia dvi problemas – kaip parinkti šilumos perdavimo koeficientą ξ , aprašantį kūno paviršiaus šilumos perdavimo intensyvumą bei aplinką, taip pat kokią imti pirminę sąlygą – funkciją $T_0(P)$ temperatūros pasiskirstymo kūne pradiniu laiko momentu.

Reikšmės ($\xi \approx 3 \text{ kcal/m}^3 \text{ val. laipsn.}$) gautos pagal rekomendacijas ir formules neatitinka reikšmės, gautos lyginant eksperimento rezultatus su skaitinio sprendimo rezultatais detalėms, pavyzdžiui tūtelei $\xi \approx 8 \text{ kcal/m}^3 \text{ val. laipsn.}$ plokštei $\xi \approx 24 \text{ kcal/m}^3 \text{ val. laipsn.}$

Kadangi nepavyko atsakyti į klausimą, kokias paimti reikšmes, buvo atlikti skaičiavimai skirtingoms ξ ir $T_0 = \text{const}$ reikšmėms. Aplinkos temperatūros kitimo funkcija tarpais paimta kaip tiesinė. Gauta, kad kiekybinės charakteristikos temperatūrinio lauko elgsena priklauso nuo pirminių sąlygų, bet kokybinės beveik nesikeičia.

Simetriniams kūnams su tolygiai pasiskirsčiusia mase, kai temperatūra pasiskirsčiusi netolygiai, bet simetriškai, temperatūrinės deformacijos nusakomos vidutine kūnų temperatūra. Kadangi KMM elementų temperatūrą fiksuotais laiko momentais galima laikyti pastovia, laikoma, kad bazinių detalių temperatūrinis laukas yra simetriškas, bei argumentu, nusakančiu jų temperatūrines deformacijas, laikomos vidutinės temperatūros $T_0 = (\int_{\Omega} T dP)/V$, (V – kūno tūris).

1.3.1 Plokštelės tipo detalių temperatūrinis laukas

Buvo matuojamos aplinkos temperatūros laike ir aproksimuojamos parametrinėmis funkcijomis. Temperatūros matuojamos tam tikruose plokštės paviršiaus taškuose. Taikant tokį modelį, buvo apskaičiuojamos temperatūros T_i reikšmės diskretizuojamiems taškams N , išdėstytiems po visą plokštės tūrį, skirtingoms $T_0 = \text{const}$ reikšmėms, ξ ir aplinkos temperatūros matavimo funkcijai.

Taip pat apskaičiuojama vidutinė temperatūra T_{sv} apskaičiuota temperatūriniu lauku

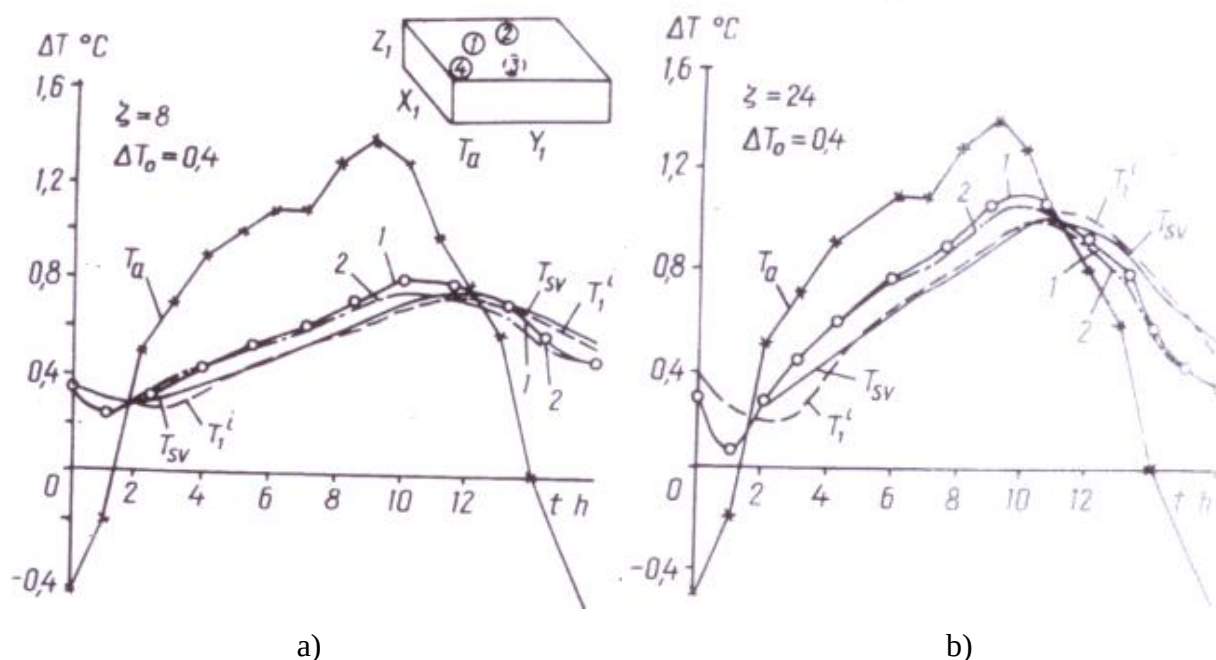
$$T_{sv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i. \quad (1.19)$$

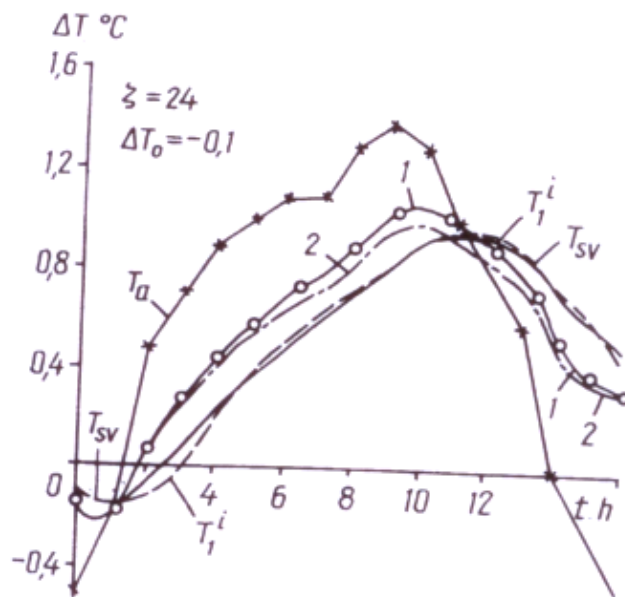
1.1 paveiksle pavaizduoti eksperimentinių duomenų tipinio aplinkos temperatūros kitimo grafikai darbinės KMM zonos centre T_a , temperatūros pasikeitimai plokštės taškuose 1,2,3,4 jos paviršiuje 16 valandų laikotarpiu. 1.1 a–b paveiksle parodyti vidutinės temperatūros grafikai, kurie apskaičiuoti pagal (1.19) duotoms skirtingoms T_0 ir ξ . Visuose paveiksluose $\Delta T = T_0 - 20^\circ\text{C}$. Lyginant temperatūras T_{sv} su temperatūromis skirtinguose taškuose, įrodyta, kad ji artima temperatūrai taške $I(x_1/2, y_1/3, z_1)$. Tai paaiškinama tuo, kad plokštumoje jo vietoje vyksta intensyviausias šilumos perdavimas.

Atsižvelgiant į vidutinės temperatūros inertiškumą santykinai su plokštės paviršiaus temperatūra, empiriškai gaunama formulė:

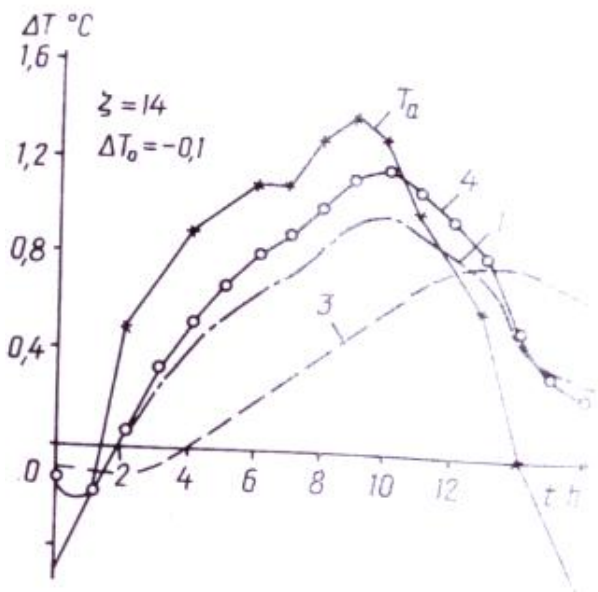
$$T_1^{(i)} = \frac{1}{4}(T^{(i)} + T^{(i-1)} + 2T^{(i-2)}), \quad (1.20)$$

čia $T^{(i)} = T^{(i)}(x_1/2, y_1/3, z_1)$, laiko intervalas $1 - (2 - i) = 1i$, pakankamai tiksliai aproksimuojantis temperatūrą T_{sv} (žr. 1.1 pav.).





c)



d)

1.1 pav. Temperatūros pokyčiai aplinkoje T_α ir pagrindai esant skirtingiems ξ ir T_0 1 taške $(x_1/2, y_1/3, z_1)$, 2 taške $(x_1/6, y_1/2, z_1)$, 3 taške $(x_1/2, y_1/2, z_1)$, 4 taške $(x_1/6, y_1/6, z_1)$, T_{sv} – vidutinė viso kūno temperatūra, T_1^i – apskaičiuota pagal formulę (1.20) (Kasparaitis *et al.* 1991)

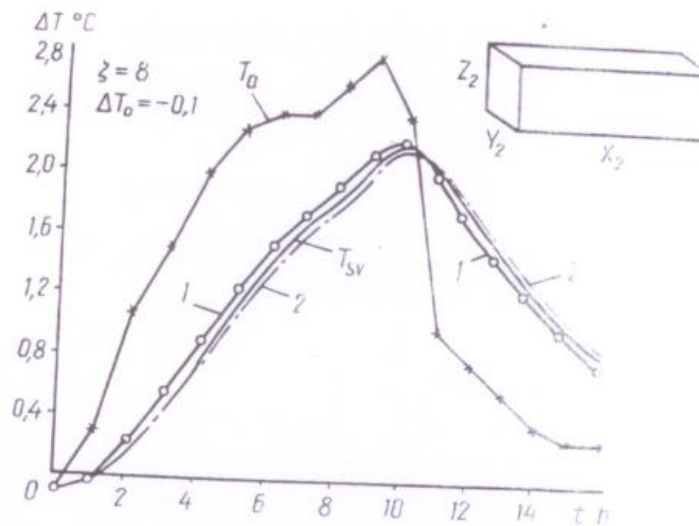
Čia pavaizduoti plokštės rezultatai su dydžiais $x_1 = 1,2m$, $y_1 = 1,9m$, $z_1 = 0,4m$. Keičiantis dydžiams gali būti tikslinami ir laiko intervalai (1.20) formulėje ir taško vieta, kur skaičiuojama vidutinė temperatūra.

Mažesnių detalių temperatūrinis laukas palyginamas su dydžiais $x_1 = 1,2m$, $y_1 = 0,12m$, $z_1 = 0,35m$.

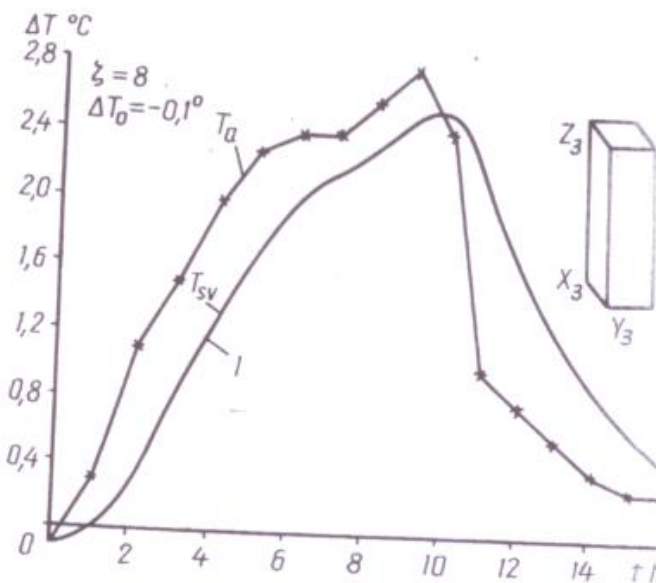
Iš tyrimo rezultatų išplaukia, kad temperatūra taške 2($x_2/3, y_2, z_2/2$) pakankamai gerai nusako vidutinę temperatūrą T_{sv} (žr. 1.2 paveikslą), neįskaitant prieš tai buvusios temperatūros laiko momentais. Skirtumas neviršija $0,06^\circ C$.

Kitų KMM detalių, kurių bent vienas dydis mažesnis nei prieš tai, apibūdinančias temperatūras paskirsto greičiau, pavyzdžiui, tuteinės temperatūra gerai nusako tinkamai parinktą tašką (žr. 1.3 pav.).

Šių skaičiavimų modeliai ir programos gali būti naudojami vidutinėms temperatūroms vertinti matavimo objektuose, esant temperatūriniam aplinkos kitimui ir norint kompensuoti jų sukeltas temperatūrines deformacijas.



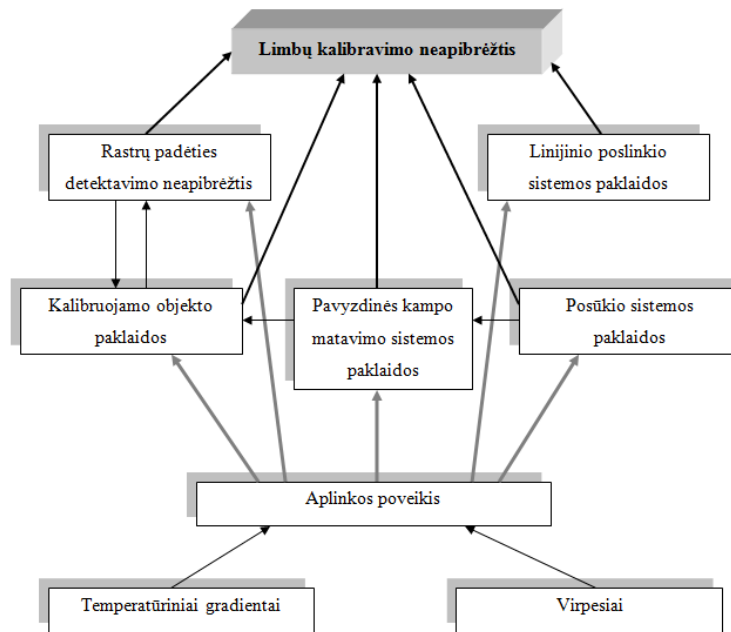
1.2 pav. Aplinkos temperatūros T_a pasikeitimai ir portalas taške 1 – $(x_2/3, y_2/2, z_2)$, taške 2 – $(x_2/3, y_2, z_2/2)$, T_{sv} – vidutinė viso kūno temperatūra (Kasparaitis et al. 1991)



1.3 pav. Aplinkos temperatūros T_a pasikeitimai ir pinolės taške 1 – $(x_3/2, y_3, z_3/3)$, T_{sv} – vidutinė viso kūno temperatūra (Kasparaitis et al. 1991)

1.4 Kalibravimo neapibrėžties analizė

Pagal klasikinę matavimo paklaidų atsiradimo priežasčių schemą, kampo matavimo tikslumas yra nustatomas paties matavimo įrenginio tikslumu, neigiamu aplinkos poveikiu matavimo įrenginiui ir matavimo objektui, matavimo objekto poveikiu paklaidai, matavimo įrenginio sąveikos su matavimo objektu paklaidomis, matavimo metodų iššaukiamomis paklaidomis, matavimo rezultatų apdorojimo ir pateikimo bei eile mažiau svarbių paklaidų šaltinių. Kampo kalibravimo paklaidų modelis pateiktas 1.4 pav.



1.4 pav. Kampo kalibravimo paklaidų modelis

Limbo kampo kalibravimo neapibrėžties sandai nagrinėjami pagal 1.4 pav. pateiktą modelio schemą.

1. Posūkio sistemos paklaidos $\Delta\phi$ s

Pagrindiniais šios sistemos paklaidų sandais, įvertinus sukimo mechnizmo sukeliamų kintamų radialiųjų ir ašinių jėgų bei sukimo momentų apie suklio sukimosi ašiai statmenas ašis poveikį, yra:

- radialiosios sukimosi paklaidos ΔR ,
- ašinė sukimosi paklaida ΔA ,
- kampinės sukimosi paklaidos ΔK .

Radialiosios sukimosi paklaidos pasireiškia kaip kintamas aukštesnio, nei pirma harmonika, dažnio ekscentrisiteto dedamoji. Pavyzdinės matavimo sistemos tikslumo šis judesio parametras neįtakoja, nes jo poveikis eliminuojamas dvipusiu sūklio veleno posūkio kampo nuskaitymu, realizuotu tiriamoje posūkio kampo matavimo sistemoje. Limbo rastrinio elemento padėties detektavimas vykdomas vienu detektavimo įrenginiu. Ašinė sukimosi paklaida ΔA pasireišk kaip paviršiaus, ant kurio suformuotas rastrinis piešinys, ašinio mušimo dedamoji, defokusuojanti rastrinių elementų detektavimo sistemą.

Kampinių sukimosi paklaidų ΔK poveikis dvejopas. Jų poveikis identiškas radialiųjų ir ašinių paklaidų poveikiui. Dėl kampinių sukimosi paklaidų ΔK atsiranda radialiosios paklaidos dedamoji, kurios dydis vertinamas šia priklausomybe:

$$\Delta k_K = \Delta K \cdot l_k, \quad (1.21)$$

čia l_k – atstumas tarp radialios paklaidos ir limbų kalibravimo plokštumų.

Dėl kampinių sukimosi paklaidų ΔK taip pat atsiranda limbo darbinio paviršiaus ašinio mušimo dedamoji, kurios dydis vertinamas šia priklausomybe:

$$\Delta A_k = \Delta K \cdot r_k, \quad (1.22)$$

čia r_k – kalibruojamo takelio spindulys.

Posūkio sistemos paklaidos, skaičiuojant kalibravimo neapibrėžtį, vertinamos liekamųjų paklaidų vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčiu $S_{\phi s}$.

2. Etaloninės kampo sistemos paklaidos $\Delta \phi k$.

Skaičiuojant kalibravimo neapibrėžtį, vertinama, kad sistemingosios paklaidos komponentės kompensuojamos matematiniu metodu. Liekamoji paklaida bus atsitiktinio pobūdžio.

3. Linijinių poslinkių sistemos paklaidos $\Delta \phi l$

Pagrindiniais šios sistemos paklaidų sandais yra:

- linijinės tiesaus judesio paklaidos ΔY ir ΔZ pagrindinio judesio kryptčiai X statmenomis ašimis Y ir Z ;
- kampinės tiesaus judesio paklaidos βX ir βZ pagrindinio judesio X ir jai statmenos vertikalios ašies Z atžvilgiu;
- kariatėlės linijinio poslinkio nuo limbo rastrinio takelio geometrinio centro matavimo paklaida ΔX .

Linijinės tiesaus judesio paklaidos ΔY pagrindinio judesio kryptčiai statmena horizontalia kryptimi tiesiogiai įtakoja kalibravimo tikslumą. Šis neapibrėžties sandas turi būti vertinamas skaičiuojant rastrinio takelio sieties kalibravimo paklaidą. Linijinės tiesaus judesio paklaidos ΔZ pagrindinio judesio kryptčiai statmena vertikalia kryptimi pasireišk kaip paviršiaus, ant kurio suformuotas rastrinis piešinys, defokusuojanti detektavimo sistemą dedamoji.

Kampinė tiesaus judesio paklaida βX pagrindinio judesio ašies X atžvilgiu tiesiogiai įtakoja kalibravimo tikslumą. Jos dydis nusakomas šia priklausomybe:

$$\delta_{yx} = \beta_x \cdot l_z, \quad (1.23)$$

čia l_z – atstumas tarp atraminių kariatėlės kreipiamųjų paviršių ir kalibravimo plokšumos.

Kampinė tiesaus judesio paklaida βZ pagrindinio judesio ašiai statmenos vertikalios ašies Z atžvilgiu taip pat tiesiogiai įtakoja kalibravimo tikslumą. Jos dydis nusakomas tokia priklausomybe:

$$\delta_{yz} = \beta_z \cdot l_x, \quad (1.24)$$

čia l_x – atstumas tarp kariatėlės guolių vidurio linijos ir rastrinių elementų detektavimo sistemos optinės ašies.

Šis neapibrėžties sandas turi būti vertinamas skaičiuojant rastrinio takelio sisties kalibravimo paklaidą.

4. *Limbo rastrų padėties detektavimo palaidos $\Delta\phi d$.*

Pagrindiniais šios sistemos paklaidų sandais yra:

- mikroskopo židinio nuotolio kaitumas (defokusavimas),
- mikroskopo optinės ašies nustatymo paklaidos,
- dinaminio kalibravimo greičio paklaida,
- brūkšnio krašto padėties nustatymo skyra,
- brūkšnio krašto padėties nustatymo kartojimasis,
- detektavimo paklaida, susijusi su apšvietimu,
- mikroskopo didinimas (arba kito linijos pajautimo įtaiso jautris),
- brūkšnio padėties pajautimo schemos netiesiškumas.

5. *Kalibravimo objekto paklaidos $\Delta\phi o$*

Pagrindinėmis šio kalibravimo neapibrėžties sando priežastimis yra:

- rastrinio elemento krašto kokybės – aukšto ir žemo dažnio tiesumo nuokrypiai,
- rastrinio elemento krašto kampinės padėties nuokrypiai,
- rastrinių elementų atspindžio parametrų nuokrypiai,
- skalės paviršiaus ašinis mušimas,
- rastrų defektai.

6. *Aplinkos faktorių poveikis $\Delta\phi a$.*

Neigiamo aplinkos poveikio paklaidų šaltiniai yra: aplinkos temperatūros nuokrypis nuo norminės $+20^{\circ}\text{C}$, temperatūriniai gradientai kalibravimo erdvėje ir priklausantys nuo laiko, grindų virpesiai, aplinkos santykinė drėgmė ir jos pokytis.

Pagrindinėmis galimomis šio kalibravimo neapibrėžties sando dedamosiomis yra:

- tiesaus judesio paklaidos dėl temperatūrinių gradientų ir drėgmės pokyčio,
- mikroskopo židinio nuotolio defokusavimo kitimas dėl virpesių ir temperatūrinių gradientų,
- mikroskopo optinės ašies nustatymo paklaidos dėl virpesių ir temperatūrinių gradientų,
- dinaminio kalibravimo greičio paklaida dėl virpesių,
- kalibruojamojo ir pavyzdinės matavimo sistemos limbų paklaidos dėl temperatūrinių gradientų.

2. TEMPERATŪRINIŲ TRIKDŽIŲ IDENTIFIKAVIMAS, TYRIMO METODIKA

2.1 Temperatūros matuoklis PP2

Visiems temperatūros tyrimams bus naudojamas temperatūros matuoklis PP2, aukštos kokybės temperatūros jutikliai (ne žemesnės nei A klasės) (platininiai-foliniai EN60 751 ir platininiai-lustiniai PCA1.2010.1H) bei skaitmeninis termometras „OMEGA HH41“.

Temperatūros matuoklis PP2 yra labai aukšto tikslumo temperatūros bei kitų aplinkos parametrų (slėgio, drėgmės ir kitų) matuoklis. Tokius prietaisus naudoja metrologijos laboratorijos daugelyje Europos šalių.

Į prietaisą PP2 galima prijungti iki 92 temperatūros jutiklių ir keleta analoginių įėjimų. Gali būti naudojami PT100 arba PT25 tipo jutikliai. Prietaisas yra surinktas 19 colių pagrindinėje šynoje prijungiant procesoriaus, multipleksoriaus ir analogo-kodo keitiklių plokštes. Tiksliai temperatūros reikšmei gauti naudojamas platinos (PT) jutiklis ir du atraminiai rezistoriai, kurie reikalingi prietaiso susikalibravimui. Vienas rezistorių reikalingas žemiausios temperatūros matavimo diapazone reikšmės nustatymui, kitas – aukščiausios. Temperatūros reikšmė apskaičiuojama iš priklausomybės tarp varžos ir temperatūros aproksimuotos 7 laipsnio, kuris suskaičiuojamas naudojantis platinos jutiklių žinoma varžos ir temperatūros priklausomybe išreikšta lentelėmis pagal EN 60 751 standartą.

Norint prijungti keleta kitų aplinkos parametrų matuoklių, prietaisas turi 14 arba 20 bitų analoginius įtampinius (0–1 V, 0–5 V) arba srovinius (4–20 mA, 0–20 mA) įėjimus. Šiems matuokliams reikalingas atskiras maitinimas.

Duomenys iš PP2 prietaiso perduodami per RS232 arba Ethernet protokolą. Galima siųsti tik reikiamo kanalo duomenų užklausimą, atsakyme yra užklausto kanalo varžos reikšmė omais. Varžos perskaičiavimas į temperatūrą yra atliekamas kompiuteryje.

Matavimo metu atsiranda šios paklaidos:

- *Ne jutiklio kanalo paklaidos ΔI , ΔU ir ΔV .* Ilgu matavimo laikotarpiu pastovios srovės svyravimas. Paklaidos išvengiama matuojant santykinai su atraminiais rezistoriais, o vėliau interpoliuojant.
- *Jutiklio kanalo paklaidos U_{Ti} , I_{Li} . Termo-įtampos U_{Ti} ir srovės nuotėkiai I_{Li} elektroniniuose raktuose.* Korekcija matuojant prie nulinės srovės. Matuojamas įtampos kritimas ant jutiklio prie srovės I ir prie nulinės srovės.
- *Triukšmo įtampa U_R .* Sumažinama paklaida naudojant mažatriukšmius stiprintuvus įėjimo grandinėje ir mažą įėjimo varžą.

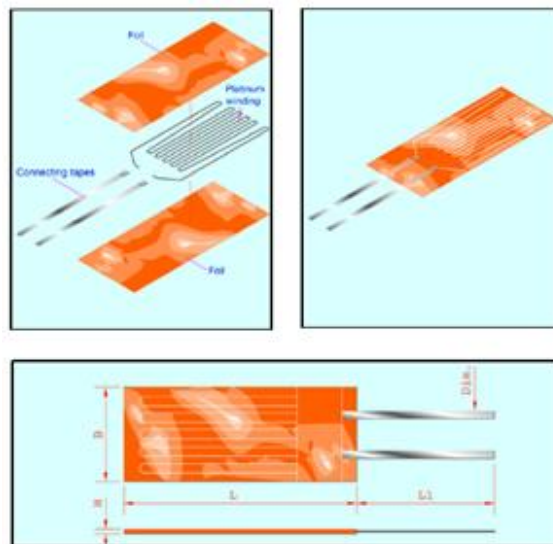
- *Analogas kodas keitimo paklaida ΔFD .*
- *Diskretizavimo paklaida.* Sumažinama naudojant gerą analogas kodas (sigma to delta) 20 bitų keitiklį.
- *Platininio jutiklio Δt .* Neatitikimas charakteristikos temperatūra-varža. Naudojami aukštos kokybės jutikliai.

2.2 Temperatūros jutikliai

Pagal tarptautinės temperatūros skalės ITS-90 reglamentą temperatūros vienetui perduoti naudojami etaloniniai termometrai. Mūsų tyrimo temperatūros diapazonui tinka platinos varžos (PT) termometrai. Juos naudoja daugelis nacionalinių metrologijos laboratorijų: Anglijos, Vokietijos, Suomijos, Rusijos ir Šveicarijos.

Temperatūrai matuoti yra pasirenkami naudoti platininiai - foliniai jutikliai EN 60 751 ir platininiai - lustiniai jutikliai PCA 1.2010.1H, (Kasparaitis et al. 2009b).

Platininis -folinis jutiklis EN 60 751:

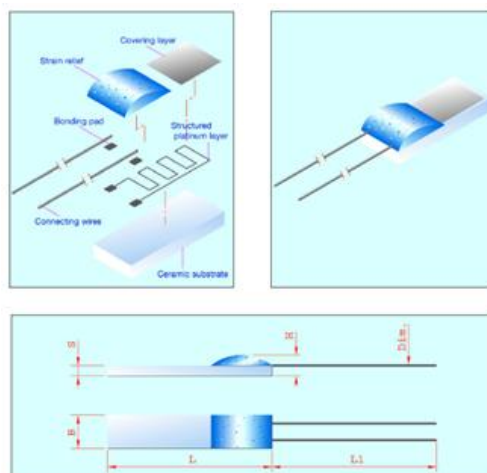


2.1 pav. Jutiklis EN 60 751 (jumo.net)

1 lentelė. Jutiklio EN 60 751 techninės charakteristikos (jumo.net)

-80 ..+180	Matuojamoji temperatūra, °C
21	Jutiklio plotis B, mm
50	Jutiklio ilgis L, mm
0,3	Jutiklio aukštis H, mm
30	Išėjimo kontaktų ilgis L1, mm
1,4	Išėjimo kontaktų plotis D1, mm
Ni	Išėjimo kontaktų medžiaga

Platininis – lustinis jutiklis PCA 1.2010.1H:



2.2 pav. Jutiklis PCA 1.2010.1H (jumo.net)

2 lentelė. Jutiklio PCA 1.2010. 1H techninės charakteristikos (jumo.net)

K1.0,5	Tolerancija DIN EN 60751
-70 ..+550	Matuojamoji temperatūra, °C
2	Jutiklio plotis B, mm
2,5	Jutiklio ilgis L, mm
1,3	Jutiklio aukštis H, mm
10	Išėjimo kontaktų ilgis L1, mm
0,2	Išėjimo kontaktų plotis Dim, mm
Pt - Ni	Išėjimo kontaktų medžiaga

Skaitmeninis termometras „OMEGA HH41“:



2.3 pav. Skaitmeninis termometras „OMEGA HH41“

3 lentelė. Skaitmeninio termometro „OMEGA HH41“ techninės charakteristikos

-20...+130	Matuojamoji temperatūra, °C
2 kartai per sekundę	Nuskaitymo greitis
0,002-0,01	Tikslumas, °C
10	Jutiklio diametras, mm
184,1	Termometro aukštis, mm
83,8	Termometro plotis, mm
31,8	Termometro storis, mm
312	Termometro masė, g

2.3 Temperatūros matavimo metodika

Temperatūrinius trikdžius sukelia patalpos temperatūrų nevientisumas, kompiuteris, esantis šalia, skaičiavimo – valdymo kompleksas (SVK), pavara, CCD kamera, oro guoliai. Patalpoje temperatūros gradientai svyruoja, tai šildo, tai vėl vėsina komparatoriaus aplinką, oro guolio oras sukelia lokalinį vėsinimą granito paviršiuje, o visi kiti veiksniai turi įtakos tiek bendram aplinkos šilumai, tiek vietiniam, kur yra pritvirtinti.

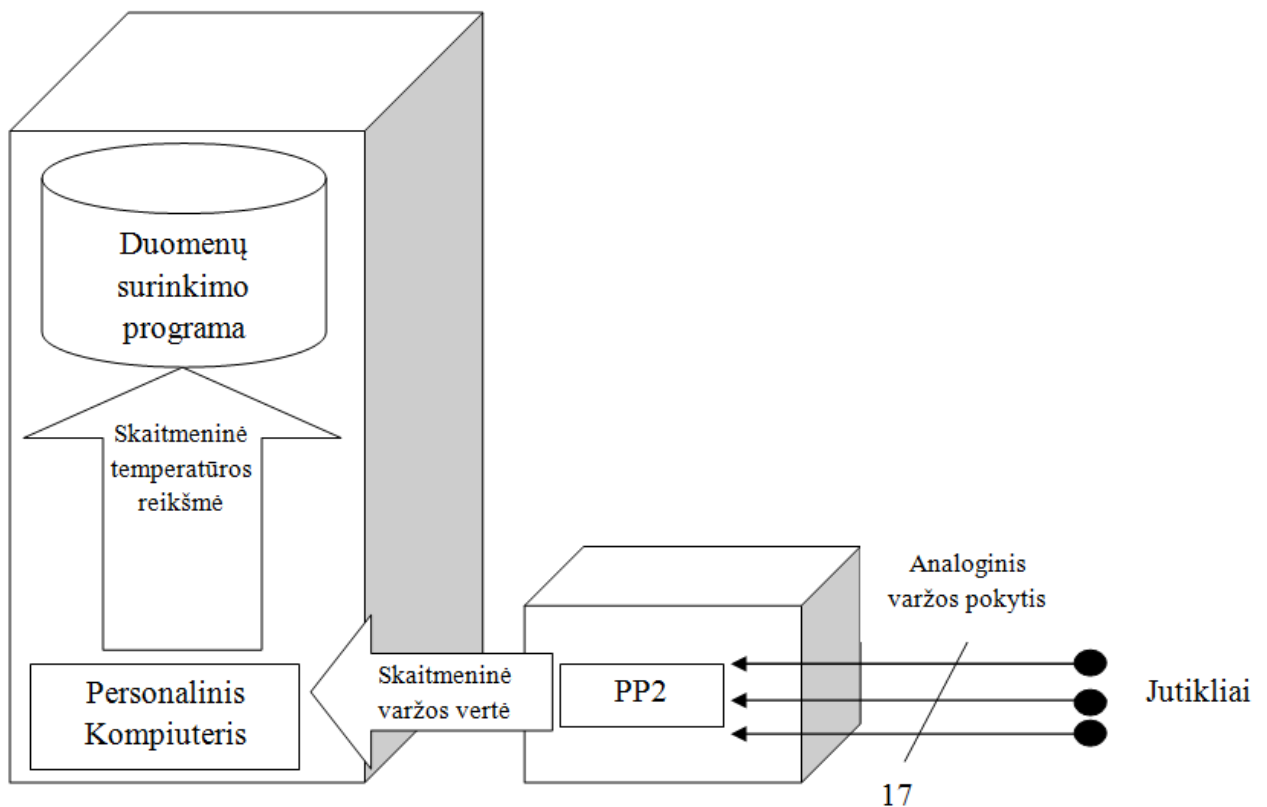
Temperatūros matavimams yra sukurama jutiklių išdėstymo schema. Pirmą matuojama komparatoriaus aplinkos temperatūra, norint sužinoti, kas turi didžiausią įtaką temperatūros svyravimams, matuojama trijose plokštumose: darbinėje ir nuo jos nutolusiose per 0,5 metro žemiau ir aukščiau. Matavimai atliekami esant kelioms skirtingoms sistemos būsenoms: sistemai esant nusistovėjusiai; sistemai reaguojant į darbo dienos pradžią, kai renkasi darbuotojai; sistemai reaguojant į atidarytas duris. Gauti rezultatai nurodo aplinkos šilimo vietas iš kurių galime spręsti ir apie vidinius komparatoriaus šilumos šaltinius, kuriuos reikia tirti atskirai.

Vidiniai numanomi temperatūrinių trikdžių šaltiniai yra: CCD kamera, pavara ir aerostatiniai guoliai. Jie tiriama kiekvienas atskirai. Pradedama nuo pavaros, ant jos ir jos aplinkoje išdėstomi jutikliai. Matuojant stebima ar matavimo rezultatai realūs, jei ne, imama priemonių užtikrinti duomenų tikslumui užtikrinti. Kadangi numanoma, jog variklis šyla labiau nei visa pavara, ir prietaisas PP2 negalės išmatuoti šios temperatūros, ant jo klijuojamas skaitmeninio termometro OMEGA HH41 jutiklis. Gavus pavaros matavimų rezultatus, matuojama CCD kameros ir mikroskopo bei jų aplinkos temperatūros, remiantis tokiu pat eiliškumu kaip ir pavaros temperatūros matavimas.

Aerostatinio guolio temperatūriniai trikdžiai matuojami šalia vieno jų priklijuojant platinos folinius jutiklius. Oras slėgio sistemoje yra šaltas, taigi tikėtina, jog ir guolis šaldys aplinką. Tam tikslui, jog žinoti ar šaldymas ypač paveikia aplinkinius elementus, jo temperatūros matuojamos tokia veiksmų seka:

- pradedamas granito temperatūros matavimas
- kada granito ir oro guolio temperatūra yra nusistovėjusi, įjungiamas oras ir greitai kariatėlė patraukiama nuo jutiklių tolyn apie 25cm atstumu ir oras guolyje išjungiamas
- oras įjungiamas, kariatėlė pristumiama prie jutiklių, oras vėl išjungiamas
- pristumtoje prie jutiklių kariatėlėje įjungiamas oras guolyje
- kariatėlė patraukiama nuo jutiklių apie 25cm atstumu, ir oras guolyje išjungiamas

Atliekant matavimus, duomenys gauti tokia eiga kaip pavaizduoja blokinė schema (2.4 pav.). Jutikliai užfiksuoja temperatūros pokytį, pasikeičia jų varža, signalas perduodamas į PP2, ten varžos sulyginamos dviejų atraminių rezistorių ir nustatoma reali varžos vertė, signalas perduodamas į kompiuterį. Jame varžos duomenys perskaičiuojami į temperatūros reikšmes, jas atvaizduoja speciali duomenų programa, kuri laikui bėgant kaupia gautus temperatūros duomenis.



2.4 pav. Atliktų matavimų blokinė schema

3. TYRIMO OBJEKTAS

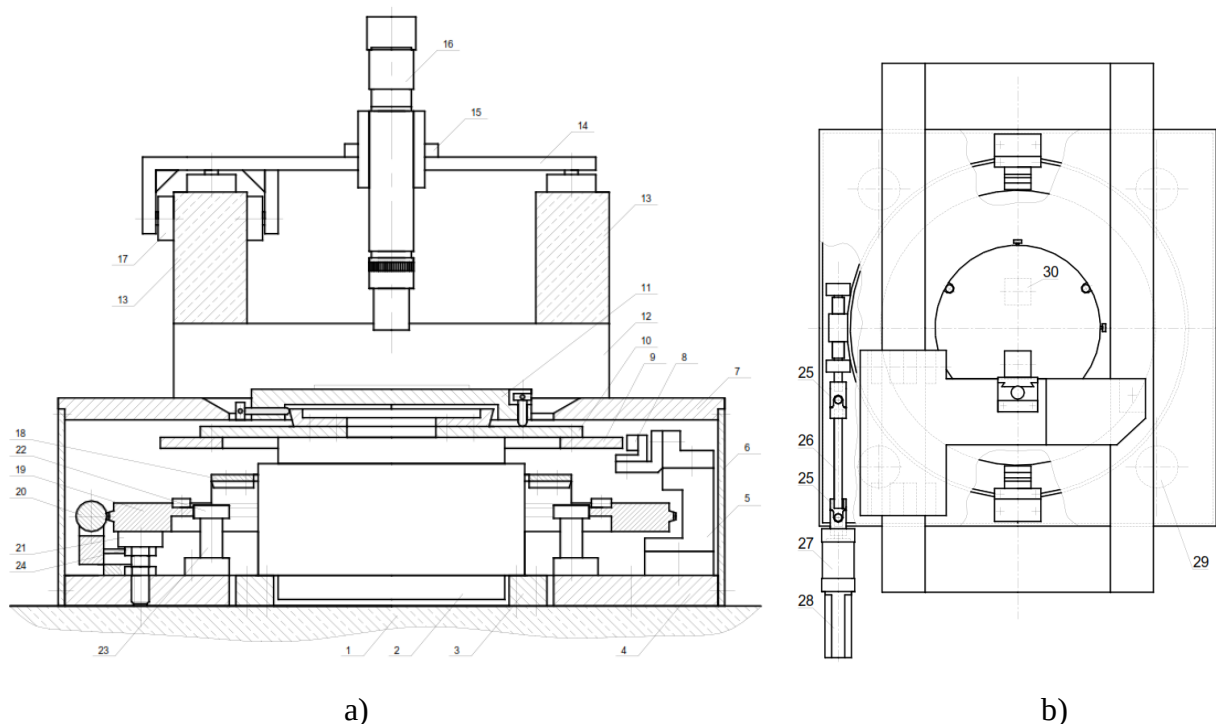
3.1 Kampo matų ir kampinių poslinkių kalibravimo komparatorius

Tyrimo objektas yra kampinis komparatorius (3.2 pav.), skirtas kampo matų ir kampinių poslinkių matavimo sistemų paklaidoms kalibruoti. Kalibravimo procesas, kaip jau minėta, gali būti statinis arba dinaminis, tai priklauso nuo to, kokioj būsenoj atliekamas pats kalibravimas. Kampiniai komparatoriai turi daug analogijos su linijiniais komparatoriais (Vekteris et al. 2012). Komparatorius yra kompleksinis įrenginys, sudarytas iš šių sudėtinių dalių:

Bazinė komparatoriaus dalis. Ją sudaro precizinis mechatroninis sukimosi judesio įrenginys, kalibruojamosios skalės brūkšnių detektavimo įrenginys, jo santykinio posūkio skalės atžvilgiu matavimo sistema.

Skaičiavimo valdymo kompleksas. Tai kalibravimo proceso valdymo, duomenų apdorojimo ir pateikimo sistema su atitinkama programine ir matematine įranga.

Neatsiejama komparavimo komplekso dalis yra preciziniams matavimams skirta laboratorija su virpesių izoliacijos ir norminės temperatūros palaikymo sistemomis.



3.1 pav. Kampinio komparatoriaus schema: a – ašinis pjūvis statmenai linijiniams kreipikliams; b – vaizdas iš viršaus; 1 – granitinė plokštė; 2 – precizinis aerostatinis suklys; 3 – atraminis žiedas; 4 – atraminė plokštė; 5 – posūkio keitiklio nuskaitymo galvutės laikiklis; 6 – sienelė; 7 – dangtis; 8 – nuskaitymo galvutė; 9 – etaloninis limbas; 10 – etaloninio limbo laikiklis; 11 – matavimo objekto staliukas; 12 – atraminė granitinė plokštė; 13 – granitinis kreipiklis; 14 – mikroskopo kariatėlė; 15 – mikroskopo laikiklis; 16 – pirmosios kariatėlės mikroskopas; 17 – mikroskopas

karietėlės aerostatinė atrama; 18 – sukamojo judesio perdavimo mova; 19 – sliekratis; 20 – sliekas; 21 – sliekračio aerostatinė atrama; 22 – riedėjimo guolis; 23 – riedėjimo guolio laikiklis; 24 – sliekračio aerostatinės atramos laikiklis; 22 – riedėjimo guolis; 23 – riedėjimo guolio laikiklis; 24 – sliekračio aerostatinės atramos laikiklis; 25 – lankstinė mova; 26 – vėlėlis; 27 – reduktorius; 28 – servovariklis; 29 – dangčio atrama (Vekteris *et al.* 2012)

Komparatoriaus struktūra

Atsižvelgiant į dvigubą komparatoriaus paskirtį – kampinių skalių (limbų) ir kampinių poslinkių matavimo keitiklių kalibravimą, pagrindiniai komparatoriaus komponentai yra šie:

- vibrostabili bazė;
- pavyzdinio kampo sistema, sudaryta iš precizinio suklio, pavaros ir posūkio matavimo sistemos;
- limbo brūkšnių padėties detektavimo sistema;
- mechaniniai mazgai ir sistemos, užtikrinantys kalibratoriaus funkcionalumą;
- skaičiavimo ir valdymo kompleksas.

Detali komparatoriaus schema pateikta aukščiau, 3.1 pav.

Pagal šią schemą sukurtas komparatorius naudojamas limbų ir kampinių matavimo sistemų paklaidoms kalibruoti. Bazinė mechatroninė sistema skirta tiesioginiam limbų ir kampinių keitiklių kalibravimui. Sistemos pagrindą sudaro masyvi pilko smulkiagrūdžio granito plyta, ant kurios per atraminį žiedą stabiliai sumontuotas aerostatinis suklys. Jis yra sukamas per slieko – sliekračio pavarą. Sliekračio sukimuisi įrengti kombinuoti aerostatiniai ir riedėjimo guoliai. Sliekratis remiasi ant aerostatinų guolių, o radialiąja kryptimi palaikomas riedėjimo guoliais. Jo sukimosi ašis apytiksliai sutampa su aerostatinio suklio sukimosi ašimi. Tuo tikslu atraminiai ir radialieji guoliai sumontuoti ant jų padėties reguliavimo mazgų. Visa ši sistema uždengta dangčiu su tiksliai apdirbtu viršutiniu paviršiumi, kuris ją apsaugo nuo pažeidimų ir iš aplinkos galinčių patekti teršalų. Ant tiksliai apdirbto dangčio paviršiaus gali būti montuojama papildoma matavimo įranga (Vekteris *et al.* 2012) .

Komparatoriaus pavariai keliami gana griežti ir tarpusavyje iš dalies prieštaringi reikalavimai. Ji turi užtikrinti pastovų kampinį suklio greitį ir sudaryti tikslaus pozicionavimo galimybę bei užtikrinti stabilų kampinę padėtį laike.

Pavara turi nesukelti jėgų, veikiančių suklių, išskyrus sukimo momentą arba tangentinę sukimo jėgą. Taip pat svarbu, kad pavara nebūtų intensyvios temperatūros spinduliuotės ir virpesių šaltiniu.

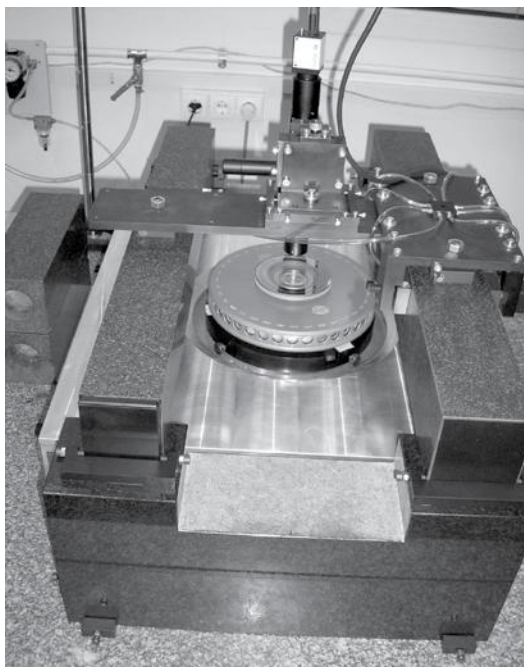
Viena iš pavaros variantų, kompleksiskai atitinkančių minėtus reikalavimus, yra slieko – sliekračio pavara, turinti autonominį sliekračio sukimosi mechanizmą ir su preciziniu sukliu sujungta per standžią tangentinę suklio kryptimi ir liauną kitomis kryptimis jungtį.

Nagrinėjame komparatoriuje sliekratis su sukliu sujungti per tamprius elementus, sukuriančius gryną jo sukimo momentą be radialiųjų ir ašinių jėgų. Taip garantuojamas fiksuojamos suklio padėties stabilumas.

Sliekas sukamas elektros varikliu per mechaninį reduktorių. Jis gali būti atjungiamas rankiniam suklio sukimui.

Kampo matavimo sistemos limbas su sukliu jungiamas standžiai be tarpinių slankiųjų mechaninių grandžių. Taip išvengiama neigiamo histerezės ir reverso paklaidų poveikio tikslumui, būdingo mechaninėms movoms.

Ant komparatoriaus pagrindo sumontuoti du iš smulkiagrūdžio granito pagaminti preciziniai kreipikliai, kuriais statmenoje suklio ašiai plokštumoje radialiaja suklio ašiai kryptimi ant aerostatinių atramų yra perslenkamos dvi kariatėlės, prie kurių tvirtinami brūkšnių detektavimo mikroskopai. Schemoje (3.1 pav.) parodytas tik vienas mikroskopas.



3.2 pav. Kampinis komparatorius (Vekteris *et al.* 2012)

3.2 Pavyzdinio kampo sistema

Viena svarbiausių kampinio komparatoriaus komponentų sudaryta iš precizinio suklio, pavaros ir posūkio matavimo sistemos. Nagrinėjamoje konstrukcijoje panaudotas „Nelson air“ firmos aerostatinis suklys RT 200L, kurio radialioji ir ašinė sukimosi paklaidos neviršija $\pm 0,025 \mu\text{m}$.

Konstruojant ir parenkant mechaninius ir elektrinius pavaros elementus siekiama minimizuoti temperatūrinį jos poveikį, sukiamus mechaninius virpesius, užtikrinti fiksuojamos padėties stabilumą, reikiamą perdavimo santykį. Naudojamos mechaninės pavaros slieko – sliekračio perdavimo santykis 1:1080. Sliekas sukamas servo varikliu, sujungtas su preciziniu

planetiniu reduktoriumi. Reduktoriaus perdavimo skaičius 10:1, laisvoji eiga (klibėjimas) – mažiau nei 3 kampinės minutės (Vekteris et al. 2012).

Pagrindinis ir technologiškai sudėtingiausias tokios pavaros konstrukcinis elementas yra sliekratis. Jis lemia posūkio tikslumą ir padėties stabilumą.

Kampo matavimo sistema

Nagrinėjamame komparatoriuje kampo matavimo sistemą sudaro pavyzdinis kampo matas (REXMUSA 417), du matavimo keitikliai (SR015A arba SR030A) su signalų formuotuvais ir interpoliatoriais (SIGNUM SiNN-1000), DSI sąsaja (A-9568-1807), spartusis kvadratūrinis skaitiklis (NI PCI-662).

Kampo matas turi dideliu kampiniu tikslumu išdėstytus rastrinius elementus – brūkšnius – ir atkuria kampo vienetą. Tai iš stabilaus nerūdijančiojo plieno pagamintas disko formos limbas, ant kurio tiksliai apdirbto išorinio cilindro suformuotas rastrinis takelis, kurio brūkšniai yra lygiagretūs su disko ir suklio ašimi. Limbo skersmuo 417 mm.

Matavimo keitikliai su signalų formuotuvais ir interpoliatoriais skirti posūkio informacijai nuskaityti ir formuoti į elektrinį kvadratūrinį signalą. Sistemos maksimalus matavimo linijinis greitis – 12,5 m/s, maksimalus signalo priėmimo dažnis – 20 MHz.

DSI sąsaja skirta formuotiems signalams iš dviejų vienodų matavimo keitiklių priimti ir jų signalus apdoroti taip, kad pasinaikintų limbo ekscentriciteto suklio sukimosi ašies atžvilgiu įnešamos paklaidos.

Spartusis kvadratūrinis skaitiklis yra ypač greitas – 20 MHz, skirtas aukštojo dažnio signalams skaičiuoti, kurie sukuriama sukant daug rastrinių brūkšnių turintį limbą ir sukuriamą signalą interpoliuojant 1000 kartų.

Elektrinė pavana užtikrina reguliuojamą sukimosi greitį. Panaudotas 100 W sinchroninis servovariklis su retųjų žemės elementų nuolatiniais magnetais ir jam skirtu servovaldikliu.

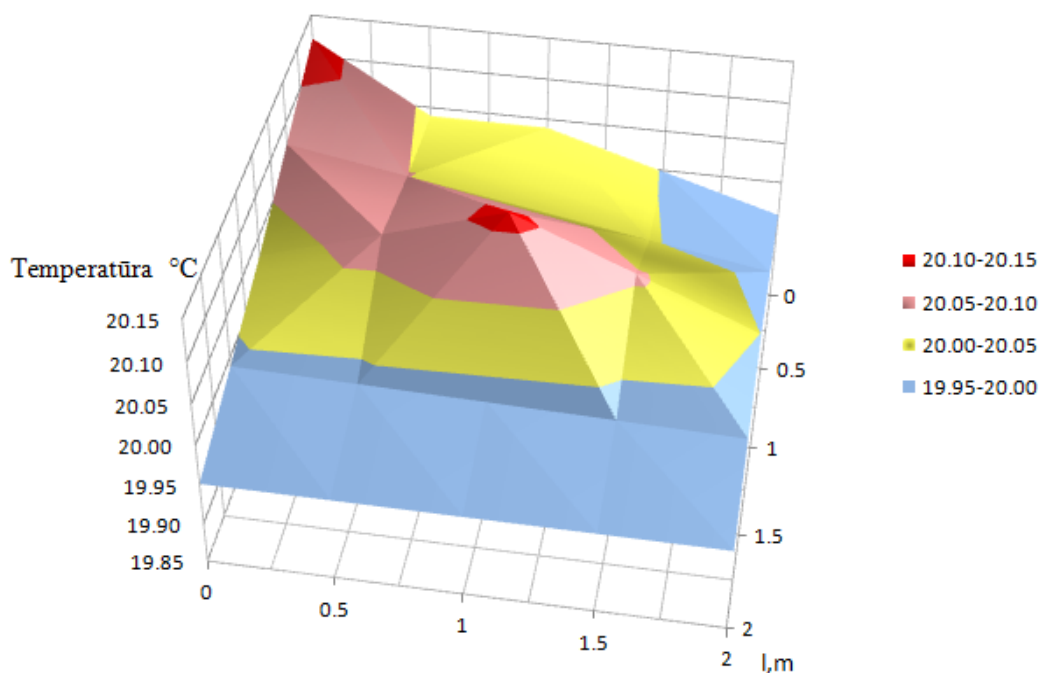
Limbams kalibruoti ant suklio sumontuotas centravimo – lygiavimo staliukas, ant kurio bazuojami kalibruojamieji limbai. Juo limbo matuojamasis paviršius išstatomas statmenai suklio sukimosi ašiai.

4. EKSPERIMENTINIS APLINKOS TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMAS

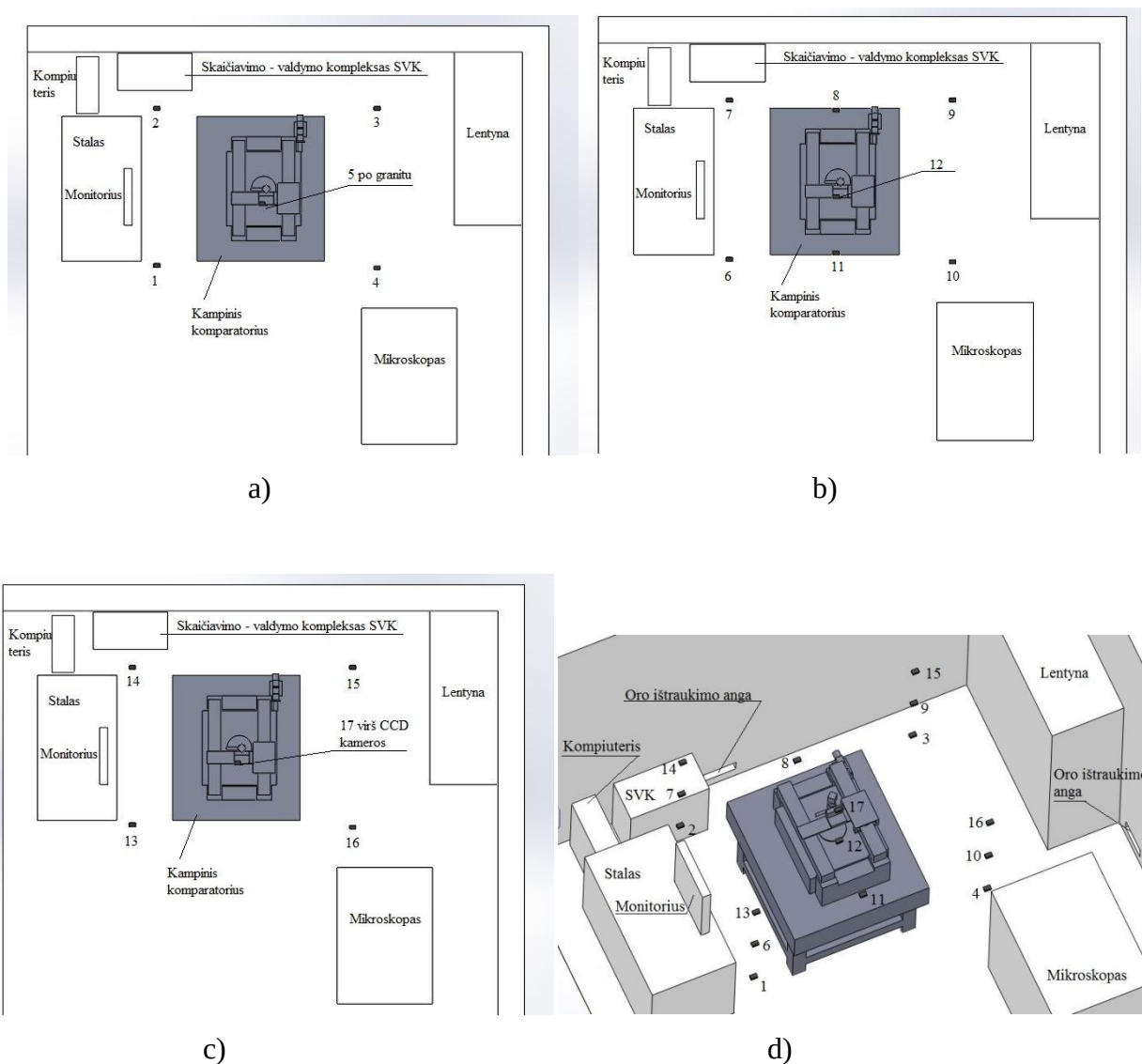
Eksperimento metu buvo matuojama temperatūra aplink visą precizinį mechatroninį kampinio komparavimo įrenginį, norint ištirti jo aplinkoje esančias temperatūrų reikšmes ir jų įtaką komparatoriaus darbui. Eksperimentui atlikti buvo naudojami šie įrenginiai: penkiolika platinos lustinių temperatūros jutiklių PT100, du platinos foliniai jutikliai PT100, PP2 precizinis temperatūros matavimo prietaisas ir asmeninis kompiuteris.

Temperatūros matavimai buvo atlikti trijose plokštumose, pirmoje plokštumoje, atitinkančioje darbinę kampinio komparatoriaus kalibravimo plokštumą, antroje – žemiau nuo darbinės plokštumos per 0,5 metro apatinėje plokštumoje, trečioje – aukščiau virš darbinės kalibravimo plokštumos per 0,5 metro viršutinėje plokštumoje.

Tyrimais nustatyta, jog visoje termokonstantinėje kampinio komparatoriaus patalpoje temperatūra kinta nuo +19,901 °C (kampe, apatinėje plokštumoje (jutiklis nr. 1)) iki +20,439 °C (kampe, viršutinėje plokštumoje, šalia skaičiavimo - valdymo bloko ir kompiuterio (jutiklis nr. 5)). Didžiausi temperatūros kitimai kalibratoriaus zonoje buvo stebimi erdvėje virš CCD kameros, iki +20,260 °C ir šalia variklio iki +20,194 °C.

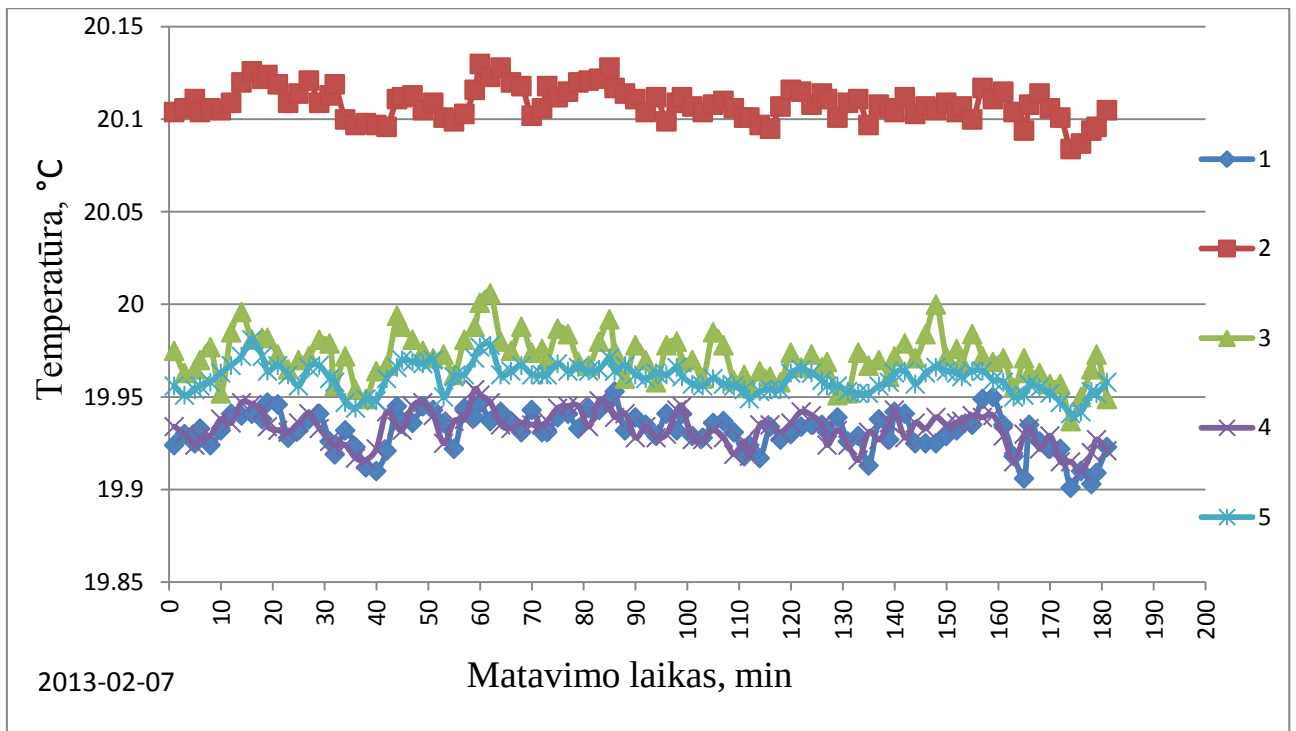


4.1 pav. Apibendrintas erdvinio temperatūros gradiento darbinėje plokštumoje grafikas



4.2 pav. Jutiklių išdėstymo schemas: a) apatinės plokštumos (0,5 m žemiau darbinės); b) darbinės plokštumos; c) viršutinės plokštumos (0,5 m aukščiau darbinės) ir d) bendras visų jutiklių vaizdas erdvėje

Atlikti matavimai esant nusistovėjusiu kampinio komparatoriaus darbo režimu, kai šalia stovi įjungtas kompiuteris su monitoriumi, prijungti variklio ir CCD kameros maitinimo kabeliai. Pastebėta, jog kamera šyla vos prijungus maitinimą (apie tai bus kalbama aptariant kameros aplinkos šilumą). Matavimo rezultatai paimti matuojant naktį, kada nevaikšto žmonės po patalpą, siekiant gauti tikslius duomenis. Bendras visų trijų matavimo plokštumų jutiklių duomenų grafikas labai painus, todėl duomenų grafikas išskirtas į tris grafikus atitinkamai pagal matavimo plokštumas (4.3 pav. a, b ir c).

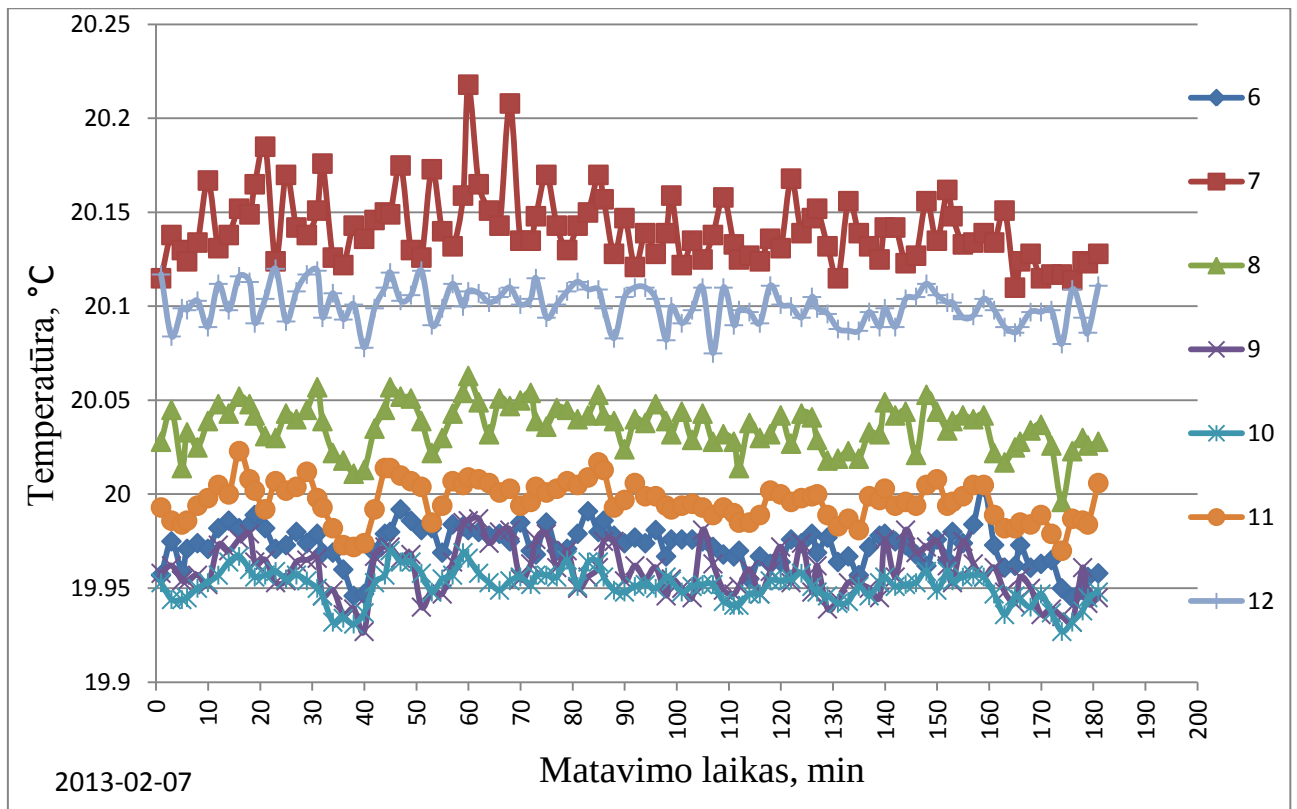


4.3 pav. a) Jutiklių gauti temperatūros duomenys apatinėje plokštumoje

4 lentelė. Apatinės plokštumos jutiklių statistiniai duomenys

Jutiklis	1	2	3	4	5
Vidurkis M	19.932	20.109	19.971	19.933	19.960
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.0107	0.0089	0.0123	0.0090	0.0075

Nagrinėdami gautus apatinės plokštumos temperatūros duomenis iškart pastebime išskirtinius 2 jutiklio rezultatus, jis yra arčiausiai skaičiavimo valdymo bloko SVK ir kompiuterio, iš to aiškiai matyti jog kompiuteris ir SVK turi didelę įtaką aplinkos šildymui apatinėje plokštumoje. Žvelgiant į toliau pateiktą grafiką, išsiskiria dvi šilumos zonos 3, 5 ir 1, 4 jutiklių, pažvelgus į jutiklių išdėstymo planą matyti jog šiluma labiau išsilaiko komparatoriaus zonoje, esančioje arčiau sienos, toliausioje zonoje nuo sienos jau vėsiau – apie 0,05 °C.

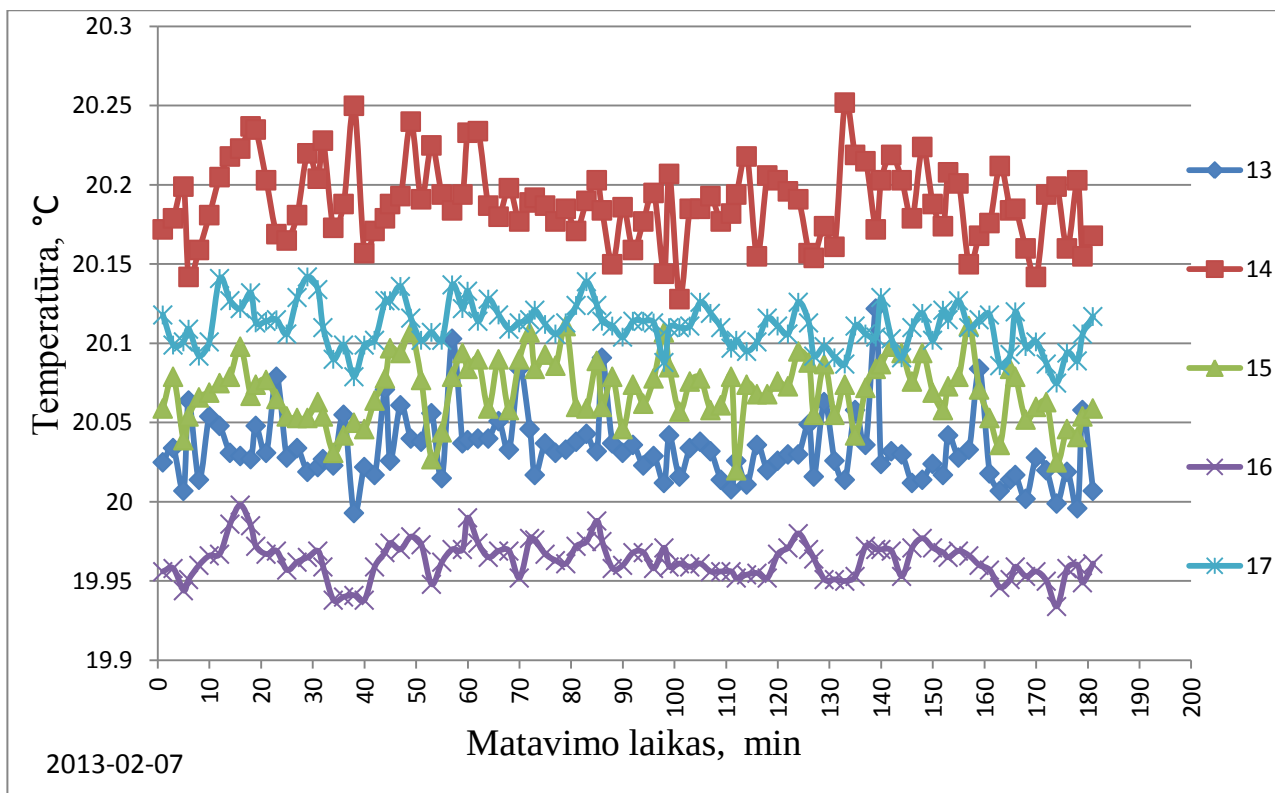


4.3 pav. b) Jutiklių gauti temperatūros duomenys darbinėje plokštumoje

5 lentelė. Darbinės plokštumos jutiklių statistiniai duomenys

Jutiklis	6	7	8	9	10	11	12
Vidurkis M	19.973	20.141	20.036	19.959	19.951	19.996	20.100
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.0105	0.0192	0.0120	0.0134	0.0085	0.0104	0.0100

Darbinėje plokštumoje paskirstyti septyni jutikliai, keturi kampuose ir du ant komparatoriaus. Didžiausią temperatūrą fiksuoja 7 jutiklis, kuris yra arčiausiai SVK ir kompiuterio. Taigi, tai dar labiau patvirtina faktą, jog nuo jų ypač stipriai šyla komparatoriaus aplinka, lyginant su apatine plokštuma, šioje plokštumoje šiluma didesnė vidutiniškai 0,03 °C. 12 jutiklis yra šalia mikroskopo, kuris šyla veikiant CCD kamerai (jai būnant prijungtai prie maitinimo). Iš grafiko matyti, kad 12 jutiklis visai nedaug, tik apie 0,05 °C fiksuoja mažesnę temperatūrą nei 7 jutiklis, taigi CCD kamera yra dar vienas didelis šilumos šaltinis. Žvelgiant į toliau pateiktą grafiką seka 8 jutiklis, kuris fiksuoja bendrą šilumos lauką, sukeltą kompiuterio, SVK, ir CCD kameros. Toliau seka 11 jutiklio fiksuojama temperatūra, kuri šiek tiek skiriasi nuo žemiausių temperatūrų dėl CCD kameros šilimo. 9, 10 ir 6 jutikliai fiksuoja beveik vienodas temperatūras, taigi jų zonose yra visiškai nusistovėjęs temperatūrų laukas, kurio neveikia didieji šilumos šaltiniai.



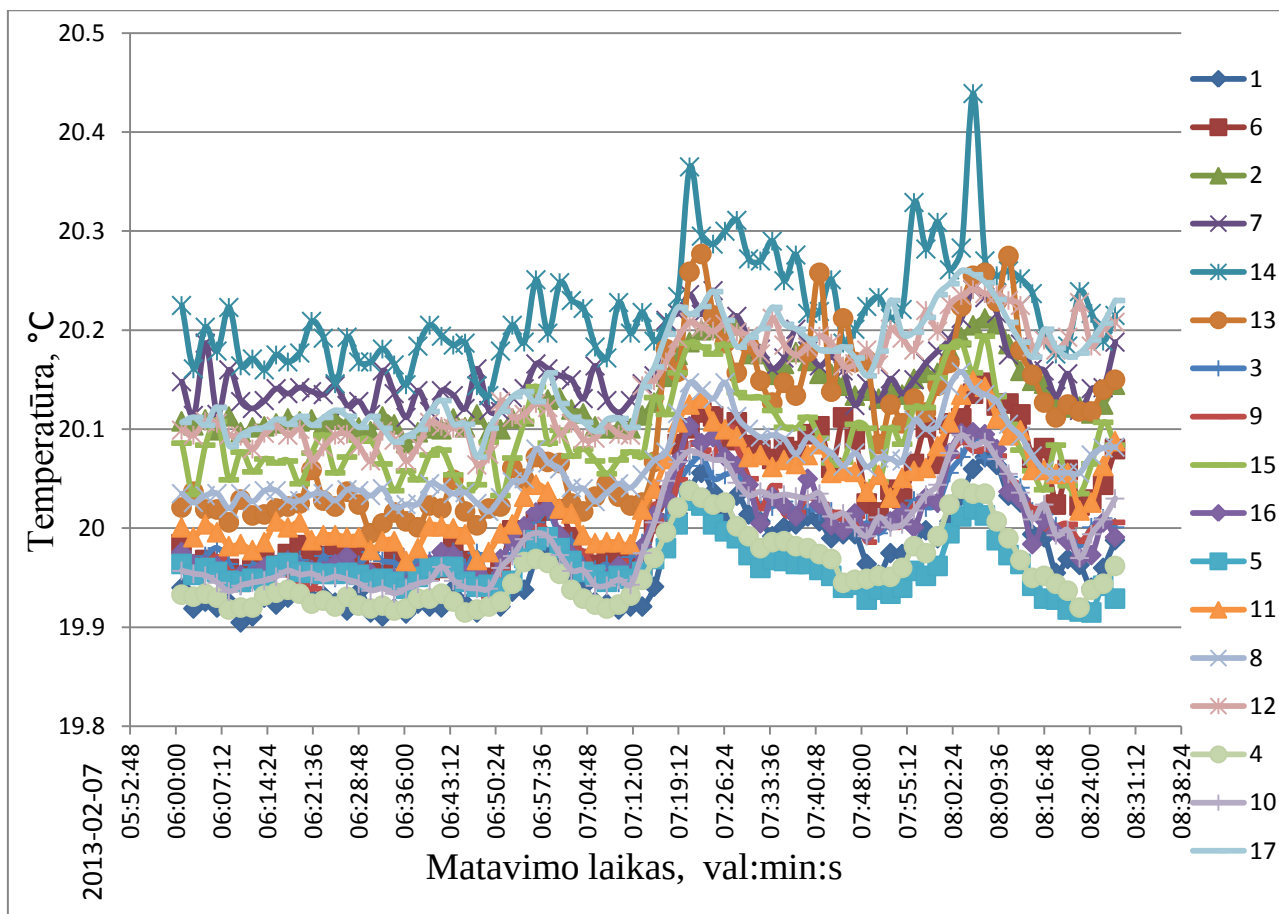
4.3 pav. c) Jutiklių gauti temperatūros duomenys viršutinėje plokštumoje

6 lentelė. Viršutinės plokštumos jutiklių statistiniai duomenys

Jutiklis	13	14	15	16	17
Vidurkis M	20.033	20.189	20.070	19.963	20.111
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.0220	0.0251	0.0197	0.0116	0.0141

Viršutinėje plokštumoje didžiausia temperatūra vėl šalia SVK ir kompiuterio, 14 jutiklio duomenys nuo darbinės plokštumos temperatūros šiame taške skiriasi temperatūros pakilimu per 0,05 °C. Toliau grafike matyti 17 jutiklio duomenys, jis yra virš CCD kameros, taigi matuoja esančią temperatūrą virš jos, kuri lyginant su 12 jutiklio duomenimis darbinėje plokštumoje yra labai nedaug didesnė, apie 0,01 °C. 15 ir 13 jutiklių temperatūros beveik tokios pat. 16 jutiklio temperatūra žemiausia, nes jis yra toliausiai nutolęs nuo pagrindinių šilumos šaltinių.

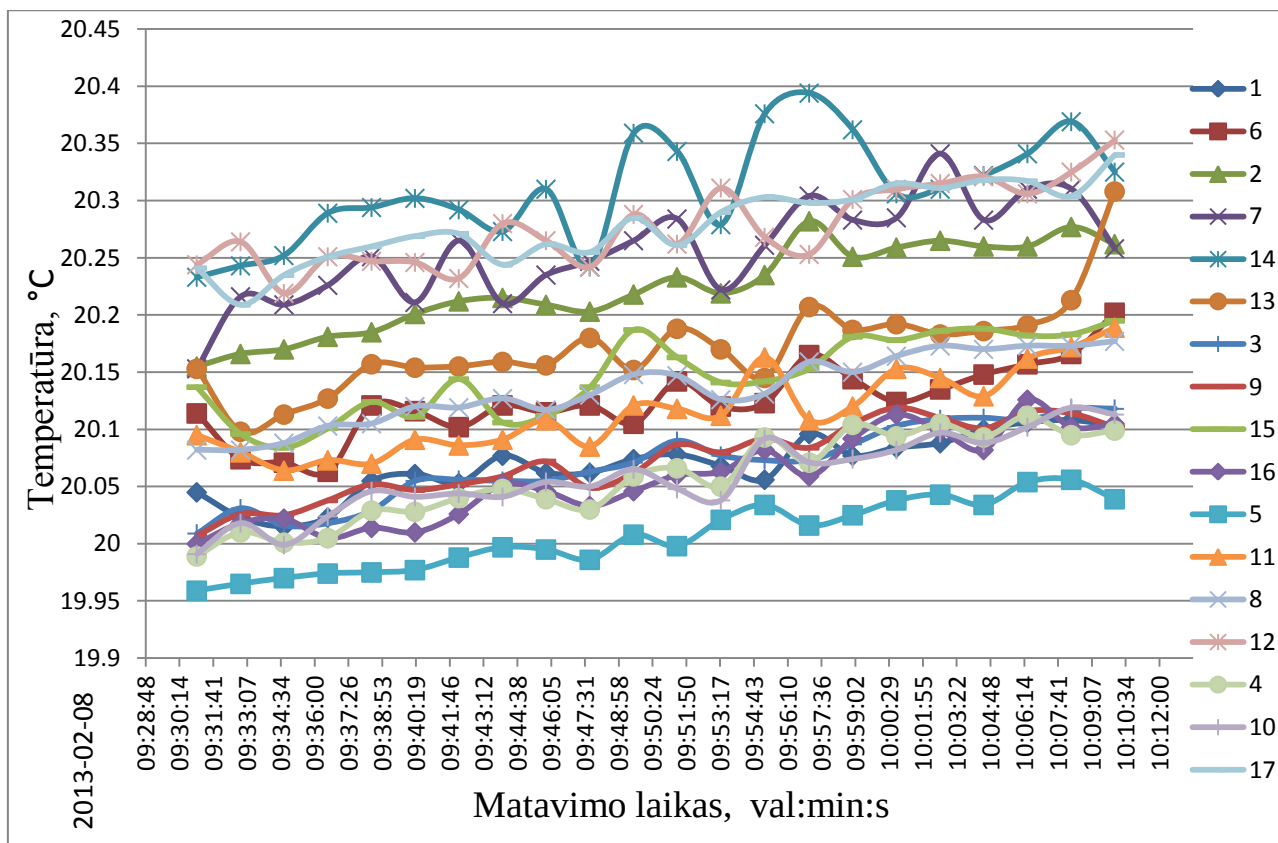
Siekiant nustatyti temperatūrų pokyčius komparatoriaus aplinkoje, kurie vyksta prasidedant darbo dienai, ryte buvo matuojamos temperatūros pradedant rinkti duomenis tuomet, kai yra nusistovėjęs komparatoriaus darbo režimas.



4.4 pav. Temperatūrų pokyčiai renkantis darbuotojams

Iki 6:50h temperatūra nusistovėjusi, ties 6:50h galima reakcija į šviesos įjungimą, vėl išjungiamo. 7:12h įjungiamo šviesa ir prisirenka žmonių, matoma didelė reakcija į aplinkos pokyčius, temperatūrų svyravimas, tačiau nėra pastovaus temperatūros kilimo, jos vidurkis nusistovi truputį padidėjęs.

Termokonstantinėje patalpoje stengiamasi išlaikyti pastovią temperatūrą, tam tikslui įrengtas kondicionierius, tačiau vaikstant į patalpą žmonėms, darinėjant duris gali būti sukelti aplinkos temperatūros pokyčiai. Norint nustatyti, koks tiksliai yra poveikis aplinkos temperatūrai darinėjant duris, buvo atliktas tyrimas (4.5 pav.).



4.5 pav. Aplinkos temperatūrų reakcija į durų atidarymą

7 lentelė. Durų darinėjimo laikai

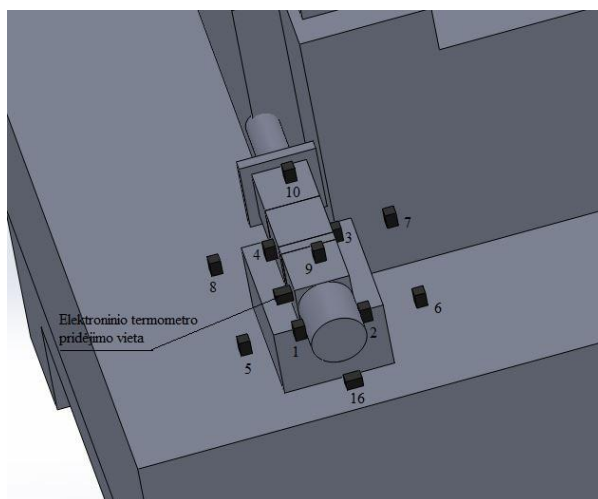
Durys atidaromos, val:min	Durys uždaromos, val:min
9:40	9:41
9:46	9:47
9:52	9:53

Komparatorius prieš matavimą buvo nusistovėjęs režimo, pradėtas matavimas, ir po 10 minučių pradėta darinėti duris. Atlikus tyrimą, galima teigti, kad durų darinėjimas didelės įtakos komparatoriaus aplinkos temperatūrai neturi. Labiausiai sureaguoja didžiausią temperatūrą fiksuojantis aukščiausioje ploštumoje esantis 14 jutiklis, tai rodo, kad atidarius duris susidaro oro srovė tarp durų ir kondicionieriaus oro ištraukimo angų. Matavimai atlikti laikant atidarytas duris po minutę, atsižvelgiant į tai, jog termokonstantinės patalpos durys praktiškai ilgiau atidarytos niekada nebūna, dažniausia dar trumpiau, nes naudojamos tik žmonėms vaikščioti.

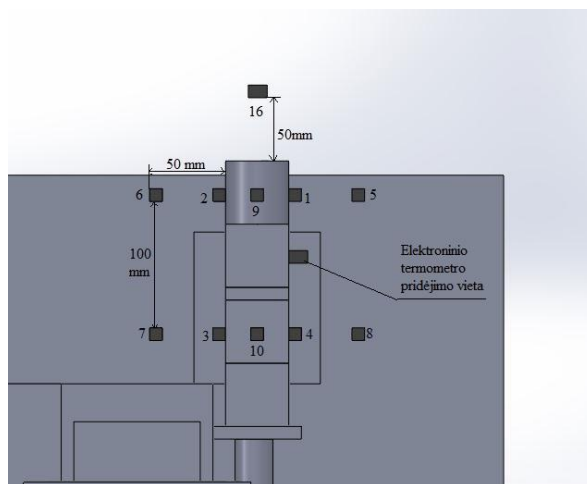
5. EKSPERIMENTINIS KOMPARATORIAUS VIDINIŲ TEMERATŪRINIŲ TRIKDŽIŲ TYRIMAS

5.1 Temperatūros gradientų variklio ir pavaros aplinkoje eksperimentinis tyrimas

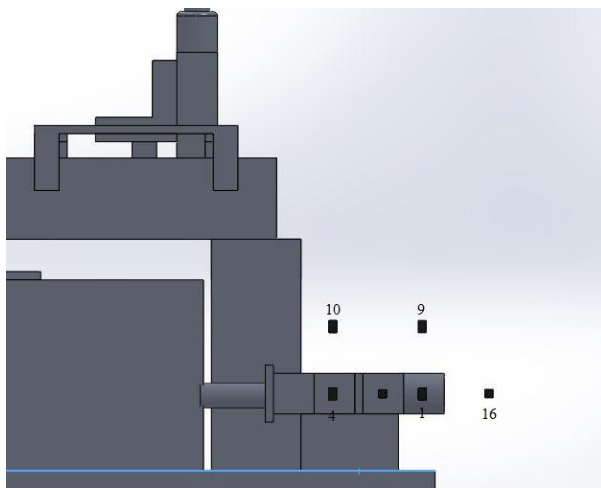
Variklis yra vienas iš pagrindinių temperatūros šaltinių kampingame komparatoriuje, taigi buvo atliekamas tyrimas, norint išmatuoti paties variklio darbinę temperatūrą ir jo aplinkos temperatūrą. Pastebėta, jog variklio darbas sukelia elektrinius triukšmus tinkle ir dėl to neįmanoma nuskaityti tikslių jutiklių duomenų. Norint gauti tikslius duomenis, variklis buvo kas 5 minutes išjungiamas ir nuskaityti jutiklių duomenys. Variklis matavimo pradžioje yra visiškai atšąsintas. Kadangi variklis per pavarą judina visą kampo matavimo sistemą, matuojant variklio aplinką kartu matuojama ir kampo matavimo sistemos aplinkos temperatūra. Bendras grafikas, vaizduojantis aplinkų temperatūrų pokyčius, pavaizduotas 5.2 pav. Eksperimento metu naudojami penkiolika PP100 platinos lustinių temperatūros jutiklių, du platinos foliniai jutikliai PT100, PP2 precizinis temperatūros matavimo prietaisas, elektroninis termometras OMEGA HH41 ir asmeninis kompiuteris.



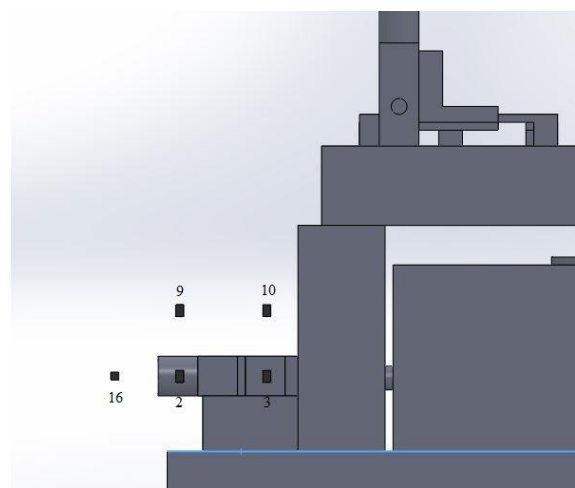
a)



b)

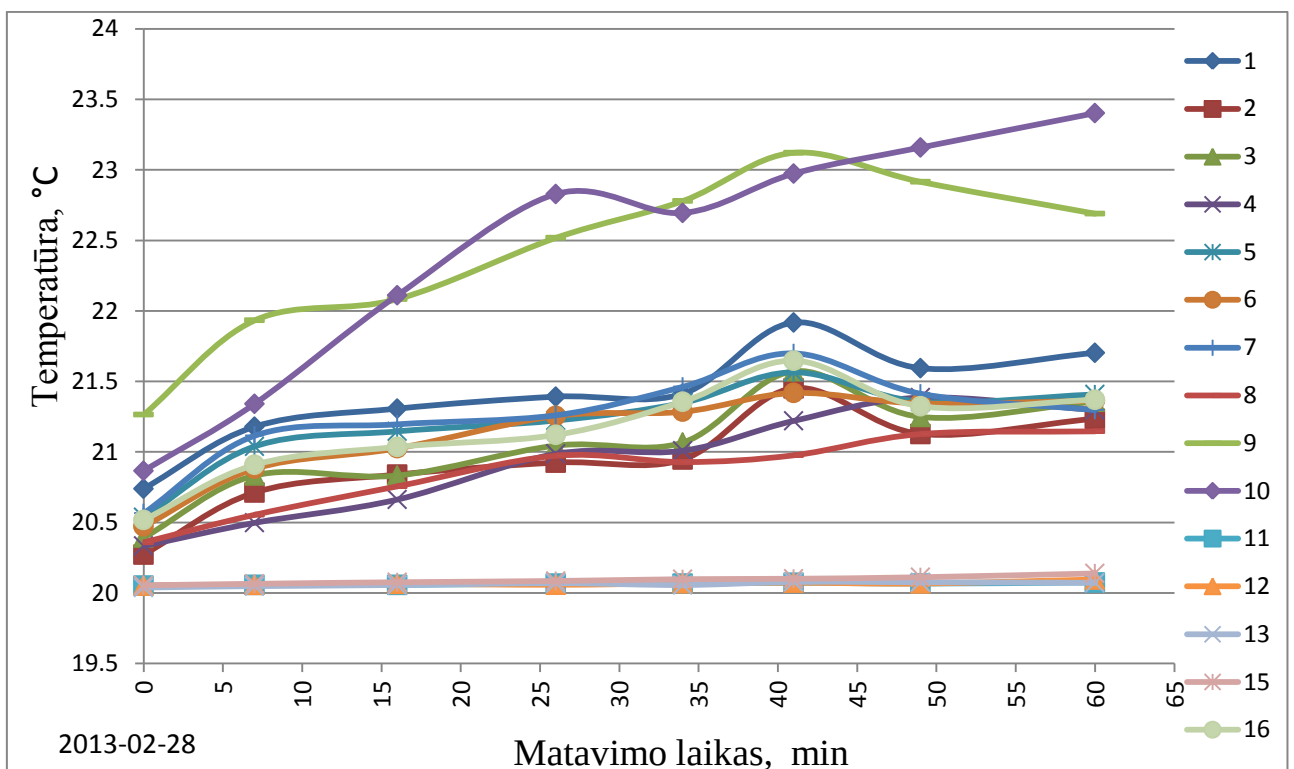


c)



d)

5.1 pav. Jutiklių išdėstymas variklio aplinkoje: a) erdvinis vaizdas; b) vaizdas iš viršaus, c) vaizdas iš dešinės; d) vaizdas iš kairės

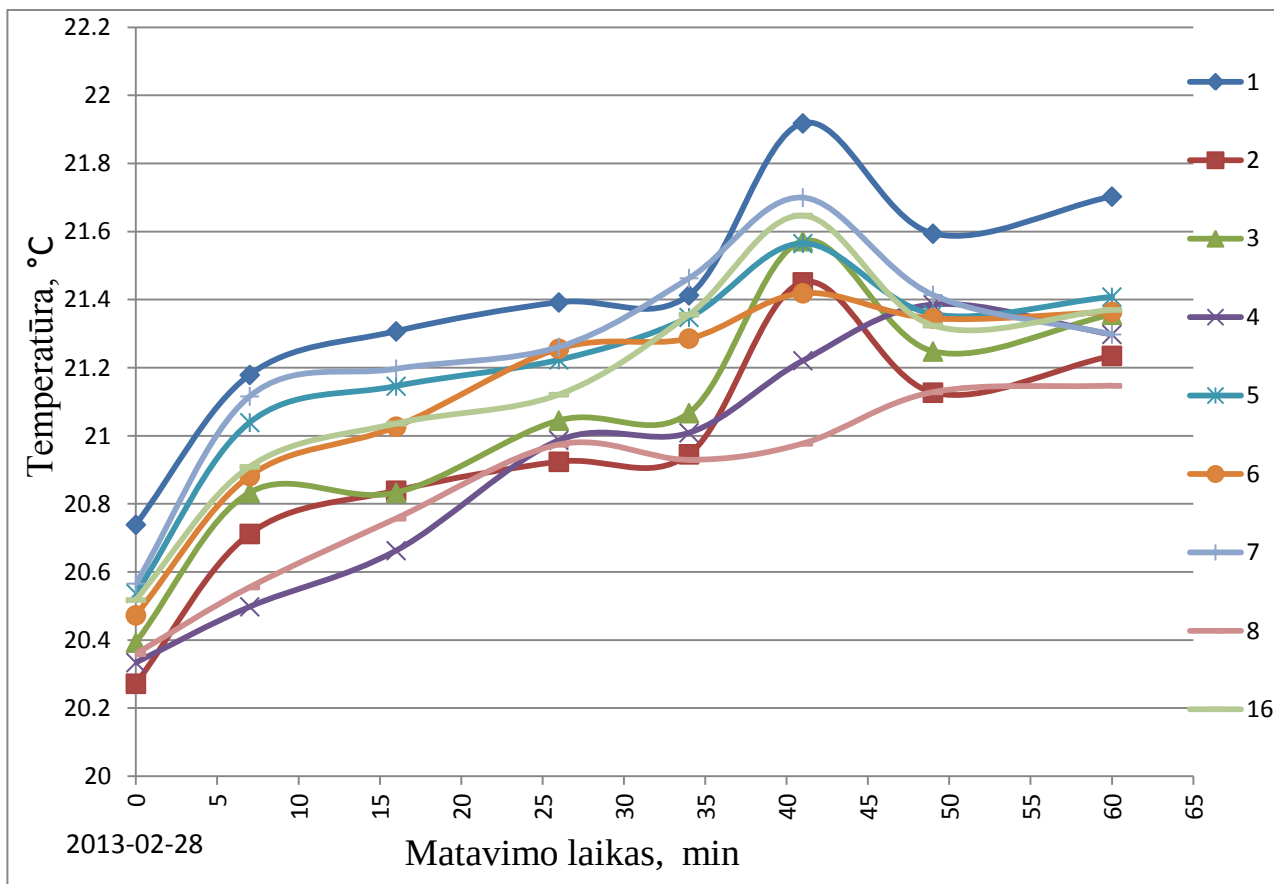


5.2 pav. Variklio ir kampo matavimo sistemos aplinkų temperatūrų grafikas

8 lentelė. Variklio ir kampo matavimo sistemos jutiklių statistiniai duomenys

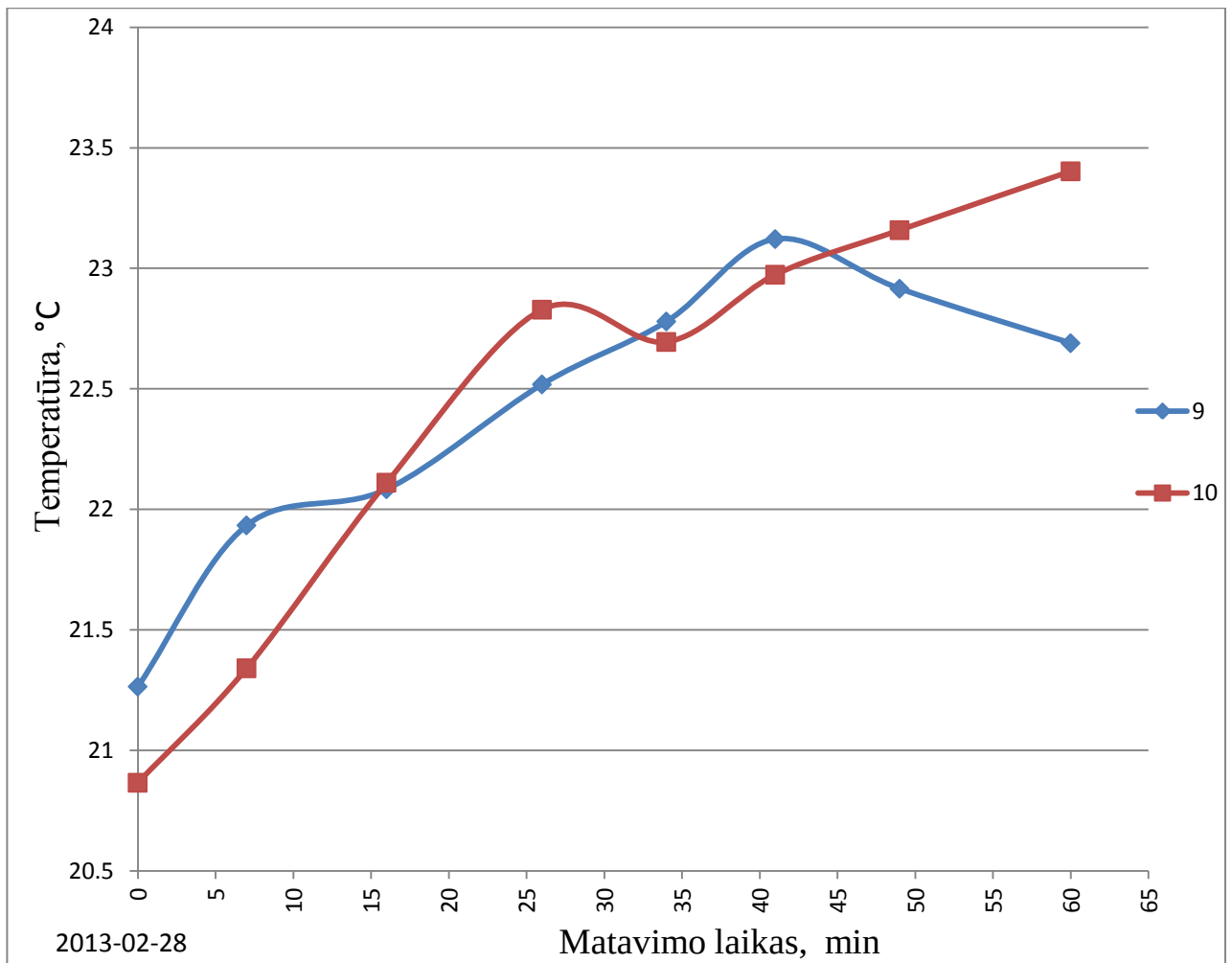
Jutiklis	1	2	3	4	5	6	7	8
Vidurkis M	21.406	20.938	21.043	20.925	21.203	21.132	21.252	20.853
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.3570	0.3569	0.3647	0.3874	0.3144	0.3226	0.3308	0.2777
Jutiklis	9	10	11	12	13	15	16	
Vidurkis M	22.414	22.422	20.064	20.067	20.062	20.091	21.160	
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.6134	0.9053	0.0077	0.0133	0.0144	0.0273	0.3461	

Variklio aplinkoje jutikliai buvo išdėstyti dviejose plokštumose, penki jutikliai variklio vidurio plokštumoje atstumu per 5 cm nuo variklio ir du jutikliai virš variklio 5 cm atstumu plokštumoje.



5.3 pav. Variklio aplinkos šilimas jo vidurio plokštumoje

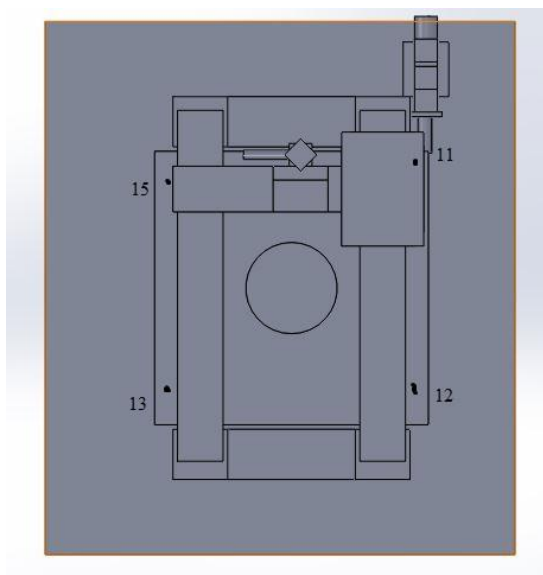
Variklio ir pavaros aplinka įjungus variklį pradžioje staigiai šyla, praėjus 10 minučių laikotarpiui, temperatūros didėjimas praranda pagreitį ir ji kyla lėčiau. Maždaug 35 matavimo minutę sustojus oro srauto aplinkoje judėjimui fiksuojamas didelis aplinkos temperatūros kilimas, kai kurių jutiklių rodmenys pakyla net per 0,5 °C. Oro srautui vėl pajudėjus, jutiklių rodmenys nukrinta ne į buvusias reikšmes, tačiau į šiek tiek aukštesnes, nes aplinka vis šyla. Vėliau jutiklių duomenų grafikai nusistovi ties savo pasiektomis temperatūromis, aplinkos šilimas nebevyksta, arba yra nykstamai lėtas.



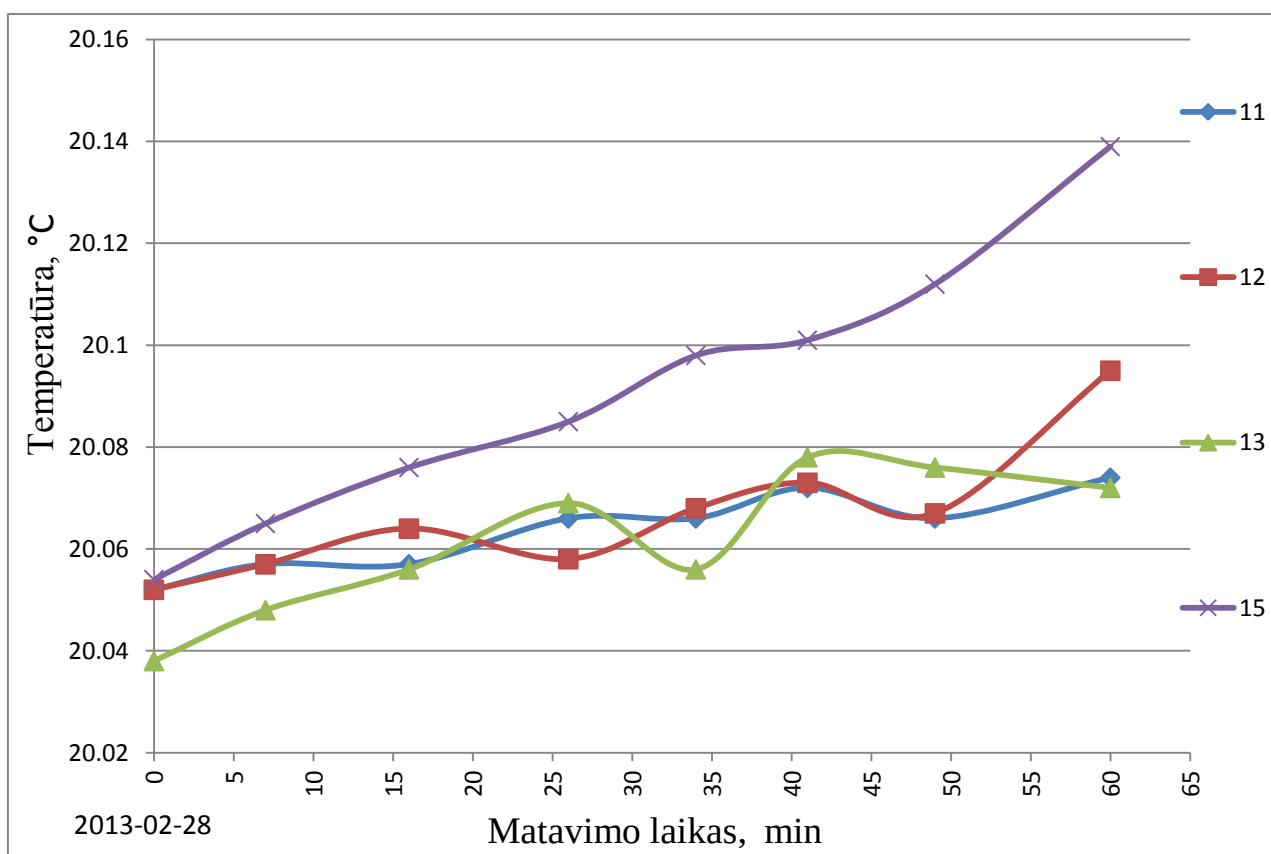
5.4 pav. Variklio aplinkos šilimas plokštumoje virš jo

Aplinkos šilimas virš variklio visą matavimo laiką išlieka vienodo greičio, 9 jutiklis yra virš variklio, o 10 yra virš pavaros. Iš duomenų grafiko matyti jog pavaros aplinka šyla ištisai, o variklio aplinka pasiekusi tam tikrą temperatūrą, apie 23,2 °C, pradeda žemėti. Žemėjimui gali turėti įtaką oro srauto pajudėjimas.

Kampo matavimo sistemos aplinka varikliui dirbant taip pat šyla, pažvelgus į temperatūrų grafiką (6.6 pav.) ir į jutiklių išdėstymo schemą, pastebima įdomi tendencija, arčiausia variklio esančio jutiklio duomenys (11 jutiklis) rodo žemesnę temperatūrą negu jutiklis, esantis toliau nuo variklio (15 jutiklis). Tokiam temperatūrų skirtumui susidaryti turbūt padeda oro srautas nuo besisukančios pavaros, kuris nupučia šilumą iki 15 jutiklio. Kampo matavimo sistemos jutikliai yra uždaroje erdvėje prie kalibratoriaus žiedų ir sukimo pavaros (6.5 pav.).

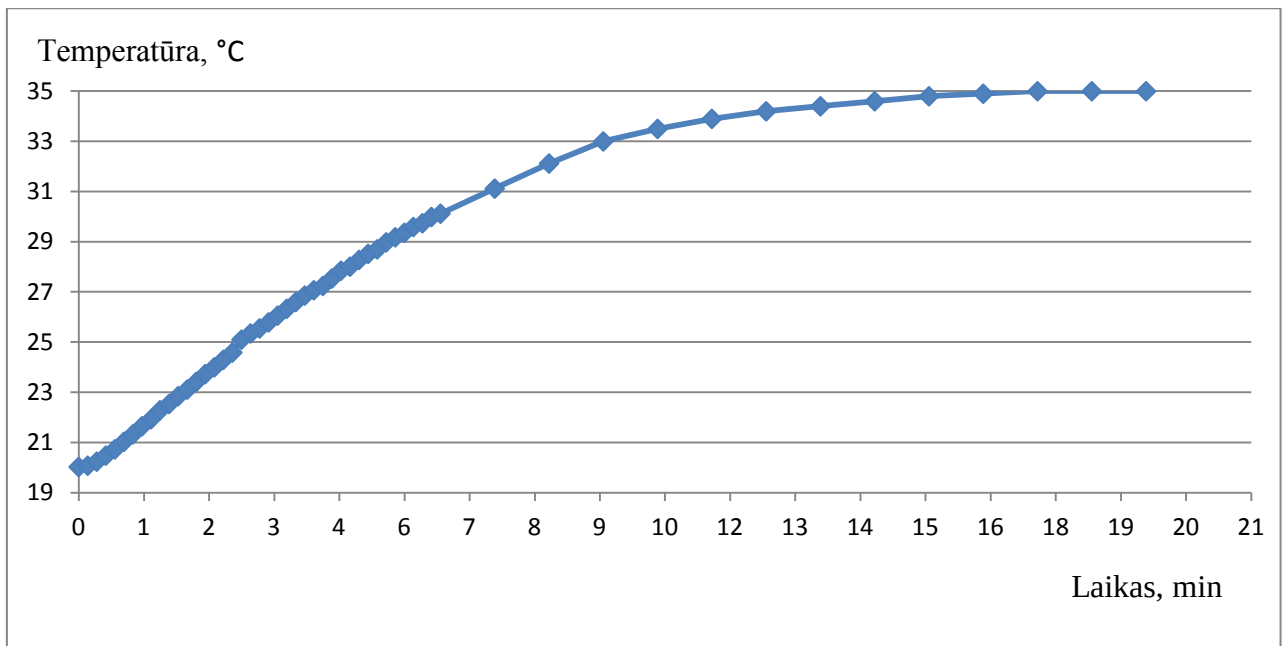


5.5 pav. Kampo matavimo sistemos jutiklių išdėstymas



5.6 pav. Kampo matavimo sistemos aplinkos šilimas dirbant varikliui

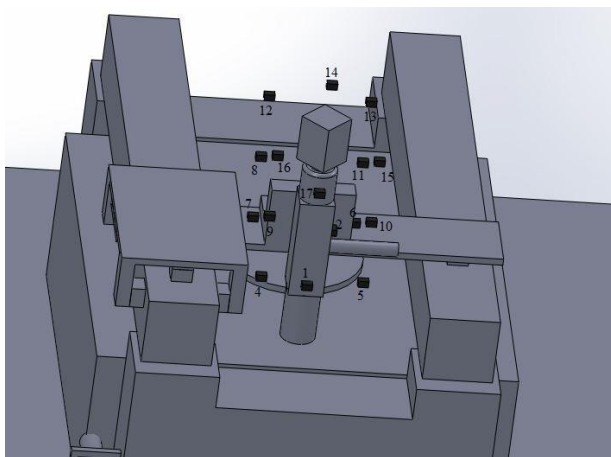
Kadangi jutikliai matuoja iki +25 °C temperatūrą, o pats variklis kaista net keletą laipsnių daugiau, tai jo temperatūrai išmatuoti buvo naudojamas termometras OMEGA HH41. Variklis šyla visą laiką beveik vienodu greičiu, pasiekus aukščiausią temperatūrą +35 °C variklio šilimas nusistovi.



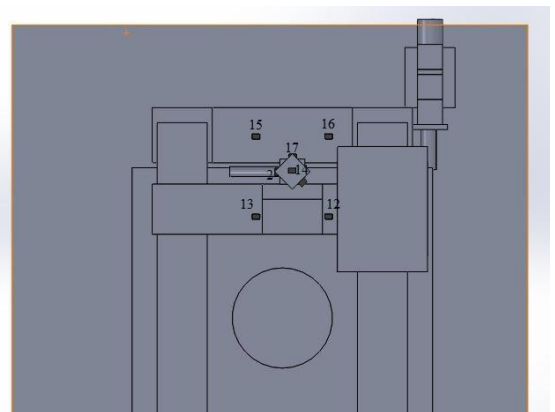
5.7 pav. Variklio šilimas dirbant

5.2 Temperatūros gradientų CCD kameros aplinkoje eksperimentinis tyrimas

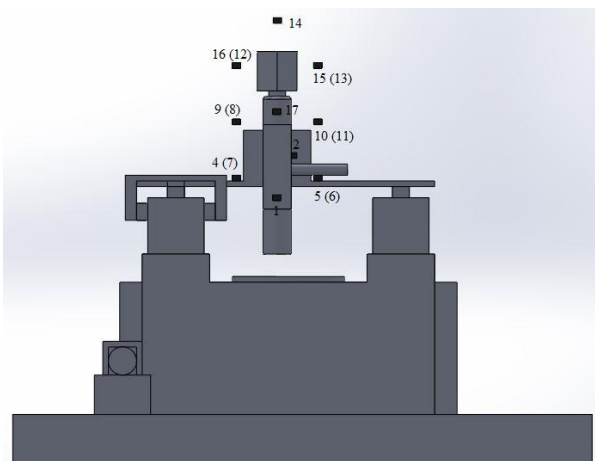
CCD kamera yra dar vienas šilumos šaltinis, taigi buvo imtasi tyrimo išmatuoti kameros ir jos aplinkos šilimą. Prieš matavimą kamera buvo ilgą laiką išjungta, atjungtas maitinimo kabelis, ji visiškai atvėsusi. Kameros laukas matuotas trimis plokštumomis, kuriose buvo po keturis jutiklius, o virš kameros buvo dar vienas jutiklis. Pati kamera, kaip ir variklis, kaista daugiau nei $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, šiuo atveju platinos lustiniai ir foliniai jutikliai aukštesnės temperatūros neregistruos, matavimo sistema nustatyta tokia polinomine funkcija, jog registruoja temperatūras nuo $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, taigi pačios kameros šilimas buvo matuotas termometru OMEGA HH41.



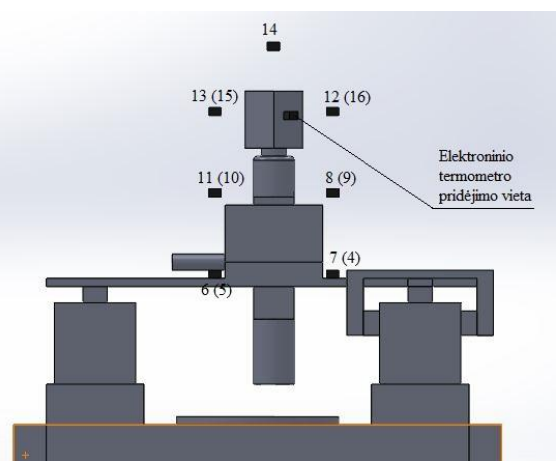
a)



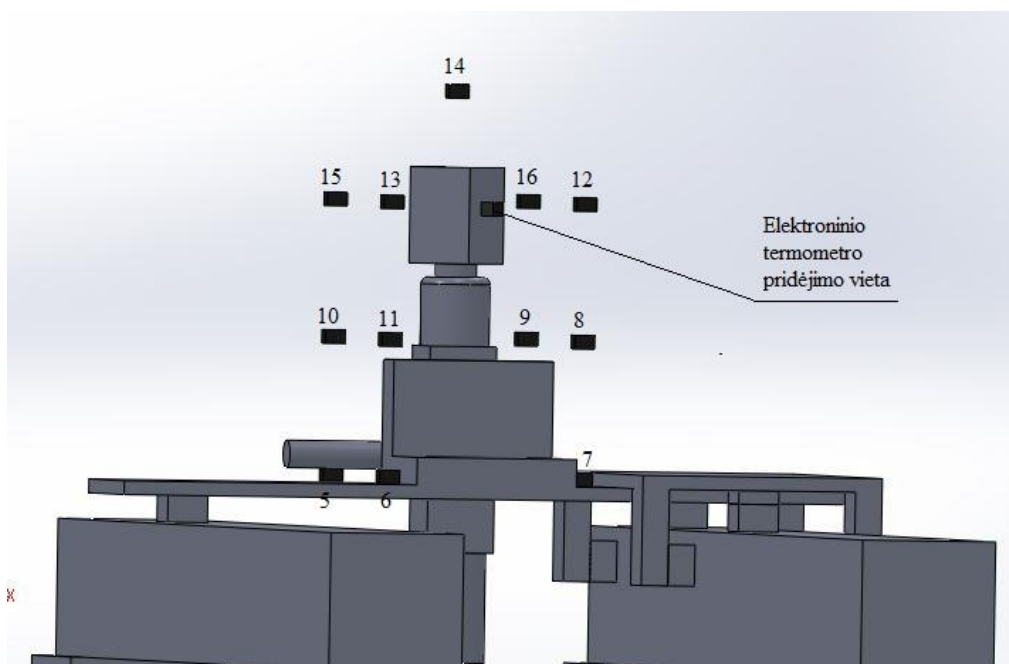
b)



c)

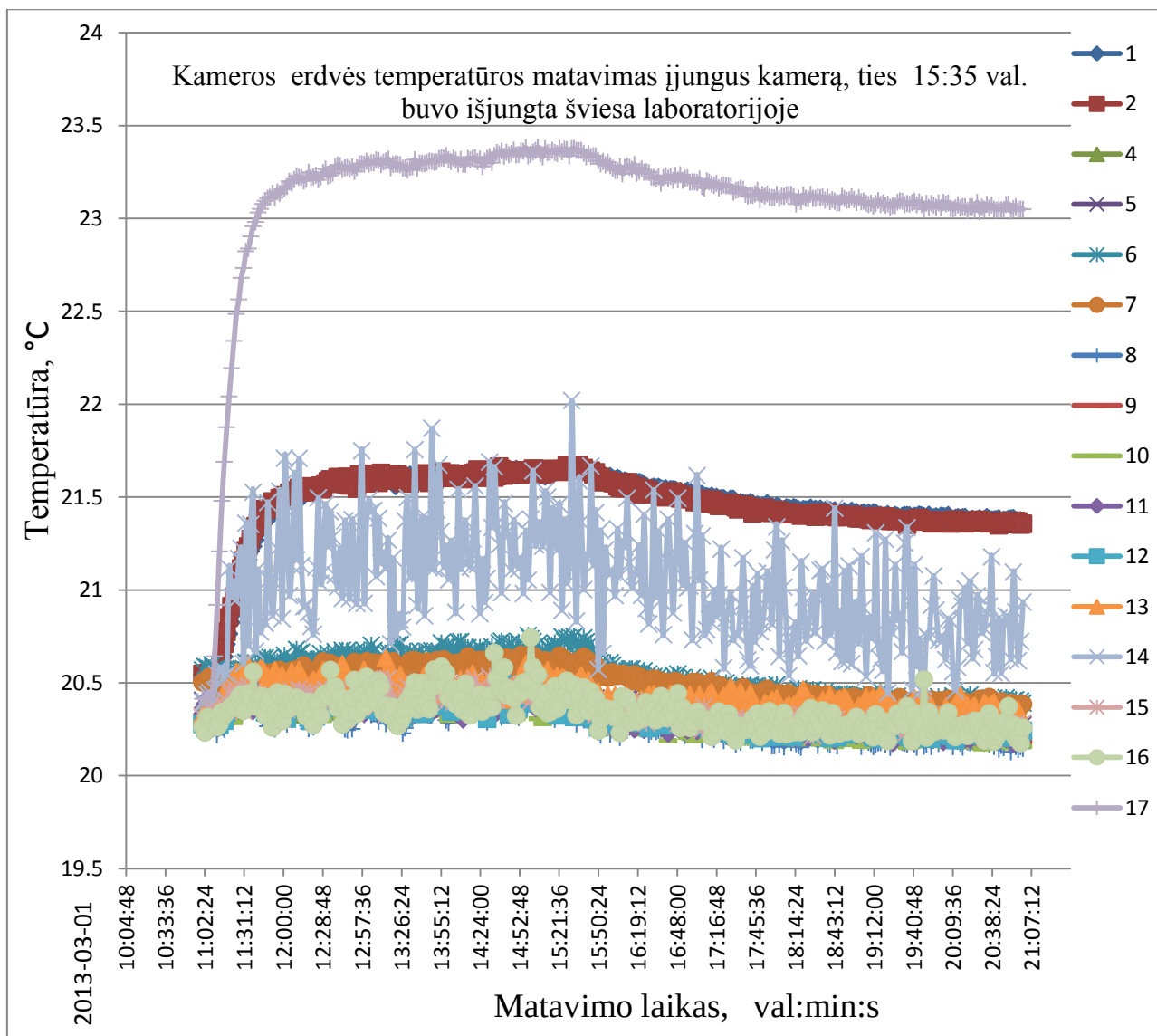


d)



e)

5.8 pav. Kameros aplinkos jutiklių išdėstymas: a) erdvinis vaizdas; b) iš viršaus; c) iš galo; d) iš priekio; e) matavimo plokštumų vaizdas

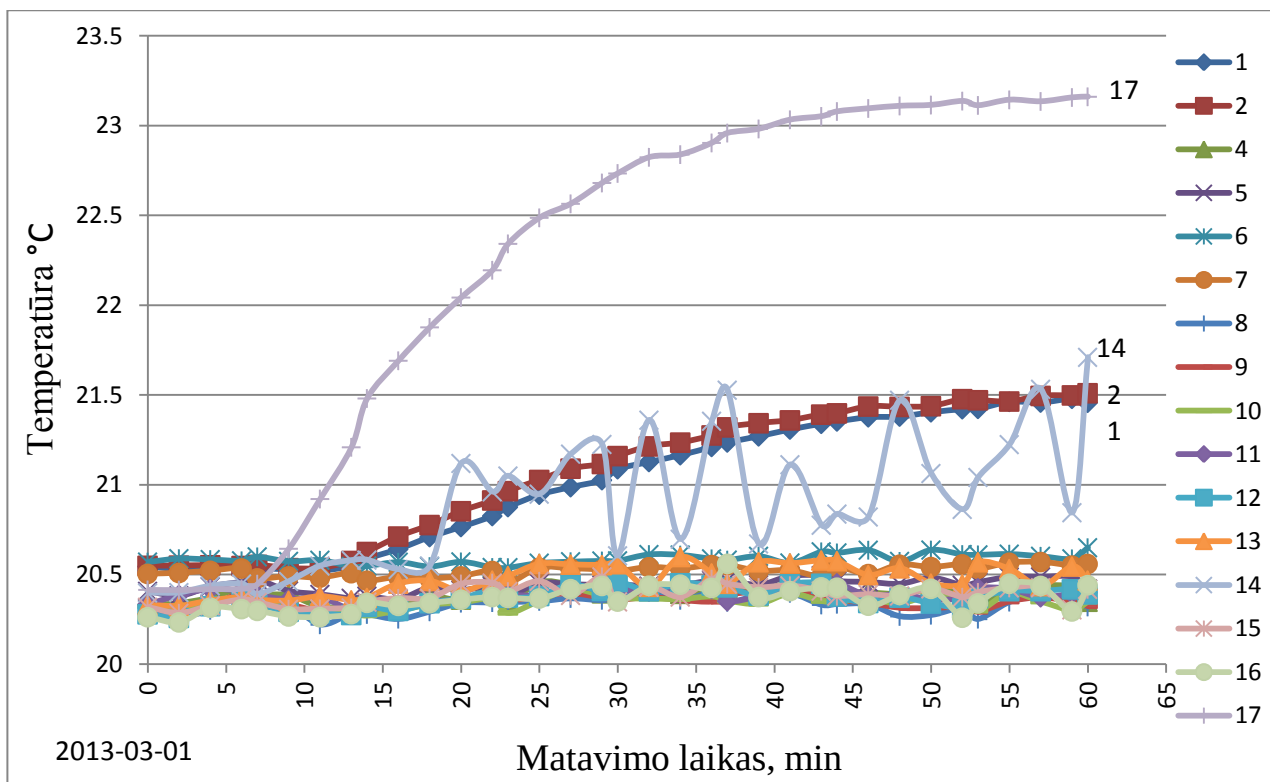


5.9 pav. Kameros aplinkos šilimas

5.9 paveiksle pavaizduotas visas matavimas ilgą laiko tarpą, visą darbo dieną, aiškiai išsiskiria trijų jutiklių duomenys, didžiausias temperatūras fiksuoja jutikliai, esantys ant mikroskopo korpuso, kurį tiesiogiai šildo kamera, ir jutiklis, kuris yra tiesiai virš kameros. Taip pat atsiskleidžia jutiklių reakcija į šviesą, kai 15:35h išjungiama šviesa, jutiklių temperatūros duomenys nukrinta maždaug per 0,5–0,7 °C.

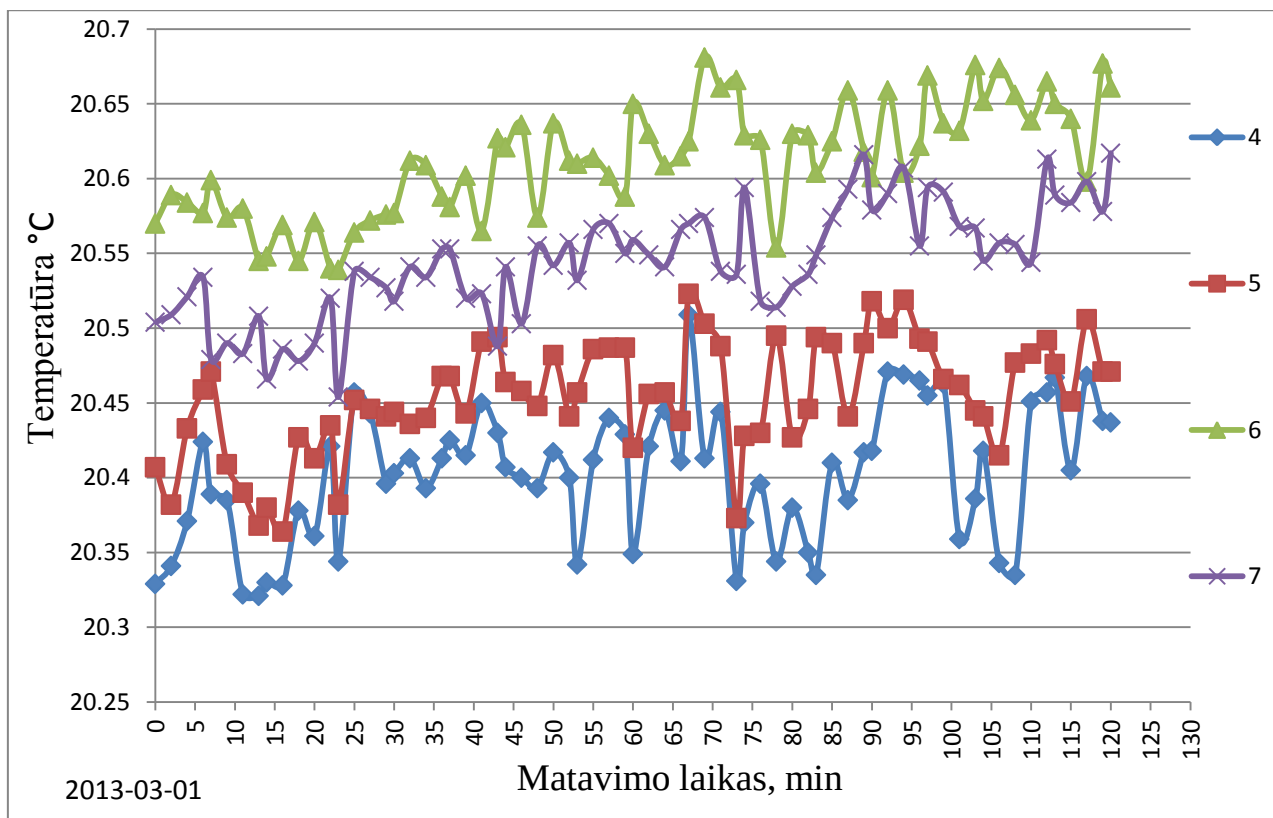
9 lentelė. Kameros aplinkos jutiklių pilno matavimo statistiniai duomenys

Jutiklis	1	2	4	5	6	7	8	9
Vidurkis M	21.469	21.462	20.350	20.382	20.549	20.507	20.285	20.297
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.2116	0.2026	0.0775	0.0878	0.1118	0.0850	0.0875	0.0760
Jutiklis	10	11	12	13	14	15	16	17
Vidurkis M	20.271	20.313	20.319	20.427	21.032	20.349	20.347	23.109
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.0791	0.0749	0.0756	0.0753	0.3059	0.0805	0.0928	0.4436



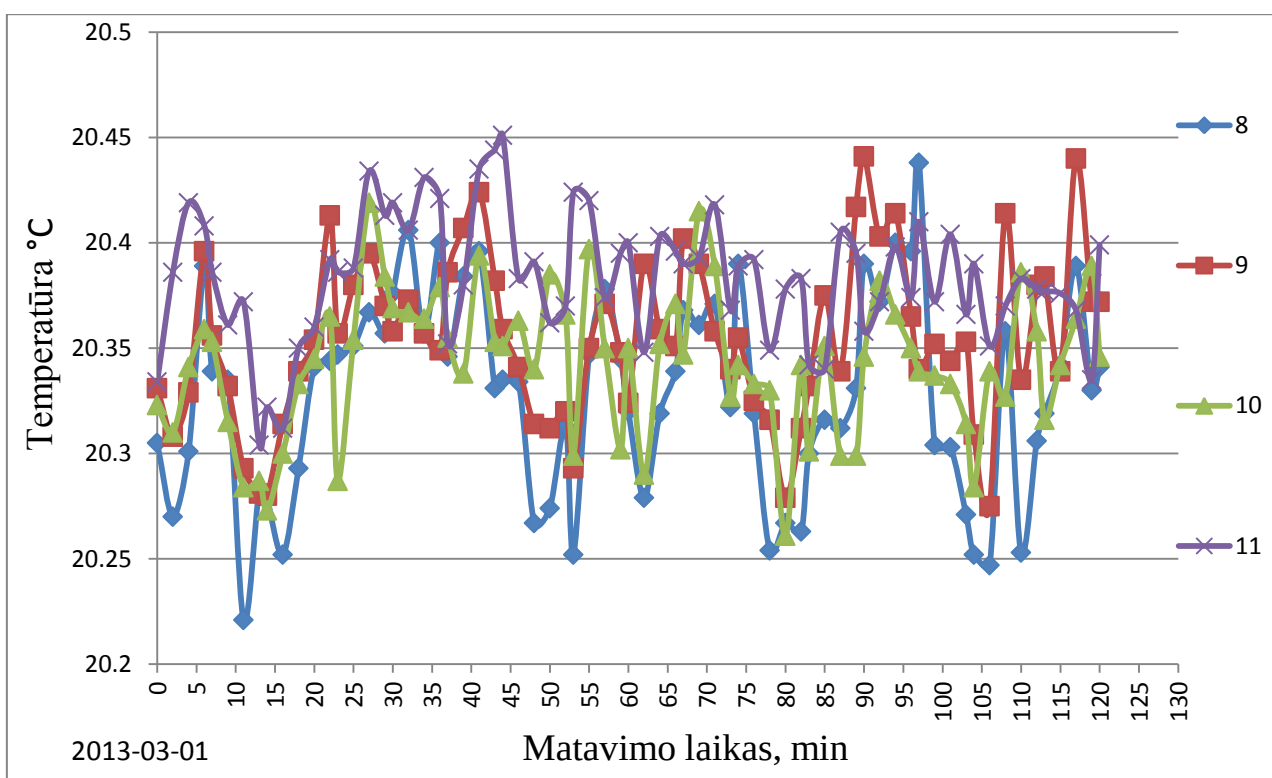
5.10 pav. Kameros šilimas pirmą valandą

Kamera įjungta 8 minutę nuo matavimo pradžios ir iš karto pastebimas temperatūros didėjimas ant mikroskopo korpuso ir virš kameros, aplinkos šilimas iš šio grafiko (5.10 pav.) nėra aiškus, todėl toliau yra sudaryti grafikai atskirai kiekvienai iš trijų matavimo plokštumų.



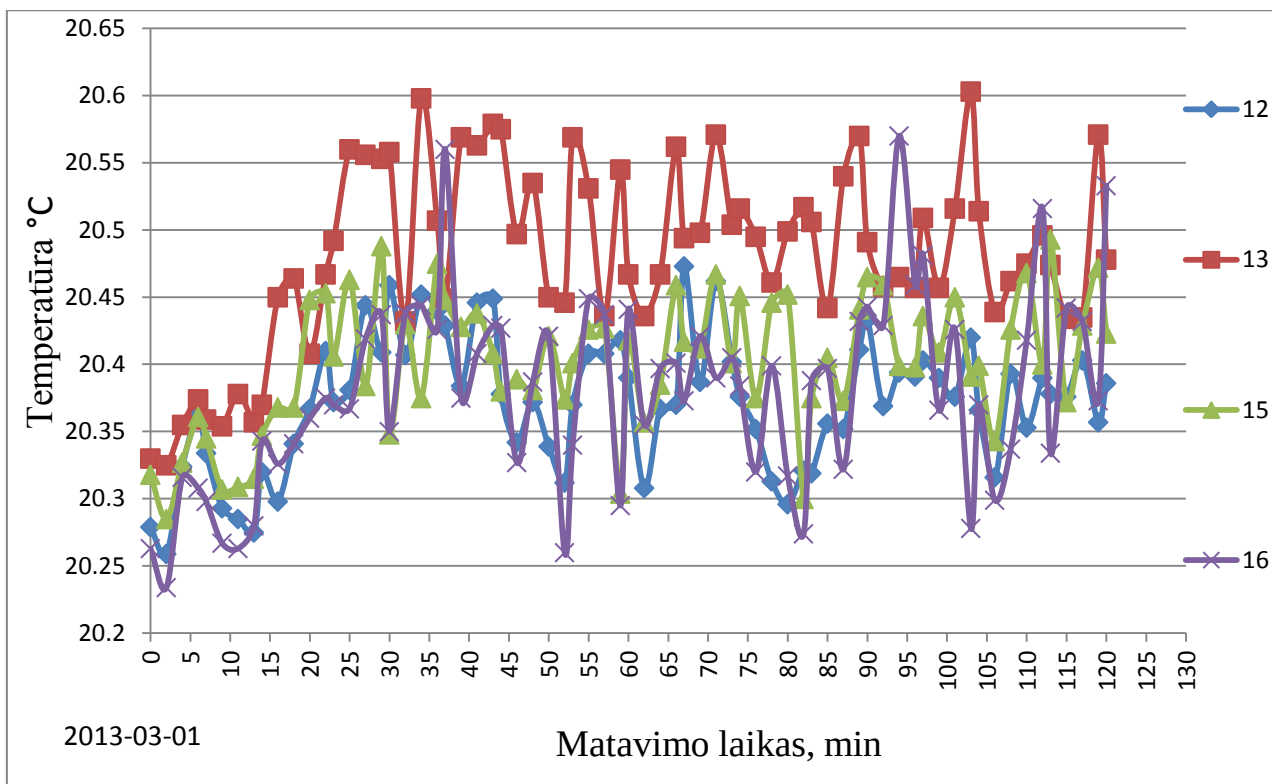
5.11 pav. Apatinės plokštumos šilimas

Visose plokštumose jutikliai nuo kameros ir mikroskopo yra 3 cm atstumu. Įjungus kamerą apatinės plokštumos jutikliai fiksuoja nedidelį temperatūros kilimą aplinkoje (5.11pav.). Matavimų duomenys paimti dviejų valandų laikotarpio, nuo kameros įjungimo 8 minutę. Dėl oro srauto judėjimo jutiklių fiksuojama temperatūra tarsi šokinėja, tačiau pažvelgus į visą jutiklio duomenų kreivę temperatūros kitimas pastebimas nesunkiai. Temperatūros duomenys aukštesni ties ta puse mikroskopo, kur jis yra tvirtinamas (šalia „liežuvio“), tai nurodo 6 ir 7 jutiklio duomenų kreivės, taigi iš to galima daryti išvadą, jog mikroskopą laikančioji konstrukcija šyla perimdama šilumą nuo mikroskopo korpuso. Aukščiausią temperatūrą fiksuoja 6 jutiklis, net 20,67 °C.



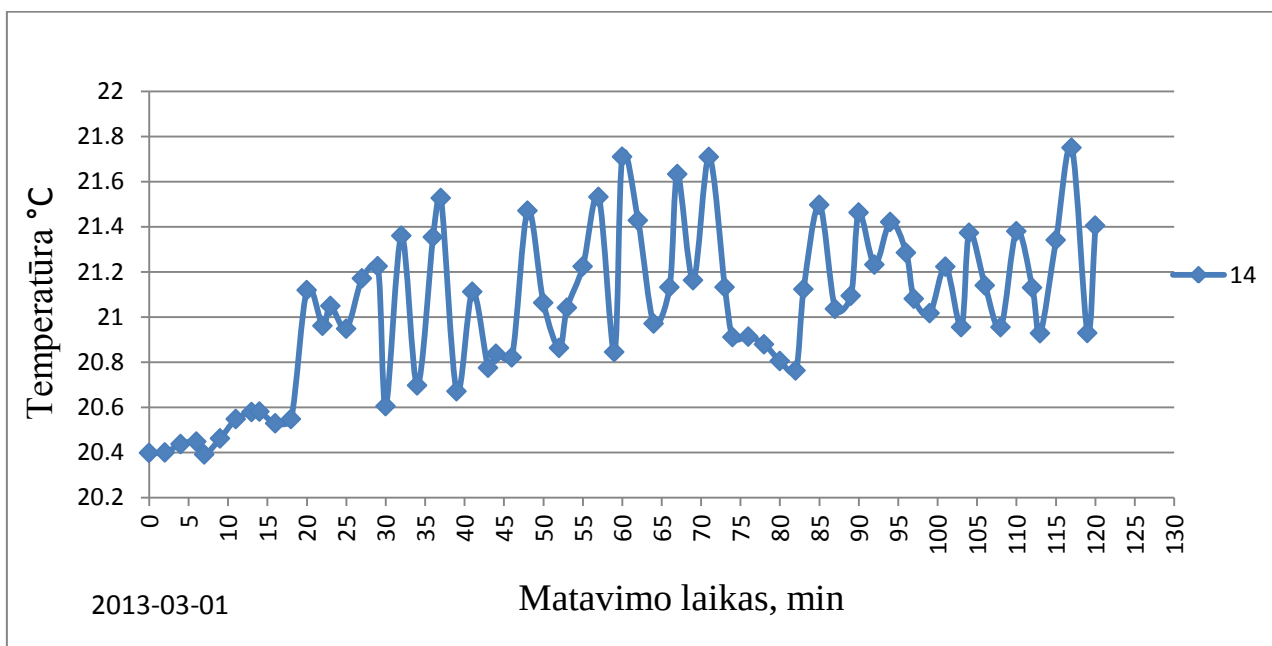
5.12 pav. Vidurinės plokštumos šilimas

Vidurinėje plokštumoje (5.12 pav.) temperatūros matavimo taškuose nėra pernelyg išsiskyrę, taip kaip apatinėje plokštumoje, visų jutiklių duomenys fiksuoja beveik bendrus temperatūros šuoliukus. Tik įjungus kamerą, apie 10 minučių visų jutiklių fiksuojamos temperatūros kyla vienodu greičiu. Aukščiausią temperatūrą fiksuoja 9 ir 11 jutikliai, ji artima 20,45 °C.



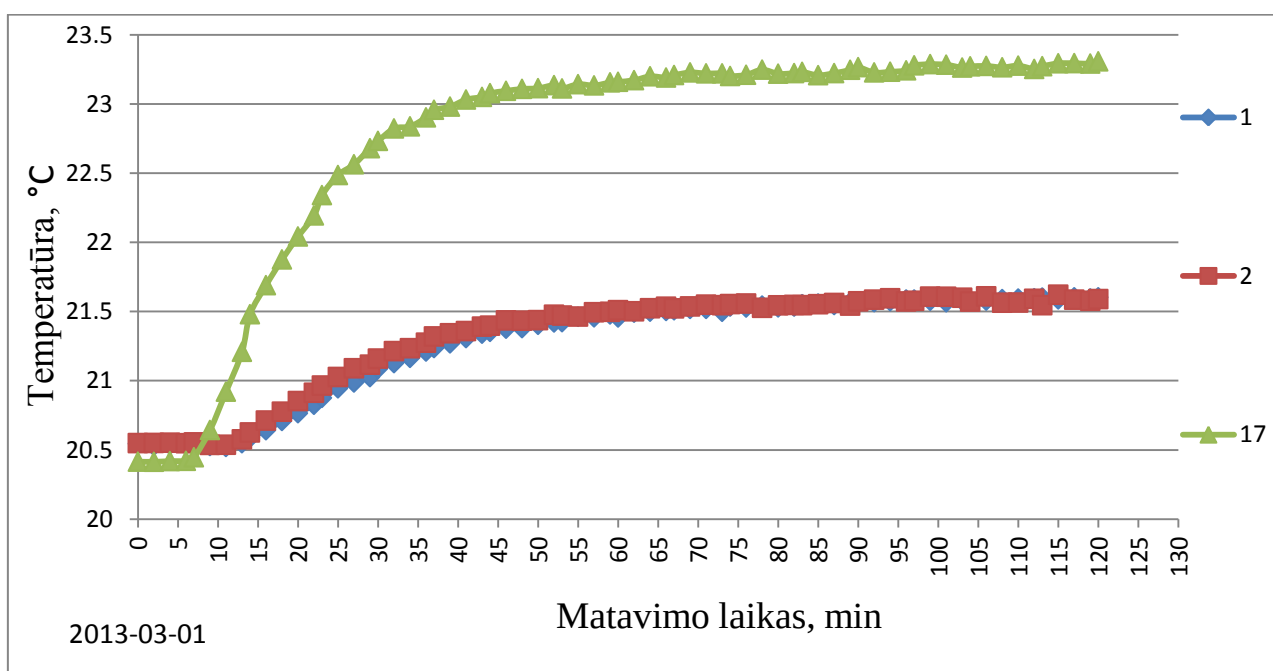
5.13 pav. Viršutinės plokštumos šilimas

Viršutinėje plokštumoje (5.13 pav.) pastebimas staigus temperatūros didėjimas vos įjungus kamerą 8 minutę, temperatūra kyla apie 10 minučių, vėliau nors ir su oro srauto sudarytais šuoliais tačiau galima teigti jog temperatūra nusistovi. Išsiskiria 13 jutiklio duomenys, šalia jo temperatūra didžiausia ir siekia 20,6 °C.



5.14 pav. Aplinkos šilimas virš kameros

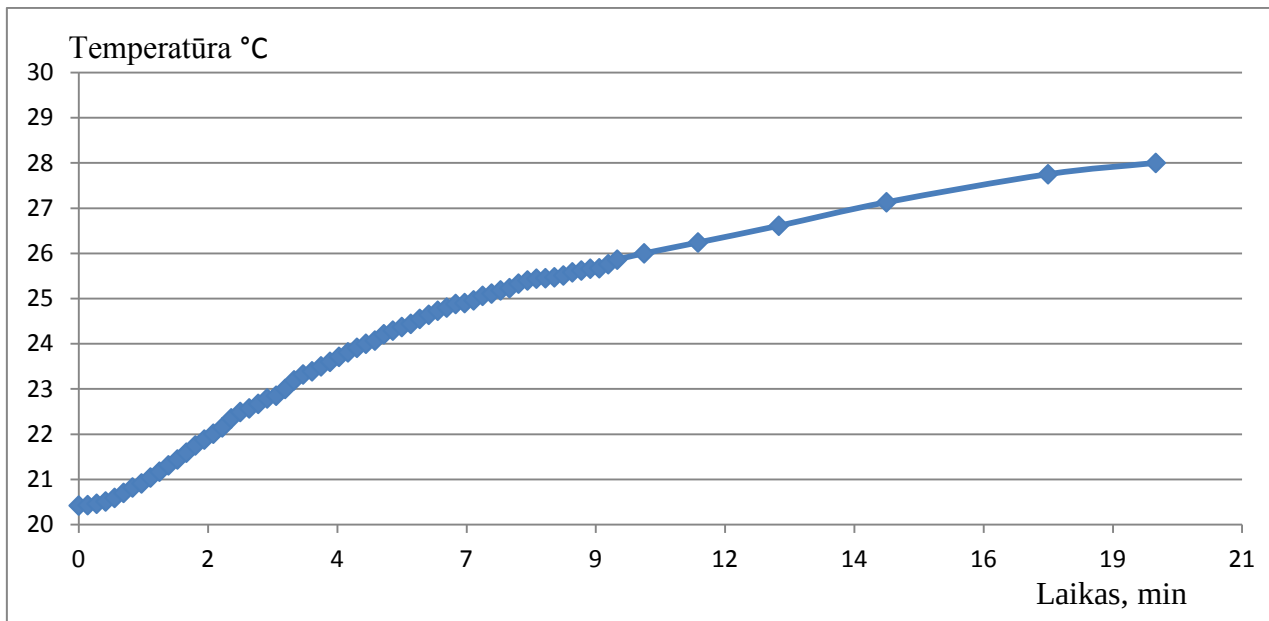
Virš kameros matuota temperatūra vienu platinos foliniu jutikliu 5cm atstumu nuo kameros, kuris yra jautresnis už platinos lustinį jutiklį. Įjungus kameros maitinimą 8 minutę matosi temperatūros kilimas (5.14 pav.), ir po dar maždaug 10 minučių ji nusistovi, truputį pakrinta. Tačiau įjungus pačios kameros fiksuojamą vaizdą kompiuteriu 20 matavimo minutę temperatūra vėl šokteli į viršų, tris kartus siekia +21,67 °C reikšmės. Iš to išplaukia išvada jog vien prijungus maitinimą kamera jau šyla, tačiau įjungus kameros veikimą, stebėjimą vaizdo per ją, kameros viršaus aplinkos temperatūra dar žymiai pakyla, momentais siekia visą celsijaus laipsnį nuo tos reikšmės kurį yra pasiekama prijungus tik maitinimą. Tačiau viršutinės aplinkos šilimas didelės įtakos mikroskopo korpuso šilimui neturi, nes karštas oras kyla į viršų, kur susimaišo su oro srovėmis ir yra išsklaidomas.



5.15 pav. Mikroskopo korpuso šilimas nuo kameros

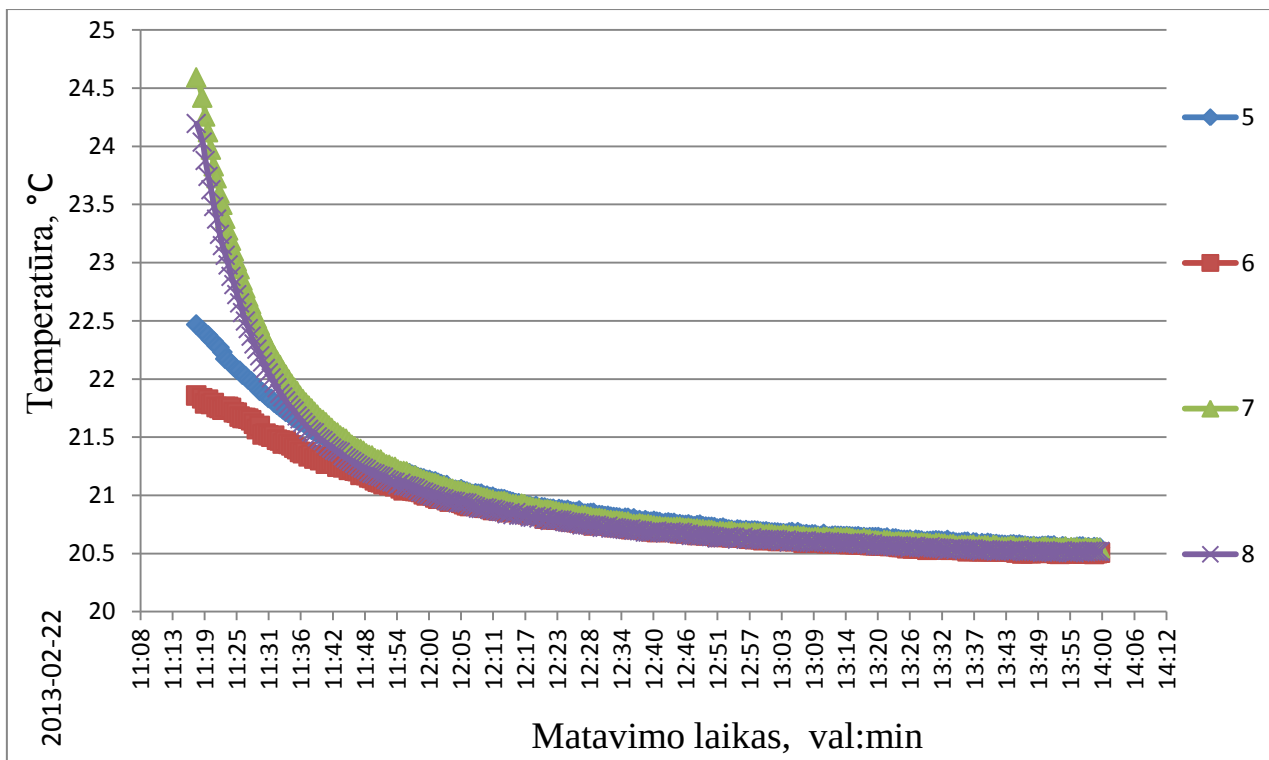
Veikiant kamerai stipriai šyla visas mikroskopo korpusas, greičiausiai šyla vieta esanti arčiausia kameros (5.15 pav. 17 jutiklis) ir ji šyla daugiausia, iki +23,3 °C laipsnio. 2 jutiklis yra viduryje viso ilgio mikroskopo korpuso, 1 jutiklis dar žemiau, tačiau jų abiejų fiksuojamos temperatūros beveik visiškai vienodos kiekvienam laiko vienetui, reiškia visa tolimesnė korpuso dalis šyla vienodai, tik pradžioje apatinė korpuso dalis šiek tiek atsilieka. 1 ir 2 jutiklių pasiekta aukščiausia temperatūra siekia +21,6 °C temperatūrą. Šių jutiklių rezultatų grafikuose neišsiskiria vieta kurioje būtų žymus šilimas įjungus pačią kamerą, jos fiksuojamą vaizdą, jau prieš tai esant įjungtam maitinimui.

Pačios kameros šilimo grafike (5.16 pav.) stebime kylančią temperatūrą, ji pakyla iki +28 °C, pradžioje kylimas greitas, vėliau sulėtėja ir nusitovi. Pačio variklio šilimo rezultatas buvo +35 °C, taigi, kamera šyla net 7 °C mažiau.



5.16 pav. Pačios kameros šilimas

Pastebėjus tai jog kamera šyla vos prijungus maitinimą, buvo gauti kameros ir mikroskopo korpuso aušimo duomenys (5.17 pav.) po ilgo laiko prijungto maitinimo kabelio. Kadangi jutikliai matuoja maždaug iki +25 °C laipsnio, tai auštant kamerai duomenys gauti tik nuo šios ribos.



5.17 pav. Kameros ir mikroskopo korpuso aušimas

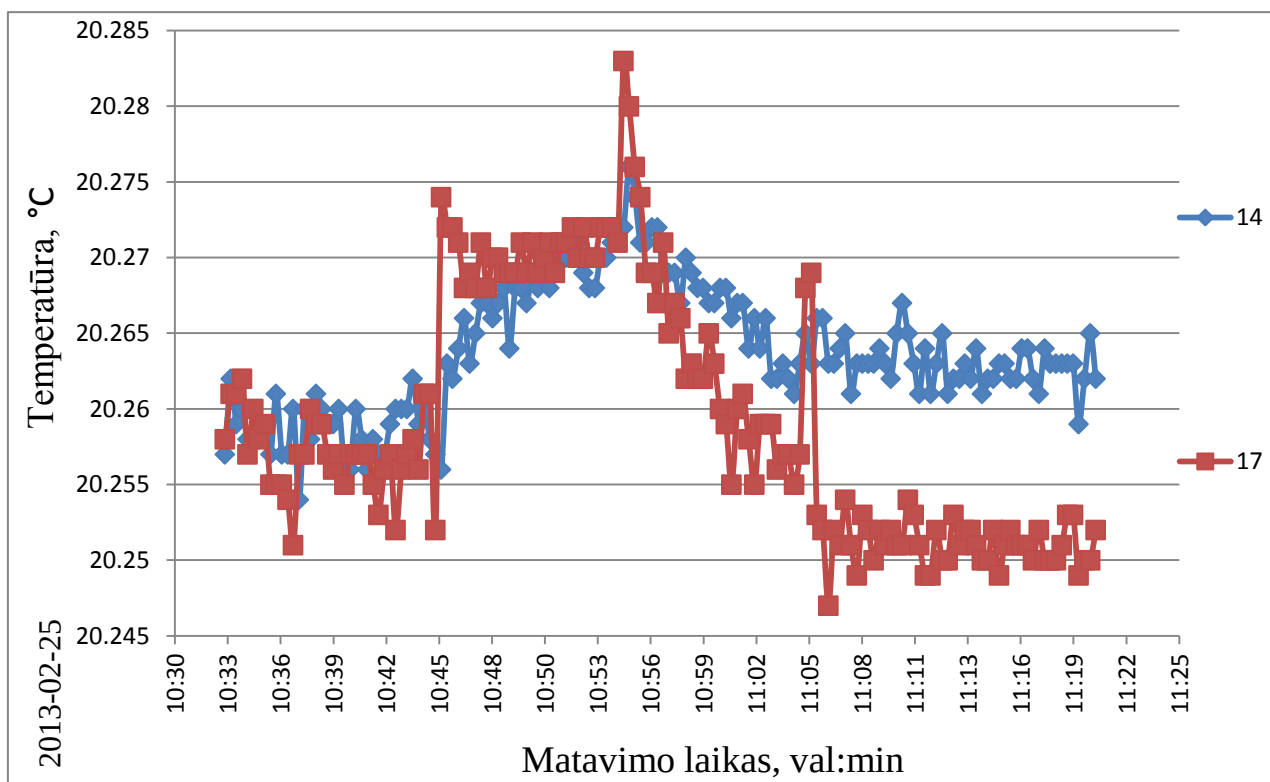
Kameros maitinimas išjungtas 11h 18 min. Iš aušimo duomenų grafiko matome jog kamera ir mikroskopo korpusas pilnai atšąsta tik per 3 valandų laikotarpį.

5.3 Temperatūros gradientų aerostatinio guolio aplinkoje eksperimentinis tyrimas

Kamera su mikroskopu yra pritvirtinta prie kariatėlės, kuri gali judėti linijiniu poslinkiu pirmyn ir atgal. Judesiui perduoti parinkti oro guoliai, tam kad nebūtų trinties ir vibracijų. Aerostatinis guolis turi įtaką kampinio komparatoriaus terminei aplinkos būklei, nes oras šaltas ir jis suteikia vėsavimo efektą.

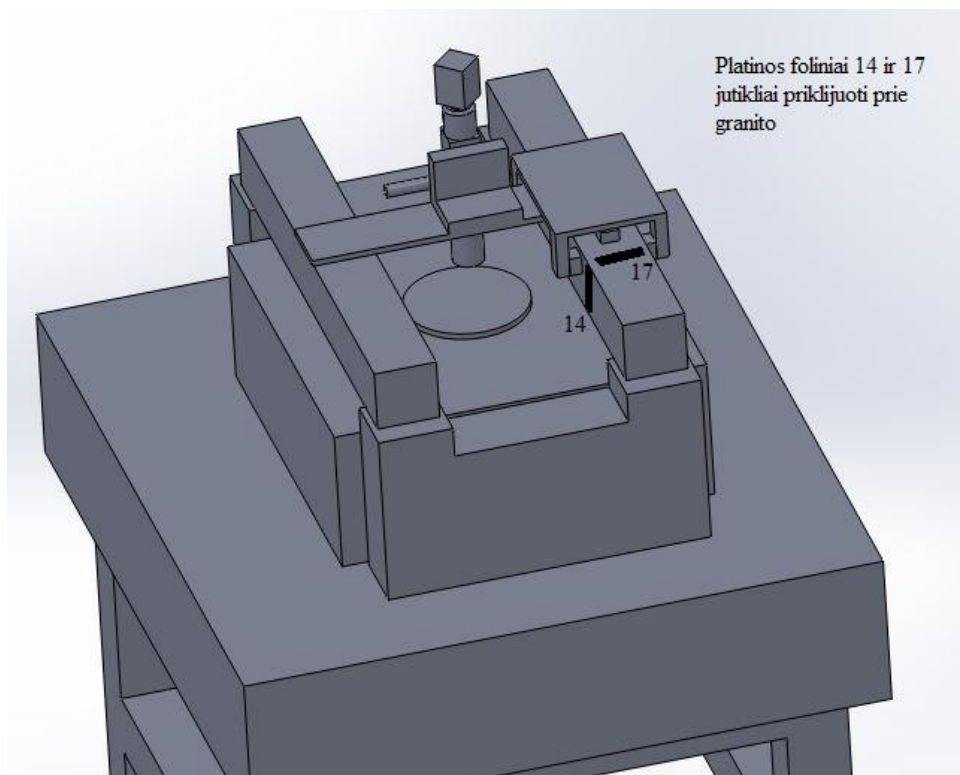
Matuojama temperatūra granito, kuriuo slankioja oro guolis. Eksperimentui parinkti du platinos foliniai jutikliai PT100 todėl, kad jie yra jautresni ir gali būdami priklijuoti matuoti didesnio ploto temperatūrą, jie ploni, todėl geriau įsisavina oro guolio sudarytos plonos oro plėvelės sukeltus temperatūrų pokyčius. Šio bandymo rezultatai grafiškai pavaizduoti 5.18 pav.

- 10:33 h pradėtas granito temperatūros matavimas.
- 10:35 h, kada granito ir oro guolio temperatūra yra nusistovėjusi, įjungiamas oras ir greitai kariatėlė patraukiama nuo jutiklių tolyn apie 25 cm atstumu ir oras guolyje išjungiamas.
- 10:45 h oras įjungiamas, kariatėlė pristumiama prie jutiklių, oras vėl išjungiamas.
- 10:55 h pristumtoje prie jutiklių kariatėlėje įjungiamas oras guolyje.
- 11:05 h kariatėlė patraukiama nuo jutiklių apie 25 cm atstumu, ir oras guolyje išjungiamas.



5.18 pav. Granito temperatūros veikiant oro guoliui

Pradėjus matuoti granito temperatūrą, jos reikšmės nusistovėjusios ties $+20,26\text{ }^{\circ}\text{C}$, o tuo metu kariatėlė pristumta prie jutiklių. Įjungus orą ir patraukus kariatėlę 25 cm atstumu, temperatūros šiek tiek susvyruoja. 10:45 h pristūmus kariatėlę prie jutiklių ir orą išjungus, jutikliai registruoja granito šilumą nuo kariatėlės, abu jutikliai pasiekia skirtingas temperatūros reikšmes, tačiau 17 jutiklis, gali būti kad sureaguoja į rankų šilumą, nes yra viršuje granito, o kariatėlė stumdoma rankomis, taigi jo užregistruoti temperatūrų šuoliai greičiausiai klaidingi. Įjungus orą pristumtoje kariatėlėje prie jutiklių 10:55 h temperatūra staigiai krinta, ir pradeda skirtis nuo jutiklių buvimo vietos, šone esantis 14 jutiklis fiksuoja lėtą aušimą, viršuje esantis 17, greitesnį. Vėliau, patraukus kariatėlę ir išjungus orą 11:05 h abiejų jutiklių buvimo vietose nustoja kristi temperatūra, ji nusistovi. Šone esantis 14 jutiklis fiksuoja $+20,263\text{ }^{\circ}\text{C}$, o esantis viršuje 17 jutiklis fiksuoja $+20,252\text{ }^{\circ}\text{C}$. Taigi, tarp jų atsiranda šiek tiek didesnis nei vienos šimtosios laipsnio skirtumas.



5.19 pav. Jutiklių išdėstymo schema šalia oro guolių

10 lentelė. Aerostatinio guolio jutiklių statistiniai duomenys

Jutiklis	14	17
Vidurkis M	20.264	20.259
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.0044	0.0082

6. TEMPERATŪRINIŲ DEFORMACIJŲ MODELIAVIMAS PAGAL TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMO REZULTATUS

6.1 Modeliavimo pradmenys

Buvo sukurti skaitiniai modeliai, suteikiantys galimybę apskaičiuoti šilumos mainų precizinio kampinio komparatoriaus (PKK) konstrukcijoje ir jį supančiame ore reiškinius, šilumos mainus su konstrukcijos korpusu bei konstrukcijos deformacijas susidariusias nehomogeniškam temperatūros laukui veikiant.

Kampinis komparatorius yra sudėtinga sistema, kurioje tiesiogiai susietos stambios masyvios mechaninės konstrukcijos bei kur kas žymiai smulkesnės optinės, elektroninės ir informacinės-technologinės dedamosios. PKK funkcijos ir matavimų neapibrėžtis labiausiai priklauso nuo mechaninių ir geometrinių-optinių elementų. Nors ir preciziškai pagaminta bei surinkta, PKK paklaidos gali atsirasti jam deformuojantis. Deformacijos dažniausiai kyla dėl išorinio temperatūros lauko bei iš aplinkos veikiant perduodamiems mažiems virpesiams.

Temperatūros sąlygojamos komparatoriaus paklaidos gali būti tiriamos įvairiai ir skirtinguose erdvės masteliuose, todėl, kad kampo atskaitos sistemos komponentų ir pačios PKK konstrukcijos geometriniai matmenys žymiai skiriasi. Atlikti visiškai pilną sistemos temperatūrinių deformacijų analizę praktiškai yra beveik neįmanoma. Ne tik todėl, kad tai būtų be galo didelės apimties ir ilgas darbas, tačiau ir dėl daugelio neišvengiamų neapibrėžtumų. Daugiausia neapibrėžtumų sukelia dalių vienų su kitomis tvirtinimo būdų gausa, detalių geometrinis sudėtingumas, labai mažų deformacijų ruože gali kilti vienpusio dalių kontakto reiškiniai, didelė medžiagų, naudojamų mechatroniniuose mazguose, įvairovė ir nevieniškai pilnai apibrėžtos jų šiluminės sąveikos sąlygos. Šiais laikais tokių sistemų tyrimo problematika vadinama daugiapakopiu uždaviniu (angl.: multi-scale problems). Tradiciškai yra skiriami mikro-, meco- ir makro- lygmens modeliai. Taip suvokiama, kad tas pats objektas gali būti nagrinėjamas skirtinguose erdvės masteliuose, t.y. jo modelis turi tyrėjo pasirinktą vykstančių fizikinių procesų skiriamąją gebą. Tokie modeliai vaizduoja procesus tik iki tam tikro smulkumo lygmens, o dar smulkesnės detalės yra įvertinamos tik integraliai. Baigtinių elementų modeliai matematiniu sudarymo principu turi savybę integraliai ir labai panašiai į tikrovę vaizduoti vykstančius procesus, smulkesnius už tinkamo linijinius matmenis.

Šiame skyriuje nagrinėjama PKK konstrukcija pasirenkant makro-lygmenį, nes manoma jog didžiausias ir esmines temperatūrines paklaidas sukelia visos PKK konstrukcijos deformacijos. Dėl deformacijų mikroskopas, kurio stebėsenos taškas išeities pozicijoje suderinamas į tam tikrą poziciją diske, gali pakeisti erdvinę orientaciją ir dėl to atskaityti neteisingą disko kampinę padėtį. Kiti galimi šilumos šaltiniai taip pat yra išdėstyti makro-mastelyje. Svarbiausi iš jų

yra CCD kameros ir pavaros sukuriamas šilumos kiekis bei galimi atsitiktiniai PKK aplinkos temperatūros svyravimai. Pastarieji modeliuojant vertinami tik integraliai, numatomos galimos deformacijų tendencijos dėl nenumatyto aplinkos temperatūros padidėjimo tam tikrose zonose.

Šio pavidalo šilumos mainų ir temperatūrinių deformacijų matematiniai modeliai yra labai sudėtingi. Sprendžiant PKK temperatūrinių deformacijų uždavinį pasinaudojama beveik visais žinomais šilumos mainų modeliais, išskyrus spinduliavimo. Spinduliavimo modelis čia nenaudojamas, kadangi vidutinės PKK konstrukcijos temperatūrų reikšmės nėra aukštos, todėl jų paviršiai šilumine prasme nėra aktyvūs. Apibūdinsime šiame skyriuje modeliuojamas šilumos mainų rūšis (6.1 pav.).

6.1.1 Šilumos perdavimas šilumos laidumo ir paviršinės konvekcijos būdu

Reiškinys būdingas šilumos mainams, sąlygojamiems standžių kūnų vidine šilumos difuzija, kurios dydis apibūdinamas šilumos laidumo koeficientu $W/(m \cdot K)$ mechanizme ir vyksta visoje PKK konstrukcijoje. Konstrukcijos paviršiams sąveikaujant su aplinkos oru, jie vėsta dėl natūralios konvekcijos, kurios intensyvumas priklauso nuo aplinkos oro temperatūros ir konstrukcijos paviršiaus. Šio modelio trūkumas yra toks kad turi būti žinoma aplinkos oro temperatūra visuose PKK paviršiaus taškuose. Jeigu ją priimame visur lygia aplinkos temperatūrai (pvz. 20 °C), šilumos atidavimas aplinkai būna apskaičiuojamas didesnis, nei jis yra iš tikrųjų. Taigi todėl apskaičiuotas konstrukcijos įšilimas ir temperatūrinės deformacijos gaunamos mažesnės nei yra iš tikrųjų. Šiems rezultatams trūksta pastovumo, kuris būtinas norint skaičiavimų būdu įvertinti tiek konstrukcijų stiprumą, tiek ir jų veikimo tikslumo rodiklius. Realybėje dėl šilumos šaltinio poveikio įšyla ne vien PKK konstrukcija, tačiau ir aplinkos oras. Tokio tipo modeliai gali būti sėkmingai naudojami ir teikia artimus tikrovei rezultatus, jeigu temperatūros PKK paviršiuje yra išmatuotos eksperimentiškai.

6.1.2 Šilumos perdavimas šilumos laidumo būdu, BE modelyje aplinkos orą traktuojant kaip PKK konstrukcijos „dalį“

PKK BE modelis apgaubiamas oro tūriu, kurio išorė yra stačiakampis gretasienis, didesnių matmenų už pačią PKK konstrukciją. Tūrio vidus visiškai užpildo tarpus prie PKK konstrukcijos išorinių paviršių. Dėlto vidinės oro dalies paviršių geometrinė forma gaunama labai sudėtinga. Taikant skaitinį BE modeliavimą tai didesnių sunkumų nesukelia, nes nejudančio oro šilumos laidumas yra žinomas, o BE modeliai tiksliai aprašo bet kokios sudėtingos geometrinės formos konstrukcijas, elementus ir tūrius. Oro tūrio gretasienio išorinių paviršių temperatūra prilyginama lygia aplinkos oro temperatūrai. Šiame modelyje nereikia naudoti laisvosios paviršinės

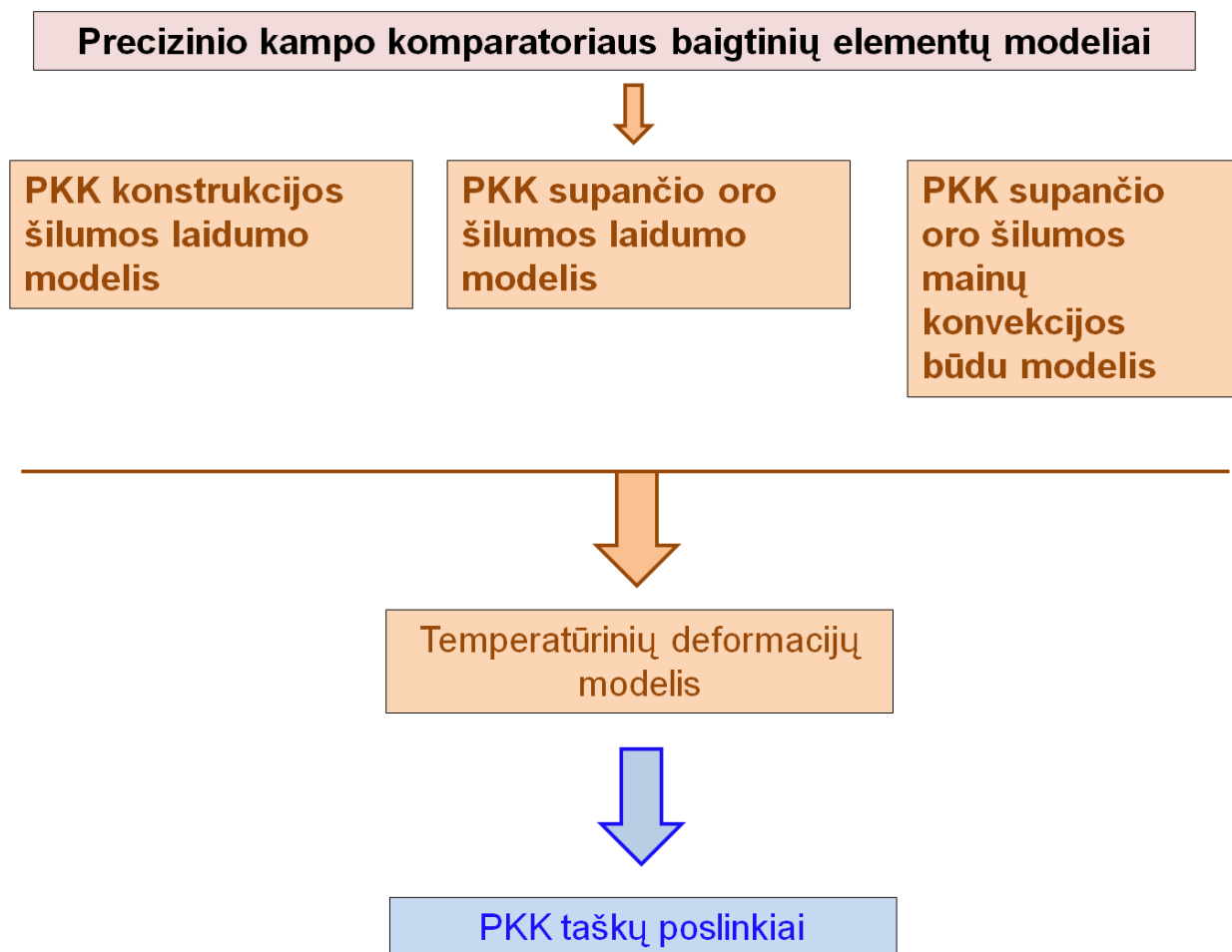
konvekcijos narių, nes PKK paviršiaus temperatūros gaunamos tiesiogiai, sprendžiant šio kombinuoto modelio lygtis. Modelis turi tokį trūkumą - neįvertinamas oro judėjimas, kylantis dėl slėgių ir temperatūrų skirtumų. Iš esmės gauti rezultatai yra tikslūs ir gerai tinka įvertinti didžiausioms galimoms PKK paklaidoms. Tačiau dažniausiai šiuo būdu apskaičiuotos PKK paviršiaus temperatūros yra šiek tiek didesnės, nei tikros, kadangi nėra modeliuojamas oro judėjimo sudarytas šilumos nuvedimas į tolimesnę PKK aplinką.

6.1.3 Šilumos perdavimas šilumos laidumo būdu, BE modelyje aplinkos orą traktuojant kaip šilumos ir masės mainų veikimu paremtą modelį.

Kaip ir prieš tai minėtame modelyje, PKK BE modelis apgaubiamas oro tūriu. Skirtumas toks, jog čia greta šilumos laidumo ore lygčių sprendžiamos ir oro judėjimo lygtys (Navje-Stokso lygtys), ir šilumos perdavimo konvekcijos būdu lygtys. Tai visiškai pilnas termo-aero-mechaninis modelis. Matematiškai toks modelis yra pats tiksliausias iš čia aptartųjų, kadangi jau pilnai aprašo čia vykstančius procesus. Greta temperatūrų, šis modelis suteikia galimybę apskaičiuoti oro slėgius ir judėjimo greičius visuose taškuose. Visiškai pilnas termo-aero-mechaninis modelis yra žymiai sudėtingesnis už prieš tai minėtą, šilumos laidumo lygtimis paremtą, modelį ir sukelia tikrai didelių problemų jį tiriant skaitiškai. O štai vien šilumos laidumo modelis be didelių sunkumų išsprendžiamas esant bet kokiai labai sudėtingai konstrukcijos geometrijai. Termo-aero-mechaninis modelis yra iš esmės visiškai netiesinis ir todėl nelengvai sprendžiamas. Skaitinio modeliavimo procesas ne visuomet konverguoja, todėl ypač sunku jį pasiekti, kai apgaubiantis oro judėjimo kraštas yra geometriškai sudėtingas, turi aštrių kampų. Ties geometrinio nepastovumo zonomis oro tėkmės greičiai ženkliai padidėja ir dažnai tenkina netgi turbulentinę tėkmę atitinkančias sąlygas, nors visuminis oro judėjimas yra tikrai lėtas, veikiamas tik natūralios konvekcijos. Tokius modelius išspręsti įmanoma, tačiau teks parinkti labai smulkius tinklėlius, atitinkamas turbulentiškumo hipotezes, labai tiksliai aprašyti kampuotų konstrukcijos elementų geometriją. Todėl šio tipo modelis nėra racionalus PKK analizei, nes parinkti stambaus skaidymo modelį ir naudotis nepilnai sukonvergavusiais rezultatais būtų nerimta. Nors galima būtų modelyje pavaizduoti ne visą PKK konstrukciją, o tik jos apytikslę gaubiamąją ir ją laikyti kaip oro tūrio vidiniu paviršiumi. Štai tokie modeliai nesunkiai sukonverguotų. Dar dėl vienos aplinkybės kuri mažina labai sudėtingų skaitinių modelių prasmę, yra tokia, kad konkrečios temperatūrinės apkrovos nėra tiksliai žinomos, o tik apytiksliai nustatomos pagal žinomas šilumos šaltinių naudojamas galias, arba tam tikru metu išmatuotas temperatūrų reikšmės tik tam tikruose taškuose. Dėl viso to sprendiniai tik apytikriai atitinka tikrovę ir dažniausiai ne dėl matematinio aparato supaprastinimų, bet dėl netikslų išėjties duomenų.

6.1.4 Temperatūrinių deformacijų modelis

Modelis gaunamas, pritaikius tamprumo teorijos lygtis ir kiekvienam konstrukcijos mazgui kaip šiluminę apkrovą suteikus apskaičiuotas temperatūras tai pačiai PKK BE šilumos laidumo modelio geometrijai. Įvertinus kiekvienos konstrukcijoje panaudotos medžiagos temperatūrinio plėtimosi koeficientą, pagal žinomas, išmatuotas temperatūras suformuojami ekvivalentinių mechaninių apkrovų vektoriai. Apskaičiavus tampriosios konstrukcijos atsaką į šias apkrovas, apskaičiuojami PKK temperatūrinių deformacijų sukelti mechaniniai poslinkiai.



6.1 pav. Precizinio kampo komparatoriaus poslinkių ir temperatūrinių deformacijų modeliavimo etapų schema (Barauskas *et al.* 2008)

6.2 PKK baigtinių elementų lygtys

6.2.1 Šilumos laidumo ir konvekcijos baigtiniai elementai

Nagrinėsime šilumai laidžią sritį V , apribotą paviršiaus S (7.2 pav.). Šioje srityje vykstantys šiluminiai procesai aprašomi štai tokia diferencialine lygtimi:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + b(x, y, z) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \in V, \quad (6.1)$$

esant kraštinėms sąlygoms

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + \alpha(T - T_\infty) = 0, \quad \in S_\alpha,$$

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + q = 0, \quad \in S_q, \quad (6.2)$$

$$T = T_p, \quad \in S_p.$$

(1) ir (2) lygtyse vartojami dydžiai turi tokią fizinę prasmę:

T - temperatūra [K];

b - tūrinių šilumos šaltinių tankis; jis teigiamas, jeigu kūnas gauna šilumą [W/m^3];

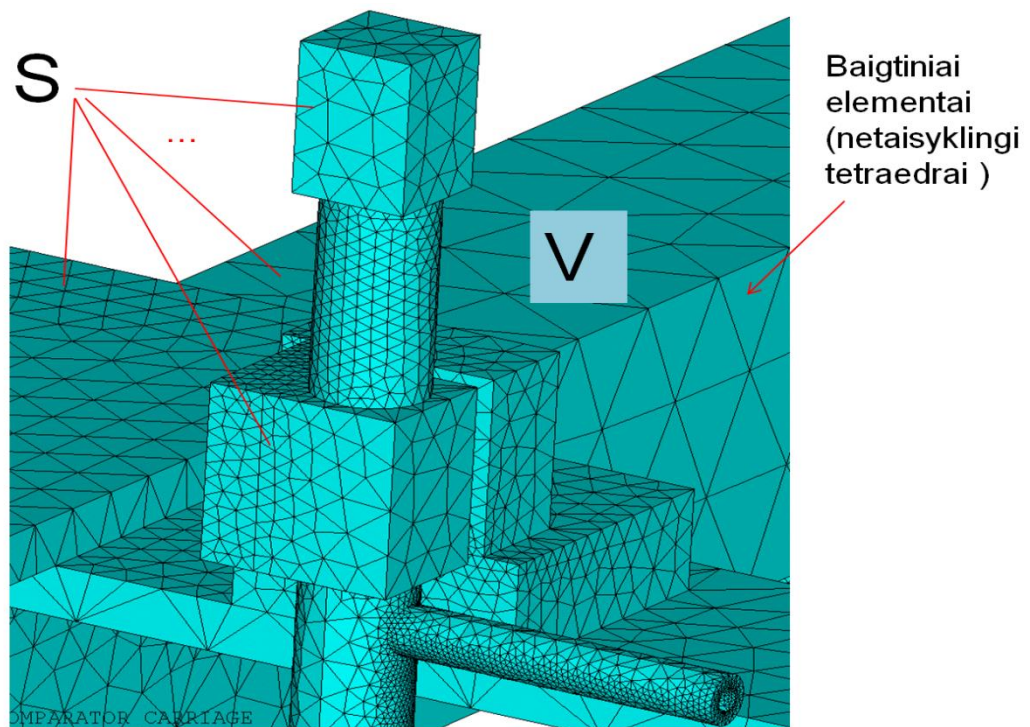
q - šilumos srauto tankis (t.y. šilumos srautas per paviršiaus ploto vienetą); jis teigiamas, jeigu kūnas atiduoda šilumą [W/m^2];

α - konvekcinio šilumos mainų su aplinka koeficientas [$W/(Km^2)$];

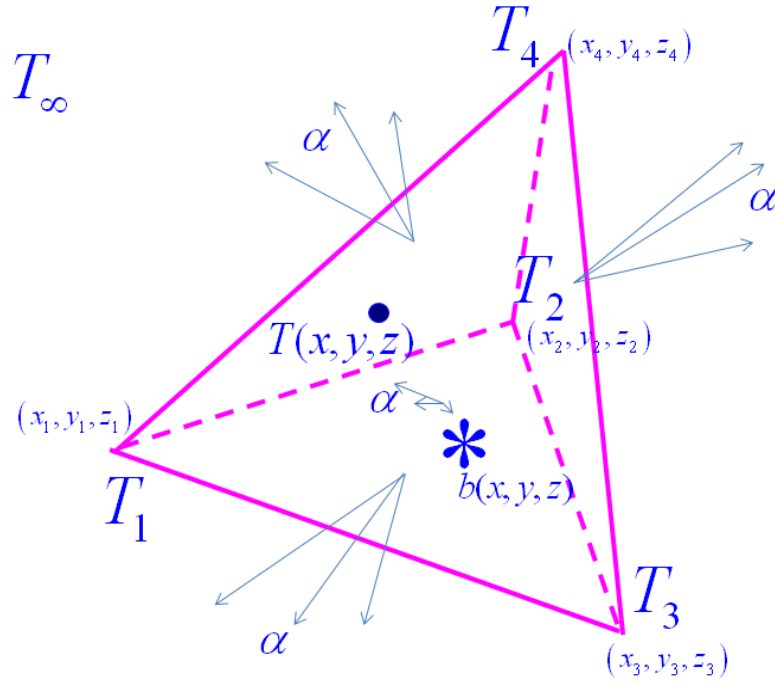
λ - šilumos laidumo koeficientas. Jei medžiaga anizotropinė, jis priklauso nuo šilumos plitimo krypties, todėl svarbiausių medžiagos ašių kryptimis vartojame koeficientus $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ [$W/(Km)$];

c - medžiagos specifinė šilumos talpa [$J/(K kg)$];

ρ - medžiagos tankis [kg/m^3].



6.2 pav. Tiriama sritis ir jos baigtiniai elementai



6.3 pav. Šilumos laidumo ir konvekcijos baigtinis elementas

Kraštinės sąlygos (2) kūno paviršiuje nustatomos trimis būdais. Laikoma, kad paviršiuje S_p temperatūros reikšmės yra duotos. Paviršiaus dalyse S_α ir S_q nusakomas šilumos srautas normaline paviršiui kryptimi $-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x - \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y - \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z$, tačiau jo reikšmės kiekvienoje lygtyje yra skirtingai aprašomos. Paviršiaus dalyje S_α srauto reikšmė yra proporcinga kūno paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumui. Šis būdas yra dažniausiai taikomas aprašant kūno šilumos mainus su dujine arba skysčio aplinka, kuris yra vadinamas paviršine *konvekcija*. Idealaus ir termiškai izoliuoto paviršiaus konvekcinių šilumos mainų koeficiento reikšmė yra $\alpha = 0$. Paviršiaus dalyje S_q srauto reikšmė yra laikoma duota. Taip gali būti, jei kūno paviršiuje veikia galingas šilumos šaltinis tiekiantis pastovų šilumos srauto tankį.

Kadangi (1) uždavinio pavidalas yra atskiras bendrojo lauko teorijos uždavinio atvejis (Barauskas et al. 2004, Barauskas et al. 2011), galime užrašyti nagrinėjamojo kūno baigtinio elemento lygtį štai tokiu pavidalu:

$$[\mathbf{C}^e]\{\dot{\mathbf{T}}^e\} + [\mathbf{K}^e]\{\mathbf{T}^e\} = \{\mathbf{S}_\infty^e\} + \{\mathbf{S}^e\} + \{\mathbf{P}^e\}; \quad (6.3)$$

čia $[\mathbf{C}^e] = c\rho \iiint_V [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dV$ - elemento šilumos talpos matrica;

$[\mathbf{K}^e] = \iiint_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}][\mathbf{B}] dV + \alpha \iint_{S_\alpha} [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] dS$ - elemento šilumos laidumo matrica;

$\{\mathbf{P}^e\} = \iiint_V [\mathbf{N}]^T b dV$ - elemento mazgų šilumos galių vektorius, įtakotas paskirstytųjų tūrinių šilumos šaltinių;

$\{\mathbf{S}^e\} = - \int_{S_q} [\mathbf{N}]^T q dS$ - elemento mazgų šilumos galių vektorius, įtakotas duoto šilumos srauto per paviršių;

$\{\mathbf{S}_\infty^e\} = \alpha \mathbf{T}_\infty \int_{S_\alpha} [\mathbf{N}]^T dS$ - elemento mazgų šilumos galių vektorius, įtakotas konvekcinių šilumos mainų su aplinka per kūno paviršių;

Aprašome plačiau vektoriaus $\{\mathbf{S}^e\}$ prasmę. Bendruoju atveju, paviršiaus dalis S_q gali susidėti iš dviejų dalių: $\bar{S}_q$, kuri priklauso pačio kūno paviršiui, t.y. kurioje šilumos srautas per paviršių $\bar{q}$ duotas arba lygus nuliui pilnai termiškai izoliuoto paviršiaus atveju, ir $\tilde{S}_q$, kuria elementas ribojasi su kitais konstrukcijos elementais. Pastarojoje dalyje srautas $\tilde{q}$ yra nežinomas, kadangi jis į nagrinėjamą elementą patenka iš gšalia esančio elemento. Todėl vietoje aukščiau užrašyto vektoriaus $\{\mathbf{S}^e\}$ užrašysime kitus du vektorius:

$$\{\mathbf{S}^e\} = \{\bar{\mathbf{S}}^e\} + \{\mathbf{Q}^e\}, \quad (6.4)$$

$$\text{čia } \{\bar{\mathbf{S}}^e\} = - \int_{\bar{S}_q} [\mathbf{N}]^T \bar{q} dS, \quad \{\mathbf{Q}^e\} = - \int_{\tilde{S}_q} [\mathbf{N}]^T \tilde{q} dS.$$

Dabar (3) lygtį galime užrašyti taip:

$$[\mathbf{K}^e] \{\mathbf{T}^e\} = \{\mathbf{S}_\infty^e\} + \{\bar{\mathbf{S}}^e\} + \{\mathbf{P}^e\} + \{\mathbf{Q}^e\}. \quad (6.5)$$

(5) yra šiluminio balanso baigtinio elemento lygtis mazguose.

Elementų lygtys sujungiamos į konstrukcijos šiluminio balanso lygtį, panaudojant *mazginių temperatūrų darnos* ir *šiluminio balanso mazguose* sąlygas, atitinkančias mazgų poslinkių darnos bei jėgų pusiausvyros mazguose sąlygoms, kurios naudojamos skaičiuojant tamprias konstrukcijas. Pats konstrukcijos vektorių ir matricų formavimo algoritmas yra analogiškas.

Gauname konstrukcijos šilumos balanso lygtį pavidale

$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{S}_\infty\} + \{\mathbf{S}\} + \{\mathbf{P}\} + \{\mathbf{Q}\}, \quad (6.6)$$

čia vektorius $\{\mathbf{Q}\}$ gaunamas ne parenkant surinkimo algoritmą, o įrašant į jį reikiamose pozicijose esančias duotas išorinių sutelktų šilumos šaltinių galių reikšmes, kurios yra matuojamos vatais [W].

Konstrukcijos vektorius $\{\mathbf{S}\}$, aprašantis duotų šilumos srautų per paviršių poveikį, gaunamas surinkus elementų vektorius $\{\bar{\mathbf{S}}^e\}$.

Išraiškoje (5) panaudotos matricos aprašytos abstrakčiame matricų pavidale. Atliekant realius skaičiavimus, joms reikia suteikti konkrečius pavidalus, susiejant su tam tikra modeliuojama konstrukcija ir ktam tikra BE vieta konstrukcijoje.

6.3 Modeliavimo rezultatai

Dėl jau minėtų anksčiau temperatūrinių laukų ir gradientų, kuriuos iššaukia vidiniai ir išoriniai temperatūriniai trikdžiai, poveikio vyksta štai tokios etaloninės kampo sistemos bei konstrukcinių elementų, bazuojančių kalibruojamą limbą ir taip pat rastrinių elementų detektavimo įrenginį, temperatūrinės deformacijos:

1. Bazinių granitinių detalių – plytos, atramų, kreipiančiųjų:

- a) Linijinės deformacijos, kurioms veikiant keičiasi linijiniai šių konstrukcinių elementų matmenys.
- b) Skirtingos atskirų paviršių deformacijos, pasireiškiančios dėl temperatūrinių gradientų erdvėje ir sukeliančios kreipiančiųjų paviršių formos nuokrypių pakitimą.

Dėl linijinėse bazinėse detalėse įvykstančių deformacijų įvyksta limbo ir jo brūkšnių padėties detektavimo įrenginio tarpusavio pasislinkimas. Jeigu temperatūros pokytis nuo norminės temperatūros yra pastovus, šį poslinkį galima kompensuoti kalibravimo sistemos išstatymu prieš prasidedant kalibravimui ir taip išvengti kalibravimo paklaidos. Jeigu temperatūros pokytis yra kintantis, jis sukelia limbo ir jo brūkšnių padėties detektavimo įrenginio tarpusavio persislinkimą vertikalia kryptimi. Šis persislinkimas bus kaip mikroskopo defokusavimas, nors šis dydis yra ir visiškai mažas.

Skirtingos keleto paviršių deformacijos, sukeliančios kreipiančiųjų paviršių formos nuokrypis, pakeis linijinio judesio paklaidas ir įtakos rastrinių elementų, esančių skirtinguose takeliuose kalibravimo paklaidas. Modeliavimo rezultatai parodo, jog nagrinėjamoje simetrinėje konstrukcijoje šis dydis yra labai mažas ir neįvertinamas sudarant paklaidų kompensavimo modelį.

2. Etaloninės kampo sistemos elementų - suklio veleno ir korpuso bei etaloninio metalinio rastrinio limbo:

- a) Linijinės deformacijos, kurios įtakoja linijinius šių detalių matmenų pokyčius.
- b) Lokalinės deformacijos, atsirandančios dėl temperatūrinių gradientų erdvėje.

Dėl konstrukcinių elementų simetriškumo sukimosi ašies atžvilgiu, pirmos grupės deformacijos neturi poveikio kalibravimo tikslumui. Antros grupės deformacijos gali sukelti suklio detalių formos nuokrypių pakitimus ir pačio kalibruojamojo limbo lokales deformacijas. Nors remiantis modeliavimo rezultatais, šio faktoriaus poveikio galima ir nevertinti skaičiuojant kompensuojamąją kalibravimo paklaidą.

3. Mikroskopo bazavimo ir perslinkimo kariatėlės bei mikroskopo:

- a) Linijinės deformacijos, kurios įtakoja linijinius šių detalių matmenų pokyčius.

b) Lokaliosios deformacijos, atsirandančios dėl temperatūrinių gradientų erdvėje

Dėl linijinių bazinių detalių deformacijų įvyksta limbo ir jo brūkšnių padėties detektavimo įrenginio tarpusavio perslinkimas išilgai rastrinių elementų formavimo apskritimo. Jeigu temperatūros pokytis nuo norminės temperatūros yra pastovus, šis poslinkis kompensuojamas kalibravimo sistemos išstatymu prieš pradedant kalibravimą ir taip kalibravimo paklaidos išvengiama. Jei temperatūros pokytis kintamas, jis sukelia limbo ir jo brūkšnių padėties detektavimo įrenginio tarpusavio poslinkius nurodyta kryptimi, t.y. rastrinių elementų tiesiogines kampinės padėties paklaidas, kurias įmanoma apskaičiuoti naudojantis (6.7) formule.

Mikroskopo korpusas yra cilindrinės formos, o šilumos šaltiniai yra išdėstyti simetriškai jo ašies atžvilgiu, kiti temperatūriniai gradientai šalia jo yra maži, taigi, lokalinės deformacijos turės linijinį pobūdį ir įtakos defokusavimo dydį. Karietėlės lokalinės deformacijos dėl tų pačių priežasčių yra nykstamai mažos.

Šiuo būdu, sudarant paklaidų, susidarančių dėl temperatūrinių deformacijų, matematinio kompensavimo modelį, reikia vertinti tik linijines temperatūrines karietėlės, bazuojančios brūkšnių padėties detektavimo mikroskopą, deformacijas ir todėl susidarančias kalibravimo paklaidas. Kitos paklaidos yra palyginus mažos ir jų kompensacija duotų tik mažą teigiamą efektą, o kompensacinių dydžių skaičiavimo modelį padarytų ypač sudėtingu.

Temperatūrinių paklaidų kompensacijai, veikiant temperatūrinėms deformacijoms esantis rastrinio limbo ir rastrinių elementų detektavimo įrenginio poslinkis ΔT , statmena rastriniam elementui kryptimi surandamas pagal limbą ir detektavimo įrenginį bazuojančių konstrukcijų temperatūrines deformacijas ir yra aproksimuojamas parametrine funkcija, kurios kintamasis yra temperatūra.

Dėl temperatūrinio poslinkio atsirandanti rastro krašto detektavimo paklaida bus paskaičiuojama pagal šią formulę:

$$\delta\varphi = \Delta T / R_r, \quad (6.7)$$

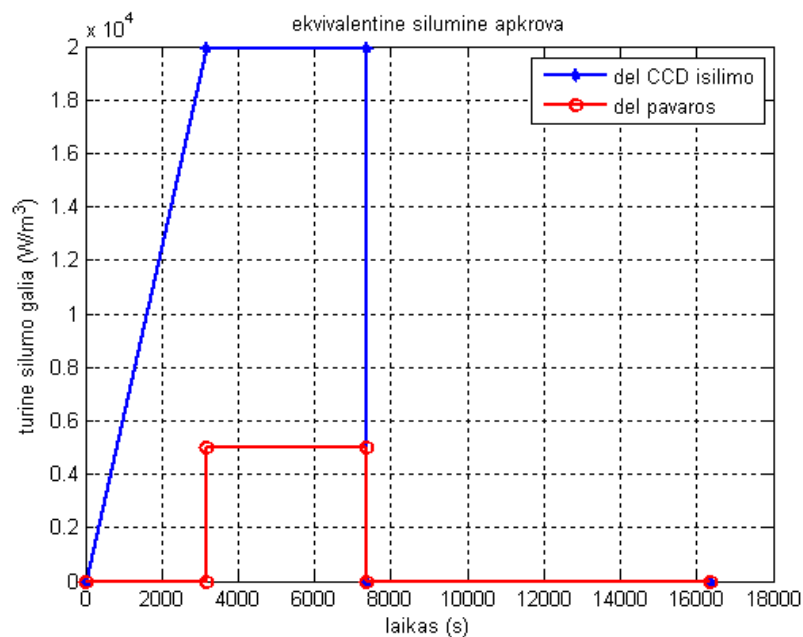
čia ΔT – linijinis mikroskopo poslinkis dėl temperatūrinių skersinio deformacijų, R_r – rastrų poslinkis.

Komparatoriaus programinėje įrangoje yra sukurama šių paklaidų kompensacijos paprogramė, kuri skaičiuoja kalibruojamojo kampo pataisos dydį ($-\delta\varphi$) realiu laiku ir atlieka kalibravimo rezultatų „pataisymą“, t.y. eliminuoja šį kalibravimo neapibrėžties sandą takelio spinduliu. PKK šiluminės apkrovos pridedamos CCD kamerą ir pavarą vaizduojančiuose BE modelio tūriuose. Jų dydžiai ir kitimo laike priklausomybės pateiktos 6.4 pav.

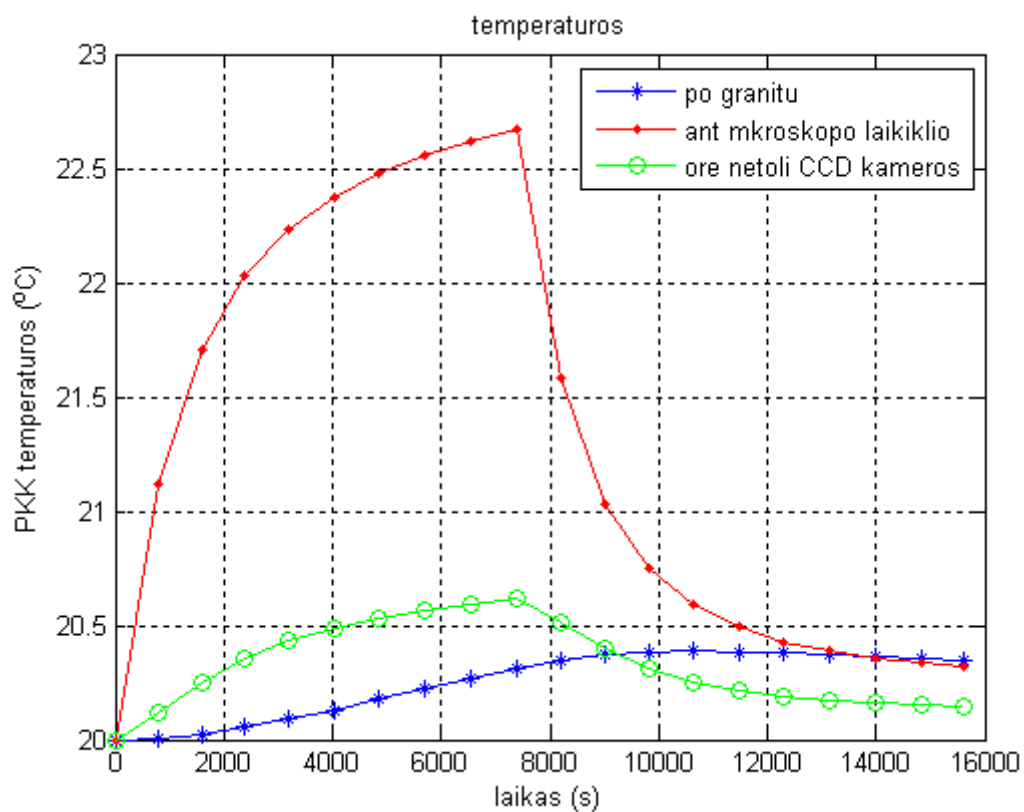
6.5 pav. pateiktos trijuose taškuose apskaičiuotos temperatūros kitimo priklausomybės nuo laiko

6.6 pav. pateiktos mikroskopo galo poslinkio dedamųjų 3 kryptimis priklausomybės nuo laiko

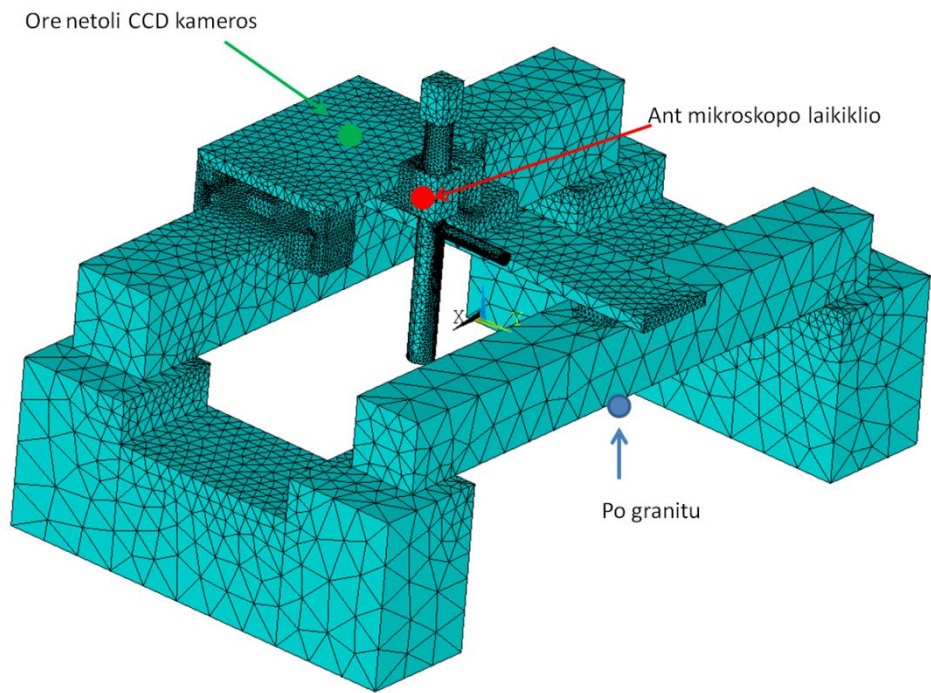
6.7 pav. pateiktos PKK temperatūros ir temperatūros sukeltų poslinkių suminės reikšmės



6.4 pav. Ekvivalentinių šilumos galių kitimo laike priklausomybės

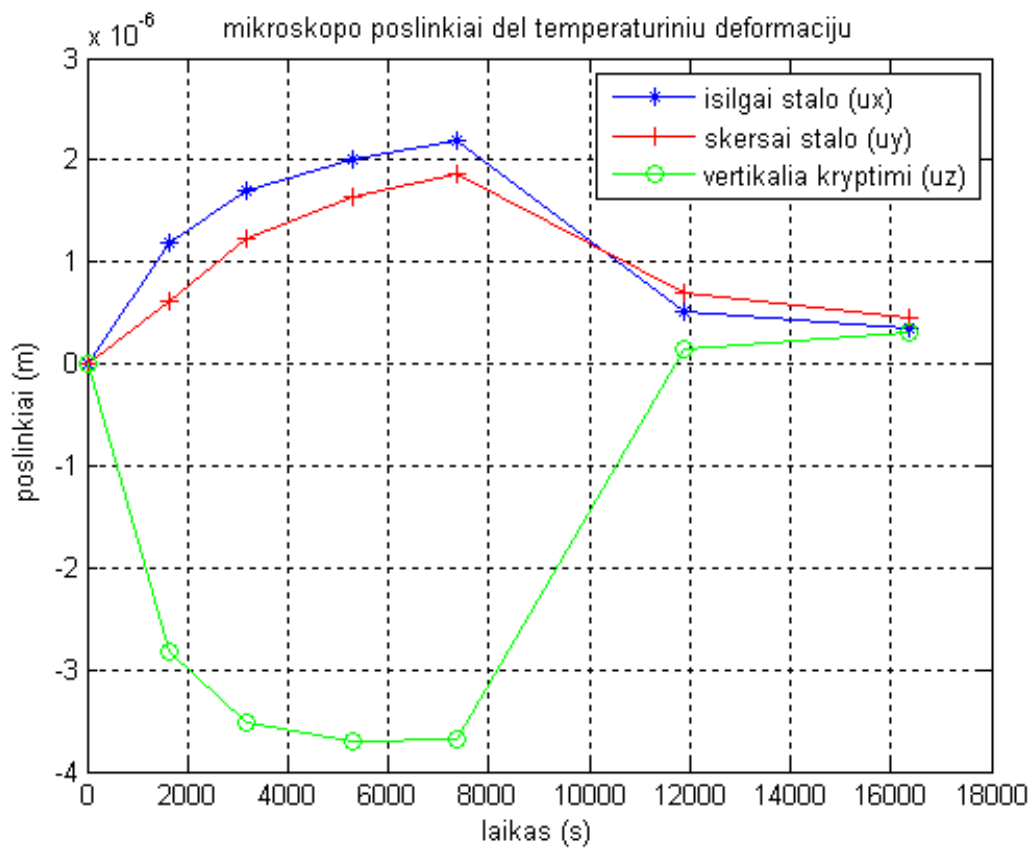


a)

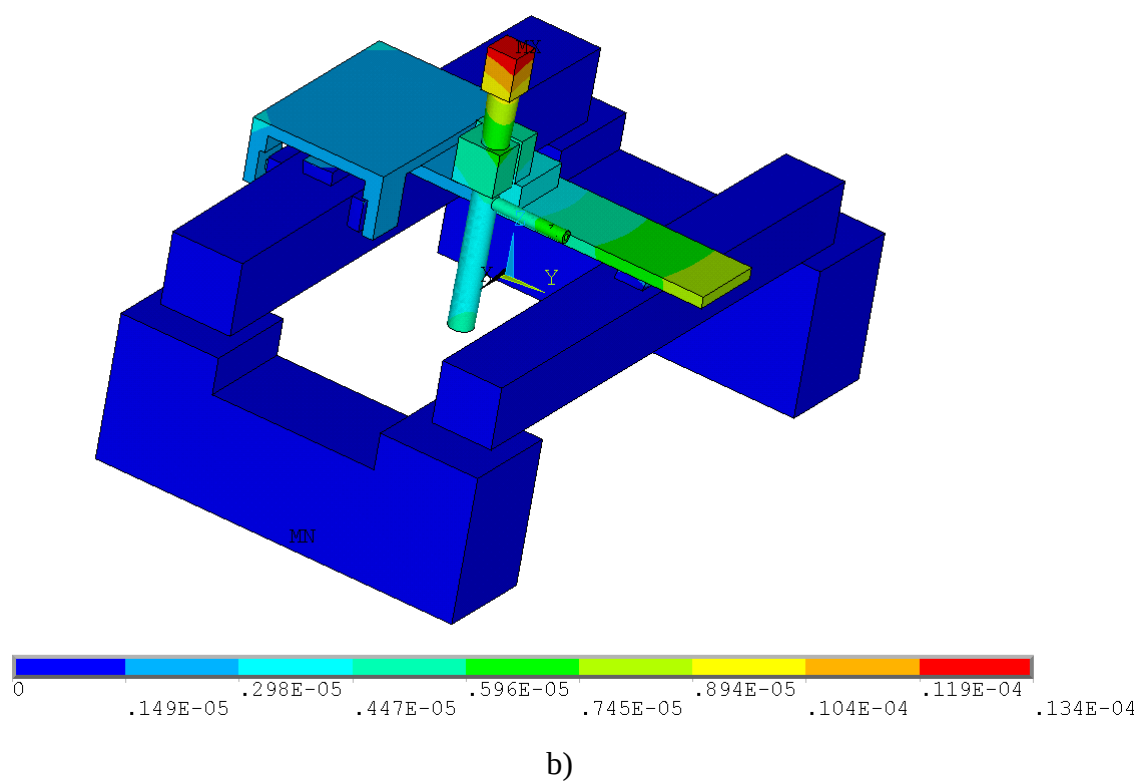
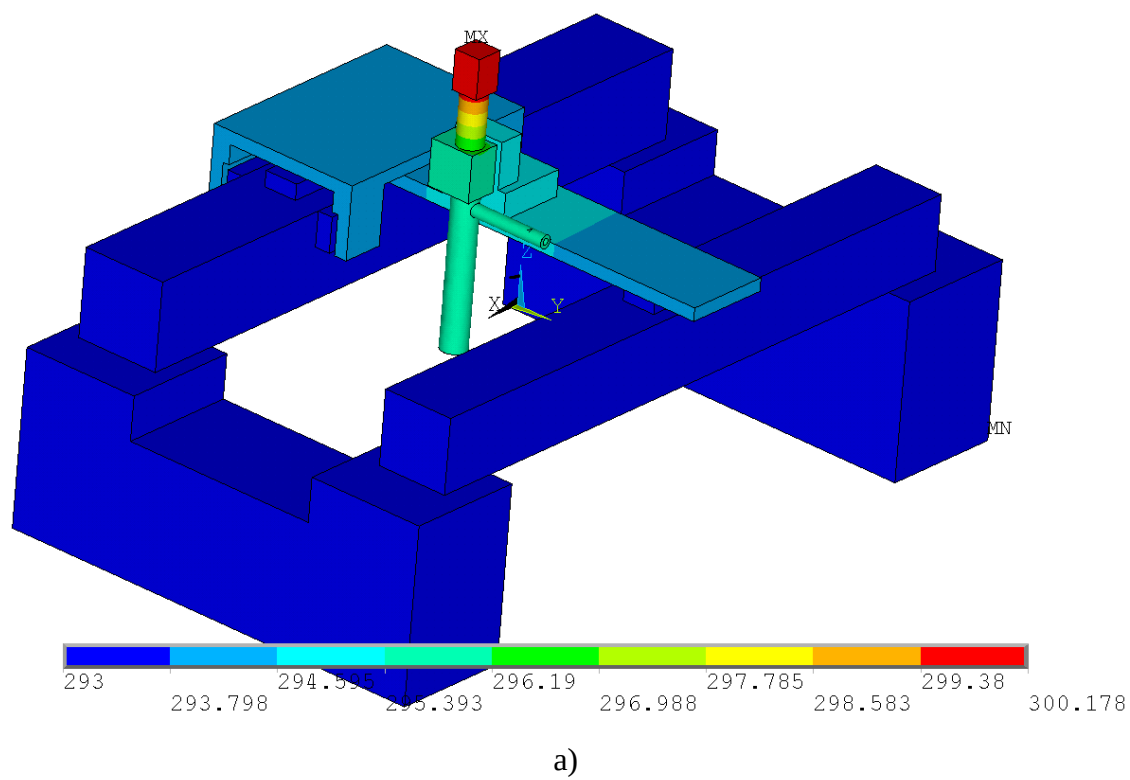


b)

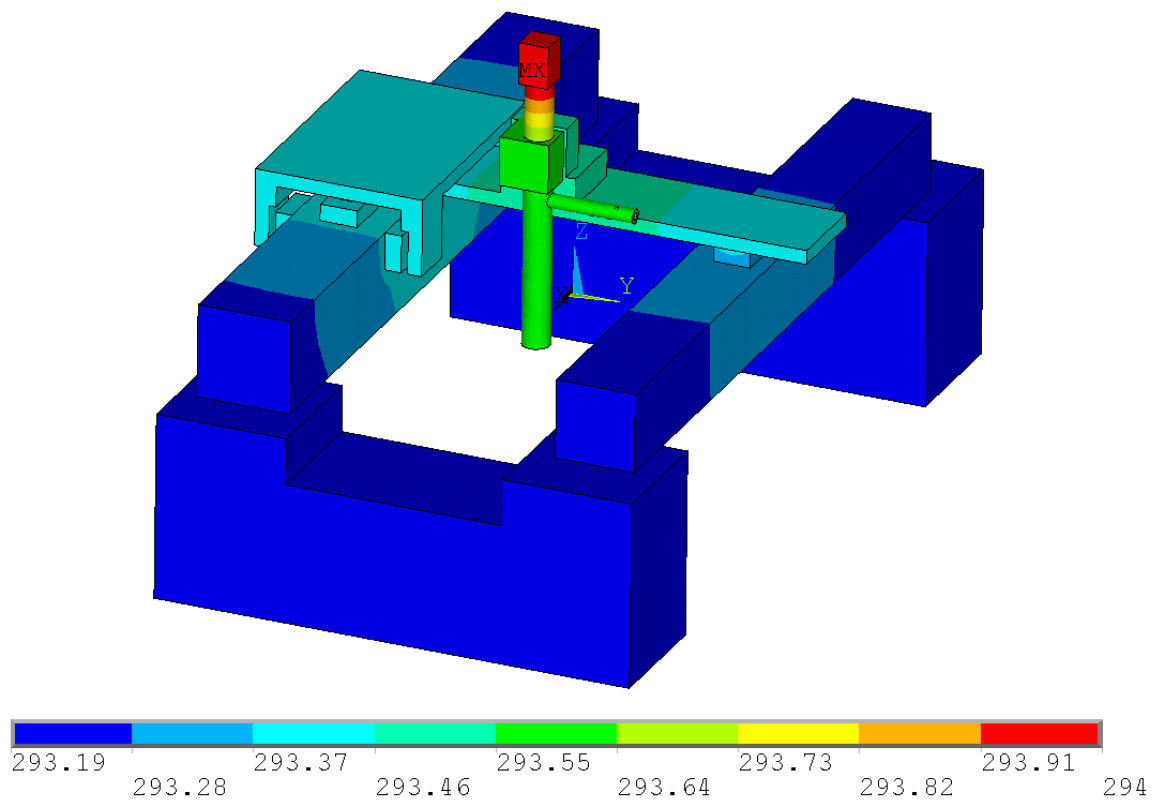
6.5 pav. Eksperimentiškai išmatuotos temperatūrų priklausomybės nuo laiko po granitu, ant korpuso ir ore netoli nuo CCD kameros a) – priklausomybių grafikas, b) – vaizdas erdvėje



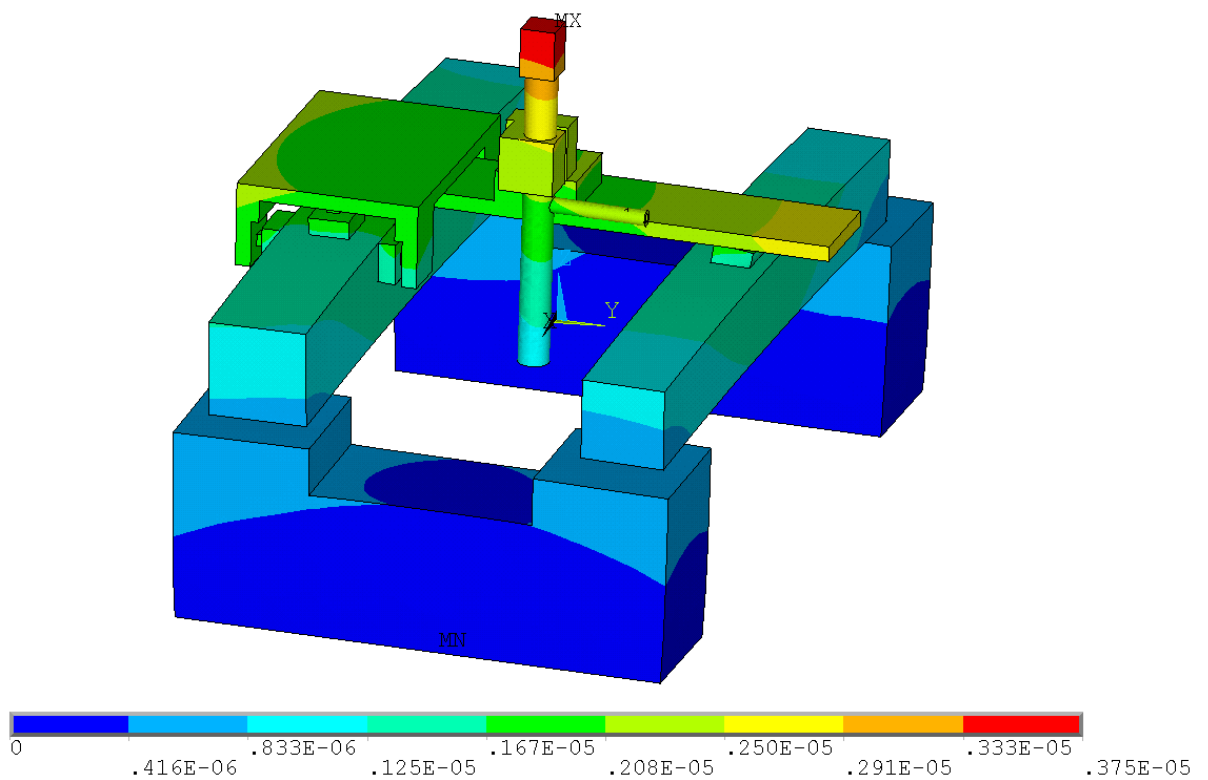
6.6 pav. Temperatūrinių deformacijų įtakotos mikroskopo galo poslinkių priklausomybės nuo laiko, kai skaičiuojama PKK temperatūros kitimo priklausomybė pridėjus 6.4 pav. pateiktas šilumos galias



6.7 pav. a) - PKK temperatūros b) - ir suminiai temperatūriniai poslinkiai laiko momentu $t=7380s$



a)



b)

6.8 pav. a) - Temperatūrų pasiskirstymas PKK korpuse b) - ir temperatūros sukelti absoliutiniai poslinkai, CCD matricos temperatūrai pakilus 1°C (vaizdavimas vienodų reikšmių zonomis)

6.4 Modeliavimo rezultatų išvados

Precizinio kampo komparatoriaus (PKK) temperatūros sukeltų poslinkių analizė, atlikta baigtinių elementų metodu, parodė, kad didžiausios galimos paklaidos yra nulemtos makroskopinių PKK konstrukcijos deformacijų. Pasinaudojus matematiniu modeliu apskaičiuotas temperatūrų pasiskirstymas PKK supančiame ore ir PKK metalinėje-granitinėje konstrukcijoje.

Apžvelgiant dviejų skirtingo intensyvumo ir skirtingose pozicijose esančių šilumos šaltinių (pavaros ir CCD matricos) sukeltų temperatūrinių trikdžių analizę matyti, kad jie abu sukuria itin panašaus pobūdžio poslinkius mikroskopo gale, kuris yra pats svarbiausias, tikslumui įtakos turintis, PKK konstrukcijos taškas. Poslinkių tendencija visais atvejais yra $\sim 45^\circ$ kampu į išilginę stalo ašį. Remiantis matavimų duomenimis, nepalankiausia situacija yra tada, kuomet CCD matricos ir pavaros temperatūros atitinkamai viršija vidutinę aplinkos temperatūrą $\sim 9^\circ\text{C}$ ir $\sim 4^\circ\text{C}$. Šiuo atveju mikroskopo galo poslinkiai stalo plokštuma dviem statmenomis kryptimis gali siekti net $7\text{--}8\ \mu\text{m}$. Pastebėta, kad padidėjus vienai iš temperatūrų, visuomet padidėja ir poslinkiai.

Pagal gautus vaizdus grafiškai, galima numanyti apie paklaidų kilmę ir priežastis. Aiškiai pastebima, kad netgi gana nedidelis temperatūros padidėjimas sukelia tam tikrą kariatelės skersinės plokštės pailgėjimą. Tikslumą labiausiai lemia x ir y poslinkiai. Ilgėjant plokštei, mikroskopas kartu su jo laikikliu, kartu su kitais deformaciniais poslinkiais, visuomet pasislenka $\sim 45^\circ$ kampu į išilginę stalo ašį ir kartu pastumia mikroskopo vamzdžio galą. Taip yra dėl to, kad kariatelė dvipuse aerostatinių guolių sistema yra apjuosta tik su viena kreipiančiąja, todėl skersinė kariatelės plokštė gali nevaržoma ilgėti ar trumpėti šios vienos kreipiančiosios atžvilgiu. Šio pobūdžio deformacijai nėra kompensavimo mechanizmo PKK konstrukcijoje.

Pritaikius konstrukcines temperatūrinių poslinkių kompensavimo priemones galima būtų sumažinti šio PKK temperatūrinės paklaidas.

Tačiau ši PKK konstrukcija yra jautri temperatūrinėms paklaidoms dėl to, kad stalas su kariatėle ir matuojamas objektas yra visiškai atskirtos konstrukcijos, bendra tik tai, kad jos stovi ant tų pačių grindų. Taigi, temperatūrinės paklaidas, suprantama, sukelia absoliutieji, o ne santykiniai mikroskopo vamzdžio poslinkiai.

IŠVADOS:

1. Termokonstantinėje laboratorijoje, komparatoriaus aplinkoje, atsiranda ryškiai išreikšti temperatūriniai gradientai erdvėje, galintys įtakoti kampinio komparatoriaus temperatūrinės deformacijas. Joje temperatūra kinta nuo $+19,901\text{ }^{\circ}\text{C}$ (jutiklis nr. 1) iki $+20,439\text{ }^{\circ}\text{C}$ šalia skaičiavimo - valdymo komplekso ir kompiuterio (jutiklis nr. 5).
Pagrindiniai temperatūros gradientų erdvėje šaltiniai yra komparatoriaus skaičiavimo – valdymo kompleksas ir valdymo bei duomenų apdorojimo kompiuteris.
2. Komparatoriaus pavara ir mikroskopo CCD kamera iššaukia didelius tiek aplinkos tiek komparatoriaus bazinių detalių temperatūrinius gradientus, kurie esminiai įtakos komparavimo tikslumą. Jų aplinkoje didžiausi temperatūros trikdžiai virš CCD kameros, iki $+20,260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir šalia variklio iki $+20,194\text{ }^{\circ}\text{C}$. O atitinkamai variklis ir CCD kamera išyla iki $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $+28^{\circ}\text{C}$.
3. Aerostatinų guolių įtaka temperatūriniam gradientui yra maža, jų poveikis yra tik lokalus.
4. Vienu didžiausių kampų kalibravimo neapibrėžties sandu yra rastrų padėties detektavimo įrenginio bazavimo portalo temperatūriniai gradientai ir temperatūrinės deformacijos, atsirandančios veikiant temperatūriniams gradientams laike.
5. Rekomenduojama įdiegti papildomą vidinių temperatūrinių trikdžių temperatūrinę izoliaciją, o liekamąsias temperatūrines paklaidas minimizuoti skaičiuojamosios paklaidų kompensacijos metodu.
6. Tyrimo rezultatai yra pakankami ir gali būti panaudoti komparatoriaus bazinių elementų temperatūrinių laukų, temperatūrinių deformacijų ir temperatūrinių paklaidų modeliavimui.

LITERATŪRA

1. Barauskas, R., Belevičius, R., Kačianauskas, R. Baigtinių elementų metodo pagrindai, Vilnius, Technika, 2004, 610 p.
2. Barauskas, A., Kasparaitis, A., Ciziunas, A. The researches of long linear scale comparator and its environmental temperatures gradient. – Proceedings of 13th International Conference –Mechanika 2008. –Kaunas: Technologija, 2008, p. 33–38.
3. Barauskas, A., Kasparaitis, A., Kaušinis, S., Lazdinas, R. Analysis of estimation and compensation of angular errors of linear motion. –Mechanika. –Kaunas: Technologija, 2009, 5 (79), p. 52–58.
4. Barauskas R., Kasparaitis A., Kaušinis, S., Lazdinas R., Temperature fields, exchanges and deformations of a precise length comparator microscope, ISSN 1392 – 1207. Mechanika, Nr.17(3), 2011, p.279–283.
5. Barauskas, A., Lazdinas, R., Snukiskis T. An Experimental Investigation of Temperature Fields of Heat Sources on Length Comparator. Proceedings of 16th International Conference. Mechanika. 2011.
6. Bryan, J. B. International status of thermal error research. –Annals of the CIRP vol. 39 (2), 1990, p. 645–656.
7. Jong Hoon Yi, Soo Hyun Kim and Yoon Keun Kwak, A nanometric displacement measurement method using the detection of fringe peak movement, Meas. Sci. Technol. 11 (2000), P. 1352–1358.
8. Kasparaitis, A., Skirmantas, R. Estimation of Temperature Variations during Definition of CMM Errors, Lithuanian Machine Building 22, 1991. 53 p. (in lithuanian).
9. Kaušinis, S., Kasparaitis, A., Barauskas, A., Barauskas R., Jakštas A., Kilikevičius, A. Line Scale Calibration in Non-Ideal Measurement Situation, –Solid State Phenomena Vols. 147–149 (2009) p. 682–685.
10. Kaušinis, S., Yee, K., Barauskas, R. Estimation of thermo-elastic damping of vibrations in MEMS resonators: finite element modeling, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, 2012, Vol. 11, iss. 3, art. no. 033005. ISSN 1932–5150 p. 1–11.
11. K. P. Birch and M.J.Downs/ Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air, Metrologia 31 (1994)315–316.
12. Li, J. W., Zhang, W.J., Yang, G.,S. Tu, S.D., Chen X.B. Thermal-error modeling for complex physical systems: the-state-of-arts review. -The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, v.42., no. 1–2, p.168–179.
13. Ma, Y. Sensor Placement Optimization for Thermal Error Compensation on Machine Tools, Ph.D. Dissertation, the University of Michigan, 2001.

14. Pauza, A., Mikalauskas, K., Augevicius, V., Stankevicius, R. Calibration of platinum resistance thermometers in the framework points of ITS-90 scale. –Matavimai. –Kaunas: Technologija. 2001, no. 1(17), p. 23–27.
15. Preston-Thomas, H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). –Metrologia, No. 27, 1990.
16. Purkiss, J. A. Fire safety engineering design of structures. Second edition. Elsevier, 2007. 389 p.
17. TaeBong Eom, TaeYoung Choi, KeonHee Lee, HyunSeung Choi and SunKyu Lee, A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer, Meas. Sci. Technol. 13 (2002), p. 222–225.
18. Thalmann, R: A new High Precision Length Measuring Machine, Progress in Precision Engineering and Nanotechnology, Proceedings of the 9-IPES/UME4, Braunschweig, Germany, 1997, Vol. 1, pp. 112–115.
19. Vekteris, V.; Kasparaitis, A. Matavimų teorija ir praktika: mokomoji knyga. Vilnius: Technika 2012. 248 p.
20. Л. Ю. Абрамов, В. М. Братов и др. Сличения эталонов единицы длины России и Финляндии, Измерительная техника, 1997 г. Nr. 3, стр. (61–64).
21. Jumo [interaktyvus]. More than sensors & automation. [žiūrėta 2013m. gegužės 29d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.jumo.net>>.

PRIEDAI



PRECIZINIO KAMPO KOMPARATORIAUS VIDINIŲ IR IŠORINIŲ TRIKDŽIŲ TEMPERATŪRINIŲ GRADIENTŲ TYRIMAS

Vytautas Rudokas¹, Albinas Kasparaitis²

VGTU MEF Mašinų gamybos katedra

El. p.: ¹Wytssssss@gmail.com; ²a.kasparaitis@precizika.lt

Anotacija. Kampinių matų kalibravimui kuriami kampiniai komparatoriai. Jų matavimo paklaidoms įtaką turi temperatūros nuokrypiai nuo norminės ir jos pokyčiai. Siame straipsnyje pateikti išorinių temperatūrinių trikdžių komparatoriaus aplinkoje ir vidinių temperatūrinių trikdžių, kuriuos darbo metu sukelia komparatoriaus elementai, tyrimo rezultatai. Išorinių temperatūrinių trikdžių poveikis tirtas trijose plokštumose, detaliosiai – darbinėje plokštumoje. Vidiniai trikdžiai tirti šylančių ir šaldančių elementų – pavaros, CCD kameros ir aerostatinų guolių aplinkoje. Straipsnyje aprašyta tyrimams naudota aparatura, jos charakteristikos, matavimo blokinė schema. Tyrimų rezultatai pateikti grafiškai, atskirai išskiriant išorinius ir vidinius temperatūrinius trikdžius.

Reikšminiai žodžiai: precizinis kampo komparatorius, išoriniai ir vidiniai temperatūriniai trikdžiai, paklaidos.

Įvadas

Siekiant užtikrinti kampų matavimo vienovę – atkurti kampo vieneto vertę, ją perduoti etalonams ir darbinėms matavimo priemonėms, atlikti tarplaboratorinius palyginimus, kuriami preciziniai kampo matavimo komparatoriai (Kausinis, S. *et al.* 2009).

Precizinėse kampo matavimo sistemose svarbu identifikuoti ir įvertinti faktorius, kurie gali įtakoti jų tikslumą. Vienu svarbiausių iš jų yra temperatūriniai trikdžiai, iššaukiantys kalibravimo sistemų elementų geometrinį matmenų pokyčius, ir tokiu būdu sukeliantys kalibravimo paklaidas. Precizinėse sistemose temperatūrinės paklaidos, atsirandančios dėl įrenginio elementų temperatūrinių deformacijų, siekia virš 40% visos suminės kalibravimo paklaidos dydžio. Šio tipo paklaidos yra sunkiai prognozuojamos, nes temperatūriniai laukai nuolat keičiasi priklausomai nuo įrenginio darbo režimo ir aplinkos sąlygų (Bryan, J.B. 1990; Li, J. W. *et al.* 2009).

Siekiant eliminuoti įvairių šilumos šaltinių įtaką precizinių matavimo įrenginių darbo tikslumui yra naudojami temperatūrinių paklaidų poveikio minimizacijos arba temperatūrinių paklaidų kompensavimo metodai. Temperatūrinių paklaidų poveikio minimizacijos atveju siekiama išvengti paklaidų mažinant išskiriamą šilumos kiekį arba izoliuojant jos poveikį (Li, J. W. *et al.* 2009; Vekteris, V., *et al.* 2012). Paklaidų kompensacija yra efektyviausias metodas užtikrinti įrenginio tikslumą matematiniais metodais. Šiuo atveju kompensuojama temperatūrinių paklaidų įtaka galutiniam matavimo rezultatui.

Temperatūrinių paklaidų kompensacijai reikia tiksliai įvertinti laike kintančią temperatūrą, tuos tikslus

parinkti jautrių skaičių, jų vietą. Toliau yra sudaromi matematiniai modeliai, kurių argumentu yra laike kintantys temperatūriniai gradientai ir, remiantis šiais modeliais, realiu laiko masteliu skaičiuojamos temperatūrinių paklaidų pataisos.

Darbo tikslas – ištirti precizinio kampo komparatoriaus vidinių ir išorinių trikdžių sukeliamus temperatūrinius gradientus erdvėje ir priklausančius nuo laiko.

Tyrimo objektas ir metodika

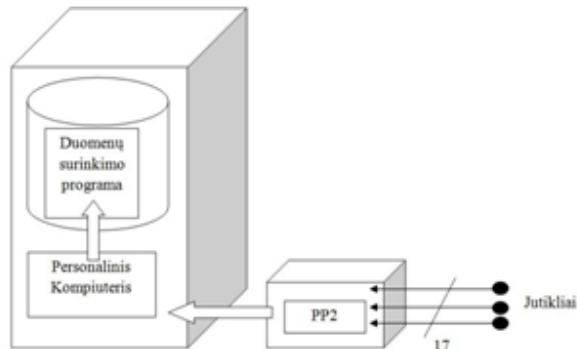
Tyrimo objektas yra kampinis komparatorius, skirtas kampo matų ir kampinių poslinkių matavimo sistemų paklaidoms kalibruoti. Komparatorius yra kompleksinis įrenginys, kurio pagrindinės komponentės yra vibro stabili bazė; pavyzdinio kampo sistema, sudaryta iš precizinio suklio, pavaros ir posūkio matavimo sistemos; limbo brūkšnių padėties detektavimo sistema; mechaniniai mazgai ir sistemos, užtikrinantys kalibratoriaus funkcionalumą; skaičiavimo – valdymo kompleksas (Barakauskas, A. *et al.* 2011).

Tyrimuose temperatūros matavimams naudojamas temperatūros matuoklis PP2 ir aukštos kokybės temperatūros jutikliai (ne žemesnės nei A klasės) (platininiai – foliniai EN60 751 ir platininiai – lustiniai PCA1.2010.1H), ir personalinis kompiuteris.

Temperatūros matuoklis PP2 yra itin aukšto tikslumo temperatūros bei kitų aplinkos parametrų (slėgio, drėgmės, ir kitų) matuoklis. Tokius prietaisus naudoja metrologijos laboratorijos daugelyje Europos šalių.

Į prietaisą PP2 galima pajungti iki 92 temperatūros jutiklių ir keletą analoginių įėjimų. Gali būti naudojami PT100 arba PT25 tipo jutikliai. Prietaisas yra surinktas 19 colių pagrindinėje šynoje prijungiant procesoriaus, multiplexoriaus ir analogo-kodo keitiklių plokštes. Tiksliam temperatūros reikšmės gavimui naudojamas platinos (PT) jutiklis ir du atraminiai rezistoriai, kurie

reikalingi prietaiso susikalibravimui. Vienas rezistorių reikalingas žemiausios temperatūros matavimo diapazone reikšmės nustatymui, kitas – aukščiausios. Temperatūros reikšmė apskaičiuojama iš priklausomybės tarp varžos ir temperatūros aproksimuotos 7 laipsnio polinomu, kuris suskaičiuojamas naudojantis platinos jutiklių žinoma varžos ir temperatūros priklausomybe išreikšta lentelėmis pagal EN 60 751 standartą.



1 pav. Temperatūros matuoklio blokinė schema

Tirti patalpos temperatūriniai gradientai, daugiausia priklausantys nuo paduodamo oro temperatūros, jo įpūtimo ir išsiurbimo sistemos, kompiuterio ir skaičiavimo – valdymo komplekso (SVK), esančių greta komparatoriaus. Vidinių komparatoriaus trikdžių temperatūriniai gradientai tirti pavaros, mikroskopo CCD kameros, oro guolių aplinkoje.

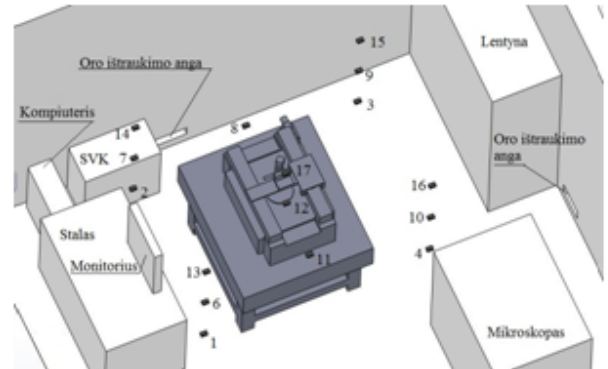
Tyrimų rezultatai

Aplinkos temperatūriniai gradientai

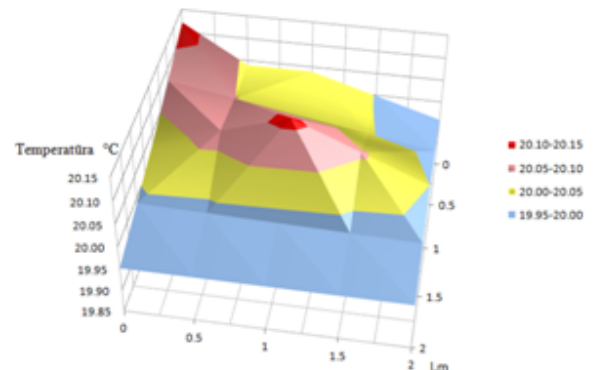
Šio tyrimo metu temperatūra buvo matuojama precizinio kampo komparatoriaus aplinkoje. Eksperimentai atlikti minėtais penkiolika platinos lustinių ir dviem foliniais PT100 jutikliais komplekte su preciziniu temperatūros matavimo prietaisu PP2. Matavimo rezultatai kaupiami ir apdorojami personaliniu kompiuteriu.

Temperatūra matuota trijose plokštumose – pirmoje plokštumoje, atitinkančioje darbinę kampinio komparatoriaus kalibravimo plokštumą, antroje, apatinėje plokštumoje, esančioje 0,5 metro žemiau darbinės plokštumos, ir trečioje, viršutinėje plokštumoje, esančioje 0,5 metro aukščiau darbinės kalibravimo plokštumos (žr.2 pav.).

Tyrimais nustatyta, jog visoje temkonstantinėje kampinio komparatoriaus aplinkoje temperatūra nėra vienoda (žiūr. 3 pav.), kinta nuo $+19,901^{\circ}\text{C}$ apatinėje plokštumoje iki $+20,439^{\circ}\text{C}$ viršutinėje plokštumoje šalia skaičiavimo - valdymo komplekso ir kompiuterio. Didžiausi temperatūros kitimai kalibratoriaus zonoje buvo stebimi erdvėje virš CCD kameros - iki $+20,260^{\circ}\text{C}$ ir šalia variklio - iki $+20,194^{\circ}\text{C}$.



2 pav. Jutiklių išdėstymo komparatoriaus aplinkoje schema

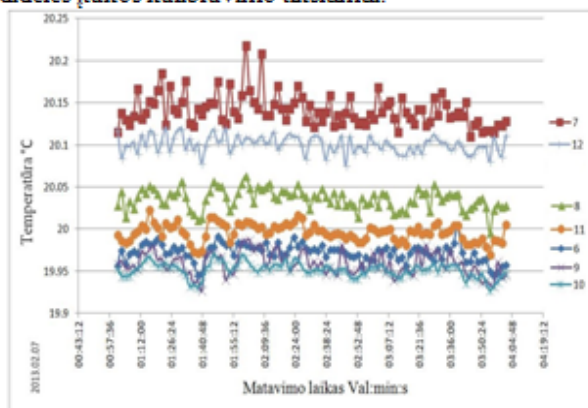


3 pav. Apibendrintas erdvinio temperatūros gradiento darbinėje plokštumoje grafikas

Darbinėje plokštumoje išdėstyti septyni jutikliai, keturi kampuose ir du ant komparatoriaus. Didžiausią temperatūrą fiksuoja jutiklis Nr.7, kuris yra arčiausia SVK ir kompiuterio. Taigi, iš to galima daryti išvadą jog nuo jų gana stipriai šyla komparatoriaus aplinka, lyginant su apatine plokštuma. Šioje plokštumoje šiluma didesnė vidutiniškai $0,03^{\circ}\text{C}$. Jutiklis Nr. 12 yra šalia mikroskopo, kuris šyla veikiant CCD kamrai (jai būnant prijungtai prie maitinimo). Iš grafiko (4 pav.) matoma kad jutiklis Nr. 12 fiksuoja tik apie $0,05^{\circ}\text{C}$ mažesnę temperatūrą nei jutiklis Nr. 7. Taigi, CCD kamera yra dar vienas didelis šilumos šaltinis. Žemesnę temperatūrą fiksuoja jutiklis Nr. 8, matujantis bendrą šilumos lauką, sukeltą kompiuterio, SVK, ir CCD kameros. Dar žemesnė yra jutiklio Nr. 11 fiksuojama temperatūra, kuri šiek tiek skiriasi nuo žemiausių temperatūrų dėl CCD kameros šilimo. ir 6 Jutikliai Nr. 9, 10 ir 6 fiksuoja beveik vienodas temperatūras. Taigi, jų zonos yra visiškai nusistovėjusios temperatūrų laukas, kurio praktiškai neveikia minėtieji šilumos šaltiniai.

Taip pat buvo tiriama aplinkos temperatūrų pokytis atidarant duris, prasidedant darbo dienai, prieš tai esant nusistovėjusiai temperatūrai. Darinėjant duris ir išlaikant jas po minutę ne visi jutikliai fiksuoja temperatūrų pokytį, daugiausiai reauoja tie, kurie yra išdėstyti viršutinėje plokštumoje. Pastebėta jutiklių reakcija į šviesos įjungimą, žmonių sukeliama aplinkos temperatūros padidėjimą. Bendrai abiem atvejams temperatūrų pokyčiai nėra dideli, temperatūros po

aplinkos trikdžių greitai nusistovi ir neturėtų daryti didelės įtakos kalibravimo tikslumui.



4 pav. Darbinės plokštumos temperatūros kitimas

Vidiniai temperatūriniai trikdžiai

Svarbiausiais tirtais vidiniais komparatoriaus temperatūriniais trikdžiais yra pavara, mikroskopo CCD kamera, aerostatiniai guoliai.

Pavara

Variklis yra vienas iš pagrindinių temperatūros šaltinių kampuiniame komparatoriuje. Buvo atliekamas tyrimas siekiant išmatuoti paties variklio darbinę temperatūrą ir jo aplinkos temperatūrą.

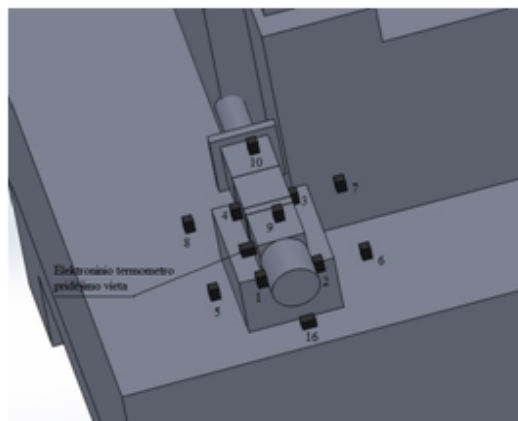
Pastebėta, jog variklio darbas sukelia elektrinius triukšmus tinkle ir dėlto neįmanoma nuskaityti tikslų jutiklių duomenų. Tam kad gauti tikslūs duomenys, variklis kas 5 minutes buvo išjungiamas ir nuskaitomi jutiklių duomenys. Matavimo pradžioje variklio temperatūra yra artima aplinkos temperatūrai. Kadangi variklis per pavara suka kampo matavimo sistemą, matuojant variklio aplinką kartu matuojama ir kampo matavimo sistemos aplinkos temperatūra. Jutikliai variklio aplinkoje buvo išdėstyti dviejose plokštumose – penki jutikliai variklio vidurio plokštumoje atstumu per 50 mm nuo variklio ir du jutikliai plokštumoje virš variklio, nutolusioje nuo jo 50mm atstumu (5 pav.).

Grafikas vaizduojantis variklio aplinkos temperatūrų pokyčius vidurinėje plokštumoje pavaizduotas 6 pav. Eksperimento metu naudojami penkiolika platinos lustinių temperatūros jutiklių ir du foliniai, PP2 precizinis temperatūros matavimo prietaisas, elektroninis termometras OMEGA HH41. Elektroninis skaitmeninis termometras buvo naudojamas todėl, jog pats variklis šyla (7 pav.), daugiau nei iki +25 °C. t.y daugiau nei yra sukalibruotų platinos jutiklių viršutinė matavimo riba.

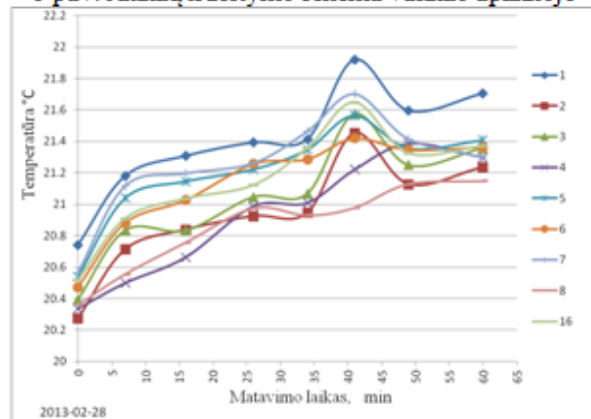
Mikroskopo CCD kamera

Prieš matavimą kamera buvo ilgą laiką išjungta, išjungtas maitinimas, jos temperatūra buvo artima nusistovėjusiai aplinkos temperatūrai. Kameros aplinkos temperatūros laukas matuotas trijose plokštumose (8 pav.), kuriose buvo po keturis jutiklius, o vienas jutiklis buvo patalpintas virš kameros.

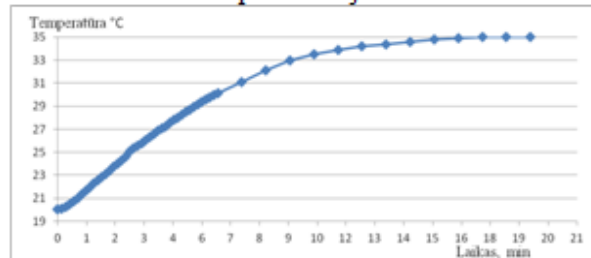
Kamera, kaip ir variklis, kaista daugiau nei +25 °C, todėl temperatūros kitimas buvo matuotas termometru OMEGA HH41.



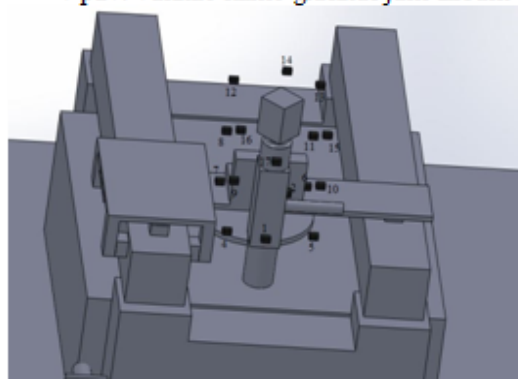
5 pav. Jutiklių išdėstymo schema variklio aplinkoje



6 pav. Variklio aplinkos šilimo grafikas jo vidurio plokštumoje



7 pav. Variklio šilimo grafikas jam dirbant

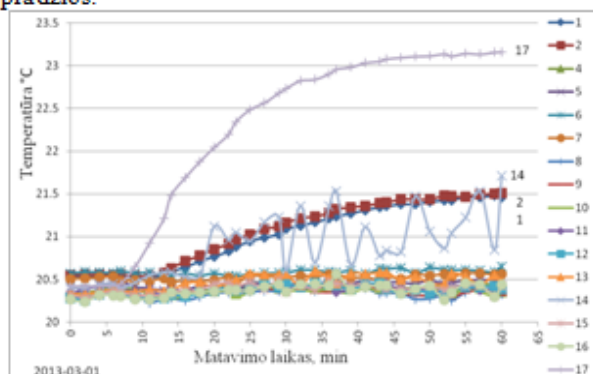


8 pav. Jutiklių išdėstymas kameros aplinkoje

Kamera, kaip ir variklis, kaista daugiau nei +25 °C, todėl temperatūros kitimas buvo matuotas termometru OMEGA HH41.

Pirmos valandos matavimo kameros aplinkos šilimo duomenys pavaizduoti 9 paveiksle. Aiškiai išsiskiria trijų jutiklių duomenys. Didžiausias temperatūras fiksuoja

jutikliai esantys ant mikroskopo korpuso, kurį tiesiogiai šildo kamera, ir jutiklis, kuris yra tiesiai virš kameros. Kamera įjungta praėjus 8 minutėms nuo matavimo pradžios.



9 pav. Kameros šilimas pirmą valandą

Visose matavimo plokštumose jutikliai nuo kameros ir mikroskopo yra nutolę per 30 mm. Įjungus kamerą apatinės plokštumos jutikliai fiksuoja nedidelę temperatūros kilimą jų aplinkoje. Temperatūros duomenys aukštesni toje mikroskopo pusėje, kur jis yra tvirtinamas. Tai rodo jutiklių Nr. 6 ir Nr.7 duomenys. Iš to galima daryti išvadą, jog mikroskopą laikančioji konstrukcija šyla perimdama šilumą nuo mikroskopo korpuso. Aukščiausią temperatūrą 20,67 °C apatinėje plokštumoje fiksuoja jutiklis Nr. 6.

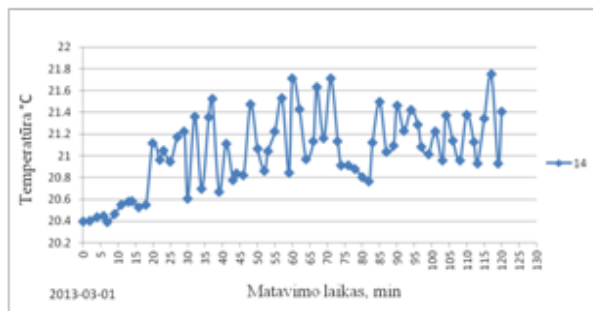
Vidurinėje plokštumoje temperatūros matavimo duomenys visuose taškuose nėra pamešę išsiskyrę taip, kaip apatinėje plokštumoje. Visų jutiklių duomenys fiksuoja analogiškus temperatūros pokyčius. Tik įjungus kamerą apie 10 minučių visų jutiklių fiksuojama temperatūra kyla vienodu greičiu. Aukščiausią temperatūrą 20,45 °C fiksuoja jutikliai Nr. 9 ir Nr. 11.

Viršutinėje plokštumoje pastebimas staigus temperatūros didėjimas vos įjungus kamerą 8 minutę. Temperatūra kyla apie 10 minučių, vėliau, nors ir su oro srauto sudarytais šuoliais, tačiau nusistovi. Išsiskiria jutiklio Nr. 13 duomenys. Jo aplinkoje temperatūra didžiausia ir siekia 20,6 °C.

Virš kameros matuota temperatūra vienu platinos foliniu jutikliu 50 mm atstumu nuo kameros, kuris yra jautresnis už platinos lustinį jutiklį. Įjungus kameros maitinimą 8 minutę, pastebimas temperatūros kilimas ir po maždaug 10 minučių ji nusistovi (10 pav.).

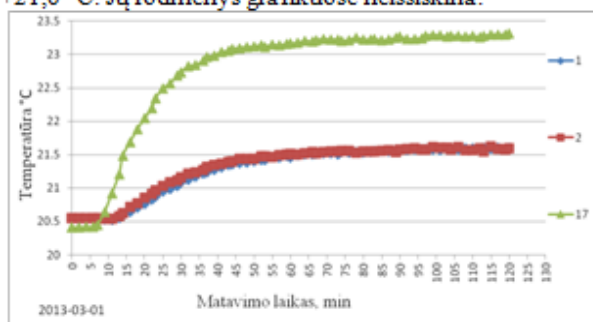
Tačiau, įjungus pačios kameros fiksuojamą vaizdą kompiuteriu 20 min nuo matavimo pradžios, temperatūra vėl šokteli į viršų iki +21,67 °C reikšmės. Iš to išplaukia išvada, jog vien prijungus maitinimą kamera jau šyla, tačiau įjungus kameros vaizdą stebėjimą, kameros viršaus aplinkos temperatūra pakyla žymiai, momentais siekia visu laipsniu daugiau, lyginant su temperatūra prijungus tik maitinimą. Tačiau viršutinės aplinkos šilimas didelės įtakos mikroskopo korpuso šilumai neturi, nes karštas oras kyla į viršų, kur susimaišo su oro srovėmis ir yra išsklaidomas.

Veikiant kamerai stipriai šyla visas mikroskopo korpusas (11 pav.). Greičiausiai šyla vieta, esanti arčiausia kameros (jutiklis Nr. 17) ir ji šyla daugiausia, iki +23,3 °C.



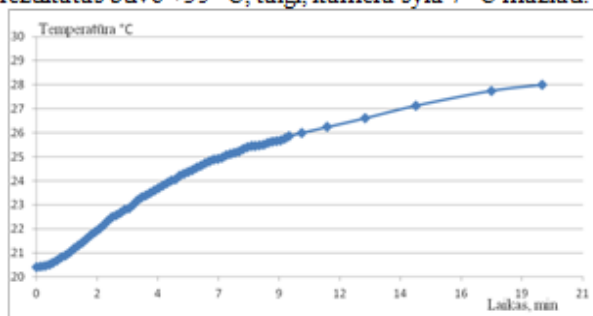
10 pav. Aplinkos šilimas virš kameros

Jutiklis Nr.2 yra mikroskopo korpuso viduryje, o jutiklis Nr.1 - dar žemiau, tačiau jų abiejų fiksuojamos temperatūros beveik visiškai vienodai kinta priklausomai nuo laiko. Reiškia, visa tolimesnė korpuso dalis šyla vienodai. Šių jutiklių aukščiausia temperatūra siekia +21,6 °C. Jų rodmenys grafikuose neišsiskiria.



11 pav. Mikroskopo korpuso šilimas nuo CCD kameros

Kameros šilimo grafike (12 pav.) stebime kylančią temperatūrą. Ji pakyla iki +28 °C. Pradžioje kilimas greitas, vėliau sulėtėja ir nusistovi. Variklio šilimo rezultatas buvo +35 °C, taigi, kamera šyla 7 °C mažiau.

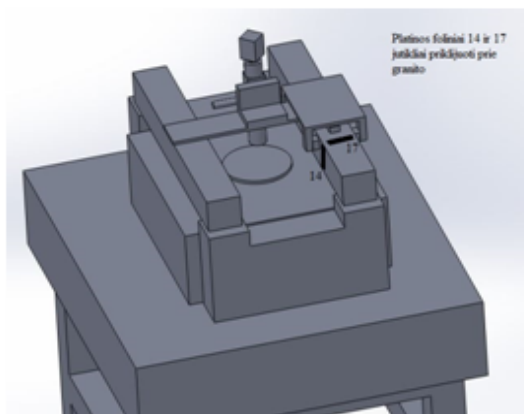


12 pav. Kameros šilimo grafikas

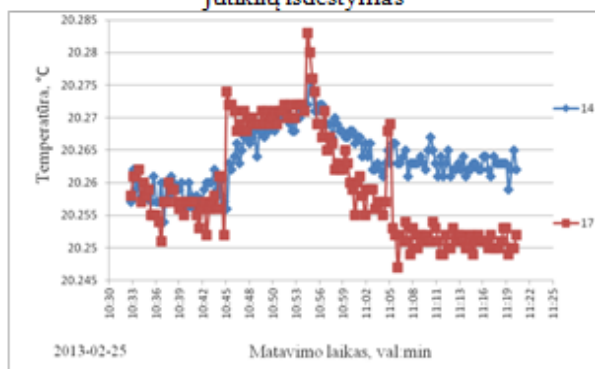
Aerostatiniai guoliai

Matuojama granito kreipiamosios, kuria slankioja aerostatinis guolis, temperatūra (13 pav.). Eksperimentui parinkti du platinos foliniai jutikliai PT100, kadangi jie yra jautresni ir gali būdami priklijuoti matuoti didesnio ploto temperatūrą. Šio bandymo rezultatai grafiškai pavaizduoti 14 pav.

Pra dedant matuoti granito kreipiamosios temperatūrą, jos reikšmės nusistovėjusios ties +20,26 °C. Tuo metu karnetėlė su išjungtu aerostatinio guolio oru yra greta temperatūros matavimo jutiklių. Įjungus orą ir patraukus karnetėlę 25 cm atstumu, temperatūros reikšmės nežymiai sumažėja. Po 15 min. nuo eksperimento pradžios pristūmus karnetėlę prie jutiklių ir išjungus orą, jutikliai registruoja granito kreipiamosios temperatūros padidėjimą.



13 pav. Aerostatinio guolio temperatūros matavimo jutiklių išdėstymas



14 pav. Granito kreipiamosios temperatūros matavimo rezultatai

Abudu jutikliai pasiekia skirtingas temperatūros reikšmes. Tikėtina, kad jutiklis Nr.17 sureaguoja į rankų šilumą, nes yra viršuje granito, o kariatėlė stumdoma rankomis, taigi jo užregistruoti temperatūrų šuoliai greičiausiai klaidingi. Įjungus orą ir prislinkus kariatėlę prie jutiklių (25 min.) jutiklių rodoma temperatūra temperatūra staigiai nevienodai krenta. Jutiklis Nr.14 fiksuoja lėtesnį temperatūros kritimą, viršuje esantis jutiklis Nr.17 - greitesnį. Vėliau, patraukus kariatėlę ir išjungus orą (35 min.) abiejų jutiklių rodoma temperatūra nustoja kristi ir nusistovi - šone esantis jutiklis Nr. 14 fiksuoja +20,263 °C, o esantis viršuje jutiklis Nr.17 fiksuoja +20,252 °C temperatūrą. Taigi, tarp jų atsiranda šiek tiek didesnis nei vienos šimtosios laipsnio skirtumas.

Išvados:

1. Termokonstantinėje laboratorijoje komparatoriaus aplinkoje atsiranda ryškiai išreikšti temperatūriniai gradientai erdvėje, galintys įtakoti kampinio komparatoriaus temperatūrinės deformacijos. Pagrindiniai temperatūros gradientų erdvėje šaltiniai yra skaičiavimo – valdymo kompleksas ir kompiuteris.
2. Pavara ir mikroskopo CCD kamera iššaukia didelius tiek aplinkos tiek komparatoriaus bazinių detalių temperatūrinius gradientus, kurie esminiai įtakos komparavimo tikslumą.
3. Aerostatinų guolių įtaka temperatūriniam gradientui yra maža, jų poveikis yra tik lokalus.
4. Tyrimo rezultatai gali būti panaudoti komparatoriaus temperatūrinių paklaidų modeliavimui.

Literatūra

1. Kausinis, S., Kasparaitis, A., Barakauskas, A., Barauskas R., Jakštas A., Kilikevicius, A. Line Scale Calibration in Non-Ideal Measurement Situation, -Solid State Phenomena Vols. 147-149 (2009) p. 682-685.
2. Bryan, J.B. International status of thermal error research. -Annals of the CIRP vol. 39 (2), 1990, p.645-656.
3. Li, J. W., Zhang, W.J., Yang, G.,S. Tu, S.D., Chen X.B. Thermal-error modeling for complex physical systems: the-state-of-arts review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, v.42., no. 1-2, p.168-179.
4. Vekteris, V., Kasparaitis, A. Matavimų teorija ir praktika: mokomoji knyga. Vilnius: Technika 2012. 248p.
5. Barakauskas, A., Lazdinas, R., Snukiskis T. An Experimental Investigation of Temperature Fields of Heat Sources on Length Comparator. Proceedings of 16th International Conference. Mechanika. 2011

Research of internal and external disturbance temperature gradients of a precision angle comparator

V.Rudokas, Albinas Kasparaitis

Annotation.

To calibrating angular measure is design precision angle comparators. Their measurement errors are influenced by temperature deviations from the normal. This paper presents results of a study on the external temperature disturbances in the comparators environment and on the temperature disturbances which are caused by comparator components when comparator is running. External temperature disturbances has been studied in three plane. Most detailed study was done on the working plane. Internal temperature disturbances study was done in the environment of warming and refrigerant comparator components – gear, CCD camera and aerostatic air bearings. Paper describes equipment used and its characteristics. The results are presented graphically, with separate diagrams for external and internal temperature disturbances.

Keywords: Precision angle comparator, internal and external temperature disturbances, measurement errors.

Conclusion:

1. In the thermal constant laboratory, in comparator environment, arise bright to express temperature gradients in space, which can affect the temperature's deformities at the angular comparator. The main sources of temperature gradients in space are counting – control of complex and computer.
2. Gear and the microscope CCD camera causes significant environment and comparator basic elements of temperature gradients which are the essential effect on the accuracy of the comparator.
3. Air bearings influence to the gradient of temperature is small, this effect is only local.
4. The results of this analysis can be used at the comparator thermal errors modeling.

2 PRIEDAS. Temperatūros matavimo duomenys

Temperatūros erdvėje matavimas nusistovėjusiam aplinkos režimui																
Eilės nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Jutiklių numeriai schemoje	1	6	2	7	14	13	3	9	15	16	5	11	8	12	4	10
07/02/2013 01:01	19.924	19.957	20.104	20.115	20.172	20.025	19.975	19.958	20.059	19.956	19.956	19.993	20.028	20.117	19.934	19.953
07/02/2013 01:03	19.93	19.975	20.106	20.138	20.179	20.034	19.963	19.962	20.079	19.958	19.951	19.986	20.045	20.084	19.93	19.944
07/02/2013 01:05	19.925	19.959	20.111	20.13	20.199	20.007	19.965	19.954	20.039	19.944	19.954	19.984	20.014	20.099	19.924	19.944
07/02/2013 01:06	19.933	19.971	20.104	20.124	20.142	20.064	19.97	19.954	20.054	19.951	19.956	19.986	20.033	20.098	19.928	19.945
07/02/2013 01:08	19.924	19.974	20.106	20.134	20.159	20.014	19.977	19.957	20.066	19.96	19.958	19.994	20.025	20.103	19.929	19.95
07/02/2013 01:10	19.932	19.971	20.105	20.167	20.181	20.054	19.952	19.952	20.069	19.966	19.963	19.998	20.039	20.089	19.938	19.953
07/02/2013 01:12	19.941	19.982	20.109	20.131	20.205	20.048	19.985	19.973	20.075	19.967	19.967	20.005	20.048	20.112	19.936	19.957
07/02/2013 01:14	19.94	19.986	20.12	20.138	20.218	20.031	19.996	19.97	20.079	19.986	19.972	20	20.043	20.098	19.947	19.964
07/02/2013 01:16	19.941	19.982	20.126	20.152	20.223	20.029	19.981	19.976	20.098	19.998	19.981	20.023	20.052	20.116	19.946	19.967
07/02/2013 01:18	19.938	19.984	20.122	20.149	20.237	20.027	19.982	19.979	20.067	19.985	19.972	20.008	20.048	20.113	19.943	19.96
07/02/2013 01:19	19.947	19.989	20.124	20.165	20.235	20.048	19.982	19.964	20.074	19.972	19.964	20.002	20.042	20.091	19.934	19.956
07/02/2013 01:21	19.946	19.982	20.119	20.185	20.203	20.031	19.973	19.965	20.077	19.967	19.967	19.992	20.031	20.104	19.932	19.957
07/02/2013 01:23	19.928	19.971	20.109	20.124	20.169	20.079	19.965	19.953	20.065	19.969	19.962	20.007	20.03	20.12	19.931	19.959
07/02/2013 01:25	19.932	19.973	20.114	20.17	20.165	20.028	19.97	19.954	20.054	19.957	19.956	20.002	20.043	20.092	19.936	19.955
07/02/2013 01:27	19.938	19.98	20.121	20.142	20.181	20.034	19.972	19.964	20.053	19.962	19.966	20.004	20.04	20.108	19.941	19.957
07/02/2013 01:29	19.941	19.974	20.109	20.138	20.22	20.019	19.981	19.965	20.053	19.965	19.967	20.012	20.045	20.117	19.933	19.954
07/02/2013 01:31	19.926	19.979	20.113	20.151	20.204	20.022	19.979	19.966	20.063	19.969	19.96	19.998	20.057	20.119	19.926	19.95
07/02/2013 01:32	19.919	19.969	20.119	20.176	20.228	20.027	19.956	19.946	20.054	19.959	19.958	19.993	20.039	20.094	19.924	19.946
07/02/2013 01:34	19.932	19.969	20.1	20.126	20.173	20.023	19.972	19.949	20.031	19.938	19.947	19.982	20.022	20.107	19.924	19.932
07/02/2013 01:36	19.923	19.96	20.097	20.122	20.188	20.055	19.954	19.936	20.042	19.94	19.944	19.973	20.018	20.093	19.917	19.934
07/02/2013 01:38	19.912	19.946	20.098	20.143	20.25	19.993	19.949	19.939	20.05	19.941	19.949	19.972	20.011	20.101	19.916	19.931
07/02/2013 01:40	19.91	19.947	20.097	20.136	20.157	20.022	19.964	19.927	20.046	19.938	19.948	19.974	20.013	20.078	19.922	19.937
07/02/2013 01:42	19.921	19.969	20.096	20.146	20.171	20.017	19.967	19.967	20.064	19.959	19.96	19.992	20.035	20.099	19.942	19.953
07/02/2013 01:44	19.945	19.979	20.111	20.15	20.179	20.071	19.994	19.972	20.078	19.968	19.966	20.014	20.045	20.11	19.934	19.957
07/02/2013 01:45	19.937	19.98	20.112	20.149	20.188	20.026	19.988	19.972	20.097	19.974	19.97	20.014	20.057	20.118	19.932	19.97
07/02/2013 01:47	19.936	19.992	20.113	20.175	20.193	20.061	19.981	19.966	20.094	19.97	19.969	20.01	20.052	20.103	19.945	19.964
07/02/2013 01:49	19.945	19.986	20.105	20.13	20.24	20.04	19.975	19.968	20.107	19.978	19.968	20.007	20.051	20.106	19.947	19.964
07/02/2013 01:51	19.943	19.981	20.109	20.126	20.191	20.038	19.971	19.94	20.077	19.973	19.97	20.004	20.039	20.119	19.94	19.958
07/02/2013 01:53	19.936	19.982	20.101	20.173	20.225	20.056	19.973	19.949	20.027	19.948	19.95	19.985	20.022	20.09	19.925	19.948
07/02/2013 01:55	19.922	19.969	20.099	20.14	20.194	20.015	19.962	19.947	20.044	19.962	19.961	19.994	20.03	20.099	19.937	19.955
07/02/2013 01:57	19.944	19.984	20.103	20.132	20.184	20.103	19.981	19.964	20.079	19.97	19.962	20.007	20.043	20.112	19.938	19.957
07/02/2013 01:59	19.939	19.983	20.116	20.159	20.194	20.037	19.988	19.985	20.094	19.97	19.971	20.005	20.054	20.1	19.954	19.969
07/02/2013 02:00	19.947	19.981	20.13	20.218	20.233	20.039	20.001	19.986	20.084	19.99	19.977	20.009	20.063	20.108	19.951	19.966
07/02/2013 02:02	19.937	19.98	20.123	20.165	20.234	20.04	20.006	19.987	20.09	19.974	19.978	20.008	20.049	20.107	19.947	19.958
07/02/2013 02:04	19.942	19.978	20.128	20.151	20.187	20.04	19.98	19.974	20.059	19.965	19.962	20.006	20.032	20.102	19.935	19.953
07/02/2013 02:06	19.937	19.979	20.12	20.143	20.18	20.051	19.975	19.98	20.09	19.969	19.964	20.001	20.051	20.105	19.933	19.949
07/02/2013 02:08	19.931	19.975	20.118	20.208	20.198	20.033	19.988	19.981	20.058	19.969	19.967	20.003	20.047	20.11	19.936	19.954
07/02/2013 02:10	19.943	19.985	20.102	20.135	20.177	20.084	19.974	19.955	20.09	19.952	19.962	19.994	20.05	20.101	19.935	19.956
07/02/2013 02:12	19.931	19.97	20.106	20.135	20.189	20.046	19.976	19.963	20.107	19.977	19.962	19.996	20.054	20.104	19.935	19.952
07/02/2013 02:13	19.931	19.968	20.118	20.148	20.192	20.017	19.97	19.976	20.084	19.976	19.962	20.004	20.039	20.115	19.937	19.957
07/02/2013 02:15	19.939	19.985	20.112	20.17	20.187	20.037	19.987	19.979	20.093	19.967	19.968	20.001	20.036	20.094	19.944	19.957
07/02/2013 02:17	19.941	19.97	20.115	20.143	20.177	20.031	19.984	19.961	20.086	19.963	19.964	20.003	20.046	20.101	19.945	19.956
07/02/2013 02:19	19.933	19.971	20.12	20.13	20.185	20.033	19.969	19.97	20.111	19.961	19.966	20.007	20.045	20.108	19.945	19.965
07/02/2013 02:21	19.944	19.979	20.121	20.143	20.171	20.038	19.967	19.95	20.06	19.972	19.964	20.005	20.04	20.113	19.934	19.951
07/02/2013 02:23	19.943	19.991	20.122	20.15	20.19	20.043	19.98	19.956	20.059	19.975	19.965	20.009	20.042	20.109	19.948	19.964
07/02/2013 02:25	19.948	19.98	20.128	20.17	20.203	20.032	19.992	19.961	20.089	19.988	19.971	20.017	20.053	20.109	19.945	19.964
07/02/2013 02:26	19.953	19.986	20.117	20.157	20.184	20.091	19.975	19.975	20.06	19.975	19.964	20.013	20.042	20.099	19.939	19.956
07/02/2013 02:28	19.932	19.978	20.114	20.128	20.15	20.037	19.96	19.975	20.079	19.958	19.967	19.993	20.039	20.083	19.941	19.949
07/02/2013 02:30	19.939	19.974	20.111	20.147	20.186	20.031	19.978	19.954	20.046	19.96	19.962	19.997	20.024	20.105	19.928	19.948
07/02/2013 02:32	19.935	19.977	20.104	20.121	20.159	20.036	19.97	19.962	20.074	19.968	19.96	20.006	20.04	20.11	19.934	19.951
07/02/2013 02:34	19.929	19.974	20.112	20.139	20.177	20.023	19.958	19.955	20.062	19.968	19.963	19.999	20.038	20.11	19.928	19.952
07/02/2013 02:36	19.941	19.981	20.099	20.128	20.195	20.029	19.978	19.961	20.078	19.958	19.962	19.999	20.048	20.104	19.93	19.95
07/02/2013 02:38	19.932	19.967	20.109	20.139	20.144	20.012	19.98	19.946	20.107	19.971	19.966	19.994	20.039	20.082	19.943	19.956
07/02/2013 02:39	19.941	19.976	20.112	20.159	20.207	20.042	19.969	19.955	20.085	19.959	19.961	19.992	20.032	20.1	19.945	19.954
07/02/2013 02:41	19.929	19.976	20.107	20.122	20.128	20.016	19.97	19.95	20.057	19.961	19.957	19.994	20.044	20.091	19.927	19.948
07/02/2013 02:43	19.928	19.976	20.104	20.135	20.185	20.034	19.96	19.945	20.076	19.959	19.956	19.995	20.029	20.098	19.927	19.951
07/02/2013 02:45	19.936	19.975	20.108	20.125	20.185	20.038	19.985	19.981	20.078	19.961	19.96	19.993	20.043	20.11	19.932	19.952
07/02/2013 02:47	19.937	19.972	20.11	20.138	20.193	20.032	19.978	19.963	20.058	19.956	19.957	19.989	20.028	20.075	19.928	19.952
07/02/2013 02:49	19.931	19.968	20.106	20.158	20.177	20.014	19.959	19.949	20.061	19.956	19.956	19.993	20.032	20.11	19.919	19.943
07/02/2013 02:51	19.918	19.967	20.101	20.133	20.182											

Variklio, pavaros ir kampo matavimo sistemos šilimas kada yra įjungtas variklis															
Jutiklio nr.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16
28/02/2013 09:17	20.739	20.272	20.393	20.334	20.537	20.473	20.566	20.359	21.265	20.866	20.052	20.052	20.038	20.054	20.518
28/02/2013 09:24	21.179	20.712	20.833	20.498	21.039	20.882	21.116	20.555	21.934	21.341	20.057	20.057	20.048	20.065	20.909
28/02/2013 09:33	21.307	20.839	20.833	20.663	21.146	21.027	21.197	20.757	22.084	22.111	20.057	20.064	20.056	20.076	21.036
28/02/2013 09:43	21.392	20.924	21.045	20.987	21.223	21.256	21.261	20.974	22.519	22.829	20.066	20.058	20.069	20.085	21.121
28/02/2013 09:51	21.413	20.946	21.067	21.009	21.348	21.286	21.463	20.929	22.78	22.695	20.066	20.068	20.056	20.098	21.356
28/02/2013 09:58	21.918	21.451	21.572	21.221	21.565	21.419	21.7	20.977	23.122	22.974	20.072	20.073	20.078	20.101	21.647
28/02/2013 10:06	21.594	21.127	21.248	21.386	21.357	21.345	21.414	21.128	22.916	23.159	20.066	20.067	20.076	20.112	21.324
28/02/2013 10:17	21.703	21.235	21.356	21.298	21.408	21.364	21.298	21.147	22.69	23.403	20.074	20.095	20.072	20.139	21.37

Kameros erdvės matavimas, kamerai esant įjungtai pirmą valandą															
Jutiklio nr.:	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
01/03/2013 11:00	20.545	20.549	20.329	20.407	20.57	20.504	20.305	20.331	20.323	20.334	20.279	20.33	20.398	20.318	20.263
01/03/2013 11:02	20.53	20.55	20.341	20.382	20.589	20.509	20.27	20.308	20.31	20.386	20.259	20.325	20.4	20.285	20.234
01/03/2013 11:04	20.537	20.552	20.371	20.433	20.584	20.521	20.301	20.329	20.341	20.419	20.324	20.355	20.437	20.327	20.316
01/03/2013 11:06	20.537	20.548	20.424	20.459	20.577	20.534	20.389	20.396	20.359	20.408	20.362	20.374	20.448	20.361	20.308
01/03/2013 11:07	20.535	20.554	20.389	20.471	20.599	20.479	20.339	20.356	20.353	20.386	20.334	20.359	20.391	20.345	20.298
01/03/2013 11:09	20.528	20.536	20.385	20.409	20.574	20.49	20.335	20.332	20.315	20.361	20.293	20.354	20.462	20.307	20.644
01/03/2013 11:11	20.521	20.537	20.322	20.39	20.58	20.483	20.221	20.293	20.284	20.372	20.285	20.378	20.548	20.309	20.263
01/03/2013 11:13	20.548	20.576	20.321	20.368	20.545	20.508	20.283	20.281	20.287	20.304	20.275	20.357	20.579	20.315	20.28
01/03/2013 11:14	20.588	20.626	20.33	20.38	20.548	20.466	20.278	20.28	20.273	20.322	20.32	20.37	20.581	20.347	20.343
01/03/2013 11:16	20.642	20.712	20.328	20.364	20.569	20.486	20.252	20.314	20.3	20.312	20.298	20.45	20.529	20.368	20.326
01/03/2013 11:18	20.709	20.776	20.378	20.427	20.545	20.478	20.293	20.339	20.333	20.35	20.341	20.464	20.548	20.368	20.341
01/03/2013 11:20	20.765	20.853	20.361	20.413	20.571	20.49	20.341	20.354	20.345	20.36	20.367	20.408	21.119	20.448	20.36
01/03/2013 11:22	20.826	20.913	20.421	20.435	20.54	20.52	20.344	20.413	20.365	20.392	20.41	20.467	20.961	20.453	20.375
01/03/2013 11:23	20.876	20.965	20.344	20.382	20.539	20.454	20.347	20.357	20.287	20.386	20.372	20.492	21.049	20.406	20.37
01/03/2013 11:25	20.945	21.027	20.457	20.452	20.564	20.538	20.351	20.38	20.354	20.388	20.381	20.56	20.948	20.463	20.367
01/03/2013 11:27	20.987	21.09	20.443	20.446	20.572	20.534	20.367	20.395	20.419	20.434	20.444	20.556	21.171	20.384	20.419
01/03/2013 11:29	21.026	21.116	20.396	20.441	20.576	20.527	20.357	20.37	20.384	20.413	20.409	20.553	21.225	20.488	20.437
01/03/2013 11:30	21.087	21.16	20.403	20.444	20.577	20.518	20.376	20.358	20.369	20.419	20.459	20.558	20.605	20.348	20.35
01/03/2013 11:32	21.127	21.214	20.413	20.436	20.612	20.541	20.406	20.373	20.367	20.406	20.407	20.432	21.36	20.43	20.438
01/03/2013 11:34	21.165	21.235	20.393	20.44	20.609	20.534	20.357	20.357	20.364	20.431	20.452	20.598	20.697	20.375	20.444
01/03/2013 11:36	21.211	21.275	20.413	20.468	20.588	20.553	20.4	20.349	20.379	20.421	20.44	20.507	21.354	20.475	20.426
01/03/2013 11:37	21.236	21.32	20.425	20.468	20.581	20.553	20.346	20.386	20.355	20.352	20.429	20.449	21.527	20.448	20.56
01/03/2013 11:39	21.27	21.343	20.415	20.443	20.602	20.52	20.384	20.407	20.338	20.38	20.384	20.569	20.671	20.428	20.375
01/03/2013 11:41	21.308	21.359	20.45	20.491	20.565	20.523	20.396	20.424	20.394	20.435	20.446	20.563	21.112	20.438	20.408
01/03/2013 11:43	21.34	21.391	20.43	20.494	20.627	20.488	20.331	20.382	20.353	20.444	20.449	20.579	20.775	20.408	20.429
01/03/2013 11:44	21.353	21.398	20.407	20.464	20.621	20.541	20.335	20.359	20.351	20.451	20.378	20.575	20.837	20.38	20.427
01/03/2013 11:46	21.376	21.436	20.4	20.458	20.636	20.503	20.334	20.341	20.363	20.383	20.342	20.497	20.821	20.389	20.327
01/03/2013 11:48	21.38	21.434	20.393	20.448	20.574	20.555	20.267	20.314	20.34	20.391	20.372	20.535	21.471	20.381	20.387
01/03/2013 11:50	21.404	21.438	20.417	20.482	20.637	20.542	20.274	20.312	20.385	20.362	20.339	20.45	21.063	20.421	20.421
01/03/2013 11:52	21.421	21.477	20.4	20.441	20.612	20.557	20.313	20.32	20.366	20.37	20.312	20.446	20.863	20.374	20.26
01/03/2013 11:53	21.423	21.471	20.342	20.457	20.61	20.532	20.252	20.293	20.299	20.424	20.37	20.569	21.041	20.401	20.34
01/03/2013 11:55	21.462	21.464	20.412	20.486	20.614	20.566	20.347	20.35	20.397	20.42	20.408	20.531	21.224	20.426	20.449
01/03/2013 11:57	21.458	21.495	20.44	20.487	20.602	20.57	20.378	20.371	20.35	20.374	20.408	20.436	21.532	20.427	20.437
01/03/2013 11:59	21.479	21.498	20.429	20.487	20.588	20.55	20.345	20.348	20.302	20.395	20.418	20.545	20.845	20.304	20.295
01/03/2013 12:00	21.457	21.51	20.349	20.42	20.65	20.559	20.32	20.324	20.35	20.4	20.39	20.467	21.71	20.418	20.441

Aerostatinų guolių temperatūros matavimas		
Jutiklio nr.:	14	17
25/02/2013 10:33	20.257	20.258
25/02/2013 10:33	20.262	20.261
25/02/2013 10:34	20.259	20.261
25/02/2013 10:34	20.26	20.262
25/02/2013 10:34	20.258	20.257
25/02/2013 10:35	20.258	20.26
25/02/2013 10:35	20.258	20.258
25/02/2013 10:35	20.258	20.259
25/02/2013 10:35	20.257	20.255
25/02/2013 10:36	20.261	20.255
25/02/2013 10:36	20.257	20.255
25/02/2013 10:36	20.257	20.254
25/02/2013 10:37	20.26	20.251
25/02/2013 10:37	20.254	20.257
25/02/2013 10:37	20.26	20.257
25/02/2013 10:38	20.258	20.26
25/02/2013 10:38	20.261	20.259
25/02/2013 10:38	20.26	20.259
25/02/2013 10:39	20.259	20.257
25/02/2013 10:39	20.259	20.256
25/02/2013 10:39	20.26	20.257
25/02/2013 10:39	20.256	20.255
25/02/2013 10:40	20.256	20.257
25/02/2013 10:40	20.26	20.257
25/02/2013 10:40	20.258	20.257
25/02/2013 10:41	20.256	20.257
25/02/2013 10:41	20.258	20.255
25/02/2013 10:41	20.257	20.253
25/02/2013 10:42	20.257	20.256

25/02/2013 10:42	20.259	20.257
25/02/2013 10:42	20.26	20.252
25/02/2013 10:43	20.26	20.256
25/02/2013 10:43	20.26	20.257
25/02/2013 10:43	20.262	20.258
25/02/2013 10:44	20.259	20.256
25/02/2013 10:44	20.26	20.261
25/02/2013 10:44	20.258	20.261
25/02/2013 10:44	20.257	20.252
25/02/2013 10:45	20.256	20.274
25/02/2013 10:45	20.263	20.272
25/02/2013 10:45	20.262	20.272
25/02/2013 10:46	20.264	20.271
25/02/2013 10:46	20.266	20.268
25/02/2013 10:46	20.263	20.269
25/02/2013 10:47	20.265	20.268
25/02/2013 10:47	20.267	20.271
25/02/2013 10:47	20.267	20.268
25/02/2013 10:48	20.266	20.27
25/02/2013 10:48	20.267	20.27
25/02/2013 10:48	20.268	20.269
25/02/2013 10:48	20.264	20.269
25/02/2013 10:49	20.268	20.269
25/02/2013 10:49	20.268	20.271
25/02/2013 10:49	20.267	20.269
25/02/2013 10:50	20.269	20.271
25/02/2013 10:50	20.268	20.269
25/02/2013 10:50	20.269	20.27
25/02/2013 10:51	20.268	20.271
25/02/2013 10:51	20.271	20.269
25/02/2013 10:51	20.27	20.271
25/02/2013 10:52	20.27	20.271
25/02/2013 10:52	20.271	20.272
25/02/2013 10:52	20.271	20.27
25/02/2013 10:52	20.269	20.272
25/02/2013 10:53	20.268	20.27
25/02/2013 10:53	20.268	20.27
25/02/2013 10:53	20.27	20.272
25/02/2013 10:54	20.27	20.272
25/02/2013 10:54	20.271	20.272
25/02/2013 10:54	20.272	20.271
25/02/2013 10:55	20.272	20.283
25/02/2013 10:55	20.276	20.28
25/02/2013 10:55	20.274	20.276
25/02/2013 10:56	20.271	20.274
25/02/2013 10:56	20.271	20.269
25/02/2013 10:56	20.272	20.269
25/02/2013 10:57	20.272	20.267
25/02/2013 10:57	20.269	20.271
25/02/2013 10:57	20.269	20.265
25/02/2013 10:57	20.269	20.267
25/02/2013 10:58	20.267	20.266
25/02/2013 10:58	20.27	20.262
25/02/2013 10:58	20.269	20.263
25/02/2013 10:59	20.268	20.262
25/02/2013 10:59	20.268	20.262
25/02/2013 10:59	20.267	20.265
25/02/2013 11:00	20.267	20.263
25/02/2013 11:00	20.268	20.26
25/02/2013 11:00	20.268	20.259
25/02/2013 11:01	20.266	20.255
25/02/2013 11:01	20.267	20.26
25/02/2013 11:01	20.267	20.261
25/02/2013 11:01	20.264	20.258
25/02/2013 11:02	20.266	20.255
25/02/2013 11:02	20.264	20.259
25/02/2013 11:02	20.266	20.259
25/02/2013 11:03	20.262	20.259
25/02/2013 11:03	20.262	20.256
25/02/2013 11:03	20.263	20.257
25/02/2013 11:04	20.262	20.257
25/02/2013 11:04	20.261	20.255
25/02/2013 11:04	20.263	20.257
25/02/2013 11:05	20.265	20.268
25/02/2013 11:05	20.263	20.269

25/02/2013 11:05	20.266	20.253
25/02/2013 11:06	20.266	20.252
25/02/2013 11:06	20.263	20.247
25/02/2013 11:06	20.263	20.252
25/02/2013 11:06	20.264	20.251
25/02/2013 11:07	20.265	20.254
25/02/2013 11:07	20.261	20.251
25/02/2013 11:07	20.263	20.249
25/02/2013 11:08	20.263	20.253
25/02/2013 11:08	20.263	20.252
25/02/2013 11:08	20.263	20.25
25/02/2013 11:09	20.264	20.252
25/02/2013 11:09	20.263	20.251
25/02/2013 11:09	20.262	20.252
25/02/2013 11:10	20.265	20.251
25/02/2013 11:10	20.267	20.251
25/02/2013 11:10	20.265	20.254
25/02/2013 11:10	20.263	20.253
25/02/2013 11:11	20.261	20.251
25/02/2013 11:11	20.264	20.249
25/02/2013 11:11	20.261	20.249
25/02/2013 11:12	20.263	20.252
25/02/2013 11:12	20.265	20.25
25/02/2013 11:12	20.261	20.25
25/02/2013 11:13	20.262	20.253
25/02/2013 11:13	20.262	20.251
25/02/2013 11:13	20.263	20.252
25/02/2013 11:14	20.262	20.252
25/02/2013 11:14	20.264	20.251
25/02/2013 11:14	20.261	20.25
25/02/2013 11:15	20.262	20.25
25/02/2013 11:15	20.262	20.252
25/02/2013 11:15	20.263	20.249
25/02/2013 11:15	20.263	20.251
25/02/2013 11:16	20.262	20.252
25/02/2013 11:16	20.262	20.251
25/02/2013 11:16	20.264	20.251
25/02/2013 11:17	20.264	20.251
25/02/2013 11:17	20.262	20.25
25/02/2013 11:17	20.261	20.252
25/02/2013 11:18	20.264	20.25
25/02/2013 11:18	20.263	20.25
25/02/2013 11:18	20.263	20.25
25/02/2013 11:19	20.263	20.251
25/02/2013 11:19	20.263	20.253
25/02/2013 11:19	20.263	20.253
25/02/2013 11:19	20.259	20.249
25/02/2013 11:20	20.262	20.25
25/02/2013 11:20	20.265	20.25
25/02/2013 11:20	20.262	20.252
Jutiklis	14	17
Vidurkis M	20.264	20.259
Vidutinis kvadratinis nuokrypis S	0.0044	0.0082