

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Artūras KILIKEVIČIUS

ILGIO MATAVIMO MECHATRONINIO
KOMPARATORIAUS DINAMINIŲ PAKLAIDŲ
TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINERIJA (10T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2009

Disertacija rengta 2005–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

Konsultantas

prof. habil. dr. Albinas KASPARAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTV leidyklos TECHNIKA 1634-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-436-9

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2009

© Kilikevičius, A., 2009

Autoriaus el. paštas akilikevicius@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Artūras KILIKEVIČIUS

THE RESEARCH OF DYNAMIC ERRORS
OF THE MECHATRONICAL LINE SCALE
COMPARATOR

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2009.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Vldas VEKTERIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T).

Consultant

Prof Dr Habil Albinas KASPARAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T).

Reziუმэ

Tikslaus ir greito brūkšnių ilgio matų padalų detektavimo problemos aktualumą ir sprendimo būtinybę pirmiausia sąlygoja sparčiai didėjantys precizinių skalių kalibravimo našumo poreikiai. Vienas pagrindinių tokių sistemų projektavimo kriterijų yra paklaidų biudžetas (sandara). Disertacijoje pagrindinis dėmesys skirtas ištirti aplinkos ir komparatoriaus elementų virpesių įtaką kalibravimo tikslumui ir nustatyti, kokią paklaidų biudžeto dalį sudaro paklaida, atsirandanti dėl virpesių poveikio.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: virpesių įtakos komparatoriaus kalibravimo tikslumui nustatymas bei virpesių matavimo priemonių patikimumo tyrimas. Pirmasis uždavinys suformuluotas, nes atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad kalibravimo sistemų dinaminiam tyrimams buvo skirta mažai dėmesio. Antrasis siejasi su pirmojo uždavinio sprendimu, nes kai matuojami dydžiai yra mikrometrų eilės, labai svarbu įvertinti virpesių matavimo priemonių patikimumą.

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Įvadiniamame skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta ilgio matų kalibravimo ir virpesių matavimo sistemų bei jų paklaidų analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikti nagrinėjamos sistemos dinaminis ir matematinis modeliai bei atliktas tiriamos sistemos modeliavimas.

Trečiajame skyriuje eksperimentiškai tiriami aplinkos ir komparatoriaus elementų virpesiai.

Ketvirtajame skyriuje pasiūlyta virpesių matavimo sistemos neapibrėžties įvertinimo metodika.

Penktame skyriuje pateikta paklaidų biudžeto sando, atsirandančio dėl virpesių poveikio, nustatymo metodika.

Disertacijos tema paskelbta 15 straipsnių ir perskaityta 11 pranešimų Lietuvos bei kitų šalių konferencijose: trys – straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašus, du – konferencijų medžiagose, referuotose ISI duomenų bazėje, trys – INSPEC duomenų bazėje cituojamuose žurnaluose, du – EBSCO duomenų bazėje cituojamuose žurnaluose, vienas – recenzuojamame tarptautiniame žurnale, du – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose bei du – respublikinėse konferencijose medžiagose.

Abstract

Actuality and solution necessity of the problem of accurate and fast detection of the length measurement scale divisions determine first of all the quickly increasing requirements of the scale calibration productivity. One of the main criterions of design of these systems is the budget (structure) of the errors. The main attention in the dissertation is laid to research the influence of an environment and comparator elements vibration onto accuracy of data reception and what part of an error budget forms the error provoked by the vibration action.

Some main tasks are being solved in the work: definition of vibration influence on comparator data reception accuracy and research of reliability of vibration measurement means. The first task was formed for the reason that after survey of literature sources it was defined that there was a small attention to dynamical research of calibration systems. The second is connected with the solution of the first task, because while the values being measured are of a micrometer order it is severely necessary to evaluate the reliability of vibration measurement systems. The thesis is divided into five chapters including the conclusion's chapter.

First chapter is dedicated for an introduction to the problem and its topicality. There are also formulated purposes and tasks of the work; the used methods and novelty of solutions are described; author's publications and structure of the thesis are presented.

In the second section dynamic and mathematical models of the system being researched are presented and the simulation of the researched system is fulfilled.

In the third section vibrations of comparator elements and of environment are researched.

In the fourth section the methodic of evaluation of measurement system discrepancy.

In the fifth section the methodic of definition of the budget sand, propagated by vibration action, is presented.

The results of thesis were announced in 11 conferences. There were also printed 15 scientific papers, three of which are referred by Thomson ISI database, two papers are published in conference proceedings by ISI database, three – are quoted in Inspec database, two – are quoted in Ebsco database, one is printed in reviewed international journal, two papers are published in reviewed conference proceedings and two papers are published in other conference proceedings.

Turinys

ĮVADAS	1
Tiriamoji problema	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodai	4
Mokslinis darbo naujumas ir jo reikšmė	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	6
Padėkos žodis	6
1. ILGIO KALIBRAVIMO SISTEMOS IR JŲ PAKLAIDOS	7
1.1. Ilgio kalibravimo sistemos	7
1.2. Ilgio kalibravimo sistemų paklaidų analizė	19
1.3. Kalibravimo neapibrėžties vertinimo metodika	25
1.4. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimas	32
1.5. Tyrimo uždaviniai ir galimų sprendimo kelių analizė	39

2. ILGIO MATAVIMO KOMPARATORIAUS DINAMINIAI TYRIMAI	41
2.1. Ilgio matavimo komparatoriaus dinaminis modelis.....	41
2.2. Modeliavimo rezultatai.....	55
2.3. Antrojo skyriaus išvados	61
3. EKSPERIMENTINIAI ILGIO MATAVIMO KOMPARATORIAUS DINAMIKOS TYRIMAI.....	63
3.1. Komparatoriaus virpesius žadinantys pamato virpesiai.....	66
3.2. Komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios virpesiai.....	68
3.3. Karietėlės virpesiai ir judesio tolygumas.....	69
3.4. Būdingų karietėlės taškų virpesiai, veikiant smūginiam virpesių žaditimui	78
3.5. Karietėlės konstrukcijos ir pavaros įtaka sistemos dinaminėms charakteristikoms.....	83
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	87
4. VIRPESIŲ MATAVIMO REZULTATŲ NEAPIBRĖŽTIES VERTINIMAS.....	89
4.1. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis	89
4.2. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimo modelio tyrimas.....	95
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados	97
5. KALIBRAVIMO PAKLAIDŲ, ATSIKANDANČIŲ DĖL VIRPESIŲ POVEIKIO, TYRIMAS	99
5.1. Virpesių įtaka kalibravimo tikslumui	99
5.2. Kalibravimo paklaidų, priklausančių nuo virpesių poveikio, nustatymas	1077
5.3. Penktojo skyriaus išvada	110
APIBENDRINTOS IŠVADOS	111
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	113
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	117
PRIEDAI	119
A priedas. Eksperimentinių tyrimų rezultatai.....	119
B priedas. Lietuvos mokslų akademijos 2008 metų jaunujų mokslininkų mokslinių darbų premijos laureto diplomas.....	129

Contents

INTRODUCTION	1
Topicality of problem	1
Actuality of the work	2
The object of the research	3
Aim of the work	3
Tasks of the work	4
Methodology of research	4
Scientific novelty	4
Practical value of work results	5
Defended propositions	5
Approbation of work results	5
Structure and contents of the work	6
Acknowledgments	6
1. LENGTH CALIBRATION SYSTEMS AND THEIR ERRORS	7
1.1. Length calibration systems	7
1.2. The analysis of errors of length calibration systems	19
1.3. The evaluation methodology of the calibrations uncertainty	25
1.4. Evaluation of the uncertainty of vibration measurement results	32
1.5. Tasks of the work and analysis of possible solutions	39

2. RESEARCH OF DYNAMICS OF THE LINE SCALE COMPARATOR...	41
2.1. Dynamic model of the length measuring comparator.....	41
2.2. Results of the simulation	55
2.3. Conclusions of of 2 nd chapter.....	61
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF LINE SCALE COMPARATOR DYNAMICS	63
3.1. Vibrations of the foundation exciting vibrations of the comparator	66
3.2. Vibrations of the comparator base – granite guide way	68
3.3. Vibrations of the carriage and the motion evenness.....	69
3.4. Vibrations of characteristic points of the carriage under impact type excitations.....	78
3.5. The influence of the carriage stucture and the drive to dynamic characteristics of the system	83
3.6. Conclusions of 3 rd chapter	87
4. EVALUATION OF THE UNCERTAINTY OF RESULTS OF VIBRATION MEASUREMENTS	89
4.1. Uncertainty of results of vibration measurements	89
4.2. Research of the model of evaluation of the uncertainty of vibration measurement results	95
4.3. Conclusions of 4 th chapter	97
5. RESEARCH OF CALIBRATION ERRORS, ARISING DUE TO VIBRATIONS.....	99
5.1. The influence of vibrations to the calibration accuracy.....	99
5.2. Determination of calibration errors, arising due to vibration	107
5.3. Conclusions of 5 th chapter	110
GENERAL CONCLUSIONS.....	111
REFERENCES	113
LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	117
APPENDIXES.....	119
Appendix A. Results of experimental researches	119
Appendix B. Diploma of Lithuanian Academy of Sciences of the winner between young scientists of scientific works 2008	129

Įvadas

Tiriamoji problema

Aukštųjų technologijų pažanga kelia vis aukštesnius ilgio matavimo tikslumo, o taip pat matavimo keitlių kalibravimo reikalavimus.

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

Tikslumo tyrimuose padaryta didelė pažanga, tačiau precizinės sistemos dažnai yra per daug sudėtingos ir skirtingos, todėl sunku ar beveik neįmanoma perkelti ir pritaikyti joms šių tyrimų pasiekimus tiesiogiai, tokių sistemų kūrimas ir tobulinimas turi remtis tyrimais specifinėje darbo aplinkoje. Kalibravimo neapibrėžties sandara yra individuali ilgio komparatoriaus charakteristika, nustatoma atlikus išsamų jos sandų tyrimą konkrečiose matavimo sąlygose.

Vienas pagrindinių tokių sistemų projektavimo kriterijų yra paklaidų biudžetas (sandara), kuris apsprendžia, kokio dydžio paklaidos (ar neapibrėžtys) gali būti toleruojamos kiekvienoje sistemos kūrimo, gamybos ar eksploatavimo

stadijoje. Paklaidas siekiama ne minimizuoti, o padaryti jas valdomomis ir kontroliuoti jų poveikį – t. y. ištirti dominuojančias paklaidas, jų valdymo (kompensavimo) galimybes, o taip pat įvertinti šių paklaidų įtaką kalibravimo paklaidų (neapibrėžties) biudžetui.

Todėl precizinės mašinos kuriamos, remiantis tiksliosios inžinerijos principais, įvirtinančiais savitą požiūrį į tokių sistemų sintezę (Rolt 1929, Moore 1970, Evans 1989, Slocum 1992). Jų žinojimas ir tinkamas pritaikymas konkrečiam atvejui reikalauja sisteminio srities problemų supratimo, gilių žinių, gebėjimo kritiškai analizuoti, vertinti ir sintezuoti naujas kompleksines idėjas. Jis yra esminis, norint racionaliai suderinti prieštarigus pakankamo sistemų tikslumo, našumo (greitaveikos) ir minimalių sąnaudų reikalavimus.

Tikslaus ir greito brūkšnių ilgio matų padalų detektavimo problemos aktualumą ir sprendimo būtinybę pirmiausia sąlygoja sparčiai didėjantys precizinių skalių kalibravimo našumo poreikiai (Nanoscience 2004, Evolving 2003, Swyt 2001). Naujoms precizinių skalių gamybos ir jų matavimo sistemoms keliami žymiai aukštesni tikslumo ir efektyvumo reikalavimai (Swt 2001, Webb 2004, Bosse 2001), siekiama, kad precizinių gaminamų skalių tikslumo parametrai būtų metrologiškai susieti gamybos metu technologinėje linijoje. Šiuos naujus sunkiai įgyvendinamus poreikius galima patenkinti tik kuriant kokybiškai naujas sistemas, atliepančias šiuolaikinius mokslo ir technikos pasiekimus ir optimaliai tenkinančias specifinius reikalavimus, o taip pat tobulinant esamas sistemas, vadovaujantis fundamentaliais tiksliosios inžinerijos principais (Nakazava 1994).

Ilgio kalibravimo problemos plačiai tyrinėjamos daugelio pasaulio šalių mokslininkų. Daug nuveikė ir mūsų šalies universitetai (VGTU ir KTU) ir mokslininkai: V. Giniotis, A. Kasparaitis, S. Kaušinis, A. Šukys, S. V. Augutis ir R. Žilinskas.

Darbe pagrindinis dėmesys skirtas nustatyti aplinkos ir komparatoriaus elementų virpesių įtaką kalibravimo tikslumui dinamiame režime bei nustatyti, kokią paklaidų biudžeto dalį sudaro paklaida, atsirandanti dėl virpesių poveikio. Nors atliekami tyrimai taikomi specifinėms didelės eigos metrologiškai susieto brūkšnių matų komparatoriaus tikslumo uždaviniams spręsti, jų rezultatai turi platesnę taikomąją prasmę ir gali būti panaudoti kuriant ir kitos paskirties precazines sistemas, pasižyminčias kokybiškai naujomis savybėmis.

Darbo aktualumas

Didėjant brūkšnių ilgio matų kalibravimo tikslumo poreikiams vis didesnę įtaką įgauna virpesiai, jų poveikis. Norint įvertinti virpesių įtaką kalibravimo tikslumui reikia išspręsti eilę naujų mokslinių ir techninių uždavinių. Atliekant

virpesių matematinę analizę susiduriama su sudėtingo tiriamos sistemos analitinio modelio sudarymo, bei reikalingų skaičiavimams koeficientų nustatymo problemomis. Tam reikia atlikti kruopščią ilgio kalibravimo sistemų arba panašios sandaros matavimo priemonių analizę, nes dauguma skaičiavimuose naudojamų dydžių galima rasti tik atlikus eksperimentinius matavimus.

Virpesių matavimai plačiai taikomi įvertinant ar kontroliuojant matavimo sistemų, mašinų ar agregatų būklę. Matuojamojo parametro stebėjimas ir pokyčių laike vertinimas, imantis atitinkamų veiksmų pagal gautus rezultatus, padeda įvertinti ir pašalinti paklaidų šaltinius. Šias funkcijas atlieka virpesių matavimo sistemos. Šių atliekamų matavimų patikimumas priklauso nuo daugelio faktorių – stebimo objekto savybių, matavimo sistemos struktūros, aplinkos, kurioje dirba prietaisais. Virpesių matavimo sistemos patikimumas, suprantamas kaip klaidingo sprendimo priėmimo tikimybė, kurią būtina minimizuoti. Tai pasiekama, analizuojant patikimumą įtakojančius veiksniai.

Šiuolaikinio mokslo pasiekimai ir technikos pažanga įgalina atlikti ilgio matavimus nanometriniame lygmenyje, todėl kokybinis ir kiekybinis precizinio ilgio atskaitos proceso determinantams aprašyti naudojami sudėtingi matematiniai modeliai ir skaitiniai metodai.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas yra ilgio matavimo mechatroninis komparatorius. Kad būtų iširtas virpesių poveikis reikia išnagrinėti:

1. Komparatoriaus dinamines paklaidas.
2. Precizinio ilgio matavimo komparatoriaus sistemos dinaminių ir matematinių modelių sprendimo metodus.
3. Virpesių matavimo rezultatų patikimumo nustatymo metodus.
4. Precizinio ilgio matavimo komparatoriaus paklaidos sando, atsirandančio dėl virpesių poveikio, nustatymo metodą.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas sukurti precizinio komparatoriaus dinaminių paklaidų tyrimo metodiką ir iširti virpesių įtaką komparatoriaus kalibravimo tikslumui su paklaidų ir neapibrėžčių įverčiais.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Remiantis mokslinė-technine literatūra susisteminti šios srities žinias.
2. Sudaryti precizinio ilgio matavimo komparatoriaus sistemos dinامينius ir matematinius modelius ir atlikti sistemos modeliavimą remiantis eksperimentiškai surastais koeficientais.
3. Išanalizuoti būdingas dinamines paklaidas, atsirandančias dėl virpesių poveikio, ir numatyti šių paklaidų įtakos kompensavimo galimybes bei eksperimentiškai ištirti virpesių įtaką matavimo rezultatui, esant skirtingiems matavimo greičiams, sukeltai sistemai išorinį žadinimą ir išmatuoti virpesius kalibravimo metu siekiant nustatyti priklausomybę tarp virpesių ir kalibravimo tikslumo.
4. Sudaryti dinaminų paklaidų ir virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo metodiką.

Tyrimų metodai

Darbe atlikti teoriniai tyrimai pagrįsti teorinės mechanikos, virpesių teorijos ir matavimų teorijos principais, pritaikant analitinius, empirinius ir skaitinius tyrimo metodus, panaudojant programinę įrangą „*Matlab*“, „*Pulse*“ ir „*Origin*“. Pagrindiniai statistiniai skaičiavimai buvo atlikti naudojant statistinius paketus „*Microsoft Excel*“ ir „*Origin*“.

Eksperimentinę medžiagą sudaro virpesių matavimo sistemų duomenys. Eksperimentai buvo atlikti UAB Metrology Precizika precizinio brūkšnių matų komparatoriaus laboratorijoje. Virpesių parametrų matavimui buvo panaudotos Danijos firmos „*Brüel & Kjær*“ ir „*Hottiger*“ matavimo priemonės.

Mokslinis darbo naujumas ir jo reikšmė

Rengiant disertaciją buvo gauti šie inžinerijos mokslui nauji matavimo rezultatai:

1. Sukurta komparatoriaus dinaminų paklaidų tyrimo metodika ir nustatyti dinaminų paklaidų atsiradimo dėsninumai, įgalinantys kompleksiskai (taikant analitinius, inžinerinius ir fizinius modelius) nagrinėti precizinių sistemų paklaidas, atsirandančias dėl virpesių poveikio.
2. Nustatyta žadinimo ir dinaminės sistemos parametrų įtaka kalibravimo paklaidoms.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Atlikus literatūros šaltinių, teorinių ir fizinių modelių tyrimus, o taip pat ištyrus šiuolaikinių aukštųjų technologijų teikiamas galimybes, nustatytos komparatoriaus būdingos paklaidos, atsirandančios dėl virpesių poveikio, sąlygojamos daugelio fizikinių reiškinių:

- Aplinkos virpesių šaltiniai.
- Komparatoriaus elementų virpesių šaltiniai.

Gauti duomenys panaudoti virpesių matavimo rezultato neapibrėžčiai įvertinti bei dėl virpesių poveikio atsirandančiai paklaidai nustatyti.

Tyrimo rezultatai panaudoti komparatoriaus konstrukcijai tobulinti.

Ginamieji teiginiai

1. Komparatoriaus dinaminė paklaidų tyrimo metodika.
2. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo metodika.
3. Virpesių įtakos komparatoriaus kalibravimo tikslumui su paklaidų ir neapibrėžčių įverčiais nustatymo metodika.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinta 15 mokslinių straipsnių: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI Web of Science sąrašą; trys – mokslo žurnaluose, cituojamuose INSPEC duomenų bazėje, du – mokslo žurnaluose, cituojamuose EBSCO duomenų bazėje, vienas – recenzuojamame tarptautiniame mokslo žurnale; keturi – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų medžiagose, du – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti vienuolikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, Vilniuje, 2005–2007 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „Mechanika 2006“, Kaune, 2006 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „KOD 2006“, Palič, Serbia-Montenegro, 2006 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „Vibration Measurements by Laser Techniques“, Ancona, Italijoje, 2006 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „Matavimai, diagnostika, metrologija“, Birštone, 2007 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“, Kaune, 2007 m., ir Bialystok, Lenkijoje, 2008 m.

Tarptautinėje konferencijoje „*Materials, Methods and Technologies*“, Sunny Beach Resort, Bulgarijoje, 2008 m.

Tarptautinėje konferencijoje „*Vibroengineering 2008*“, Kaune, 2008 m.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas ir penki skyriai bei rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis yra 135 puslapiai, neskaitant priedų. Tekste panaudotos 86 numeruotos formulės, 77 paveikslai ir 28 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 70 literatūros šaltinių.

Padėkos žodis

Pirmiausiai norėčiau padėkoti mano mokslinio darbo vadovui Vilniaus Gedimino technikos universiteto mašinų gamybos katedros profesoriui bei vibroakustinių tyrimų ir diagnostikos mokslo laboratorijos vedėjui Vladui Vekteriui, kuris paskatino mane pasirinkti labai įdomią matavimų mokslo sritį. Ypač vertinu paramą ir pagalbą doktorantūros studijų metu, patarimus ir vertingas pastabas rengiant disertacinį darbą bei už suteiktą galimybę naudotis visomis turimomis virpesių matavimo priemonėmis.

Taip pat norėčiau padėkoti mano mokslinio darbo konsultantui profesoriui Albinui Kasparaičiui ir UAB Precizika Metrology už sudarytas sąlygas dirbti su pažangiausia matavimų įranga, atlikti svarbius eksperimentinius tyrimus, kurie buvo panaudoti ruošiant disertaciją.

Dėkoju Vilniaus Gedimino technikos universiteto mašinų gamybos katedrai bei jos vedėjui docentui Mindaugui Jurevičiui už pagalbą atliekant eksperimentinius matavimus ir patarimus rengiant darbą.

Ačiū tariau ir draugams, kurie suprato mano norus ir kiek galėjo padėjo. Norėčiau padėkoti ir savo mylimai draugei, kuri buvo šalia.

Šią disertaciją norėčiau skirti savo mamai Jadvygai Kilikevičienei (1947–2005), kurios netekau pirmaisiais doktorantūros metais. Tikiuosi, Ji mane mato ir didžiuojasi.

Taigi dar kartą labai ačiū visiems prisidėjusiems prie darbo rašymo.

Ilgio kalibravimo sistemos ir jų paklaidos

Skyriuje analizuojamos ilgio matų kalibravimo sistemos ir jų paklaidos, atlikta kalibravimo neapibrėžties vertinimo metodikos apžvalga bei atliktas virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimas.

1.1. Ilgio kalibravimo sistemos

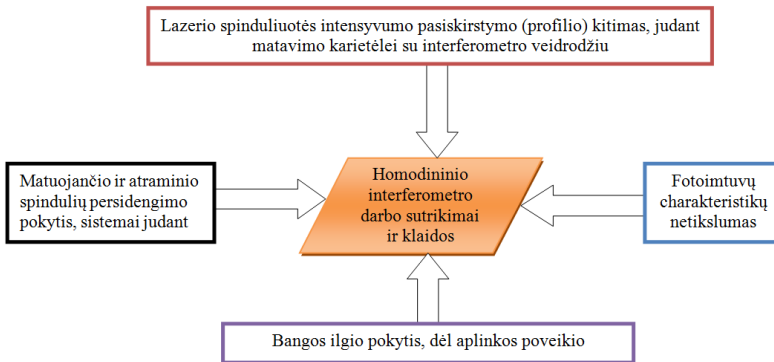
Precizinių brūkšinių matų kalibravimo sistemų, naudojamų nacionaliniuose metrologijos instituteuose bei pramonės įmonėse, struktūros, konstrukcijos, interferometrai, brūkšnio detektavimo sistemų tipai bei schemos, o taipogi aplinkos sąlygų kompensavimo metodai yra skirtingi, todėl jų matavimo galimybės taip pat nevienodos.

Paprastai ilgio vienetas atgaminamas panaudojant molekulinio jodo absorbcija stabilizuoto He–Ne lazerio spindulio bangos ilgį arba vieną iš 8 optinių dažnio etalonų, nustatytų CIPM bei skirtų praktiniam naudojimui ilgio vieneto etalonuose (Quinn 1994, Metrologia 1986). Todėl tiksliais brūkšniniais ilgio matams kalibruoti ir susieti su pirminiu ilgio vieneto etalonu dažniausiai taikomi optiniai komparatoriai tiek su judžia brūkšnio detektavimo sistema, tiek su judžia kalibruojama skale. Tiksliam šių judžių dalių poslinkių matavimui naudojamos lazerinių interferometrų matavimo sistemos.

Kuriant precizines mašinas, sudarančias aukštųjų technologijų techninę bazę, esminė siekiama naujos sistemos savybė yra jos tikslumas. Sparti technologijų, pirmiausia mikro ir nanotechnologijų pažanga kelia vis aukštesnius tikslumo, našumo ir kitus reikalavimus precizinėms mechatroninėms sistemoms, tuo pačiu skatindamos kurti kokybiškai naujas ir tobulinti esamas mašinas ir prietaisus. Tačiau tik gerai suprantant paklaidų fiziką, atlikus gilius ir išsamius tikslumo tyrimus, galima pagrįsti tokių sistemų tobulinimo kryptis ir sudaryti bandymo metodologijas. Be to, reikia nemažai pastangų ir techninių inovacijų tam, kad, atsiliepiant į mokslo ir technologijų pažangą, būtų sukurtos kokybiškai naujos sistemos, gebančios derinti prieštaringus tikslumo ir našumo reikalavimus darbo aplinkoje, artimoje gamybinei.

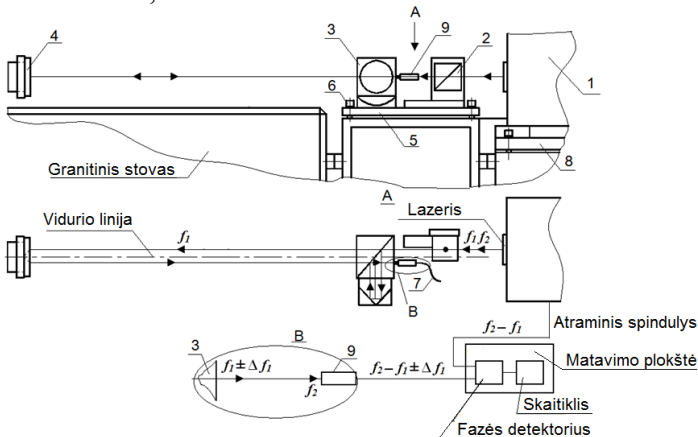
Poslinkio matavimo sistemos. Kadangi praktinis metro realizavimas yra susijęs su stabilizuoto dažnio lazerio spinduliuote, preciziniams ir metrologiškai susietiems ilgio matavimams plačiausiai naudojami lazeriniai interferometrai. Šiuo metu poslinkio matavimuose dažniausiai naudojami dviejų tipų interferometrai: homodininiai ir heterodininiai (<http://www.microscopyu.com> 2006, Wu 1996). Homodininiai interferometrai naudoja vieno dažnio lazerius, o heterodininiai – dviejų dažnių lazerius. Nors heterodininiams interferometrams būdingos didesnės tiesiškumo paklaidos, tačiau didelis signalo santykis su triukšmu bei patogios jų suderinimo su optine sistema galimybės lemia tai, jog dauguma komercinių interferometrų naudoja heterodininę metodiką. Svarbiausi parametrai, lemiantys interferometrinių poslinkio matavimo sistemų kokybę, yra (Bobroff 1993): skyra, matavimo tikslumas, rezultatų pakartojamumas, dinaminis bei matavimų diapazonas, matavimo greitis.

Poslinkių matavimo interferometruose (PMI) judžios dalies poslinkis nustatomas pagal spindulio intensyvumo pokytį, o judesio krypčiai nustatyti naudojami kvadratūriniai signalai. Homodininiuose PMI judesio krypčiai nustatyti išėjimo signalas nepoliarizuojančiame spindulio daliklyje padalinamas į dvi dalis. Viena dalis lieka nepakeista, o kita uždelsiama, panaudojant ketvirčio bangos ilgio plokštelę. Taip suformuojami poliarizuoti spinduliai ir jiems atitinkantys kvadratūriniai signalai, kurių fazės skiriasi 1/4 bangos ilgio. Šie signalai įgalina nustatyti judesio kryptį. Kadangi homodininis interferometras matuoja intensyvumo pokyčius, poslinkio signalą galima suformuoti tik sistemai judant. Sistema jautri lazerio spinduliuotės intensyvumo ir fotoimtuvų atsako pokyčiams. Kadangi homodininis interferometras nustato intensyvumo pokyčius, darbo sutrikimai ir klaidos (1.1 pav.) gali atsirasti dėl lazerio spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymo (profilio) kitimo, judant matavimo kariatėlei su interferometro veidrodžiu; matuojančio ir atraminio spindulių persidengimo pokyčio sistemai judant; fotoimtuvų charakteristikų netikslumo (Wu 1996, Bobroff 1993, Precizinių 2007).



1.1 pav. Homodininio interferometro darbo sutrikimų ir klaidų atsiradimo priežastis
Fig. 1.1. Reasons of disappear of the work confusion and errors of the Homodyne interferometer

Heterodininiuose interferometruose (1.2 pav.) naudojamas dviejų dažnių spinduliuotės šaltinis. Judžios dalies poslinkis nustatomas pagal atraminio ir matavimo spindulių fazių pokytį. 1.2 paveiksle pavaizduota karietės poslinkių matavimo lazerinių prietaisų išdėstymo schema ir dviejų dažnių lazerio interferometro principinė schema: 1 – lazerio prietaisai, 2 – 50 % spindulio daliklis, 3 – interferometras, 4 – karietės atspindžio veidrodis (judantis), 5 – reguliuojamasis staliukas, 6 – reguliavimo sraigtelis, 7 – šviesolaidis, 8 – reguliuojamas staliukas, 9 – fotoimtuvas.



1.2 pav. Karietės poslinkių matavimo ir lazerinių prietaisų išdėstymo schema, ir dviejų dažnių lazerio interferometro principinė schema
Fig. 1.2. The schemes of measurement of the carriage displacement and laser devices, and principle scheme of the two-frequency laser interferometer

Tipinėje heterodininėje sistemoje (Jakštas 2007) lazerio spindulys išskaidomas į matuojantįjį ir atraminį. Parodytoje schemoje viena dažnio dedamoji f_1 naudojama matavimui, ji atsispindi nuo judžiojo veidrodžio. Antroji dažnio dedamoji f_2 atsispindi nuo fiksuoto veidrodžio. Interferencinis signalas patenka į fotoimtuvą. Jei judusis veidrodis stovi, optinio interferencinio signalo dažnis (mūšos dažnis) tiksliai atitinka lazerio dažnių skirtumą $f_2 - f_1$. Jei šis veidrodis juda, optinio interferencinio signalo dažnis (priklausomai nuo judesio krypties) padidėja ar sumažėja; $f = f_1 \pm \Delta f_1$.

Signalą detektuojant, nežinomo dažnio matavimo signalo fazė diskrečiais laiko intervalais palyginama su žinomo dažnio atraminio signalo faze. Fazės pokytis nusako dažnį, kurį apsprendžia Doplerio efektas dėl matuojamo objekto judesio. Fotoimtuvas šį poslinkį pakeičia elektriniu signalu, kurio dažnis:

$$f = f_2 - (f_1 \pm \Delta f_1). \quad (1.1)$$

Interferometre naudojamas stabilizuotas dviejų ortogonaliai poliarizuotų dažnių He–Ne lazeris. Jiems sudaryti naudojamas Zeemano efektas, arba akustinis optinis modulatorius. Naudojant Zeeman'o efektą, besiskiriantieji spinduliuotės dažniai sudaromi, patalpinant lazerio vamzdelį į ašinį magnetinį lauką. Dėl to išeinančio iš lazerio spindulyje susidaro dviejų priešingomis kryptimis poliarizuotų skirtingų dažnių spinduliuotė. Sukuriamas spinduliuotės dažnių skirtumas neviršija 4 MHz, be to reikalingi pakankamai galingi magnetai. Taikant akustinius optinius modulatorius, dažnių skirtumui sudaryti dažnai naudojama Brego gardelė; dažnių skirtumas siekia 20 MHz, tačiau naudojant šį būdą atsiranda nesutapimai tarp matavimo ir atraminųjų spindulių, kurie turi būti koreguojami, o naudojant dvigubos modos lazerius, turinčius ypač didelius mūšos dažnius (iki 1 GHz) reikalinga labai specifinė ir brangi elektronika (Chapman 2002).

Nors He–Ne yra dažniausiai naudojami lazerių tipai, ilgio kalibravimo sistemose naudojami ir jodu stabilizuoti Nd–Yag lazeriniai interferometrai, kurių spinduliuojamos bangos ilgis $\lambda = 532$ nm, o optinė galia – 20 mW. Lazerio bangos ilgio trumpalaikis stabilumas yra 2×10^{-13} eilės dydis ir pranoksta He–Ne lazerių charakteristikas (Precizinių 2008).

Pagrindinis heterodininųjų sistemų pranašumas prieš homodininines yra tas, kad informacija apie matuojamąjį poslinkį gaunama kintamo signalo pavidalu. Todėl matavimo grandinės nejautrios signalų nuolatinio lygio svyravimams. Todėl matavimo rezultatai yra stabilesni ir ne tiek jautrūs trikdžiams (oro turbulencijai, elektriniams triukšmams, šviesos trikdžiams). Kadangi informaciją apie sistemos judesį suteikia signalo dažnis, vienos koordinatės judesio matavimui pakanka vieno fotoimtuvo. Dėl to sumažėja reikalavimai optinių

elementų tarpusavio padėties nustatymui ir fotoimtuvų stiprinimo bei slinkties charakteristikoms, o taip pat supaprastėja sistemos derinimas. Tačiau, atliekant precizinius matavimus, atsiranda interpoliavimo schemas netiesiškumo paklaidos.

Interferometrų skyrą apsprendžia minimalus detektuojamas judančio interferometro reflektoriaus poslinkis, kuris labiausia priklauso nuo optinio interferencijos signalo fazės detektavimo tikslumo. Pastaraisiais dešimtmečiais, itin sparčiai vystantis informacinėms technologijoms bei elektronikai, interferometrų skyra, kuri 1965 m. siekė $\lambda/8$, gerokai padidėjo. Naudojant pažangiausią elektroniką, kuri įgalina suskaidyti lazerio bangos ilgį į 2048 dalis, skyra siekia $\lambda/2048$, o naudojant tradicines fazės matavimo metodikas (Bobroff 1993), poslinkį matuojančių interferometrų skyra sudaro 0,1–10 nm. Šiuo metu jau esama komercinių fazės matavimo įrenginių, kuriuose atliekamas skaitmeninis signalų apdorojimas, ir signalo fazę jais galima matuoti $0,01^\circ$ tikslumu. Suderinus fazės matavimo sistemą su originalios konstrukcijos heterodininiu Michelson'o interferometru (Yim 2000), pasiekta geresnė negu 10 pm sistemos skyra iš tikrųjų atitinka ribinę fazės matavimo paklaidą $0,01^\circ$.

Daugelyje šiuolaikinės interferencinės metrologijos taikymo sričių, ypač litografijoje ir puslaidininkinės elektronikos gamybos procesuose, iškyla kita svarbi problema – poslinkio matavimo greičio padidinimas, išlaikant didelę skyrą, kadangi didinant matavimo greitį, skyra paprastai mažėja (Bobroff 1993). Pastaruoju metu šis uždavinys sprendžiamas, derinant dvi skirtingas (didelės skyros ir didelio matavimo greičio atveju) skaitmenines fazės matavimo metodikas. Tai leidžia padidinti poslinkio matavimo greitį iki 6 m/s, išlaikant 0,1 nm skyrą. Poslinkio matavimo greitį, kuris lygus judančio heterodininiame interferometre reflektoriaus greičiui, galima nustatyti iš lazerio spindulio, atsispindėjusio nuo šio reflektoriaus, dažnio pokyčio dėl Doplerio efekto:

$$\Delta f(t) = \frac{2 \cdot n \cdot v(t)}{\lambda_v}, \quad (1.2)$$

čia $v(t)$ – judančio objekto greitis.

Suintegravę šią lygtį laiko t atžvilgiu, gauname fazės pokytį tarp šviesos spindulių, nuėjusių interferometre skirtingus optinius kelius:

$$\Phi(t) = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot L(t)}{\lambda_v}, \quad (1.3)$$

čia $L(t)$ yra matuojamas reflektoriaus poslinkis.

Todėl objektui judant 1 m/s greičiu, dažnio poslinkis $\Delta f(t) = 3,2$ MHz., esant oro lūžio rodikliui $n=1$ ir lazerio bangos ilgiui vakuume $\lambda_v = 633$ nm. Kadangi iš heterodininio interferometro išėjusio matuojamojo signalo I_m dažnis

yra lygus ($\Delta\omega + 2\cdot\pi\cdot\Delta f$), kur $\Delta\omega$ yra mūšos dažnis, lygus lazerio modų dažnių skirtumui, o Δf yra Doplerio dažnio poslinkis, tai praktiškai maksimalus matavimo greitis yra apribojamas lazerio mūšos dažnio, kuris turi būti didesnis už Doplerio dažnio pokytį. Zeeman'o tipo He–Ne lazeriui $\Delta\omega$ yra maždaug 2 MHz, akustooptiniam moduliatoriui – 20 MHz, o stabilizuotiems dviejų modų lazeriams gali siekti 600–1000 MHz (Webb 2004). Naudojant lazerį, kurio modų dažniai skiriasi 600 MHz, maksimalus poslinkio matavimo greitis galėtų viršyti 200 m/s. Tačiau signalo dažnių juostos pločio didinimas blogina fazės matavimo skiriamąją gebą. Taip yra todėl, kad daugumoje fazės matavimo įrenginių fazės detektavimo diapazonas yra fiksuotas laiko atžvilgiu. Todėl fazės atskaitymų skaičius per vieną optinio signalo periodą, ekvivalentišką objekto poslinkiui mažėja dydžiu $\lambda/2$, didėjant detektuojamo signalo dažnių juostos pločiui.

Norint suderinti didelį poslinkio matavimo greitį ir didelį tikslumą, naudojama skaitmeninė fazės matavimo metodika ir dvi sistemos, įgyvendinančios didelės skyros bei didelio matavimo greičio atvejų fazių matavimo metodikas. Pirmoji sistema, naudojanti 2 kHz mūšos dažnį, matuoja optinio signalo fazę ir gali nustatyti mažus 0,1 nm dydžio poslinkius, kuomet objekto judėjimo greitis neviršija 0,67 mm/s. Antroji sistema, naudojanti 20 MHz mūšos dažnį, matuoja Doplerio poslinkio dažnį, kai objekto judėjimo greitis neviršija 6,7 m/s. Matavimo pradžioje ir gale, kol objekto judėjimo greitis mažas, abi sistemos veikia didelės skyros režime. Greičiui viršijus 0,67 mm/s ribą, didelės skyros fazės matavimo sistema išjungžiama, ir veikia tik didelio greičio moda. Taip sinchroniškai derinant dvi modas, poslinkio matavimo greitis padidinamas iki 6 m/s, išlaikant 0,1 nm skyrą (Yim 2000).

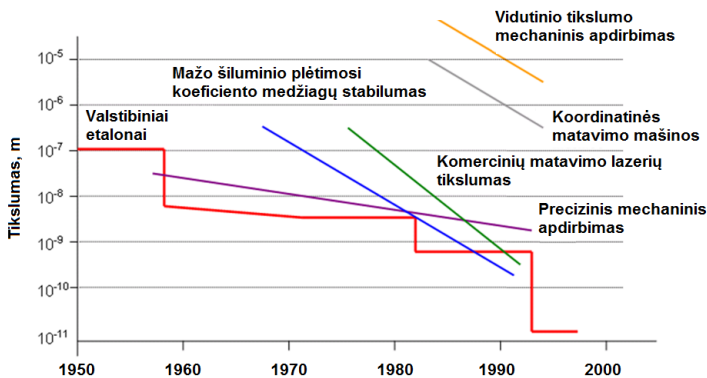
Taigi, tiesinė matavimų skalė, o taip pat tiksli aplinkos sąlygų kontrolė bei stabilizavimas yra pagrindiniai šiuolaikinių interferometrinių poslinkio matavimo metodų tikslumo kriterijai. Naudojant modernias skaitmenines duomenų apdorojimo technologijas, interferometrų netiesiškumo paklaidas bei skyrą galima sumažinti iki 10 pm (Bobroff 1993). Norint pasiekti daugelyje praktinių atvejų reikalingą santykinę ilgio matavimo neapibrėžtį, mažesnę negu 10^{-7} , oro lūžio rodiklio matavimo tikslumas turi būti ne mažesnis negu 10^{-8} .

Linijinių skalių kalibravimo sistemos. Ilgio matavimo komparatoriaus tobulinimo galimybes galima įvertinti, remiantis dvylikos šalių, dalyvavusių linijinių skalių kalibravimo palyginimuose NANO–3 (2003 m.), programos ataskaitoje pateiktais detaliais duomenimis apie matavimo duomenų neapibrėžties sandų reikšmes. Šių duomenų analizė rodo, kad nuo ilgio nepriklausantys neapibrėžties sandai, lemiantys pasikartojamumo paklaidos dydį, gali būti sumažinti, padidinant kalibruojamos linijos vaizdo fokusavimo tikslumą, jos detektavimo sistemos skyrą, kompensuojant atsitiktinių geometrinių, temperatūrinių ir kt. paklaidų įtaką. Nuo ilgio priklausantiems

sandams sumažinti sugriežtinamos tolerancijos paveikiesiems dydžiams, ypač aplinkos sąlygoms, arba naudojami brangūs vakuuminiai komparatoriai.

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

Sparti aukštųjų technologijų pažanga kelia vis aukštesnius ilgio ir poslinkių matavimų tikslumo, greičio ir kt. reikalavimus. Kokybei tampant marketabilia, naujų matavimo priemonių sukūrimas ir jų matavimo galimybių pagerinimas duoda tiesioginę naudą pramonei ir verslui, įgalindamas įsiskverbti į sritis, kurios anksčiau buvo neprieinamos dėl ribotų matavimo galimybių. Aukščiausius reikalavimus susietai ilgio metrologijai pateikia puslaidininkių pramonė, kur kritinius matmenis jau dabar reikia nustatyti nanometru ar net jų dalių tikslumu. Ilgio kalibravimo tikslumo poreikių augimą gerai iliustruoja 1.3 paveiksle (Precizinių 2007).

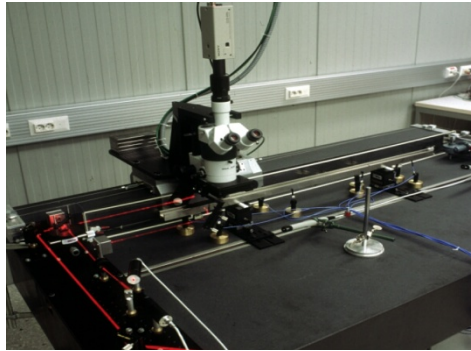


1.3 pav. Ilgio etalonų tikslumo ir pramonės techninių galimybių raida

Fig. 1.3. Development of accuracy of length standards and technical opportunities of industry

Todėl tiek nacionaliniai metrologijos institutai, tiek pramonės firmos vykdo plačias tyrimų programas, kurių tikslas – sukurti ir laiku pateikti vartotojams ilgio matavimo metodus ir priemones, įgalinančias, atsiliepiant į susietosios metrologijos poreikius, palaikyti pramonės konkurencingumą, prekybą ir inovacijas, užtikrinti gamybos procesų valdymą nuo mikro iki makroskalės. Suomija puikiai pasirodė NANO–3 programoje. 2005 metais įrengė naujas šiuolaikines nacionalinio matavimo instituto (NMI) MIKES laboratorijas.

Suomijos NMI linijinių skalių komparatoriuje panaudotas fotoelektrinismikroskopas su CCD kamera, dirbantis dinamiame režime, parodytas 1.4 paveiksle (Precizinių 2007). Jame panaudota nespaltoto vaizdo Sony SSC-350CE CCD kamera. CCD matricoje talpinamas vaizdas $0,2 \times 0,2$ mm. Matricos eilučių žingsnis atitinka 554 nm atstumui skalės paviršiuje. Kamera duoda du vaizdo laukus, pakraunamus per 1 ms. Kitas laukas gaunamas po 20 ms. CCD kameros jautris pakankamas gauti ryškiam linijos vaizdui, esant 1/1000 s eksponavimo laikui.



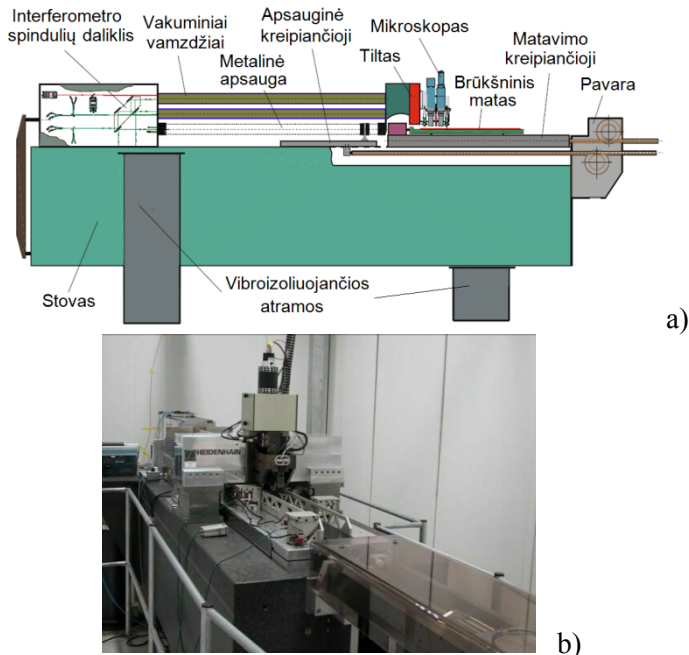
1.4 pav. Suomijos NMI interferometrinis komparatorius su fotoelektriniu mikroskopu ir CCD kamera

Fig. 1.4. Interferometrical comparator with photoelectric microscope and with CCD camera of Finland National Measurement Institute

Matavimo procesą valdo centrinis kompiuteris. Atstumas tarp įvairių brūkšnių padėčių gali būti išmatuotas automatiškai, kai atstumas tarp gretimų matuojamų brūkšnių yra nuo 1 mm iki 1000 mm. Taipogi gali būti nustatytas kartotinių matavimų skaičius nuo 1 iki 20. Visi duomenys yra registruojami mikroskopo kariatėlei judant. Kariatėlės greitis, kai mikroskopas yra virš brūkšnio, yra apie 0,2 mm/s, tačiau gali būti padidintas iki 2 mm/s, kai kariatėlė juda nuo vieno iki kito brūkšnio. Paruošiamojo matavimo metu, kompiuterinė programa nukreipia mikroskopą link apytiksliai žinomos brūkšnio padėties bei analizuoja CCD kameros atskirų vaizdo elementų intensyvumą sumą. Kai ši suma pasiekia tam tikrą lygį, laikoma, jog tai yra tikroji brūkšnio padėtis ir atskaitomi interferometro parodymai bei apskaičiuojama apytikslė brūkšnio padėtis. Sekančio skalės matavimo metu programa seka interferometro parodymus ir, kai jis atsiduria netoli brūkšnio pozicijos, kuri buvo užfiksuota paruošiamojo matavimo metu, programa išsaugo esamą skaitiklio reikšmę, pradeda interferencinio ir trikampio signalų konvertavimą iš analoginių į skaitmeninius bei nurodo kadro griebikliui iš CCD kameros paimti du vaizdo

puskadrius. Toliau tokiu pat principu yra surenkami duomenys bei apskaičiuojamas šviesos lūžio rodiklis ore kiekvienai gradavimo linijai.

Metrologinės programos ilgio matavimo srityje nuolat vykdomos JAV, Japonijoje, Anglijoje, Vokietijoje. Programos padeda sukurti metrologinę infrastruktūrą, didinančią pramonės konkurencingumą, palaikančią inovacijas pramonėje ir gerinančią gamybos procesų ir kokybės valdymą. Pvz., sisteminiai vakuuminio nanokomparatoriaus tikslumo tyrimai, atlikti Vokietijos nacionaliniame metrologijos institute (PTB) 2000–2006 metais, leido sumažinti matavimų pasikartojamumo paklaidą nuo 14 iki 0,2 nm. JAV nacionaliniame metrologijos institute (NIST) kuriamas naujos kartos ilgio komparatorius, kurio matuojamasis ruožas $1 \times 10^{-7} \text{ m} \leq L \leq 1 \text{ m}$, o atitinkama kalibravimo neapibrėžtis – nuo 1 iki 10 nm (Beers 1999). PTB nanokomparatorius (1.5 pav.) plačiai aprašytas (Precizinių 2007, Flügge 1999, Flügge 2001, Flügge 2003, Flügge 2005, Bosse 2003). Mechaninę dalį sudaro masyvus granito blokas, kurio masė apie 6000 kg. Stovo paviršių, naudojamų oro kreipiančiosioms, nuokrypiui nuo plokštumo neviršija 1 μm .

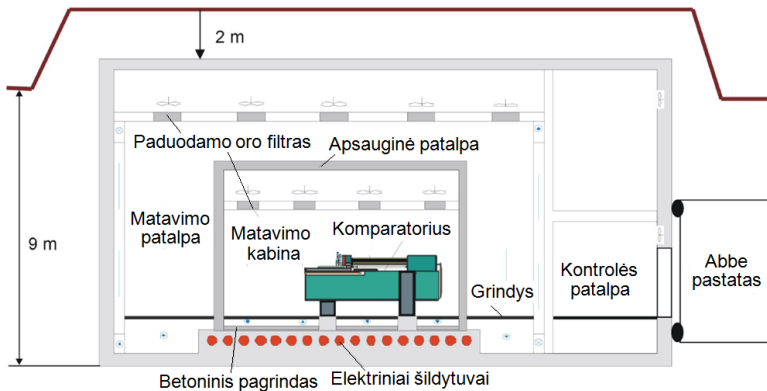


1.5 pav. PTB nanokomparatoriaus schema a) ir bendras vaizdas b)
Fig. 1.5. Scheme of the PTB Nanocomparator a) and general view (b)

Poslinkių matavimo interferometro spindulys sklinda vakuume. Karietėlė su matuojama skale perstumiama, panaudojant linijinį variklį, nuo kurio judesys

perduodamas anglies pluošto strypais. Matuojant variklio sukeliamas triukšmas neviršija 10 nm. Karietėlės padėtis vertikalia kryptimi tiksliai nustatoma, panaudojant pjėzovykdikius.

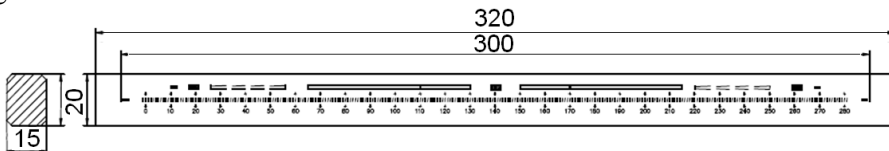
Komparatorius talpinamas specialiai įrengtoje patalpoje, įrengtoje 9 m po žeme, 1.6 paveiksle (Precizinių 2007). Matavimo kabina stovi ant betoninio pagrindo; komparatorius pastatytas ant spyruoklių. Temperatūros stabilumui užtikrinti matavimo patalpos sienos ir pati patalpa kondicionuojamos atskirai. Betoninis pagrindas gali būti šildomas, panaudojant elektrinius šildytuvus.



1.6 pav. Nanokomparatoriaus patalpos schema
Fig. 1.6. The scheme of the nanocomparators room

Komparatoriaus tikslumui nustatyti naudojamas precizinių linijinių skalių kalibravimas.

Dažniausia šiam tikslui PTB naudojama skalė parodyta 1.7 paveiksle. Pagrindinių padalų žingsnis 1 mm, linijos ilgis 1 mm, linijos plotis 4 μm , skalės ilgis 280 mm.



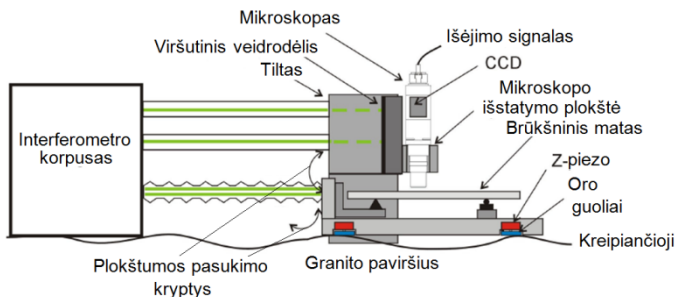
1.7 pav. Linijinė skalė, naudojama nanokomparatoriaus tikslumo tyrimuose
Fig. 1.7. Linear scale, used in researches of the nanocomparator accuracy

Pagrindinis iššūkis, su kuriuo susiduriama naudojant skales, kaip metrologiniuos etalonus, yra tikslus skalės padėties nustatymas. Skalės padėtis turi būti aiškiai reglamentuota ir tenkinti pakartojamumo reikalavimą. Norint pasiekti aukštą matavimo rezultatų pasikartojamumą, skalė kiekvieną kartą turi būti nustatoma identiškai. Jei matavimai, atlikti naudojant inkrementinį

poslinkių keitlį lyginami su lazerinio interferometro duomenimis, keitlis tvirtinamas specialiame invaro laikiklyje, leidžiančiame labai tiksliai nustatyti keitlio galvutės padėtį pagal 5 laisvės laipsnius.

Laikiklio paviršių lygiagretumas pagrindui ir skalės paviršiui, o taip pat tikslus atstumas nuo pagrindo iki skalės paviršiaus nustatomas, panaudojant poslinkių keitlį.

Inkrementinio keitlio skalė tvirtinama ant ritininių atramų, kurių aukštį galima tiksliai reguliuoti. Reguluojant matavimo kariatėlės padėtį pagal optinio atstumo matavimo keitlio signalus, skalės paviršius nustatomas lygiagrečiai granitinio stovo kreipiančiosioms. Labai tiksliai nustatoma skalės padėtis išilgai matavimo krypties bei atstumas tarp skalės paviršiaus ir mikroskopo. Matuojant 300 mm ilgio skales, šio atstumo svyravimas neviršija $0,3 \mu\text{m}$. Bendra skalės matavimo schema parodyta 1.8 paveiksle (Precizinių 2007).



1.8 pav. Bendra skalės nustatymo ir matavimo schema

Fig. 1.8. The common scale detection and measurement scheme

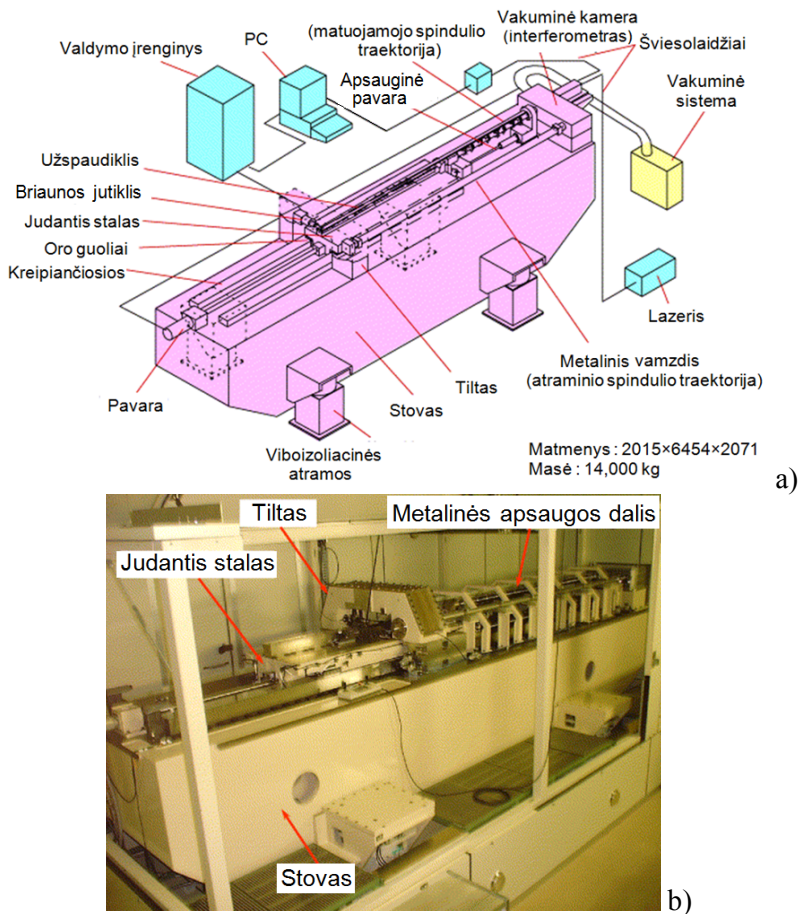
Nacionaliniame Prancūzijos metrologijos institute, skirtingai nei prieš tai minėtuose ilgio matų kalibravimo įrenginiuose, kalibravimo įrenginyje (LNE) naudojama riedėjimo sraigto ir veržlės pavara (1.9 pav.) (Precizinių 2007).



1.9 pav. LNE linijinių skalių komparatorius

Fig. 1.9. LNE line scale comparator

Pramoninės firmos taip pat vykdo intensyvius taikomouosius tyrimus ir tobulina ilgio matavimo sistemas. Japonijos firma „Mitutoyo“ yra sukūrusi vakuuminį komparatorių (1.10 pav.) brūkšniniais (iki 1,6 m ilgio) matams kalibruoti su neapibrėžtimi ≤ 40 nm/m (Sawabe 2004). Ji sukūrė inovatyvią greito linijos detektavimo sistemą, panaudojant fotoelektrinę mikroskopą su trimis analizuojančiais plyšiais, ir pasiekė dinaminio kalibravimo greitį 20 mm/s. Vokietijos firma Dr. Johannes Heidenhain GmbH taip pat kuria vakuuminį komparatorių brūkšniniais matams iki $L \leq 3$ m kalibruoti. Tačiau pramoninių firmų tyrimo rezultatai dažniausia neskelbiami arba pristatomi labai ribotai, o inovatyvūs sprendimai patentuojami.



1.10 pav. Principinė vakuuminio komparatoriaus schema a) ir bendras vaizdas b)
Fig. 1.10. The principal scheme (a) and general view (b) of the vacuum comparator

Lietuvoje taip pat labai svarbu padėti pramonei likti konkurencingai ir padidinti gamybos procesų efektyvumą, sukuriant matavimo infrastruktūrą, atitinkančią reikalavimus, kuriuos diktuoja inovatyvūs produktai.

Sukurtos ir ištytos priemonės patikimam ilgio matavimui, adaptuotos gamybinei aplinkai, įgalins įterpti susietą ilgio metrologiją į technologinius procesus. Patobulinta interferometrinio dinaminio poslinkių matavimo ir susieto ilgio matavimo metodologija ir technologija, o taip pat sukurtos šiuolaikinės aplinkos poveikių įtakos ir paklaidų kompensavimo priemonės palengvins veiksmingą tikslųjų matavimų uždavinių sprendimą ir kitose aukštųjų technologijų įmonėse, ypač priskirtinose precizinės mechatronikos kryptyse.

1.2. Ilgio kalibravimo sistemų paklaidų analizė

Projektuojant precizines mašinas esminis dalykas, sudarant mašinos paklaidų biudžetą, yra svarbiausių paklaidų, galinčių įtakoti mašinos tikslumą, identifikavimas ir įvertinimas. Šiuo atveju reikalinga praktinė patirtis bei žinios, kurios leistų numatyti galimas paklaidas, o taip pat teorinis modelis, apibūdinantis mechaninius ryšius sistemoje, pvz. ryšius tarp interferometro prizmės, judančio veidrodėlio ir matuojamo (kalibruojamo) objekto, kurie sudaro taip vadinamą matavimo grandinę. Bet koks matavimo grandinių geometrinių matmenų pokytis dėl šiluminio plėtimosi, deformacijų, kampinių paklaidų ar virpesių sukelia ilgio matavimo paklaidas. Konstruojant mašinas siekiama, kad matavimo grandinė būtų kuo trumpesnė ir ją sudarytų kuo mažiau narių, be to yra vengiama struktūrinių komponentų, kurių poveikis negali būti iš anksto prognozuojamas ir įvertinamas (Jakštas 2007, Flügge 1999, Flügge 2001, Flügge 2003, Flügge 2005, Bosse 2003).

Sudarant realų brūkšninių ilgio matų kalibravimo neapibrėžties biudžetą, labai svarbu išnagrinėti ir įvertinti skaitmeninio paklaidų kompensavimo galimybes. Laikantis pagrindinių matavimo informacinių sistemų optimizacijos principų, visų pirma turi būti minimizuota šias paklaidas sukeliančių faktorių įtaka, nes paklaidų kompensavimo sistemos efektyvumas priklauso tiek nuo pradinio kompensuojamųjų paklaidų dydžio, tiek ir nuo paveikiųjų dydžių įtakos sumažinimo galimybių.

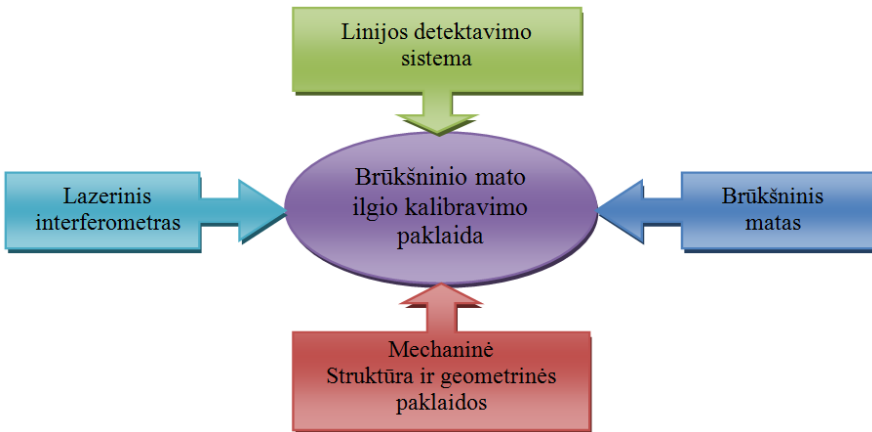
Kalibravimo sistemos tikslumą didele dalimi apsprendžia geometrinių paklaidų įtaka, todėl turi būti nagrinėjama geometrinių paklaidų kompensacija, susijusi su komparatoriaus pagrindinių elementų formos paklaidomis arba panaudojami įvairūs struktūriniai sprendimai (pvz. kampiniai interferometrai) paklaidoms kompensuoti. Ekonomiškai yra efektyvu gamybos tikslumo sąskaita užtikrinti tiesų judesį, kurio linijinės paklaidos X ir Z ašių kryptimi neviršytų 2–3 μm , o kampiniai posūkiai apie šias ašis būtų 1–2 kampinės sekundės.

Tolimesnis paklaidų mažinimas būtų vykdomas jų skaitmeninės kompensacijos sąskaita.

Norint nustatyti atliekamų matavimų patikimumą reikia įvertinti galimą netikslumų įtaką matavimo rezultatui. Šiuo atveju naudojama matavimo neapibrėžtis, kuri iš esmės yra galimo netikslumo įvertis, pateiktas kartu su matavimo rezultatu. Neapibrėžtis parodo, kiek matavimo rezultatas yra artimas tikrajai matuojamo dydžio vertei, o neapibrėžties skaitinė vertė nusako pasiklovimo intervalo, atitinkančio tam tikrą tikimybės lygį, ribas. Brūkšinių ilgio matų kalibravimo tikslumas taip pat įvertinamas jiems priskiriama neapibrėžtimi.

Nustatant neapibrėžties dydį visų pirma sudaromas matematinis neapibrėžties įvertinimo modelis, kuris nusako ryšį tarp matuojamo dydžio (išėjimo dydžio) ir dydžių (įėjimo dydžių), į kuriuos reikia atsižvelgti vertinant matuojamus parametrus.

Neapibrėžties biudžeto sudarymas remiasi 2 prielaidomis: suminė paklaida yra atskirų paklaidų komponentių suma ir atskiros paklaidų komponentės turi savo fizikines priežastis, 1.11 paveiksle, kurios gali būti identifikuotos bei kiekybiškai įvertintos (Precizinių 2007).

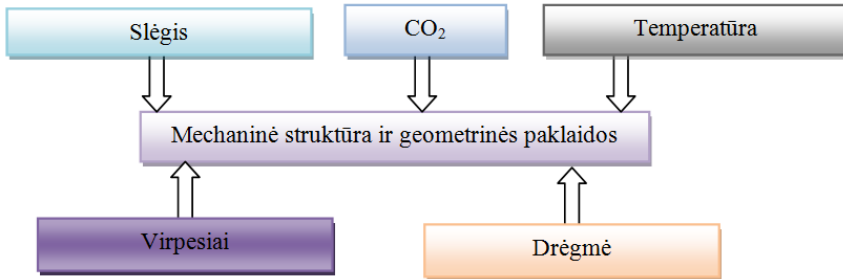


1.11 pav. Brūkšninio mato ilgio kalibravimo paklaidą sudarančios komponentės

Fig. 1.11. The bar gauge calibration error and its constitutive components

Atlikus kalibravimo sistemų palyginamąją analizę galima tvirtinti, jog nepaisant sudėtingų struktūrinių komponentų, tokių kaip fotoelektriniai mikroskopai bei lazerinės interferometrines sistemas, ilgio kalibravimo sistemos tikslumui didžiausią įtaką turi mechaninių komponentų geometrinės paklaidos (1.12 pav.), susijusios su jų formų, derinimo, judesių paklaidomis bei matmenų

stabilumu, todėl pagrindinis dėmesys turi būti skiriamas tokio tipo paklaidų analizei ir vertinimui, siekiant užsibrėžto sistemos tikslumo.



1.12 pav. Dėl aplinkos poveikio atsirandančios mechaninės struktūros ir geometrinės paklaidos

Fig. 1.12. Errors of the mechanical structure and the geometric errors arising due to the environmental

Galima nurodyti tokius tipinius brūkšnių matų kalibravimo paklaidų šaltinius, atsirandančius dėl lazerinės interferometrinės sistemos (1.13 pav.) (Jakštas 2007):

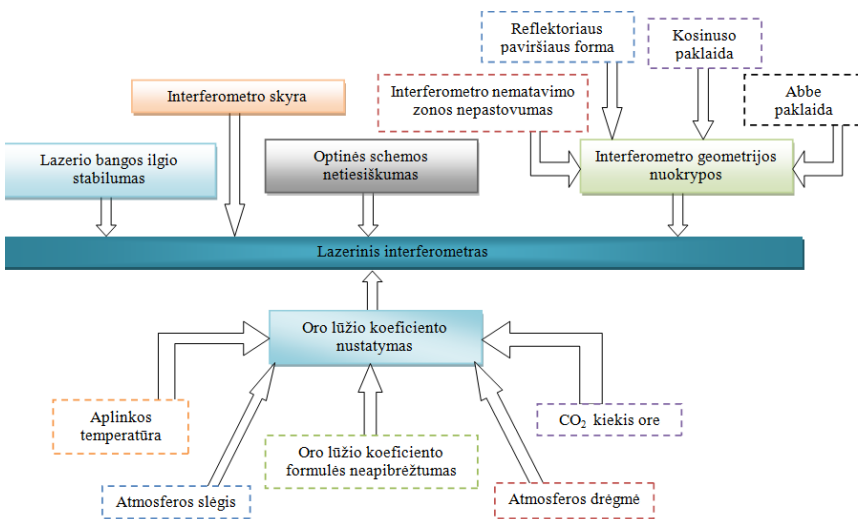
- Lazerio bangos ilgis:
 - ✓ lazerio bangos ilgis vakuume;
 - ✓ oro lūžio rodiklio nustatymas.
- Interferometras:
 - ✓ interferometro nustatymas skalės ašies atžvilgiu;
 - ✓ lazerinio interferometro struktūrinės charakteristikos:
 - atstumo tarp atraminio veidrodžio ir mikroskopo pastovumas;
 - atstumas tarp lazerio spindulį skaidančios prizmės ir mikroskopo pastovumas;
 - atstumas tarp matuojančio veidrodžio ir skalės pastovumas.
- Skalė:
 - ✓ skalės temperatūros matavimas;
 - ✓ šiluminio plėtimosi koeficiento matavimas;
 - ✓ mato padalų (brūkšnio) kokybė.

Matuojant atstumus tarp kalibruojamų skalių brūkšnių, reikia tiksliai perslinkti arba pačią skalę, arba atskaitos mikroskopą. Tikslių valdomų judesių įgyvendinimo poreikis sąlygoja papildomus griežtus tikslumo reikalavimus mechaninei ir optinei interferometro struktūrai. Su tuo susiję tokie papildomi paklaidų šaltiniai (Jakštas 2007):

- Kosinuso paklaida – jei kariatėlės judesio kryptis nėra lygiagreti lazerio spinduliui, tarp matavimo rezultato ir tikrosios matuojamojo dydžio reikšmės atsiranda kosinusinė priklausomybė. Nuokrypis mažinamas derinant optinę

sistema;

- Abbe paklaida – jei matavimo ir atskaitos linijos nesutampa, kariatėlei sukiojantis judesio metu atsiranda Abbe paklaida. Yra įvairūs metodai šiai paklaidai eliminuoti ar sumažinti iki leistino dydžio (Lassila 1994);
- Įlinkio paklaida – kai vidurinė skalės dalis, net jei skalė paremta Airy taškuose, įlinksta keletą mikrometrų skalės galų atžvilgiu (WDGM-7 2003). Jei atskaitos mikroskopo ašis nestatmena skalės ašiai, atsiranda matavimo rezultato paklaida. Įlinkio paklaida minimizuojama derinant prietaisą;
- Paklaida dėl veidrodėlio pasisukimo – proporcinga pasisukimo kampų dydžiui bei atstumui nuo veidrodėlio iki lazerio spindulių daliklio.



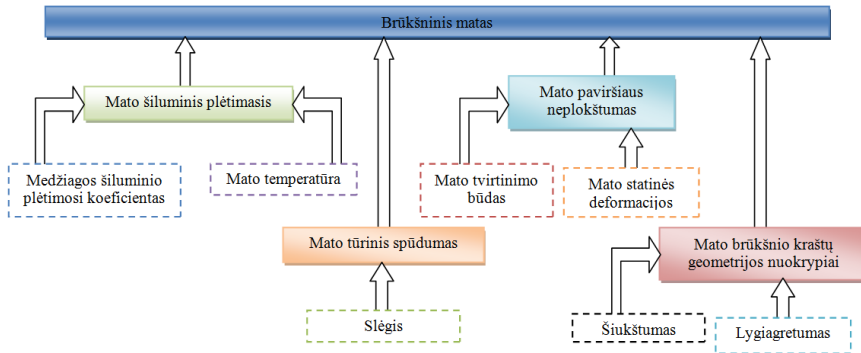
1.13 pav. Paklaidų atsirandančių dėl lazerinio interferometro sistemos priežastis

Fig. 1.13. The causes of errors due to the laser interferometry system

Svarbiausias neapibrėžties šaltinis matuojant ilgus brūkšninius matus (1.14 pav.) yra susijęs su mato temperatūra ir jos matavimu. Nors temperatūros jutiklius galima sukaliuoti kelių mK tikslumu, tačiau visada reikia įvertinti temperatūros gradientus dėl kintančių aplinkos sąlygų:

- šiluminio plėtimosi koeficientas – jei kalibruojamo mato temperatūra skiriasi nuo 20 °C, turi būti įnešta matuojamojo ilgio pataisa dėl šiluminio plėtimosi. Pataisos neapibrėžtis priklauso nuo šiluminio plėtimosi koeficiento neapibrėžties, matuojamojo ilgio ir temperatūros nuokrypio nuo 20 °C;
- padalos brūkšnio kokybė (skalėms);
- skalės paviršiaus neplokštumas;
- skalės atramų išdėstymas.

Kadangi padalos ilgis nustatomas kaip trumpiausias atstumas tarp dviejų brūkšnių centrų, išmatuotas ilgis labai priklauso nuo brūkšnio kokybės, o taip pat nuo brūkšnio padėties nuskaitymo sistemos. Jei brūkšniai nelygiagretūs, netiesūs ar neidentiški, brūkšnio centro nustatymas tampa neapibrėžtas. Praktikoje tai pasireiškia kaip skirtumas tarp tos pačios skalės kalibravimo skirtingais prietaisais rezultatų (Ostaševičius 1998, Truchetet 2001).



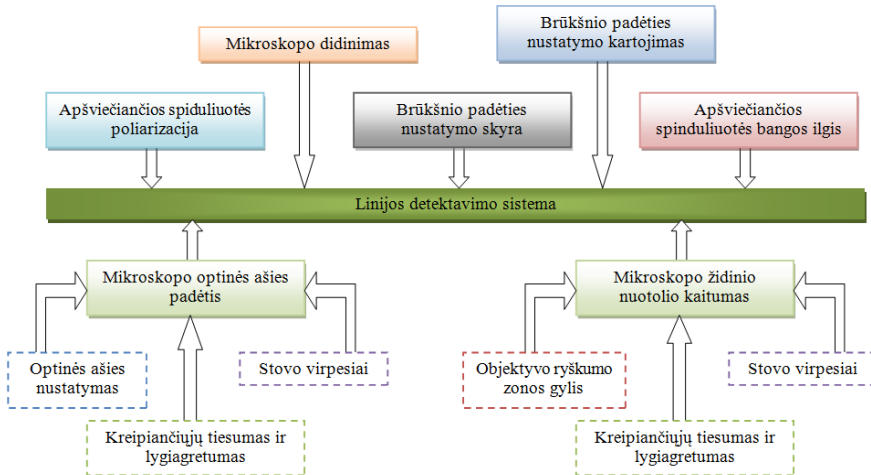
1.14 pav. Paklaidos atsirandančios dėl brūkšninio mato struktūros
Fig. 1.14. Errors arising due to the bar gauge structure

Kalibruojant precizines linijines skales ypač svarbu tiksliai nustatyti linijos (brūkšnio) padėtį, todėl linijos detektavimo sistemai (1.15 pav.) galima išskirti sekančias paklaidas (WDGM–7 2003, Jakštas 2007):

- brūkšnio krašto padėties nustatymo skyra;
- brūkšnio krašto padėties nustatymo kartojimasis;
- brūkšnio krašto geometrijos (lygiagretumo, šiurkštumo) įtaka;
- matavimo linijos nustatymo įtaka;
- mikroskopo židinio kaitumo įtaka (defokusavimas);
- apšviečiančios spinduliuotės bangos ilgio įtaka;
- apšviečiančios spinduliuotės poliarizavimo įtaka;
- apšviečiančios spinduliuotės koherentiškumo įtaka;
- mikroskopo didinimas (arba kito linijos pajautimo įtaiso jautris);
- brūkšnio padėties pajautimo schemos netiesiškumas;
- mikroskopo optinės ašies nustatymas;
- brūkšnio krašto padėties nustatymo algoritmo, brūkšnio profilio asimetrijos, linijos formos įtaka;
- skalės matavimo priešinga kryptimi įtaka.

Visos šios paklaidos yra specifinės ir priklauso nuo konkrečios ilgio kalibravimo sistemos struktūrinių sprendimų, todėl konstruojant valdomo tikslumo sistemą reikia kiekybiškai įvertinti šias paklaidų dedamąsias.

Atlikus tokių sistemų analizę galima tvirtinti, jog nepaisant sudėtingų struktūrinių komponentų, tokių kaip fotoelektriniai mikroskopai bei lazerinės interferometrinės sistemos, ilgio kalibravimo sistemos tikslumui didžiausią įtaką turi mechaninių komponentų geometrinės paklaidos, susijusios su jų formų, derinimo, judesių paklaidomis bei matmenų stabilumu, todėl atliekant tyrimus pagrindinis dėmesys skiriamas tokio tipo paklaidų analizei ir vertinimui.



1.15 pav. Brūkšninio mato padėties nustatymo paklaidos

Fig. 1.15. Positioning errors of the bar gauge

Sudarant realų brūkšninių ilgio matų kalibravimo neapibrėžties biudžetą, labai svarbu išnagrinėti ir įvertinti skaitmeninio paklaidų kompensavimo galimybes. Laikantis pagrindinių matavimo informacinių sistemų optimizacijos principų, visų pirma turi būti minimizuota šias paklaidas sukeliančių faktorių įtaka, nes paklaidų kompensavimo sistemos efektyvumas priklauso tiek nuo pradinio kompensuojamųjų paklaidų dydžio, tiek ir nuo paveikiųjų dydžių įtakos sumažinimo galimybių (Precizinių 2007, Flügge 1999, Flügge 2001, Flügge 2003, Flügge 2005, Bosse 2003, Sawabe 2004).

Kalibravimo sistemos tikslumą didele dalimi apsprendžia geometrinių paklaidų įtaka, todėl šiame tyrimų etape nagrinėjama geometrinių paklaidų kompensacija, susijusi su komparatoriaus pagrindinių elementų formos paklaidomis.

Paklaidų kompensacijos metodai yra skirstomi į dvi iš esmės besiskiriančias grupes – aktyviuosius ir pasyviuosius. Aktyvieji metodai realizuojami techninėmis priemonėmis. Taikant šį metodą yra nustatomos (matuojamos) elementariosios geometrinės paklaidos ir jos eliminuojamos techninėmis

priemonėmis. Pvz., panaudojant korekcines interferometrines koordinates (papildomas reflektorių sistemas) yra kompensuojami kampiniai kariatėlės svyravimai, šiuo būdu sistemingosios ir atsitiktinės paklaidos visiškai kompensuojamos realiame laike.

Taikant pasyvią paklaidų kompensaciją, paklaidos yra matuojamos iš anksto, jos įsimenamos komparatoriaus kompiuterio atmintyje, kaip argumento – poslinkio funkcijos ir įvertinamos (atimamos iš atskaitų), dirbant komparatoriui realiame laike, šiuo metodu yra kompensuojamos tik sistemingosios paklaidos. Tad pirmasis aktyviosios kompensacijos metodas yra efektyvesnis, tačiau jį taikant reikalinga papildoma interferometro koordinatė – optinė sistema ir elektroninio signalų apdorojimo plokštė.

Svarbi geometrinių paklaidų sąlygota matavimo neapibrėžties dedamoji kalibruojant linijines skales yra susijusi su Abbe principo neišlaikymu, o pagrindiniai tokių paklaidų šaltiniai yra komparatoriaus stovo formos paklaidos ir pavaros jėgų poveikis.

Ekonomiškai yra efektyvu gamybos tikslumo sąskaita užtikrinti tiesų judesį, kurio linijinės paklaidos X ir Z ašių kryptimi neviršytų 2–3 μm , o kampiniai posūčiai apie šias ašis būtų 1–2 kampinės sekundės. Tolimesnis paklaidų mažinimas būtų vykdomas jų skaitmeninės kompensacijos sąskaita.

1.3. Kalibravimo neapibrėžties vertinimo metodika

Ilgio kalibravimo uždaviniuose tikslumo lygio įvertinimui naudojama: santykinės neapibrėžties skaitinė vertė ir apibendrinta suminės neapibrėžties formulė, turinti dvinario formą. Suminę neapibrėžtį sudaro sandai priklausantys nuo matuojamo ilgio ir nepriklausantys, todėl vertinant ilgio matų su skirtingomis matavimo ribomis kalibravimo tikslumą būtina nurodyti abi dedamąsias.

Pagal ISO rekomendaciją (*ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Guide 1995)) matavimo neapibrėžtis skirstoma į dvi grupes:

A. Neapibrėžtys, nustatomos statistiniais metodais; B. Neapibrėžtys, nustatomos kitais metodais.

Kalibruojant skales, ilgesnes negu 10 mm, dominuoja B tipo neapibrėžtys. Kiekviena dedamoji nustatoma atskirai. Jas sumuojant, gaunama jungtinė neapibrėžtis u_c , priklausanti nuo matuojamojo ilgio, o jos dydį apsprendžia sisteminiai faktoriai.

Kalibruojant labai tikslas skales, jos matuojamos bent 8 kartus. Iš šių matavimų duomenų kiekvienam skalės intervalui apskaičiuojamas standartinis matavimo rezultatų nuokrypis. Matavimo neapibrėžtis šiuo atveju nustatoma A metodu. Ši dedamoji sudaro nuo ilgio nepriklausančią kalibravimo neapibrėžties

dedamąją. Ji atsiranda dėl mikroskopo, linijos centravimo ar briaunos padėties nustatymo paklaidų, interferometro aplinkos sąlygų (drėgmės, slėgio, temperatūros), matuoklių paklaidų, skalės kokybės, mikroskopo ir retroreflektoriaus tarpusavio padėties pasikeitimo ir kt. Skalės kalibravimo metu šių komponentų atskirai įvertinti neįmanoma. Šių dedamųjų sąlygojama neapibrėžtis sudaro atsitiktinę kalibravimo neapibrėžties dedamąją u_r .

Brūkšninių matų ilgio nuokrypiai dL nuo nominalios jo vertės turi būti pamatuoti ir išreikšti kaip įėjimo dydžių x_1, x_2, \dots, x_N , t. y. parametru įtakojančių ilgio nuokrypius, funkcija (Jürgen 2002):

$$dL = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (1.4)$$

Sudėtinė skalės kalibravimo neapibrėžtis pateikiama:

$$u_c^2(dL) = \sum_i^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \cdot c_{ij}^2 + c_i \cdot c_{ijj} \right] u^2(x_i) \cdot u^2(x_j), \quad (1.5)$$

čia $c_i = \frac{\delta L}{\delta x_i}$, $c_{ij} = \frac{\delta^2 L}{\delta x_i \cdot \delta x_j}$, $c_{ijj} = \frac{\delta^3 L}{\delta x_i \cdot \delta^2 x_j}$ – įėjimo dydžio jautrio koeficientai,

$u_i(x_i)$ – įėjimo dydžio standartinė neapibrėžtis.

Išplėstinė neapibrėžtis apskaičiuojama, kaip standartinės neapibrėžties u ir aprėpties koeficiento k sandauga: $U = k \times u$.

Kalibravimo neapibrėžties sandų analizė. Brūkšninių matų kalibravimo tikslumą iš esmės nusako dvi matavimo procedūros (Precizinių 2007): tikslus poslinkio matavimas lazeriniu interferometru bei tikslus brūkšnio centro padėties nustatymas – atskaitos taško suradimas fotoelektrinio mikroskopo pagalba. Nagrinėjant kalibravimo neapibrėžtį galima sudaryti atskirus neapibrėžties modelius lazeriniam interferometrui bei mikroskopui.

Idealaus lazerinio interferometro matuojamas poslinkis išreiškiamas:

$$L_\phi = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\phi, \quad (1.6)$$

čia λ – lazerio bangos ilgis, $\Delta\phi$ – fazių skirtumas tarp interferometro matavimo ir atraminio spindulių.

Tačiau dėl optikos netobulumo, lazerio bangos ilgio nestabilumo, geometrinių interferometro konstrukcijos paklaidų, aplinkos parametru nuokrypių realus interferometro matuojamas poslinkis:

$$L = L_{\phi} + L_n + L_T + L_m + L_a + L_A, \quad (1.7)$$

čia L_{ϕ} – matuojamo ilgio korekcija dėl matuojamo interferometro optinių kelių skirtumo netikslumo; L_n – ilgio korekcija dėl oro lūžio rodiklio matavimo netikslumo, L_T – pataisa dėl temperatūros poveikio matavimo grandinei; L_m – įtakos faktorius, nusakantis mechaninius poveikius sistemos konstrukcijoje, L_a – ilgio korekcija dėl oro turbulencijos, L_A – matuojamo ilgio pataisa dėl konstrukcijos komponentų geometrinių paklaidų (Abbe, kosinuso paklaidos).

Pasinaudojus 1.5 lygtimi lazerinio interferometro matuojamo ilgio L neapibrėžties matematinio modelio išraiška:

$$u_c^2(L) = c_{\phi}^2 \cdot u^2(L_{\phi}) + c_n^2 \cdot u^2(L_n) + c_T^2 \cdot u^2(L_T) + c_m^2 \cdot u^2(L_m) + c_a^2 \cdot u^2(L_a) + c_A^2 \cdot u^2(L_A), \quad (1.8)$$

čia c_i – jautrio koeficientai, t. y. įtakos faktorių (1.7 lygtis) dalinės išvestinės.

Pirmoji lygties 1.8 dedamoji yra susijusi su lazerio bangos ilgio stabilumu bei fazių skirtumo matavimo netikslumais, t. y., atsitiktiniais fazių svyravimais, kurie šiuolaikiniams lazeriams sudaro $< 0,1$ nm. Šiuo atveju dominuojantis narys He-Ne lazeriui yra ilgalaikis bangos ilgio stabilumas, kurio standartinė neapibrėžtis yra $1 \times 10^{-9} \cdot \lambda$; jautrio koeficientas – $c_{\phi} = \frac{L}{\lambda}$.

Atliekant matavimus ore, reikalinga įvertinti oro lūžio rodiklio įtaką lazerio bangos ilgiui $\lambda = \frac{\lambda_{vak}}{n}$; jo matavimo paklaida yra susijusi su tiksliais aplinkos parametrų (temperatūros, slėgio, santykinės drėgmės bei CO₂ kiekio) matavimais bei skaičiavimo metodikos, pagrįstos Edlen'ο formule įnešama neapibrėžtimi (Yim 2000). Brūkšninio mato temperatūros matavimo neapibrėžtis, kaip varžinių termometrų Pt–100 kalibravimo tikslumo pasekmė, siekia 20 mK. PTB komparatoriaus aplinkos parametrų matavimo paklaidų ir neapibrėžčių sandų dydžiai pateikti 1.1 lentelėje.

Neapibrėžties sandas, kuris įvertina Edlen'ο lygties įnešamą paklaidą į bendrą neapibrėžties biudžetą, sudaro 1×10^{-8} (Birch 1993, Downs 1998). Bendras temperatūros ir slėgio neapibrėžties dedamųjų dydis randamas susumuojant atskiras jų komponentų skaitines vertes, žr. 1.2 lentelę.

Neapibrėžties dedamąsias, susijusias su mechaniniais, temperatūros ar oro turbulencijos poveikiais interferometro matavimo grandinei $u_c(L_T) + u_c(L_m) + u_c(L_a)$, eksperimentiškai įvertinti yra gana sudėtinga, kaip ir sudaryti teorinius modelius, išskiriant atskirų komponentų poveikį. PTB atlikto eksperimento metu buvo pamatuotas lazerinio interferometro stabilumas, matavimo veidrodėliui nejudant, t. y. fiksuojant veidrodėlio poslinkius statinėje padėtyje, tuo būdu įvertinant bendrą šių komponentų įtaką. Buvo apskaičiuota,

kad standartinė matavimo rezultato neapibrėžtis sudaro 6 nm; jautrio koeficientas lygus 1.

1.1 lentelė. Aplinkos parametrų matavimo paklaidų ir neapibrėžčių sandų dydžiai

Table 1.1. Measurement errors and uncertainties sand sizes of the environmental parameters

Paklaidos šaltinis	Dydis	Standartinė neapibrėžtis	Jautrio koeficientas	Neapibrėžties sandų dydis
Temperatūra				
Pt 100 kalibravimas	20 mK	10,2 mK	$9,3 \times 10^{-7} L/K$	$9,5 \times 10^{-9} L$
Pt 100 matavimo grandinės tikslumas	3 mK	1,7 mK	$9,3 \times 10^{-7} L/K$	$1,6 \times 10^{-9} L$
Keitiklio savaiminis įšilimas	5 mK	2,9 mK	$9,3 \times 10^{-7} L/K$	$2,7 \times 10^{-9} L$
ITS-90 temperatūrinės skalės lygčių paklaida	0,13 mK	0,13 mK	$9,3 \times 10^{-7} L/K$	$1,2 \times 10^{-10} L$
Slėgis				
Pirminio slėgio etalono neapibrėžtis	5 Pa	2,6 Pa	$2,7 \times 10^{-9} L/Pa$	$7 \times 10^{-9} L/Pa$
Slėgio jutiklio	10 Pa	5,8 Pa	$2,7 \times 10^{-9} L/Pa$	$1,6 \times 10^{-8} L/Pa$
Slėgio jutiklio skyra	1 Pa	0,3 pa	$2,7 \times 10^{-9} L/Pa$	$8,0 \times 10^{-10} L/Pa$
CO₂ kiekis				
Nuokrypis nuo standartinių sąlygų (400 ppm)	100 ppm	100 ppm	$1,47 \times 10^{-8} L/ppm$	$1,47 \times 10^{-8} L/ppm$

Dėl temperatūros nehomogeniškumo brūkšnių kalibravimo laboratorijoje, susidaro temperatūriniai laukai išilgai skalės, kurie sąlygoja nevienodus skalės taškų poslinkius dėl temperatūrinių gradientų pačioje skalėje. Kaip parodė teoriniai skaičiavimai (Jakštas 2007, Kaušinis 2006), ilgiems brūkšniniams matams (iki 3,5 m) šie poslinkiai gali siekti iki 3 μm, esant 1 K oro temperatūros skirtumui, todėl vertinant matų kalibravimo neapibrėžtį reikalinga nustatyti gradientų įtaką. Pamatavus 1 m ilgio brūkšninio mato temperatūrą atskiruose buvo nustatyta, kad mato galuose temperatūra skiriasi 15 mK. Be to, laikant, kad skalės temperatūra skiriasi nuo norminės 20 °C temperatūros, atsiranda paklaida vertinant mato medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientą, o neapibrėžties dedamoji susijusi su šia paklaida vertinama $0,5 \times 10^{-6} /K$ (Boensch 1994).

Dėl kalibravimo sistemos komponentų geometrinių ar surinkimo paklaidų atsiranda tam tikras nuokrypis tarp mikroskopo kariatėlės judesio trajektorijos ir lazerinio interferometro matavimo ašies, kuris pasireiškia, kaip ilgio matavimo paklaida tiesiogiai proporcinga kampo tarp šių ašių kosinusui. Tokia paklaida sąlygoja, jog interferometro matuojamas atstumas bus visada mažesnis nei tikrasis interferometro matavimo veidrodėlio poslinkis. Matuojant mikroskopo kariatėlės buvo nustatyta, jog tokia nuokrypa 3,5 m kariatėlės eigoje sudaro 2 mm, kas atitinka $1,5 \times 10^{-10} L$ dydžio kosinuso paklaidą. Matavimo kariatėlės kampiniai nuokrypiai matavimo metu, o ypač atstumo tarp mikroskopo ir

kalibruojamo objekto svyravimai yra pagrindiniai komparatoriaus kalibravimo neapibrėžties veiksniai, todėl konstruojant tokias mašinas stengiamasi galima sumažinti tokius kampinius judesius arba juos tiksliai išmatuoti ir atitinkamai padarant tam tikras korekcijas skaitmeniniu būdu.

Viena pagrindinių problemų, su kuriomis susiduriama projektuojant tiksliai mašinas, yra Abbe principo, reikalaujančio išdėstyti matavimo ir atskaitymo linijas toje pačioje tiesėje, pritaikymo galimybės. Tikslioms sistemoms labai svarbus metrologinių ir struktūrinių (jėginių) grandinių atskyrimo principas, siekiant sumažinti tampriąsias deformacijas dėl veikiančių apkrovų, o taip pat temperatūrinės paklaidas. Metrologinės ir struktūrinės grandinės turi egzistuoti įmanomai atskirtai; geriausia atskirtis yra fizinė, bet galima ir informacinė atskirtis, pvz., panaudojant paklaidų kompensaciją, grįstą struktūrinių modelių matavimu. Ryšių apribojimo principas įgalina gauti norimą judesio laisvės laipsnių skaičių, arba juos eliminuoti, panaudojant minimaliai būtiną skaičių apribojančių ryšių.

Abbe paklaida dėl gamybos tolerancijų ir surinkimo paklaidų atsiranda visose sistemose, o jos dydžiui nustatyti atliekami judesio trajektorijos tiesumo matavimai, todėl paklaida tiesiogiai priklauso nuo kreipiančiųjų kokybės. Atstumas tarp matavimo ir atskaitymo linijų brūkšnių ilgio matų komparatoriuje yra 0 ± 4 mm, o su šia paklaida susijusi neapibrėžties komponentė sudaro 12,8 nm, panaudojant grįžtamo ryšio kampo matuoklius bei vykdičius paklaidas galima sumažinti iki 3 nm.

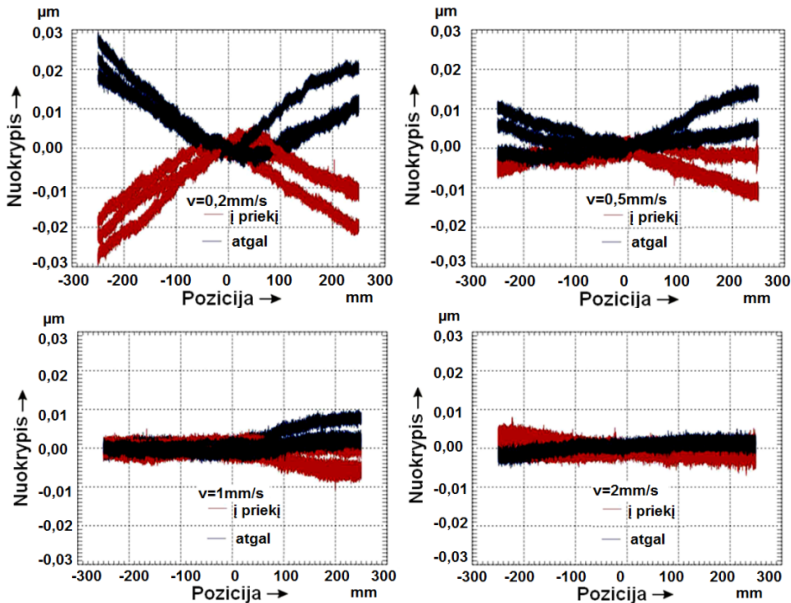
Brūkšnio detektavimo optinės sistemos efektyvumas (Jakštas 2007) priklauso:

- apšvietimo būdo,
- vaizdo jutiklio,
- optinės perdavimo funkcijos,
- vaizdo defokusavimo,
- duomenų apdorojimo algoritmo.

Matuojamo objekto apšvietimas yra bene kritiškiausias aspektas, su kuriuo susiduriama mikroskopijoje, siekiant išryškinti dominančias bandinių savybes. Matuojamos skalės apšvietimo problema, kuriant precizines ilgio kalibravimo sistemas yra labai svarbi, kadangi objektų vaizdai gaunami, naudojant apšviestas struktūras, kurios yra projektuojamos į vaizdo jutiklį per optinį traktą. Analizuojamos struktūros (objekto) apšvietimas optimizuojamas, nustatant ryšį tarp apšvietos ir vaizdo parametrų, siekiant gauti didžiausią erdvinę skyrą, jautrį ir brūkšnio detektavimo tikslumą.

Matavimo sistemai dirbant dinaminiu režimu, atsiranda neapibrėžties dedamosios priklausančios nuo matavimo greičio, todėl siekiant tikslumo reikalinga atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus bei parinkti optimalų komparatoriaus darbo režimą ir greitį. PTB atlikto eksperimento metu buvo

nustatyta (Flügge 2003) priklausomybė tarp matavimo tikslumo ir darbinio greičio, 1.16 paveiksle.



1.16 pav. Kalibravimo tikslumo priklausomybė nuo matavimo greičio ir krypties
Fig. 1.16. Dependence of the calibration accuracy with the measurement speed and direction

Neapibrėžčių šaltiniai susiję su linijos detektavimo sistema detaliau išnagrinėti (Precizinių 2007), ir pateikti 1.2 lentelėje.

Atskirai susumavus nuo ilgio priklausančias ir nepriklausančias dedamąsias gauname tokią jungtinės neapibrėžties išraišką:

$$u_c(L) = Q[36,8; 43,6L], \text{ nm}, \quad (1.9)$$

čia L – kalibruojamo mato ilgis m, $Q[x; y] = (x^2 + y^2)^{1/2}$

Siekiant įvertinti nustatytos standartinės apibrėžties patikimumą, t. y. nustatyti ar gerai neapibrėžtis įvertina standartinį nuokrypį, susijusį su nagrinėjamu dydžiu yra apskaičiuojamas efektyvusis laisvės laipsnių skaičius:

$$v_{ef} = \frac{\left\{ \sum_i^N [c_i \cdot u(x_i)]^2 \right\}^2}{\sum_i^N \left\{ \frac{[c_i \cdot u(x_i)]^4}{v_i} \right\}}. \quad (1.10)$$

1.2 lentelė. Brūkšinių matų kalibravimo neapibrėžties sandai**Table 1.2.** The calibration uncertainty components of the bar gauge calibration

Neapibrėžties sandas	Pasisk.	$u(x_i)$	ν_i	c_i	$u_i (dL), \text{nm}$
Linijos detektavimo sistema					
Videotriukšmai	N	12 nm	∞	1	12
Mikroskopo defokusavimas	N	3 μm	10	0,02	6
Abbe ir kampinės mikroskopo karietėlės paklaidos	R	12,8 nm	10	1	12,8
Mikroskopo suregulavimas	R	16 nm	10	1	16
Linijos detektavimo kartojimasis	N	25 nm	16	1	25
Linijos detektavimo algoritmo įtaka, brūkšnio profilio asimetrija, δ_{alg}	N	5 nm	4	1	5
Interferometras					
Lazerio bangos ilgis	N	1×10^{-9}	10	L/λ	$1.0 \cdot L$
Oro lūžio rodiklio lygtis, δ_{Ed}	N	1×10^{-8}	100	L	$10 \cdot L$
Oro temperatūra, t_{oro}	N	30 mK	4	$9,3 \times 10^{-7} \cdot L, \text{m/K}$	$27,9 \cdot L$
Oro slėgis, p_{oro}	N	6 Pa	4	$2,7 \times 10^{-9} \cdot L, \text{m/Pa}$	$16,9 \cdot L$
Santykinis oro drėgnumas, %	N	1,5%	4	$8,5 \times 10^{-9} \cdot L, \text{m/\%}$	$1,8 \cdot L$
CO ₂ kiekis ore, C_{O_2}	N	100 ppm	4	$1,47 \times 10^{-10} \cdot L, \text{m/ppm}$	$1,5 \cdot L$
Paklaida dėl oro turbulencijos, mechaninio poveikio, temperatūros matavimo grandinėje	R	6 nm	10	1	6
Brūkšninis matas					
Mato temperatūros nuokrypis nuo 20 °C, t_m	N	25 mK	10	$3 \times 10^{-8} \cdot L, \text{m/K}$	$0,75 \cdot L$
Šiluminio plėtimosi koeficientas, α_m	N	$4 \times 10^{-8} \text{1/K}$	10	$0,05 \cdot L, \text{m} \cdot \text{K}$	$2 \cdot L$
Mato temperatūros gradientas, t_{gr}	N	15 mK	7		
Mato plokštumo nuokrypa (dėl skalės įlinkio), δ_{pl}	N	5 nm	3	$3,6 \times 10^{-9} \cdot L, \text{nm}$	$18 \cdot L$
Mato suregulavimas ir kosinuso paklaida, δ_{\cos}	R	40 μrad	4	$\varphi_i^2 / (2 \cdot L), \text{m/rad}$	$0,04 \cdot L$

Sudarytam neapibrėžties modeliui (1.2 lentelė) efektyvusis laipsnių skaičius $\nu_{ef} = 21$, todėl priėmus pasiklovimo tikimybę $P=95\%$ iš Studento skirstinio randamas išplėstinės neapibrėžties aprėpties koeficientas, kuris yra lygus $k=2,08$. Išplėstinė brūkšninių matų kalibravimo neapibrėžtis:

$$u_{95}(L) = Q[76,5; 90,7L], \text{ nm}, \quad (1.11)$$

čia L – kalibruojamo mato ilgis, m.

Palyginimui pagrindiniai neapibrėžties sandai PTB nanokomparatoriui yra:

- vakuumo slėgio matavimas – 0,78 nm/m;
- kalibruojamos skalės temperatūra – 1,6 nm/m;
- mikroskopo defokusavimo įtaka – 0,45 nm/m;
- pasikartojamumas – 0,13 nm.

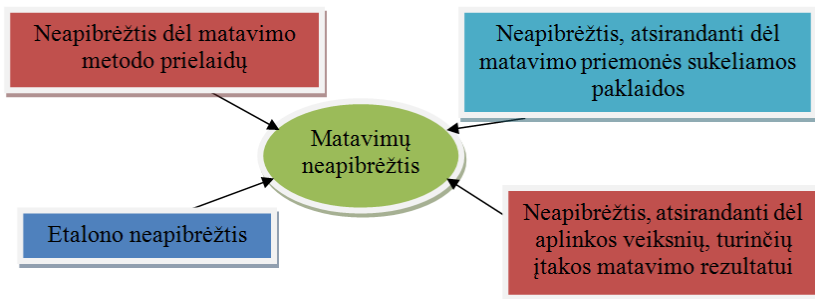
Išplėstinė brūkšninių matų kalibravimo neapibrėžtis kalibruojant PTB nanokomparatoriumi yra vertinama:

$$u_{95} = \sqrt{(4,6\text{nm})^2 + (9,2 \cdot 10^{-9} L)^2}, \quad (1.12)$$

čia L – kalibruojamos skalės ilgis m.

1.4. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimas

Virpesių matavimų rezultatų neapibrėžtis (1.17 pav.) susideda iš šių dedamųjų (LAB 2000): neapibrėžties, atsirandančios dėl matavimo priemonės sukeltos paklaidos, neapibrėžties, atsirandančios dėl aplinkos veiksnių, turinčių įtakos matavimo rezultatui, etalono neapibrėžties ir dėl matavimo metodo prielaidų neapibrėžties.



1.17 pav. Virpesių matavimų rezultatų neapibrėžties dedamosios
Fig. 1.17. The uncertainty components of the vibration measurement results

Pagrindiniai bandymų matavimo rezultatų neapibrėžties šaltiniai (Martens 2002), gali būti pritaikyti virpesių matavimo sistemai – šiuo atveju bandymų metu atliekamų matavimų prigimtis yra artimesnė kalibravimo metu atliekamų matavimų prigimčiai. Iš išvardintų neapibrėžties dedamųjų gali būti išskirtos šios, kaip tinkamos virpesių matavimo sistemos atveju:

- aplinkos įtakos dydžiai;
- tiesumo nuokrypos (daroma prielaida, kad modelis yra tiesinis);
- kalibravimo klaidos;
- netikslus suderinimas;
- dreifai;
- imties;
- terminis triukšmas;
- triukšmas dėl medžiagos korpuskulinės prigimties;
- elektros triukšmas.

Kiekvienas iš matavimo prietaisų, įeinančių į virpesių matavimo sistemą, įneša instrumentinę paklaidą arba kalibravimo neapibrėžtį.

Virpesių matavimo sistema gali būti nagrinėjama kaip atskira sistema su daugeliu įėjimo ir išėjimo parametrų.

Matavimų rezultatų neapibrėžties vertinimo procedūra atliekama remiantis šiais žingsniais (LAB 2000, Barkov 2007):

- Įvertinamas kiekvienas poveikis, reikšmingai įtakojantis matavimo rezultatą ir jei įmanoma, šie poveikiai kompensuojami, taikant nustatytas pataisas. Sudaroma matavimo funkcija, nustatanti ryšį tarp įėjimo duomenų x_i , $i = 1, \dots, N$, ir išėjimo dydžio Y_i išreiškiamą pavidalu: $f(x_1, \dots, x_n) = Y$.
- Pateikiama standartinė neapibrėžtis kiekvienam iš įvertintų poveikių, išreiškiamą standartiniu nuokrypiu u_i .
- Nustatoma suminė matuojamojo dydžio standartinė neapibrėžtis u_c , sumuojant atskiras standartinės Y dydžio matavimo neapibrėžtis $u_i(Y)$ (ir atitinkamas kovariacijas) naudojant tokios formos neapibrėžties pateikimo dėsnį:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}. \quad (1.13)$$

- Išplėstinė neapibrėžtis U yra pateikiama kaip suminės standartinės neapibrėžties u_c ir aprėpties faktoriaus k sandauga:

$$U = k \cdot u_c. \quad (1.14)$$

Remiantis (LAB 2000, Martens 2002), galima teigti, kad kai įtakos faktoriaus vertė yra žinoma ir pastovi, naudojant „B“ metodą (naudojami kitų šaltinių duomenys, nesiremiama atliktų matavimų statistiniais parametrais,

tačiau pagrindinis gaunamas rezultatas yra statistinis įvertis) jo neapibrėžčiai vertinti, jam bus priskiriamas δ skirstinys – tikimybė, kad atsitiktinis dydis, aprašantis šią neapibrėžties dedamąją įgys tam tikrą nustatytą reikšmę su tikimybe 1, o tikimybė, kad minėto dydžio reikšmė gali būti kitokia – lygi 0. Jei žinomos atsitiktinio dydžio, aprašančio neapibrėžties dedamąją, ribos, tai yra, šis atsitiktinis dydis gali įgyti bet kokia reikšmę iš nustatyto intervalo (a, b) , laikoma, kad neapibrėžties dedamoji pasiskirsčiusi pagal stačiakampį (tolydinį) dėsnį. Kiti dažnai naudojami tikimybiniai skirstiniai – Gauso skirstinys, trikampis skirstinys.

Šiuolaikinėje literatūroje matavimų rezultatų neapibrėžties vertinimui taikomi ir skaitiniai, o ne tik tikimybiniai metodai (Mauris 2001, Xia 2004, Urbanski 2003, Ferrero 2004, Phillips 1997, Phillips 1998, Weise 1993). Tai grindžiama tuo, kad matavimų rezultatai pagal GUM yra laikomi atsitiktiniais dydžiais. (Mauris 2001, Xia 2004) teigiama, jog ši prielaida ne visada teisinga – atliekant daug matavimų, neapibrėžtis įgyja sisteminį charakterį, kuris išskraipomas vertinant matavimų neapibrėžties įvertį statistiniais metodais.

Literatūroje (Phillips 1998, Giniotis 2004), siūloma matavimų rezultatų neapibrėžties vertinimo metodologiją patobulinti ir skaičiuojant įvertį atsižvelgti į jau sukauptus duomenis. Pateikiami keli atvejai. Pirmuoju atveju vertinama nekoreguoto dydžio matavimo neapibrėžtis, siūloma pilną korekciją įtraukti į matavimo neapibrėžties įvertį. Teigiama, kad nekoreguojant matavimo įverčio, gaunamas netikslus matavimo neapibrėžties įvertis – per didelis, arba per mažas. Jei neapibrėžties įvertis gaunamas per didelis, esamas patikimumo lygmuo iš tikrųjų yra mažesnis, nei pateikiama, o neapibrėžtį įvertinus nepakankamai, pateikiamas patikimumo lygmuo yra mažesnis, nei yra teigiama. Analizuojamas atvejis, kai nekoreguotas nuokrypis taikomas neapibrėžties įverčio koregavimui, kai matuojamasis dydis Y išreiškiamas tokiu būdu:

$$y - U_- \leq y + U_+, \quad (1.15)$$

čia

$$U_- = \begin{cases} U - \delta, & \text{jei } U - \delta > 0 \\ 0, & \text{jei } U - \delta \leq 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

ir

$$U_+ = \begin{cases} U + \delta, & \text{jei } U + \delta > 0 \\ 0, & \text{jei } U + \delta \leq 0 \end{cases}, \quad (1.17)$$

čia δ – apskaičiuota matavimo paklaida, neįtraukta į neapibrėžties skaičiavimo modelį.

Šis metodas lyginamas su keliais panašiais metodais. Pirmoji procedūra nekoreguotą nuokrypį traktuoja kaip naują neapibrėžties šaltinį, ir neapibrėžtis koreguojama pagal formulę: $U_{RSS_{uc}} = k\sqrt{u_c^2 + \delta^2}$. Antruoju atveju, neapibrėžtis skaičiuojama pagal formulę: $U_{RSSU} = \sqrt{k^2 u_c^2 + \delta^2}$. Teigiama, kad šis metodas lyginant su pastaraisiais, minimizuoja specifikacijos zoną, kurią naudoja išplėstinės neapibrėžties intervalas. Be to, taip išvengiama neigiamo išplėstinės neapibrėžties intervalo.

Kitame šaltinyje (Giniotis 2004), siūloma naudoti Bajeso metodą:

$$y = y_m \left(\frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \right) + y_{pe} \left(\frac{1}{1 + \gamma^2} \right), \quad (1.18)$$

kai

$$y = \frac{u_{pe}}{u_{cm}}. \quad (1.19)$$

Neapibrėžtį siūloma tikslinti tokiu būdu:

$$\frac{1}{u_c^2} = \frac{1}{u_{cm}^2} + \frac{1}{u_{pe}^2}, \quad (1.20)$$

čia y_m – matuojamojo dydžio įvertis, neįvertinant apriorinės informacijos, y_{pe} – matuojamojo dydžio įvertis, įvertinant apriorinę sukaupią informaciją, u_c – matuojamojo dydžio suminė neapibrėžtis, vertinant sukaupią informaciją, u_{cm} – matuojamojo dydžio suminė neapibrėžtis, nevertinant sukauptos informacijos, u_{pe} – sukaupytų duomenų suminė neapibrėžtis.

Ši metodologija tinkama tuomet, kai visus atsitiktinius dydžius aprašantys skirstiniai yra Gauso. Todėl ji gali būti tinkama taikyti nuolatinio virpesių matavimo sistemos duomenims analizuoti. Metodologija yra siūloma geometrinių dydžių matavimo rezultatų neapibrėžties įverčiui tikslinti.

Matavimų rezultatų neapibrėžčiai įvertinti yra taikomos bendro pobūdžio rekomendacijos, taikant jas visada būtina analizuoti, įvertinant konkrečios matavimo sistemos (tame tarpe ir virpesių matavimo posistemę). Ši analizė leidžia surinkti informaciją ir sukurti matavimų neapibrėžties modelį, remiantis statistiniais „A“ ir „B“ metodais. Tuo pat metu vykdomi tyrimai pačios neapibrėžties įvertinimo metodologijos tobulinimo kryptimi.

Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis paprastai vertinama naudojantis standartizuota metodologija (ISO 2002).

Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis. Šiuolaikinės matavimo sistemos dažnai įeina į automatizuotas ar automatines objekto, įrenginio ar mašinos

valdymo sistemas kaip viena iš jų posistemų. Todėl patikimas minėtos posistemės funkcionavimas yra viso objekto patikimumą ir efektyvumą įtakojantis faktorius. Matavimo sistemos patikimumas, šiuo atveju, suprantamas kaip klaidingo sprendimo priėmimo tikimybė, kurią būtina minimizuoti. Tai galima pasiekti, analizuojant patikimumą įtakojančius veiksnius.

Techninėje literatūroje (Ignacio 1998), pateikiama funkcinių virpesių matavimo įrenginių klasifikacija pagal paskirtį. Jie skirstomi į penkias grupes:

- 1) mechaninių ir akustinių virpesių atkūrimo įrenginiai;
- 2) mechaninių ir akustinių virpesių parametrų uždavimo ir valdymo įrenginiai;
- 3) informacijos gavimo įrenginiai;
- 4) informacinių signalų formavimo, apdorojimo ir atvaizdavimo įrenginiai;
- 5) pagalbiniai įrenginiai.

Pagrindiniai virpesių parametrai (ISO 2002, ISO 2005): poslinkis s (m, mm), virpesių greitis v (mm/s), virpesių pagreitis a (mm/s²). Šie parametrai gali būti išreiškiami vienas per kitą (čia pateikiamas atvejis, kai virpesių signalas yra harmoninis dažnio/signalas):

$$\bar{s} = \bar{v} / (2\pi \cdot f) = \bar{a} / (2\pi \cdot f)^2, \quad (1.21)$$

$$\bar{v} = 2\pi \cdot f \cdot \bar{s} = \bar{a} / (2\pi \cdot f), \quad (1.22)$$

$$\bar{a} = (2\pi \cdot f)^2 \bar{s} = 2\pi \cdot f \cdot \bar{v}. \quad (1.23)$$

Informacijai apie matuojamus virpesių parametrus gauti naudojami įvairių tipų virpesių matavimo keitliai. Labiausiai paplitę pjezoelektriniai, induktyviniai, talpuminiai ir sūkurinių srovių keitliai.

Plačiausiai virpesių matavimui naudojami pjezoelektriniai matavimo keitliai dėl savo didelio patikimumo, plataus dažninio ir dinaminio diapazono, galimybės naudoti be išorinių maitinimo šaltinių. Pjezoelektriniai keitliai kompaktiški, yra mažų matmenų ir masės, lengvai išdėstomi sunkiai prieinamose vietose, leidžia dirbti aukštose ir žemose temperatūrose. Šių keitlių veikimo principas paremtas tuo, kad kai kuriose mechaniškai apkraunamose medžiagose atsiranda elektros krūvis, o prijungus prie tokių medžiagų įtampą, keičiasi jų matmenys. Tokiu būdu galima stebėti taip vadinamą tiesioginį ir atvirkštinį pjezoefektą.

Susidariusio krūvio ir panaudotos jėgos priklausomybė aprašoma formule (Vobolis 1996):

$$Q(t) = h \cdot F(t), \quad (1.24)$$

čia h – pjezomodulis, $F(t)$ – panaudota jėga.

Induktyviniai keitliai yra labiau apsaugoti nuo galimų trikdžių ir jie patikimesni lyginant su talpuminiais, tačiau reikalingas maitinimo šaltinis. Taip

pat gali būti naudojamas virpesių poslinkių matavimui. Keitlio generuojama evj priklauso nuo jo parametru:

$$E = \frac{\omega \cdot B \cdot l}{d\delta_r/dt}, \quad (1.25)$$

čia: ω – ritės vijų skaičius; B – magnetinė indukcija oro tarpelyje; δ_r – ritės poslinkis; $l = \pi \cdot D$ – ritės vijos aktyvinis ilgis; D – vidutinis ritės diametras.

Talpuminiai keitliai daugiausiai naudojami virpesių poslinkio matavimui. Jų talpa paprastai priklauso nuo techninių keitlio parametru:

$$C = \frac{0,088 \cdot \varepsilon \cdot A}{l_{pl}}, \quad (1.26)$$

čia: A – kondensatoriaus plokštelių plotas; ε – dielektriko, išskiriančio plokšteles, dielektrinė skverbtis; l_{pl} – atstumas tarp plokštelių.

Sūkurinių srovių keitliams būtina taikyti specialius maitinimo šaltinius, jie jautrūs išorinės aplinkos parametrams ir reikalingos ypatingos sąlygos.

Priklausomai nuo matavimo tikslų, gali būti naudojami skirtingų parametru matavimo keitliai. Naudojant poslinkio keitlį, stiprinamos žemo dažnio dedamosios, naudojant pagreičio matuoklį, priešingai, stiprinamos aukšto dažnio dedamosios. Naudojant virpesių greičio keitlį, tiek aukšto, tiek žemo dažnio dedamosios stiprinamos vienodai (Brüel 1998).

Keitlių darbinės charakteristikos (1.18 pav.) žymiai skiriasi priklausomai nuo keitlio matavimo paskirties (poslinkiui, greičiui, pagreičiui matuoti).

Nuosekli dažnių analizė gali būti atliekama naudojant skirtingų tipų filtrus. Naudojant pastovaus absoliutaus dažnių pločio filtrą gaunama nemažai informacijos apie virpesių procesą.

Analizė naudojant filtrus su pastoviu santykinių dažnių juostos pločiu suteikia operatyvią informaciją apie dažnių spektrą. Atliekant juostinę analizę oktavinėse ar trečdaliai oktavos juostose gaunama pakankamai duomenų apie bendrąjį lygių pasiskirstymą dažnių spektre (Ignacio 1998).

Virpesių matavimas vykdomas naudojant stacionarias sistemas (nuolatinis matavimas) arba kilnojamą (mobiliąsias) sistemas (periodinis matavimas) (Jonušas 2001).

Virpesių matavimo sistema eksploatuojama įrenginiuose naudojant pirminius virpesių keitlius nuolat pritvirtintus prie kontroliuojamojo objekto nuolatinio matavimo sistemos atveju, ir tvirtinamus periodiškai, kai matavimas atliekamas kilnojamų matavimo sistemų pagalba. Pagrindinė nuolatinio virpesių matavimo įrangos funkcija yra virpesių lygio automatinis sekimas, pateikiant diskrečius signalus, kai matuojami duomenys pasiekia ribinį lygmenį arba viršija iš anksto duotas reikšmes. Periodinio virpesių matavimo sistema leidžia atlikti

matavimus kontroliuojamuose objekto taškuose naudojant skaitmeninius indikatorius arba analizės prietaisus.

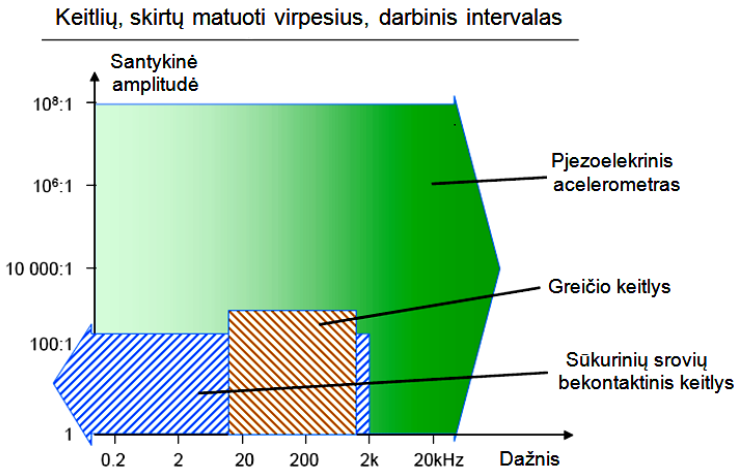


Fig. 1.18. The performances of the vibration measurement transducers

Virpesių matavimo sistemą galima išskaidyti į atskiras dedamąsias:

- pirmąją iš sudedamųjų virpesių matavimo dalių yra virpesių signalo matavimo ir analizės priemonės. Matavimo priemonėms dažniausiai naudojama spektrinė signalų analizė, ji lengvai realizuojama, naudojant skaitinę Furjė transformaciją. Be virpesių keitlių matavimui ir analizei dar naudojami skaitmeniniai prietaisai (spektro analizatoriai arba kompiuteriai). Jei vartotojui reikia keitlius stacionariai pritvirtinti neprieinamuose vietose, tokiais atvejais jis gali arba vesti kabelius prieinamuose vietose ir juose matuoti įrenginių virpesius, arba sujungti šiuos keitlius nuolatinio virpesių matavimo sistemoje. Galima naudoti tiek kontaktinius, tiek bekontaktinius virpesių matavimo prietaisus;
- antroji sudedamoji dalis – kompiuteris su virpesių matavimo programiniu paketu. Juo naudojantis, saugomi nustatyti virpesių matavimų duomenys, virpesių parametrai lyginami su ribinėmis reikšmėmis, nustatomos atskirų virpesių parametrų pokyčių tendencijos, ruošiamos ataskaitos, pateikiami duomenys ekspertams, arba jį pakeičiančiai programai;
- trečioji sudedamoji virpesių matavimo sistemos dalis – intelektualioji. Ji užtikrina defektų identifikacijos uždavinių sprendimą ir atlieka jų vystymosi prognozę pagal gautus duomenis bei tarpinę medžiagą, gautą naudojant matavimo priemones. Daugumoje virpesių matavimo sistemų šią dalį atlieka ekspertas, turintis specialų pasiruošimą. Taip pat dažnai reikia naudoti

ekspertines programas.

Virpesių matavimo ir analizės sistemos gali būti išskirtos į atskiras grupes:

- sistemos, naudojamos konkrečiai siauros dažninės srities matavimams,
- daugiafunkcinės matavimo sistemos, analoginės-skaitmeninės ir automatizuotos sistemos.

Siauros dažninės srities matavimo sistemos naudojamos atliekant tyrimus, virpesių parametrų matavimus lauko sąlygomis ir pan. Sistemos išėjime informacija pateikiama išmatuotomis reikšmėmis arba jų santykiškai – tiesioginių, netiesioginių ar jungtinių matavimų rezultatais.

Daugiafunkcinės matavimo sistemos leidžia matuoti virpesių parametrus ir spręsti kitus uždavinius, pavyzdžiui, atlikti dažninę analizę arba pasiskirstymo funkcijos analizę, įvertinti koreliacijos funkciją ir t. t.

1.5. Tyrimo uždaviniai ir galimų sprendimo kelių analizė

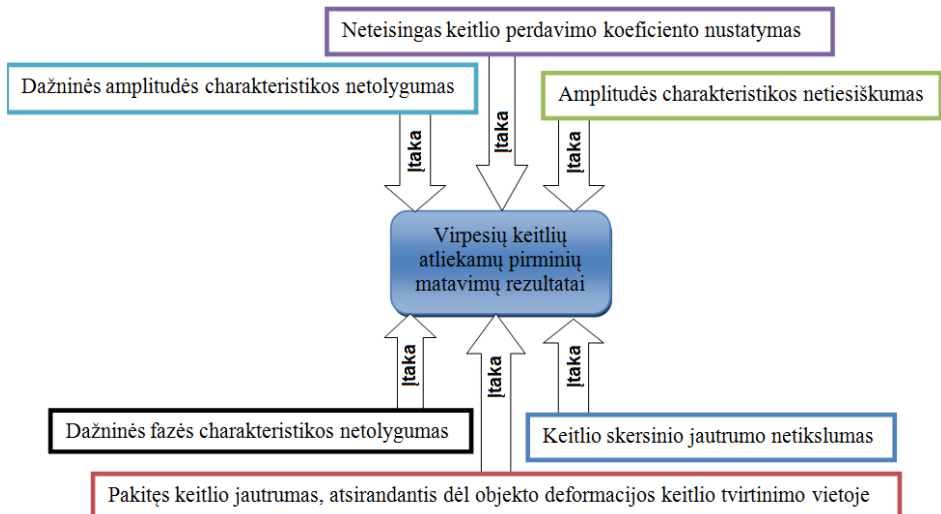
Remiantis atlikta brūkšnių ilgio matų kalibravimo sistemų ir jų komponentų analize ir siekiant pagrįsti naujai kuriamos brūkšnių matų kalibravimo sistemos struktūrinius sprendimus, pagrindinis dėmesys disertacijoje skirtas ištirti ilgio matų kalibravimo sistemų dinamines paklaidas bei jų atsiradimo priežastis.

Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimo problemas nagrinėjantys tyrimai (Martens 2002, Weise 1993, Giniotis 2004), dažniausiai susieti su kalibravimo problemomis, naudojant etaloninius prietaisus. Atlikta literatūros apžvalga rodo, kad virpesių keitlių atliekamų pirminių matavimų rezultatai gali būti įtakojami šių veiksnių (1.19 pav.) (Natke 1997, Isermann 1997, Daniel 2001, Eidukevičiūtė 2006, Eidukevičiūtė 2008):

- neteisingas keitlio perdavimo koeficiento nustatymas;
- dažninės amplitudės charakteristikos netolygumas;
- amplitudės charakteristikos netiesiškumas;
- dažninės fazės charakteristikos netolygumas;
- keitlio skersinio jautrumo netikslumas;
- pakitęs keitlio jautrumas, atsirandantis dėl objekto deformacijos keitlio tvirtinimo vietoje.

Literatūroje nagrinėjančioje virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimą yra siūloma (Barkov 2007, Natke 1997), vietoje statistinių neapibrėžties vertinimo metodų naudoti skaitinius metodus (pavyzdžiui, neraiškiają logiką). Šis pasiūlymas argumentuojamas tuo, jog esant sisteminiam matuojamojo dydžio neapibrėžties charakteriui, neapibrėžties įvertis yra iškraipomas. Tačiau šiame darbe daroma prielaida, kad virpesių matavimuose vyrauja statistinis matavimų neapibrėžties charakteris, todėl įvertinio nustatymui

bus taikomi tik statistiniai metodai.



1.19 pav. Veiksniai įtakojantys i virpesių keitlių atliekamų pirminių matavimų rezultatus

Fig. 1.19. Factors influencing the initial measurement results performed by the vibration transducers

Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad kalibravimo sistemų dinaminiam tyrimams buvo skirta mažai dėmesio, ypač:

- brūkšinių didelio ilgio matų kalibravimo sistemos dinaminė paklaidų, įtakojančių kalibravimo sistemos tikslumą, nustatymui bei jų įtakos kalibravimo tikslumui apskaičiuoti;
- sistemos dinamikos tyrimams;
- eksperimentiniams brūkšinių matų kalibravimo dinaminiam režime virpesių tyrimams bei kalibravimo neapibrėžties įvertinimui;
- virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimams.

2

Ilgio matavimo komparatoriaus dinaminiai tyrimai

Tyrimų tikslas – taikant virpesių lygtis išanalizuoti komparatoriaus dinamines charakteristikas. Užduotam tikslui įvykdyti buvo sudarytas sistemos dinaminis modelis ir atliktas sistemos modeliavimas žadinant realių amplitudžių reikšmėmis. Sudarytas komparatoriaus sistemos dinaminis modelis leidžia analizuoti charakteringus komparatoriui dinامينius virpesius.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Kasparaitis 2008).

2.1. Ilgio matavimo komparatoriaus dinaminis modelis

Tiriamasis objektas

Šiuolaikiniai brūkšniniai ilgio matai gaminami įvairių skerspjūvio formų ir ilgių – nuo kelių mikrometrų iki kelių metrų (Lietuvoje iki 3400 mm (<http://www.bsp.lt> 2006)), jų gamybai naudojamos medžiagos plienas, invaras, stiklas, stiklo keramika bei pačios naujausios medžiagos, tokios kaip stiklo keramika Zerodur, turinčios itin mažą šiluminio plėtimosi koeficientą, be to

skiriasi matų gradavimo tankis, kuris gali kisti nuo 0,5 μm itin aukšto tikslumo skalėse iki kelių milimetrų ar daugiau. Kalibruojant brūkšninius matus, atstumai matuojami tarp brūkšnių centrų, tačiau atskirai atvejais matuojami tarp linijos profilio kraštų (Beers 1999). Skaitmeniniai matavimo mikroskopai įgalina atlikti tikslų brūkšninių ilgio matų kalibravimo sistemų pozicionavimą ir įvertinti brūkšnių kokybę bei jų išdėstymo tikslumą.

Komparatorius patalpintas etaloninėje patalpoje.

Ilgio komparatorių sudaro 9 pagrindinės dalys:

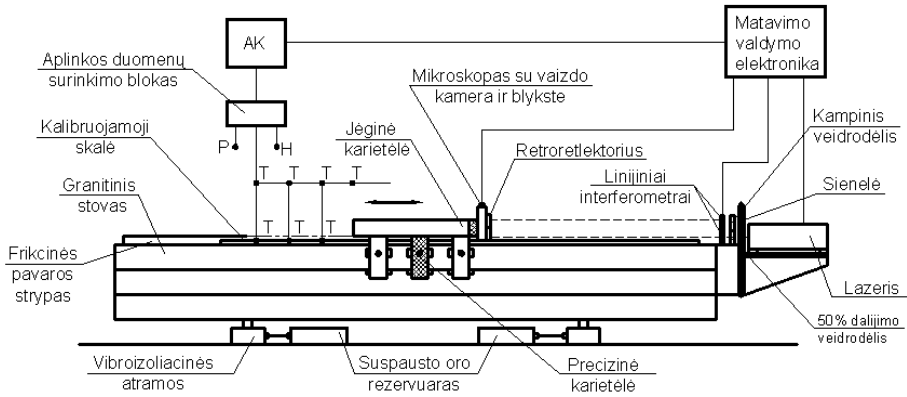
- lazerinis interferometras,
- aplinkos parametrų matuoklis,
- mikroskopas su skaitmenine vaizdo kamera,
- pavara,
- valdiklis,
- duomenų surinkimo ir apdorojimo kompiuteris,
- korekcijos sistemos,
- granitinė kreipiamoji,
- kariatėlė, esanti ant granitinės kreipiamosios, ant oro guolių.

Visos dalys yra tarpusavyje sujungtos ir sinchronizuotos.

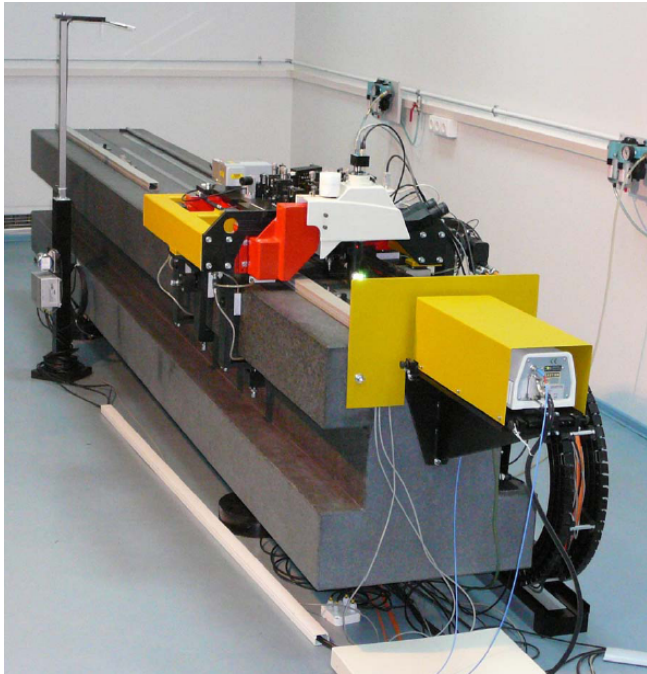
Komparatorius (2.1 pav.) sudarytas iš 4 m ilgio masyvios smulkios struktūros granitinės kreipiamosios, horizontaliojoje plokštumoje padėtos ant keturių pneumatinių atramų, kurios slopina aukšto dažnio virpesius bei kariatėlės, judančios išilgai kreipiamosios. Granitinės kreipiamosios virpesių lygis, matavimai atlikti komparatoriui esant ramybės būsenoje (Kilikevičius 2006), neviršija 0,7 μm , esant 25 Hz ir 0,1 μm kitose virpesių dažnio ruožuose. Kariatėlė, padavus suspaustą orą į jos aerostatinis guolius, slysta oro guoliais išilgai kreipiamosios šešiomis aukšto tikslumo kreipiamosiomis. Tarpelis tarp oro guolių plokštumų ir kreipiamosios siekia 6 μm . Oro debitas yra labai mažas. Kariatėlės sistema yra sukonstruota taip, kad kariatėlė bazuojasi ant standžiai įmontuotų aerostatinų atramų, kurios įverttos priešingose kreipiančiųjų pusėse sumontuotomis spyruokliuojančiomis aerostatinėmis atramomis. Tai įgalina sureguliuoti norimai mažus aerostatinų atramų tarpus tuo padidinant jų standumą.

Kariatėlę išilgai stovo traukia programiniu būdu valdoma trinties pavara. Kariatėlės ir pavaros sistemos konstrukcija įgalina eliminuoti pavaros poveikį išilginio judesio tikslumui. Tam kariatėlė sudaryta iš dviejų dalių – jėginės ir precizinės. Prie pirmosios jėginės dalies jungiama pavara, o prie antrosios – visos matavimo sistemos, kurios skirtos kariatėlės judesiams matuoti ir kalibruojamųjų skalių linijoms detektuoti. Jėginė (toliau vadinama jėginė kariatėlė) ir precizinė (toliau vadinama precizinė kariatėlė) kariatėlės dalys tarpusavyje sujungtos elementų. Tai jėgos pardavimo iš vienos kariatėlės į kitą

priemonė. Šio elemento konstrukcija parinkta tokia, kad juo perduodamos jėgos kryptis sutampa su kariatėlių judesio kreipiamosiomis kryptimi (t. y. skersine kryptimi jėga neišvystoma). Svarbu ir tai, kad jėginę ir precizinę kariatėles jungiantis elementas yra sumontuotas taip, kad juo perduodamos jėgos kryptis eina per precizines kariatėlės masės centrą. Taip eliminuojami sukamieji momentai, kurie gali iššaukti neigiamą poveikį tikslumui.



a)



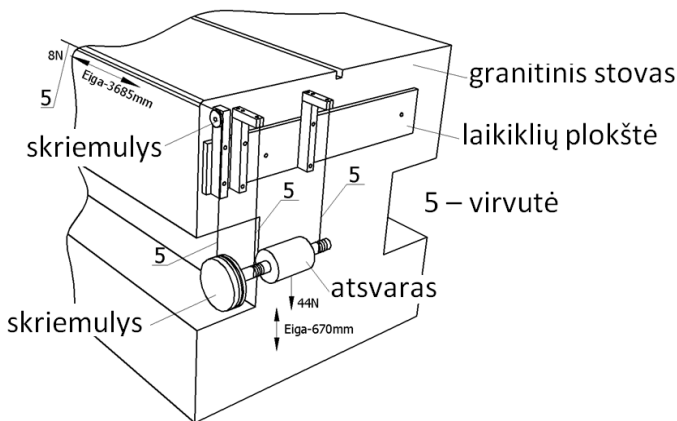
b)

2.1 pav. Ilgio matavimo komparatoriaus schema (a) ir bendras vaizdas (b)
Fig. 2.1. Length scale comparator scheme (a) and general view (b)

Komparatoriaus darbo kokybei yra svarbu, kad stumdant karietėlių sistemą atsirandanti pasipriešinimo jėga būtų minimali ir judant pirmyn ir atgal išilgai visos eigos būtų vienoda. Ši sąlyga reikalinga tam, kad karietėlės pavaros mechanizmas nesukeltų žalingų virpesių ir deformacijų, veikiančių precizinę karietėlę.

Tačiau karietėlę veikiančią jėgą neišvengiamai sukelia laidų vikšras, kuriame yra pavaros ir mikroskopo mechanizmui reikalingi laidai ir kabeliai. Vienpusis laidų vikšras kartu su laidais viena karietėlės judesio kryptimi sukelia pasipriešinimo eigai jėgą, o kita kryptimi – stūmimo jėgą. Stūmimo jėgai atsverti suprojektuotas ir įrengtas vikšro atsvaras, kurio veikimo principas parodytas 2.2 paveiksle.

Šį mechanizmą sudaro vertikaliai judantis svarstis, kuris kartu atlieka reduktoriaus funkciją. Per skriemulį permesta virvutė tempia karietėlę horizontalia kryptimi jėga, kuri yra priešinga ir lygi laidų vikšro išvystomai jėgai. Tokia atsvaro konstrukcija yra ypatinga tuo, kad maža jo trinties jėga ir redukcijos perdavimo santykis yra vienetu didesnis, negu didžiojo ir mažojo skriemulių santykių, t. y. $i = \frac{D}{d} + 1$; tokių būdu mechanizmas yra kompleksiškas vertikalia kryptimi.



2.2 pav. Laidų vikšro atsvaro mechanizmas
Fig. 2.2. The wiring tracks leverage mechanism

Ant granitinės kreipiančiosios šalia lazerio yra papildoma optinė interferometrinė sistema su paklaidų skaičiavimo programine įranga atlieka *Abbe* paklaidų vertikalojoje plokštumoje kompensavimą. *Abbe* paklaidos horizontaliojoje plokštumoje yra nežymios. Išilgai lazerio spindulio dešimtyje fiksuotų padėčių matuojama rastrinės skalės ir oro temperatūra. Pamatuo-

temperatūrų reikšmės yra kaupiamos duomenų kaupiklyje ir išsiunčiamos į pagrindinį kompiuterį. Bei realiame laike yra kompensuojamas skalės temperatūrinis išsiplėtimas.

Pamatuotas ilgis yra normalizuojamas iki projekcinio esančio 20 °C aplinkoje, įvertinant skalės temperatūros duomenis, šiluminio plėtimosi koeficientą ir aplinkos poveikio korekciją pagal oro refrakcijos rodiklį, kuris apskaičiuojamas pagal *Edlen*'o lygtį. Visą kalibravimo procesą ir sistemos atliekamas operacijas valdo pagrindinis personalinis kompiuteris.

Dinaminio modelio sudarymas. Precizinis ilgio komparatorius (2.3 pav.) yra sudėtinga mechatroninė sistema. Projektuojant tokias konstrukcijas pagal tradicinę stiprumo kriterijais pagrįstą metodiką, dažnai nėra užtikrinama apsauga nuo mažų (mikrometrų arba dešimčių nanometrų eilės), tačiau nepageidaujamų spindulio fokusavimo taško virpesių poveikio, kylančių bendrų konstrukcijos tampriųjų virpesių rezultate. Šie sunkiai prognozuojami virpesiai gali kilti dėl seisminio pobūdžio konstrukcijos sužadavimo, tačiau neretai jų priežastimi gali būti ir mašinos veikimo ypatumai bei konstrukcinės ypatybės. Pavyzdžiui, varikliai ir pavaros savo darbo metu gali sukelti mažus virpesius, kurie perduodami konstrukcijoje priklausomai nuo jos geometrinės formos bei matmenų, kurie sąlygoja standumines savybes ir masės pasiskirstymą. Labai svarbi yra kreipiančiųjų konstrukcija bei standumas, slopinimas laisvumą turinčiuose sujungimuose, ir pan. Netgi maži temperatūros pokyčiai gali įtakoti tam tikrą kreipiančiųjų ir sujungimų laisvumą arba sukelti temperatūrinės deformacijas, kurios galiausiai įtakoja lazerio spindulio apšviečiamo taško padėtį. Šios deformacijos ir poslinkiai yra pereinamojo pobūdžio, todėl jų poveikio negalima pašalinti įprastomis kompensacinėmis priemonėmis.

Projektuojant precizines sistemas yra laikomasi ar bent stengiamasi laikytis svarbiausių principų, užtikrinančių didžiausią konstrukcijos standumą. Reiktų nenaudoti lenkimo deformacijas patiriančių konstrukcijos elementų bei „atvirų“ kevalinių struktūrų. Tačiau tai ne visuomet paprasta, kadangi neišvengiamai tenka ieškoti kompromisinių sprendimų, suderinančių tarpusavyje mašinos funkcionalumą, konstrukcijos dalių bei bendrąjį standumą, gabaritus, kainą ir pan.

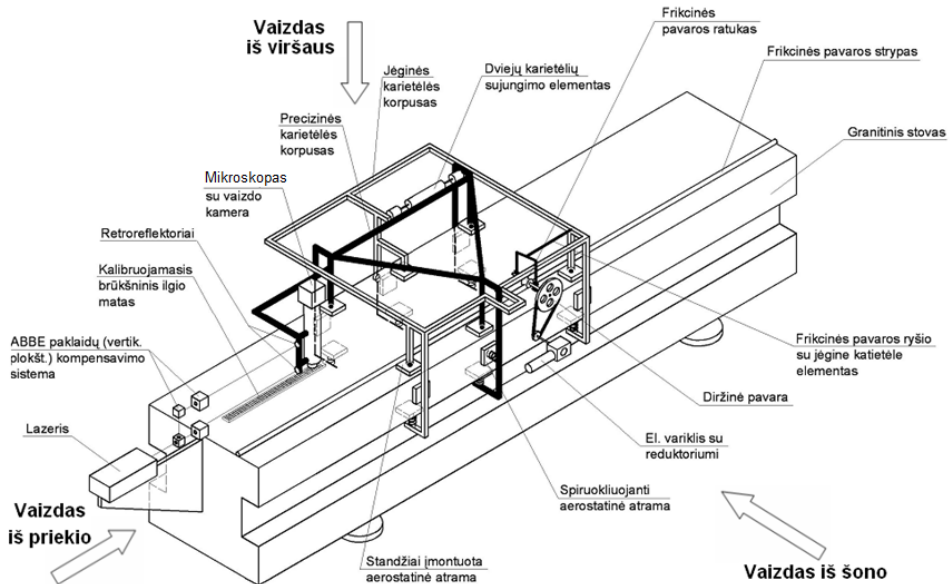
Virpesiams tirti sudarytas precizinio ilgio matavimo komparatoriaus dinaminis modelis.

Virpamosios sistemos dinaminio modelio sudėtingumas priklauso nuo dviejų pagrindinių objektyvių veiksnių: pačios sistemos sudėtingumo ir informacijos įvairumo, kurią norima gauti, išnagrinėjus tą sistemą.

Dinaminis modelis sudaromas šešiais etapais (Augustaitis 2000).

Pirmasis etapas. Pasirinkus tiriamąjį objektą (mašiną, jos dalį arba kt.) išsiaiškinama, kaip ir kokie jame atsiranda virpesiai, kokia tų virpesių fizikinė

kilmė, ką norima konkrečiai sužinoti ištyrus virpesius, kam reikalingi tyrimo rezultatai. Tam gali prireikti eksperimentinių virpesių tyrimų, tampriųjų ir slopinimo elementų jėginių charakteristikų (eksperimentiškai arba analitiškai nustatytų), kitokių matavimų ir tyrimų.



2.3 pav. Komparatoriaus schema su pagrindiniais mazgais ir sistemomis bei dinaminio modelio vaizdavimo kryptys

Fig. 2.3. The scheme of the comparator with key systems and directions of the dynamic model imaging

Antrasis etapas. Išsiaiškinama, kokias tiriamojo objekto vietas galima laikyti absoliučiai standžiais kūnais, kaip tokie kūnai susiję tarp savęs tampriaisiais ir virpesių slopinimo ryšiais, kokie tų kūnų judesių apribojimai, kokie kylančių virpesių žadinimo šaltiniai.

Trečiasis etapas. Turimi antrajame etape išvardyti duomenys ir dinaminio modelio elementai atitinkamai sujungiami tarpusavyje, gaunamas pirminis dinaminio modelio variantas, kuriame pažymėti dar ne galutiniai jo duomenys ir dar ne galutinės apibendrintosios koordinatės.

Ketvirtasis etapas. Galutinai apskaičiuojamos arba nustatomos eksperimentiniu būdu parinktų absoliučiai standžių kūnų masės, inercijos momentai, tampriųjų ir slopinimo elementų charakteristikos, randami reikalingi tolesniems skaičiavimams atstumai tarp elementų.

Penktasis etapas. Patikslinamos sudaryto trečiame ir ketvirtame etape dinaminio modelio apibendrintosios koordinatės, kad būtų patogiau gauti rezultatus.

Pavyzdžiui, patartina kūnų padėtis nustatyti jų svorio arba standumo centrų atžvilgiu. Patikslinamos virpesių žadinimo jėgos.

Šeštasis etapas. Kuo labiau suprastinamas gautas pirminis dinaminis modelis. Stengiamasi palikti kuo mažiau tampriųjų ir slopinimo elementų su netiesinėmis charakteristikomis (aproksimuojama tiesinėmis); netiesinės charakteristikos paliekamos tik ten, kur jos būtinos.

Stengiamasi laikyti nepriklausomais nuo laiko dydžiais kuo daugiau sistemos parametrų (mases, inercijos momentus, standumo ir pasipriešinimo koeficientus).

Mažinamas apibendrintųjų koordinačių ir kartu laisvės laipsnių skaičius, kur leistina nepaisoma kūnų masės ir inercijos momentų, sujungiami standžiaisiais ryšiais atskiri kūnai, kai juos jungiančių tampriųjų ryšių standumo koeficientai yra dideli.

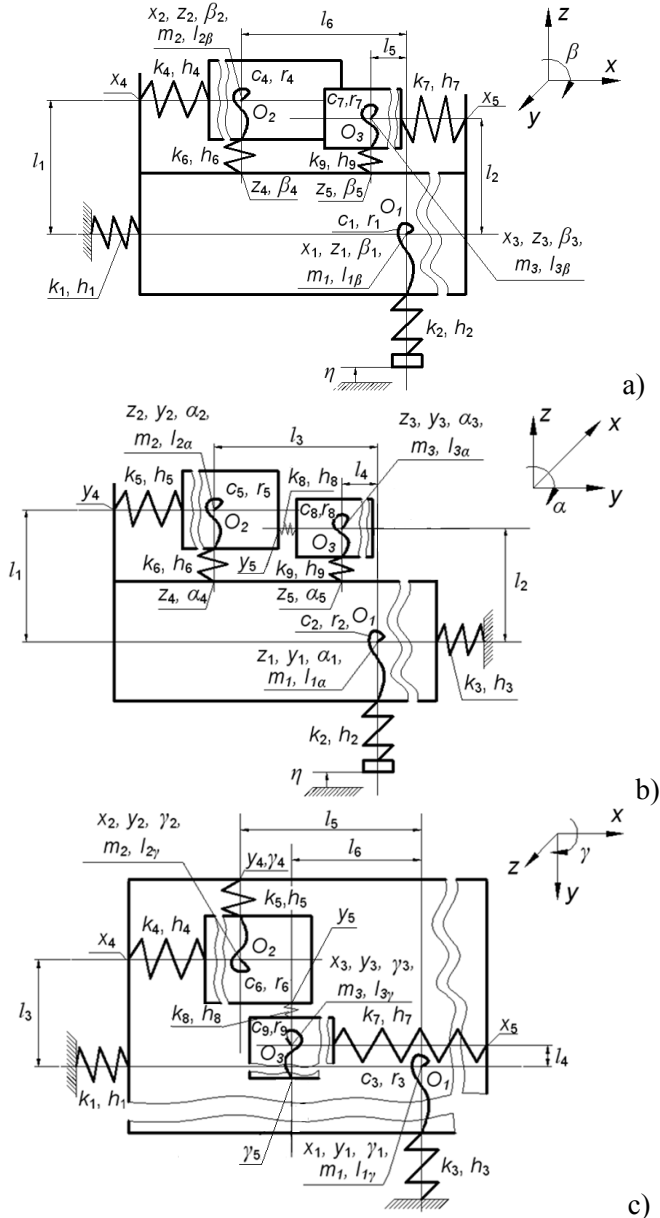
Tokiu būdu sudaromas galutinis tiriamosios sistemos dinaminis modelis (2.4 pav. a, b ir c).

2.4 paveiksle pateiktų žymėjimų paaiškinimai: O_1, O_2, O_3 – atitinkamai granitinio pagrindo, jėginės ir precizinės kariatėlių koordinačių sistemų taškai, sutampantys su jų masių centrais; m_1, m_2, m_3 – mazgų masės; I_{1j}, I_{2j}, I_{3j} – inercijos momentai, kur j – atitinka kampus α, β, γ ; k_n – standumo koeficientai pagal linijinio judėjimo ašis ($n=1, 2, \dots, 9$); c_n – kampinio judėjimo standumo koeficientai ($n=1, 2, \dots, 9$); h_n – linijinio judėjimo slopinimo koeficientai ($n=1, 2, \dots, 9$); r_n – kampinio judėjimo slopinimo koeficientai ($n=1, 2, \dots, 9$); η – pamato virpesiai.

Pagrindinėmis koordinatėmis trijų posistemų laikysime koordinates $x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i=1, 2, 3$), jos fiksuoja linijinius ir kampinius masių centrų judesius jų koordinačių sistemose. Iš viso yra 18 pagrindinių koordinačių ir 12 perteklinių koordinačių: $x_4, y_4, z_4, \alpha_4, \beta_4, \gamma_4, x_5, y_5, z_5, \alpha_5, \beta_5, \gamma_5$.

Judėjimo lygtis sudarome padalindami komparatoriaus dinaminį modelį į tris posistemas:

- Granitinio pagrindo posistemę O_1 sudaro vibroizoliuojančiosios atramos su granitine kreipiamąja be ryšių su kariatėle. Posistemę O_1 apibudina dydžiai: $m_1, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, I_{1\gamma}, k_1, k_2, k_3, c_1, c_2, c_3, h_1, h_2, h_3, r_1, r_2, r_3$ ir pagrindinės koordinatės $x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$.
- Jėginės kariatėlės posistemę O_2 sudaro jėginė kariatėlė su ryšiais jungiančiais ją su granitine kreipiamąja. Posistemę O_2 apibudina dydžiai: $m_2, I_{2\alpha}, I_{2\beta}, I_{2\gamma}, k_4, k_5, k_6, c_4, c_5, c_6, h_4, h_5, h_6, r_4, r_5, r_6$ ir pagrindinės koordinatės $x_2, y_2, z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$, bei perteklinės koordinatės $x_4, y_4, z_4, \alpha_4, \beta_4, \gamma_4$.
- Precizinės kariatėlės posistemę O_3 sudaro precizinė kariatėlė su ryšiais jungiančiais ją su granitine kreipiamąja ir jėgine kariatėle. Posistemę O_3 apibudina dydžiai: $m_3, I_{3\alpha}, I_{3\beta}, I_{3\gamma}, k_7, k_8, k_9, c_7, c_8, c_9, h_7, h_8, h_9, r_7, r_8, r_9$ ir pagrindinės koordinatės $x_3, y_3, z_3, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3$, bei perteklinės koordinatės $x_5, y_5, z_5, \alpha_5, \beta_5, \gamma_5$.



2.4 pav. Komparatoriaus dinaminis modelis: a) vaizdas koordinacių plokštumoje zx , b) vaizdas koordinacių plokštumoje zy , c) vaizdas koordinacių plokštumoje yx

Fig. 2.4. Dynamic model of the comparator: a) the view in the zx plane, b) the view in the zy plane, c) the view in the yx plane

Posistemių sujungimas įvertinamas papildomais ryšiais, kuriuos išreiškiame papildomomis (perteklinėmis) koordinatėmis.

Ilgio matavimo komparatorius yra sudėtinga virpamoji sistema, turinti daugelį laisvės laipsnių bei turinti savyje tamprius, disipacinius ir kitokius ryšius. Tokios sistemos diferencialinių lygtims išvesti tikslinga taikyti antrojo tipo Lagranžo lygtį:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dq_i} \right) - \frac{dT}{dq_i} + \frac{d\Phi}{dq_i} + \frac{d\Pi}{dq_i} = Q_i(t), \quad (2.1)$$

čia T, Π, Φ – sistemos kinetinė, potencinė energijos ir disipacinė funkcija; $\{q\}, \{\dot{q}\}, \{\ddot{q}\}$ – poslinkio, greičio ir pagreičio vektoriai, $\{Q(t)\}$ – išorinio žadinimo jėgų vektorius.

Atskirų posistemių kinetinė, potencinė energijos ir disipacinė funkcija turėtų tokias išraiškas:

$$2T_i = m_i(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) + I_{i\alpha}\dot{\alpha}_i^2 + I_{i\beta}\dot{\beta}_i^2 + I_{i\gamma}\dot{\gamma}_i^2, \quad (\text{kai } i=1, 2, 3), \quad (2.2)$$

$$2\Pi_1 = k_1(x_1 - x_0)^2 + k_3(y_1 - y_0)^2 + k_2(z_1 - z_0)^2 + c_2(\alpha_1 - \alpha_0)^2 + c_1(\beta_1 - \beta_0)^2 + c_3(\gamma_1 - \gamma_0)^2, \quad (2.3)$$

$$2\Pi_2 = k_4(x_2 - x_4)^2 + k_5(y_2 - y_4)^2 + k_6(z_2 - z_4)^2 + c_5(\alpha_2 - \alpha_4)^2 + c_4(\beta_2 - \beta_4)^2 + c_6(\gamma_2 - \gamma_4)^2, \quad (2.4)$$

$$2\Pi_3 = k_7(x_3 - x_5)^2 + k_8(y_3 - y_5)^2 + k_9(z_3 - z_5)^2 + c_8(\alpha_3 - \alpha_5)^2 + c_7(\beta_3 - \beta_5)^2 + c_9(\gamma_3 - \gamma_5)^2, \quad (2.5)$$

čia $x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ – užduoti pamato kinematiniai žadinimai atitinkamomis koordinatėmis.

Disipacinių funkcijų Φ_i išraiškos:

$$2\Phi_1 = h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)^2 + h_3(\dot{y}_1 - \dot{y}_0)^2 + h_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_0)^2 + r_2(\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_0)^2 + r_1(\dot{\beta}_1 - \dot{\beta}_0)^2 + r_3(\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_0)^2, \quad (2.6)$$

$$2\Phi_2 = h_4(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)^2 + h_5(\dot{y}_2 - \dot{y}_4)^2 + h_6(\dot{z}_2 - \dot{z}_4)^2 + r_5(\dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_4)^2 + r_4(\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_4)^2 + r_6(\dot{\gamma}_2 - \dot{\gamma}_4)^2, \quad (2.7)$$

$$2\Phi_3 = h_7(\dot{x}_3 - \dot{x}_5)^2 + h_8(\dot{y}_3 - \dot{y}_5)^2 + h_9(\dot{z}_3 - \dot{z}_5)^2 + r_8(\dot{\alpha}_3 - \dot{\alpha}_5)^2 + r_7(\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_5)^2 + r_9(\dot{\gamma}_3 - \dot{\gamma}_5)^2. \quad (2.8)$$

Dinaminio modelio ryšių lygtys turi išraiškas:

$$\begin{aligned} x_4 - x_1 - l_1\beta_1 - l_3\gamma_1 &= 0; & y_4 - y_1 - l_1\alpha_1 - l_6\gamma_1 &= 0; & z_4 - z_1 - l_3\alpha_1 + l_6\beta_1 &= 0; \\ x_5 - x_1 - l_1\beta_1 - l_4\gamma_1 &= 0; & y_5 - y_2 - (l_1 - l_2) \cdot \alpha_2 - (l_5 - l_6) \cdot \gamma_2 &= 0; \\ z_5 - z_1 - l_3\alpha_1 + l_5\beta_1 &= 0; & \alpha_4 - \alpha_1 &= 0; & \beta_4 - \beta_1 &= 0; & \gamma_4 - \gamma_1 &= 0; \\ \alpha_5 - \alpha_1 &= 0; & \beta_5 - \beta_1 &= 0; & \gamma_5 - \gamma_1 &= 0. \end{aligned}$$

Visos sistemos matematinį modelį sudarys antros eilės diferencialinių lygčių sistema kartu su ryšio lygtimis:

$$[A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [D]\{q\} = \{Q(t)\}, \quad (2.9)$$

čia (A) , (B) , (D) – inercijos, slopinimo ir standumo matricos; $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ – poslinkio, greičio ir pagreičio vektoriai, $\{Q(t)\}$ – jėgų vektorius.

Nagrinėsime sistemą, kaip žadinamą kinematiškai:

$$[A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [D]\{q\} = \{Q_{Kin.}(t)\} + \{Q(t)\}. \quad (2.10)$$

(A) , (B) , (D) matricos, poslinkio, greičio ir pagreičio $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ vektoriai bei jėgų $\{Q(t)\}$ ir kinematinio žadinimo jėgų $\{Q_{Kin.}(t)\}$ vektoriai turi tokia forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{130} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{230} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{301} & a_{302} & \dots & a_{3030} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{130} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{230} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{301} & b_{302} & \dots & b_{3030} \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{130} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{230} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{301} & d_{302} & \dots & d_{3030} \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{30} \end{Bmatrix}, \{\dot{q}\} = \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_{30} \end{Bmatrix}, \{\ddot{q}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_{30} \end{Bmatrix}, \quad (2.14)$$

$$\{Q(t)\} = \begin{Bmatrix} Q_1(t) \\ Q_2(t) \\ \vdots \\ Q_{30}(t) \end{Bmatrix}, \quad (2.15)$$

$$\{Q_{Kin.}(t)\} = \{\eta \cdot k_2\}. \quad (2.16)$$

Gautas dinaminis modelis yra sudėtingas, bet jį galima supaprastinti atmetus 1 – ają posistemę, kurią sudaro vibroizolijuojančiosios atramos su granitine kreipiamąja be ryšių su jėginę ir precizinę kariatėlėmis.

Tikslingiausia sudaryti tik kariatėlių dinaminį modelį, nes norint tobulinti komparatoriaus konstrukciją, patogiausia būtų keisti komparatoriaus kariatėlės (2.5 pav.) konstrukciją. Tai tam tikslui sudarytas kariatėlių dinaminis modelis (2.6 pav.) atmetus granitinio pagrindo posistemę, o trūkstamus ryšius pakeitus pamatuotais eksperimentiškai išoriniai granitinio pagrindo žadinimais $x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ atitinkamomis koordinatėmis.

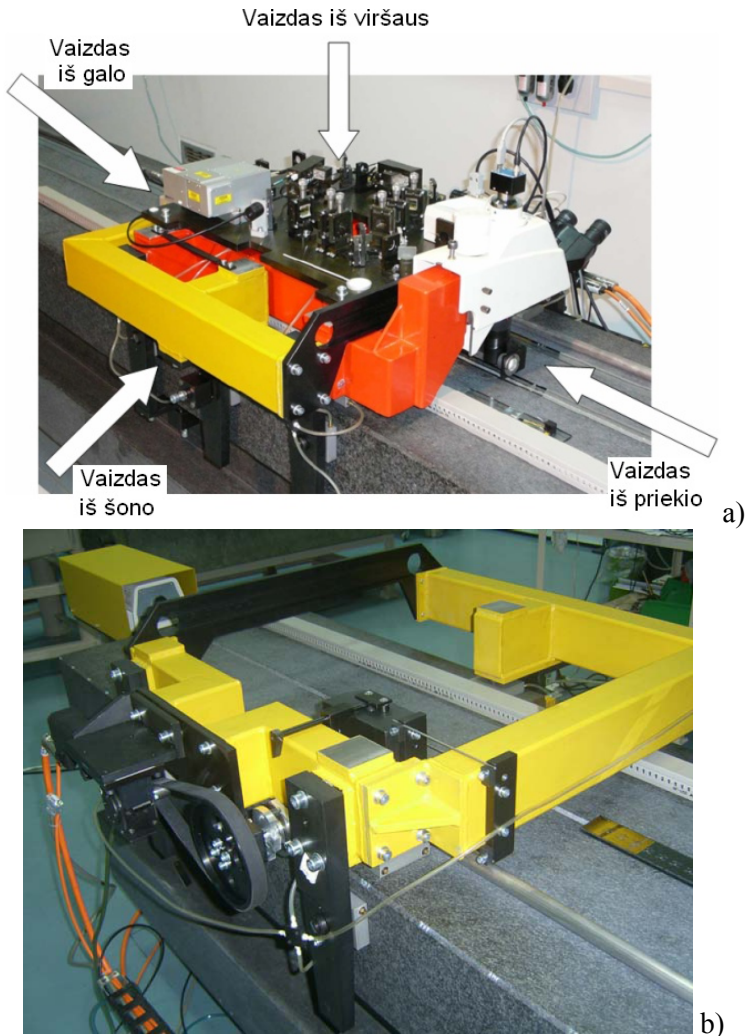
2.6 paveiksle pateiktų žymėjimų paaiškinimai: O_1, O_2 – atitinkamai jėginės ir precizinės kariatėlių koordinačių sistemų taškai, sutampantys su jų masių centrais; m_1, m_2 – jėginės ir precizinės kariatėlių masės; I_{1j}, I_{2j} – inercijos momentai, kur j – atitinka kampus α, β, γ ; k_n – standumo koeficientai pagal linijinio judėjimo ašis ($n=1, 2, \dots, 6$); c_n – kampinio judėjimo standumo koeficientai ($n=1, 2, \dots, 6$); h_n – linijinio judėjimo slopinimo koeficientai ($n=1, 2, \dots, 6$); r_n – kampinio judėjimo slopinimo koeficientai ($n=1, 2, \dots, 6$); η_1, η_2, η_3 – pamato virpesiai ašimis x, y ir z .

Pagrindinėmis koordinatėmis trijų posistemių laikysim koordinatas $x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i=1, 2$), jos fiksuoja linijinius ir kampinius masių centrų judesius koordinačių sistemose su pradžia taškuose O_1 ir O_2 . Iš viso yra 12 pagrindinių koordinačių ir viena perteklinė. Judėjimo lygtis sudarome padalindami komparatoriaus dinaminį modelį į dvi posistemas:

- Jėginės kariatėlės posistemę O_1 posistemę sudaro jėginė kariatėlė su ryšiais jungiančiais ją su granitine kreipiamąja be ryšių su precizine kariatėle. Posistemę O_1 apibudina dydžiai: $m_1, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, I_{1\gamma}, k_1, k_2, k_3, c_1, c_2, c_3, h_1, h_2, h_3, r_1, r_2, r_3$ ir pagrindinės koordinatės $x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$.

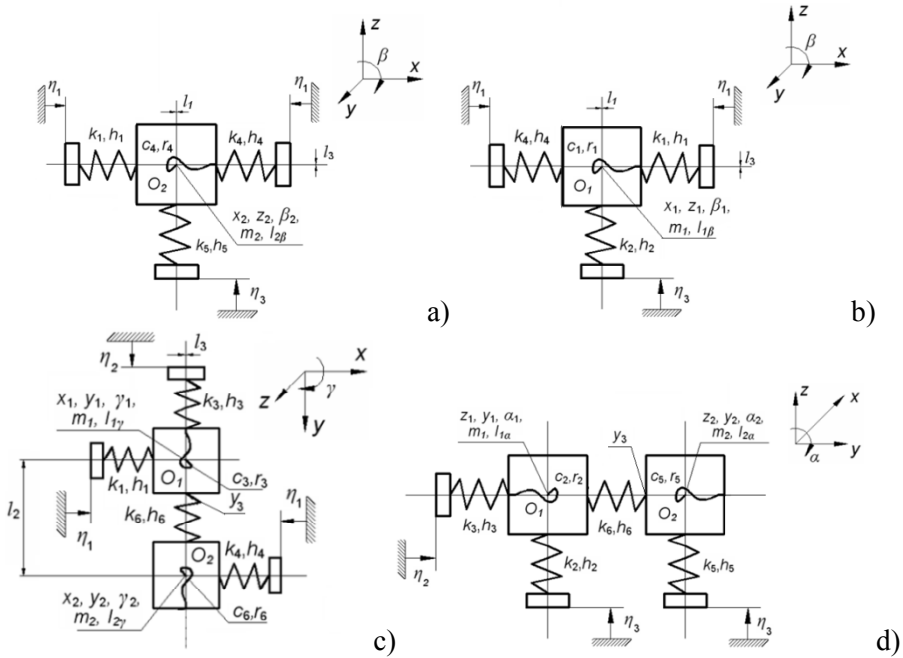
- Precizinės kariatėlės posistemę O_2 sudaro precizinė kariatėlė su ryšiais jungiančiais ją su granitine kreipiamąja ir jėgine kariatėle. Posistemę O_2 apibudina dydžiai: $m_2, I_{2\alpha}, I_{2\beta}, I_{2\gamma}, k_4, k_5, k_6, k_7, c_4, c_5, c_6, h_4, h_5, h_6, r_4, r_5, r_6$ ir pagrindinės koordinatės $x_2, y_2, z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$, bei perteklinė koordinatė y_3 .

Posistemių sujungimas įvertinamas papildomais ryšiais, kuriuos išreiškiame papildomomis (perteklinėmis) koordinatėmis.



2.5 pav. Ilgio matavimo komparatoriaus kariatelių (jėginės ir precizinės) sistemos vaizdas su dinaminio modelio vaizdavimo kryptimis (a) bei jėginės kariatėlės vaizdas (b)

Fig. 2.5. The view of the length scale comparator carriage systems with imaging directions of the dynamic model (a) and view of the force carriage (b)



2.6 pav. Komparatoriaus kariatėlių dinaminis modelis: a) ir b) vaizdas koordinacių plokštumoje zx , c) vaizdas koordinacių plokštumoje yx ir d) vaizdas koordinacių plokštumoje zy

Fig. 2.6. Dynamic model of the comparators carriages: a) the view in the zx plane, b) the view in the zy plane, c) the view in the yx plane

Žinant eksperimentiškai pamatuotus absoliučius granitinės kreipiančiosios taškų virpesių amplitudžių pagreičius ($\eta_1=a_x(t)$; $\eta_2=a_y(t)$; $\eta_3=a_z(t)$) galime naudoti dinamikos lygtį (2.10), joje esančios (A) , (B) , (D) matricos, poslinkio, greičio ir pagreičio $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ vektoriai bei jėgų $\{Q(t)\}$ ir kinematinio žadinimo jėgų $\{Q_{Kin.}(t)\}$ vektoriai turi tokią formą:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{213} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{131} & a_{132} & \dots & a_{1313} \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{113} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{213} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{131} & b_{132} & \dots & b_{1313} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{113} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{213} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{131} & d_{132} & \dots & d_{1313} \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{13} \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{q}\} = \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_{13} \end{Bmatrix}, \quad \{\ddot{q}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_{13} \end{Bmatrix}, \quad (2.20)$$

$$\{Q(t)\} = \begin{Bmatrix} Q_1(t) \\ Q_2(t) \\ \vdots \\ Q_{13}(t) \end{Bmatrix}, \quad (2.21)$$

$$\{Q_{Kin.}(t)\} = \begin{Bmatrix} \eta_1 \cdot k_1 \\ \eta_2 \cdot k_3 \\ \eta_3 \cdot k_2 \\ \eta_1 \cdot k_4 \\ \eta_3 \cdot k_5 \end{Bmatrix}. \quad (2.22)$$

Sistemos kinetinė, potencinė energijos ir disipacinė funkcijos:

$$2T_i = m_i(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) + I_{i\alpha}\dot{\alpha}_i^2 + I_{i\beta}\dot{\beta}_i^2 + I_{i\gamma}\dot{\gamma}_i^2, \quad (\text{kai } i=1, 2), \quad (2.23)$$

$$2\Pi_1 = k_1(x_1 - x_0)^2 + k_2(z_1 - z_0)^2 + k_3(y_1 - y_0)^2 + \\ + c_2(\alpha_1 - \alpha_0)^2 + c_1(\beta_1 - \beta_0)^2 + c_3(\gamma_1 - \gamma_0)^2, \quad (2.24)$$

$$2\Pi_2 = k_4(x_2 - x_0)^2 + k_5(z_2 - z_0)^2 + k_6(y_2 - y_3 - y_0)^2 + \\ + c_5(\alpha_2 - \alpha_0)^2 + c_4(\beta_2 - \beta_0)^2 + c_6(\gamma_2 - \gamma_0)^2, \quad (2.25)$$

čia $x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ – užduoti granitinės kreipiamosios žadinimai atitinkamomis koordinatėmis.

Disipacinės funkcijos išraišką Φ_i gauname iš Π_i , pakeitę standumo koeficientus į trinties (slopinimo) koeficientus:

$$2\Phi_1 = h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)^2 + h_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_0)^2 + h_3(\dot{y}_1 - \dot{y}_0)^2 + r_2(\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_0)^2 + r_1(\dot{\beta}_1 - \dot{\beta}_0)^2 + r_3(\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_0)^2, \quad (2.26)$$

$$2\Phi_2 = h_4(\dot{x}_2 - \dot{x}_0)^2 + h_5(\dot{z}_2 - \dot{z}_0)^2 + h_6(\dot{y}_2 - \dot{y}_3 - \dot{y}_0)^2 + r_3(\dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_0)^2 + r_4(\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_0)^2 + r_6(\dot{\gamma}_2 - \dot{\gamma}_0)^2. \quad (2.27)$$

Dinamino modelio ryšio lygtis turi išraišką: $y_3 - y_1 - l_2 \cdot \gamma_1 - l_2 \cdot \alpha_1 = 0$.

2.2. Modeliavimo rezultatai

Modeliavimui reikalingi koeficientai buvo rasti eksperimentiškai.

Standumo koeficientas. Mechaninė jėginės kariatėlės kontaktinė sąveika su stalo kreipiančiąja nagrinėjamoje konstrukcijoje užtikrinama aerostatinųjų guolių pagalba, žr. 2.4 paveikslą b. Aerostatinio guolio dinamika yra aprašoma Reinoldso lygtimis, todėl įvertinant susietumą su bendra deformuojama konstrukcija, uždavinys taptų netiesiniu ir gan sudėtingu. Šiame modelyje aerostatiniai guoliai modeliuojami supaprastintai, laikant, kad jų standumai yra žinomi. Kadangi turėjome pagamintą realią konstrukciją, jų standumą buvo galima iširti eksperimentiškai.

Standumo koeficientas k yra modulis tokios jėgos, kurią sukelia tampriojo elemento ilgio pokytis vienu ilgio vienetu. SI sistemoje – tai jėga Niutonais, kurią sukelia tampriojo elemento ilgio pokytis vienu metru:

$$k = \frac{P_l}{\Delta x}. \quad (2.28)$$

Sukamo elemento standumo koeficientas c yra jėgos momentas, kurį sukelia tampriojo elemento susisukimas vienu kampų matavimo vienetu. SI sistemoje tai momentas niutonmetrais, kurį sukelia tampriojo elemento susisukimas vienu radianu:

$$c = \frac{M_l}{\Delta \varphi}. \quad (2.29)$$

Slopinimo koeficientas. Mechaninių sistemų virpesius dažniausiai slopina trinties jėgos. Slopinimo jėgų ir slopinimo momentų veikimo kryptys yra priešingos juos sukėlusių apibendrintųjų greičių kryptims.

Priešingo ženklo slopinimo jėgos projekcijos į apibendrintojo linijinio greičio kryptį priklausomybė nuo to greičio vadinama jėgine slopinimo charakteristika. Taip pat vadinama ir slopinimo jėgų priešingo ženklo momento priklausomybė nuo jį sukėlusio kampinio greičio:

$$P_{sl} = h \dot{x}, \quad M_{sl} = r \dot{\varphi}. \quad (2.30)$$

Proporcingumo koeficientai h ir r , įeinantys į (2.30), vadinami *pasipriešinimo koeficientais*. Jie, kaip ir standumo koeficientai, atskirais atvejais gali būti apibendrintųjų greičių ir koordinacių bei laiko funkcijos. Šių koeficientų apibrėžimai, kai jie yra pastovieji dydžiai: *koeficientas* h yra modulis tokios slopinimo jėgos, kurią sukelia vienetinis apibendrintasis greitis:

$$h = \frac{P_{sl}}{\dot{x}}. \quad (2.31)$$

Koeficientas r yra slopinimo jėgų momentas, sukiamas vienetinio apibendrintojo kampinio greičio:

$$r = \frac{M_{sl}}{\dot{\varphi}}. \quad (2.32)$$

Turint laisvųjų virpesių bandymų rezultatus, slopinimą mechaninėje sistemoje galima įvertinti logaritminiu dekrementu:

$$\Delta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}}, \quad (2.33)$$

čia x_n ir x_{n+1} dvi gretimos maksimalios sistemos amplitudės laiko periodu

$\Delta t = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\varepsilon^2}}$, kur ω_0 yra sistemos apskritiminis dažnis, $\omega_0 = \sqrt{km}$

(tiesiaiegis judėjimas) ir $\omega_0 = \sqrt{c/J}$ (sukamasis judėjimas). Išreiškę

amplitudžių santykiu gauname: $\frac{x_n}{x_{n+1}} = e^{\frac{2\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}}$.

Logaritminio dekremento Δ išraiška yra (Ostaševičius 1998):

$$\Delta = \frac{2\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}, \quad (2.34)$$

čia ε – slopinimo koeficientų santykis lygus:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_{kr}}, \quad \varepsilon = \frac{r}{r_{kr}}. \quad (2.35)$$

Iš formulės (2.34) slopinimo koeficientų santykis ε lygus:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\frac{2\pi^2}{\Delta^2} + 1}}. \quad (2.36)$$

Slopinimo koeficientas:

$$h = \varepsilon \cdot h_{kr}, \quad r = \varepsilon \cdot r_{kr}, \quad (2.37)$$

čia h_{kr}, r_{kr} – kritinės slopinimo reikšmės:

$$h_{kr} = 2\sqrt{km}, \quad r_{kr} = 2\sqrt{cJ}. \quad (2.38)$$

Atlikus eksperimentinius tyrimus (4.4 darbo dalis) bei naudojantis 2.28–2.38 formulėmis buvo gauti standumo ir slopinimo koeficientai. Standumo koeficientų reikšmės pateiktos 2.1 lentelėje, o slopinimo koeficientų – 2.2 lentelėje.

2.1 lentelė. Standumo koeficientų reikšmės

Table 2.1. The stiffness coefficient values

Standumo koeficientas	$k_1, \text{N/m}$	$k_2, \text{N/m}$	$k_3, \text{N/m}$	$k_4, \text{N/m}$	$k_5, \text{N/m}$	$k_6, \text{N/m}$	$k_7, \text{N/m}$	$k_8, \text{N/m}$	$k_9, \text{N/m}$
Skaitinė reikšmė	$80 \cdot 10^6$	$200 \cdot 10^6$	$80 \cdot 10^6$	$160 \cdot 10^6$	$0,37 \cdot 10^6$	$180 \cdot 10^6$	$160 \cdot 10^6$	$18,85 \cdot 10^6$	$180 \cdot 10^6$
Standumo koeficientas	$c_1, \text{Nm/rad}$	$c_2, \text{Nm/rad}$	$c_3, \text{Nm/rad}$	$c_4, \text{Nm/rad}$	$c_5, \text{Nm/rad}$	$c_6, \text{Nm/rad}$	$c_7, \text{Nm/rad}$	$c_8, \text{Nm/rad}$	$c_9, \text{Nm/rad}$
Skaitinė reikšmė	$200 \cdot 10^6$	$600 \cdot 10^6$	$200 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^6$	$120 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^6$	$120 \cdot 10^6$

2.2 lentelė. Slopinimo koeficientų reikšmės**Table 2.2.** The damping coefficient values

Slopinimo koeficientas	$h_1, \text{Ns/m}$	$h_2, \text{Ns/m}$	$h_3, \text{Ns/m}$	$h_4, \text{Ns/m}$	$h_5, \text{Ns/m}$	$h_6, \text{Ns/m}$	$h_7, \text{Ns/m}$	$h_8, \text{Ns/m}$	$h_9, \text{Ns/m}$
Skaitinė reikšmė	$0,044 \cdot 10^6$	$0,132 \cdot 10^6$	$0,044 \cdot 10^6$	6864	83,84	1971	3289	1613,8	3725
Slopinimo koeficientas	$r_1, \text{Nms/rad}$	$r_2, \text{Nms/rad}$	$r_3, \text{Nms/rad}$	$r_4, \text{Nms/rad}$	$r_5, \text{Nms/rad}$	$r_6, \text{Nms/rad}$	$r_7, \text{Nms/rad}$	$r_8, \text{Nms/rad}$	$r_9, \text{Nms/rad}$
Skaitinė reikšmė	$0,084 \cdot 10^6$	$0,103 \cdot 10^6$	$0,096 \cdot 10^6$	6864	4485	2599	4175	2598	3534

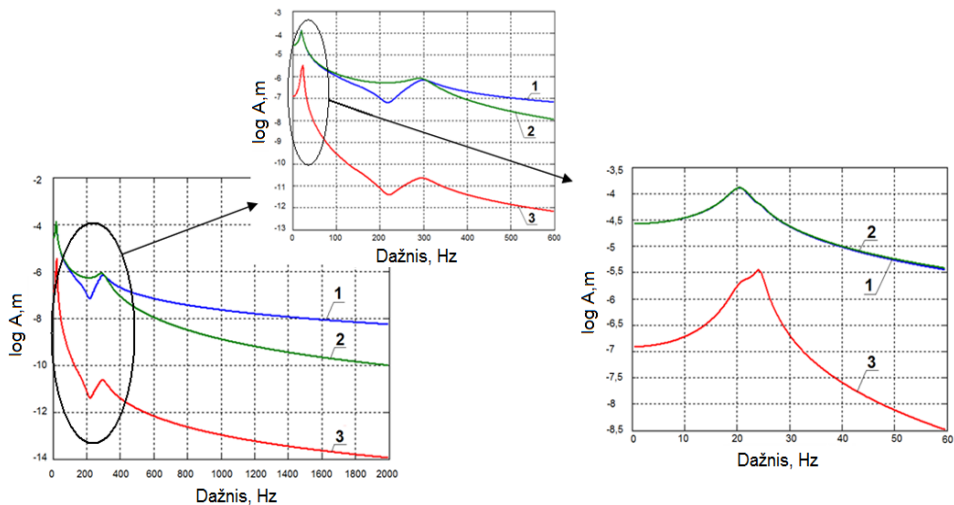
Modeliavimo rezultatai

Modeliavimui atlikti naudojama programinė įranga MATLAB, skirta didelės greitaveikos skaitmeniniam apdorojimui ir vizualizacijai. MATLAB apima skaitmeninę analizę, veiksmus su matricomis ir masyvais, signalų apdorojimą ir grafiką. SIMULINK – vizualinio modeliavimo įrankis. Modelių konstravimas SIMULINK priemonėmis (toliau vadinami S-modeliais) pagrįstas *Drag-and-Drop* (nuvilk ir palik) technologija. SIMULINK'o privalumas dvejopas: viena vertus, leidžia vartotojui taikyti visas MATLAB sistemos galimybes, o antra vertus – yra gana savarankiška jos sudedamoji dalis ta prasme, kad dirbant su juo nebūtina turėti darbo su kitais elementais, esančiais sistemos sudėtyje, įgūdžių (Kildišas 2003).

Sudaromo modelio blokai yra sujungiami kryptiniais ryšiais. Duomenys, kuriuos perduoda tarpusavy blokai, gali būti skaliariniai dydžiai, vektoriai arba daugiamatės matricos. Kartu su kitais modeliavimo parametrais vartotojas gali nurodyti modeliavimo laiko kitimo būdą (pastovus arba kintamas žingsnis) ir modeliavimo pabaigos sąlygas.

Remiantis šio skyriaus lygtimis (2.15–2.27), bei eksperimentiškai rastais koeficientais buvo sudarytas SIMULINK terpėje ilgio komparatoriaus dinaminis modelis. Amplitudžių dažninių charakteristikų apskaičiavimas buvo padarytas naudojant sukurtą komparatoriaus dinaminį modelį. Pagrindinės koordinatės labiausiai susijusios su komparatoriaus tikslumu, yra y koordinatės. Kaip tik ši kryptis sutampa su matavimo kryptimi kalibruojant ilgio matus. Todėl buvo

analizuojami virpesiai išilgai y koordinatės. Skaičiavimo rezultatai yra parodyti 2.6, 2.7, 2.8 ir 2.9 paveiksluose. Sistemos atsakas į svarbiausią žadinimą – jėgą pridėtą prie jėginės kariatėlės yra parodytas 2.6 paveiksle. Čia parodytos virpesių amplitudinės dažninės charakteristikos: jėginės kariatėlės (1), precizinės kariatėlės (2) ir granitinės kreipiančiosios (3). Jėginės kariatėlės virpesių atžvilgiu precizinės kariatėlės amplitudinė dažninė charakteristika (1) ir precizinės kariatėlės virpesių atžvilgiu granitinės kreipiančiosios amplitudinė dažninė charakteristika (2) parodytos 2.7 paveiksle.



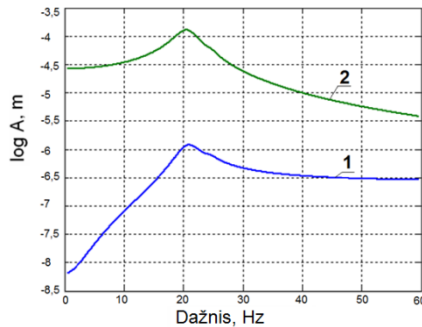
2.6 pav. Amplitudinis dažninis atsakas į žadinimą, pridėtą prie jėginės kariatėlės y_2 kryptimi: precizinės kariatėlės atsako amplitudės pagal koordinatę y_3 (1), jėginės kariatėlės atsako amplitudės išilgai pagal koordinatę y_2 (2), granitinės kreipiančiosios atsako amplitudės išilgai pagal koordinatę y_1 (3)

Fig. 2.6. Amplitude frequency response to the excitation added to the force carriage in the y_2 direction: of the precise carriage along the coordinate y_3 (1), of the force carriage along the coordinate y_2 (2), the frame along the coordinate y_1 (3)

Iš 2.6 paveikslo matosi dvi rezonansinės zonos ant dažnių kreivių: nuo 20–25 Hz zona ir 280–310 Hz zona. Paklaidos dydis priklauso nuo žadinimo jėgos amplitudės, čia ji priimta kaip vienetinė jėga.

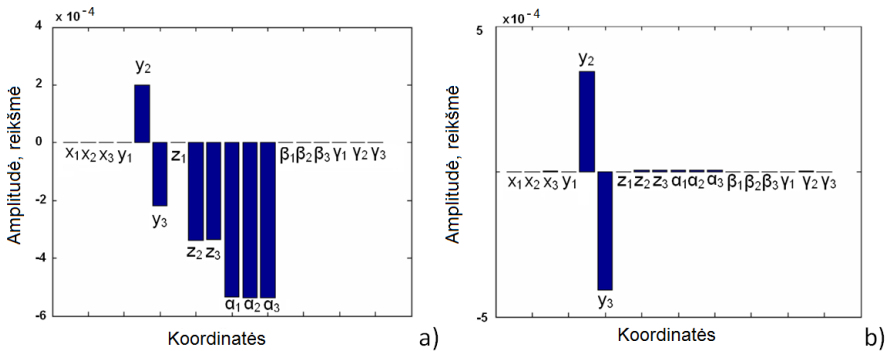
Virpesių formos šių zonų rezonansams parodytos 2.8 paveiksle. Paveiksle virpesiai pagal koordinates y_2 ir y_3 , esant šiems dažniams, vyksta priešpriešiais.

Seisminių virpesių tyrimas rodo, kad seisminio virpėjimo proceso spektras turi pagrindinius dažnius 0,5–1,5 Hz, nors aukštesnių dažnių dedamosios gali siekti 18–25 Hz.



2.7 pav. Amplitudinis dažninis atsakas į žadinimą pridėtą prie jėginės kariatėlės y_2 kryptimi: jėginės kariatėlės virpesiai atžvilgiu precizinės kariatėlės y_2 – y_3 (1), precizinės kariatėlės virpesiai atžvilgiu granitinės kreipiančiosios y_3 – y_1 (2)

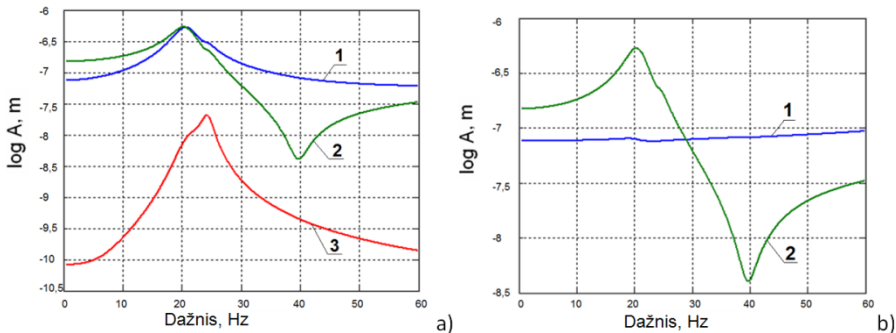
Fig. 2.7. Amplitude frequency response to the excitation added to the force carriage in the y_2 direction: of the force carriage in respect to the precise carriage, y_2 – y_3 (1), of the precise carriage in respect to the frame, y_3 – y_1 (2)



2.8 pav. Sistemos virpesių formos virpant dažniais 24 Hz (a) ir 296 Hz (b)

Fig. 2.8. Modes of oscillations of the system at frequencies 24 Hz (a) and 296 Hz (b)

Seisminio žadinimo kryptis pagrindinai sutampa su z_1 kryptimi ir, esant simetriškam poveikiui į visas keturias aerostatinės atramas ir esant joms visoms vienodo standumo, jis sukels kariatėlių virpesius z_2 ir z_3 kryptimis, kurie yra mažiau svarbus komparatoriaus darbui. Blogesnis atvejis, kai žadinimai, veikiantys aerostatinės atramas viename komparatoriaus gale, skiriasi nuo žadinimų, veikiančių aerostatinės atramas kitame komparatoriaus gale. Tai iššauks sukamojo judesio virpesius koordinatės β_1 kryptimi, kurie turės dedamąsias išilgai y ašį. Šie dažniai gali pakliūti į pirmąją rezonansinę zoną. Buvo apskaičiuotas amplitudinis dažninis atsakas į šį žadinimą (2.9 pav.), priėmus jo amplitudes artimas amplitudėms išmatuotoms eksperimentiškai, tokiu būdu rezultatas yra artimas tikrajam.



2.9 pav. Amplitudinis dažninis atsakas į žadinimą – jėgą, veikiančią granitinę kreipiančiąją kryptimis y_1 ir α_1 : a) jėginės kariatėlės atsako pagal koordinatę y_2 amplitudės (1), precizinės kariatėlės atsako pagal koordinatę y_3 amplitudės (2), granitinės kreipiančiosios atsako pagal koordinatę y_1 amplitudės (3); b) precizinės kariatėlės virpesių atžvilgiu jėginės kariatėlės (y_2 – y_3) atsakas (1), precizinės kariatėlės virpesių atžvilgiu granitinės kreipiančiosios (y_3 – y_1) atsakas

Fig. 2.9. Amplitude frequency response to the excitation forces added to the frame in the y_1 and α_1 directions: a) amplitudes of responses of the force carriage along the coordinate y_2 ; (2), amplitudes of responses of the precise carriage along the coordinate y_3 (3) amplitudes of responses of the frame along the coordinate y_1 ; b) amplitude of responses of the force carriage in respect to the precise carriage, y_2 – y_3 (1), and the precise carriage in respect to the frame, y_3 – y_1 (2)

Kaip matyti iš 2.9 paveikslo svarbiausių virpesių amplitudės – precizinės kariatėlės atžvilgiu jėginės y_2 – y_3 yra pakankamai žemo lygio, kuris nesikeičia reikšmingai visoje žemų dažnių zonoje. Nors precizinės kariatėlės virpesiai atžvilgiu granitinės kreipiančiosios pagal koordinatę y_3 – y_3 – y_1 turi rezonansą su žymiai išaugusia amplitude.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudarytas komparatoriaus sistemos dinaminis modelis leidžia analizuoti charakteringus komparatoriui dinaminis virpesius.
2. Nustatyta, seismiškai žadinant realių amplitudžių reikšmėmis, kad šiuo atveju virpesiai yra maži ir neturi didelės įtakos komparatoriaus sistemos dinaminėms charakteristikoms.
3. Pavaros sistemos keliami virpesiai gali būti reikšmingi komparatoriaus darbui ir reiktų tikslesnių tyrimų nustatant tikrąjį pavaros jėgų žadinimo dydį.

3

Eksperimentiniai ilgio matavimo komparatoriaus dinamikos tyrimai

Šių tyrimų tikslas – nustatyti sistemos mechaninio nestabilumo sukeltas kalibravimo paklaidas.

Jos atsiranda tuomet, kai:

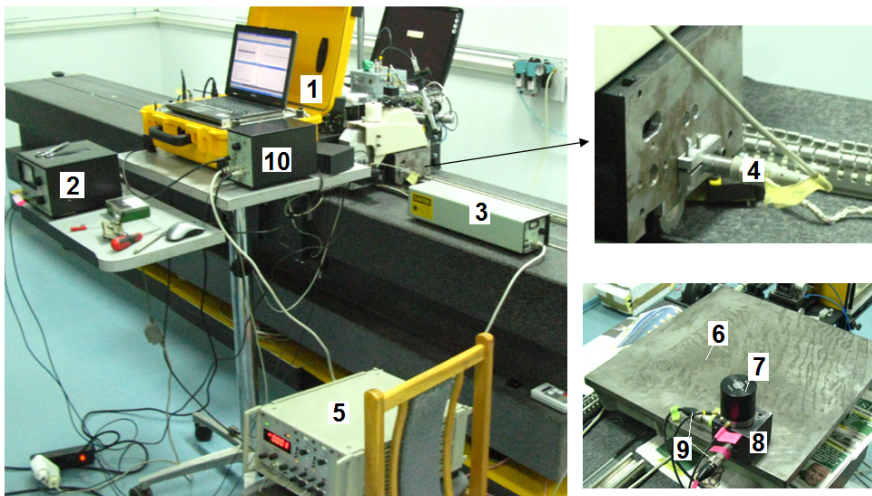
- Kinta atstumas tarp mikroskopo optinės ašies susikirtimo su skalės brūkšnių plokštuma taško ir kariatėlės taško, kurio poslinkis yra matuojamas lazeriniu interferometru;
- Kinta kariatėlės greitis matavimo judesio kryptimi brūkšnių fotografavimo metu.

Kad būtų išaiškintos šių faktorių atsiradimo priežastys ir jų poveikis brūkšnio padėties nustatymo paklaidai laipsnis, buvo atlikti šie komparatoriaus mechaninės sistemos dinaminio stabilumo tyrimai:

- Patikslinti komparatoriaus virpesius žadinantys betoninio pamato virpesiai horizontalioje ir vertikalioje plokštumose;
- Patikslinti komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios virpesiai išilgai kreipiamosios ir vertikalioje plokštumoje;
- Ištirti būdingų kariatėlės taškų virpesiai veikiant smūginiam virpesių žadinimui. Šie duomenys reikalingi modeliavimui ir skaičiavimų rezultatų pagal sudarytus modelius patikrinimui;

- Ištirti kariatėlės taško, kuriame tvirtinamas mikroskopas, virpesiai, o taip pat mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio, pritvirtinto prie kariatėlės santykiniai virpesiai šiomis sąlygomis:
 - ✓ išjungus visas pneumatines sistemas;
 - ✓ įjungus pneumatines vibroizoliacines atramas;
 - ✓ įjungus visas pneumatines sistemas;
 - ✓ esant darbiniam, taip pat mažesniems ir didesniems nei darbinis matavimo greičiams;
 - ✓ judant be elektromechaninės pavaros.
- Ištirti kariatėlės greičio virpesiai skirtingais judėjimo greičiais:
 - ✓ kad būtų ištirta pavaros įtaka mechaninei ilgio matavimo komparatoriaus sistemai, nes buvo pakeista pavaros tvirtinimo vieta bei frikinė pavaros dalis buvo pakeista į pavarą su trosu, buvo atlikti sistemos reikšmingų taškų virpesių matavimai.

Tyrimo priemonių ir metodų aprašymas. Virpesių parametrų matavimui buvo panaudotos Danijos firmos "Brüel & Kjør" virpesių matavimo priemonės. 3.1 paveiksle parodytos virpesių matavimo priemonės: 1. Kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“ su kompiuterių DEEL. 2. Vibrometras 2511. 3. Lazerinis greičio keitlys 8323. 4. Linijinio poslinkio keitlys "Hottiger Tr102". 5. Stiprintuvas "Hottiger KWS 503D". 6. Matavimo plyta 500x600 mm. 7. Seisminis akcelerometras 8306. 8. Orientavimo kaladėlė Kl. 10.06. 9. Akcelerometrai 8341. 10. Lazerinio greičio keitlio 8323 stiprintuvas 2815).



3.1 pav. Virpesių parametrų matavimo priemonės
Fig. 3.1. Vibration parameters measuring equipment

Akcelerometrai 8306 ir 8341 buvo tvirtinami prie orientavimo kaladėlės Kl. 10.06. Ši kaladėlė savo ruožtu tvirtinama atitinkamoje įrenginio vietoje arba fiksuojama ant minėtos masyvos matavimo plytos, kuri pastatoma reikiamoje matavimo vietoje ant grindų. Orientavimo kaladėlė leidžia perstatyti akcelerometrų reikiama kryptimi pakankamai standžiai pritvirtinant. Linijinio poslinkio keitlys Hottiger Tr102 buvo tvirtinamas ant plokštelės, kuri standžiai sutvirtinta su mikroskopo korpusu. Linijinių poslinkio keitlių buvo matuojami santykiniai mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio virpesiai.

Matavimo signalai kompiuteriu buvo apdorojami, panaudojant programinius paketus Origin 6 ir Pulse. Buvo apskaičiuoti signalų spektrai, skirstiniai ir statistiniai parametrai (Vekteris 2000):

Aritmetinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Standartinis nuokrypis:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

Standartinis vidurkio nuokrypis (aritmetinio vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida):

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

Sklaida:

$$x_{sklaida} = x_{\max} - x_{\min} \quad (3.4)$$

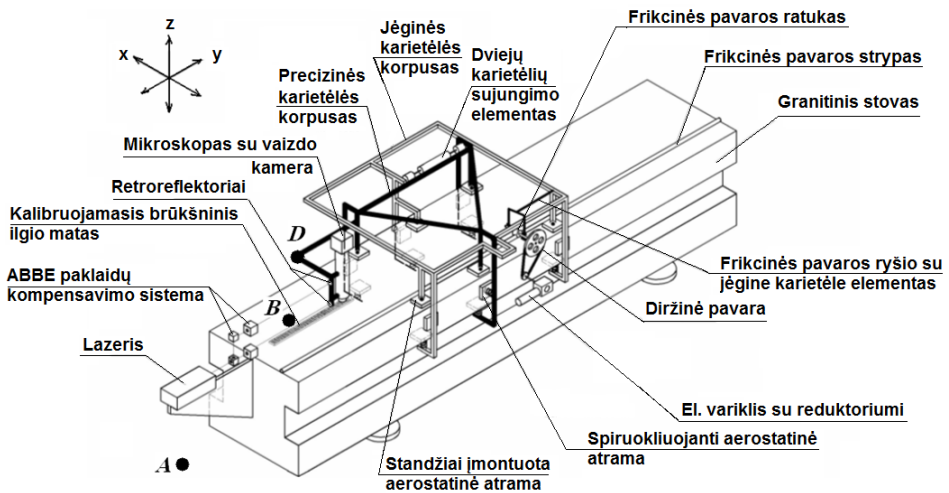
čia n – matavimo rezultatų skaičius, x_i – i -asis matavimo rezultatas.

Tyrimo rezultatai panaudoti komparatoriaus konstrukcijai tobulinti.

Skyriaus tematika paskelbta dešimt autoriaus straipsnių (Kilikevičius 2005, 2006, 2008; Kasparaitis 2006, 2007; Vekteris 2007; Trumpa 2007, Juchnevičius 2007).

3.1. Komparatoriaus virpesius žadinantys pamato virpesiai

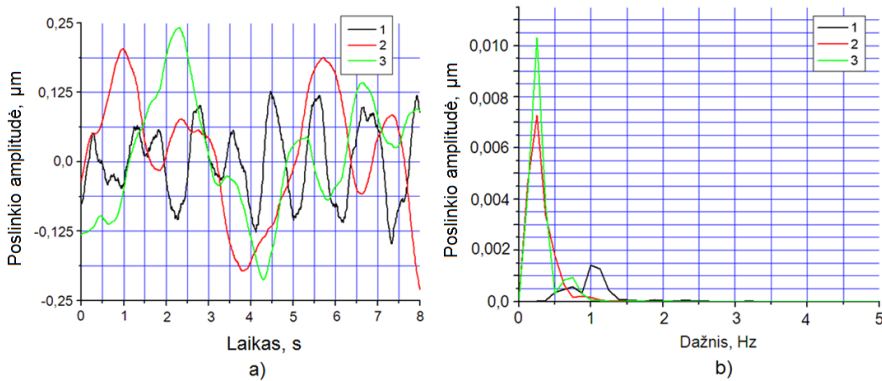
Komparatoriaus virpesius žadinantys betoninio pamato virpesiai horizontalioje (skersinė ir išilginė kryptis) ir vertikalioje plokštumose. Matavimai buvo atlikti ant pamato esančiame taške po lazerio stovu (3.2 pav.) akcelerometru trimis kryptimis. Virpesių registracijos ir suskaičiuotas spektrinio tankio grafikai ir pateikti 3.3 paveiksle a ir b, o 3.1 lentelėje – suskaičiuotosios virpesių statistinės charakteristikos.



3.2 pav. Virpesių matavimo taškai: A – betoninio pamato, B – granitinės krepiamosios, D – precizinės kariatėlės

Fig. 3.2. Vibration measurement points: A – concrete foundation, B – granite guideway, D – precision carriage

Matuojant pamato virpesius buvo siekiama iširti patalpos vibracinius parametrus veikiant technologiniams įrengimams ir kitiems vibracijų žadinimo šaltiniams. Patalpos įrengimus per sienas ir grindis veikia kitų patalpų technologinės aplinkos vibracijos: ventiliacijos mechanizmai, universalios metalo apdirbimo staklės, bei tekimo apdirbimo centrai. Pastarųjų staklių bendras galingumas siekia 50 kW, o jos pastatytos apie 50 m atstumu nuo tyrinėtios patalpos. Šioje patalpoje yra palaikomas $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ termokonstantinis režimas.



3.3 pav. Betoninio pamato (3.2 pav. taško A) absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai: 1 – vertikali ašis, 2 – išilginė ašis, 3 – skersinė ašis

Fig. 3.3. The absolute vibration of concrete foundation (Fig. 3.2 point A) (a) and its spectrum (b): 1 – vertical direction, 2 – longitudinal direction, 3 – transverse direction

3.1 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 3.1. Statistical characteristics of vibrations

Matavimo kryptis	Statistiniai parametrai						
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_{xx} , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis S_x , μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm	Suma
Vertikali	-0,00106	0,0673	0,00149	-0,148	0,128	0,275	-2,177
Išilginė	0,0176	0,108	0,00238	-0,230	0,203	0,433	-2,177
Skersinė	0,0104	0,107	0,00236	-0,213	0,241	0,454	0,0214

3.1 lentelės duomenys bei 3.3 paveiklo grafikai rodo, kad pagrindo virpesiai visomis kryptimis yra panašūs ir maksimali poslinkio amplitudės sklaida yra 0,454 μm . Virpesiai reikšmingi tik žemuose dažniuose iki 1,5 Hz, kituose dažniuose virpesių amplitudės nežymios.

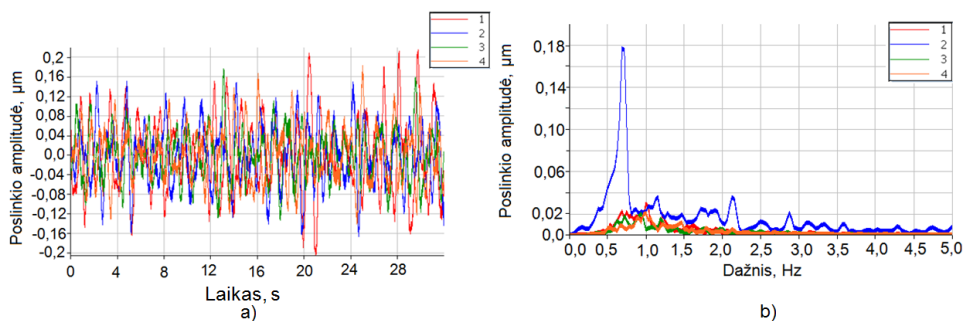
3.2. Komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios virpesiai

Virpesių matavimai buvo atlikti granitinės kreipiamosios (3.2 pav. taške B) viršutinėje plokštumoje, 200 mm nuo jos galo prie lazerio, esant išjungtomis visoms pneumatiniams sistemoms, t. y. vibroizoliacinėms atramoms ir visiems aerostatiniais guoliams. Matavimai atlikti horizontalioje plokštumoje išilgai kreipiamosios, kadangi šie svyravimai yra pavojingiausi, o taip pat vertikalia ir skersine kryptimis.

Siekiant išryškinti variklio įjungimo įtaką, buvo atlikti papildomi virpesių matavimai dviem būsenom – esant įjungtam ir išjungtam varikliui. Šių matavimų rezultatai parodė variklio įtaką sistemos dinaminėms charakteristikoms.

Matuojant granitinės kreipiamosios virpesius pradžioje pavaros variklis buvo išjungtas. Virpesių registracijos metu, po 16 s nuo jos pradžios, jis buvo įjungtas.

Bei buvo atliktas granitinės kreipiamosios virpesių matavimas, kai visos pneumatinės sistemos įjungtos. Matavimų rezultatai, kai absoliutūs taško B virpesiai matuojami išilgai granitinės kreipiamosios, pateikti 3.4 paveiksle ir 3.2 lentelėje. 3.4 paveiksle pažymėtos kreivės reiškia: 1 – įjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara, 2 – išjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara, 3 – išjungtos visos pneumatinės sistemos ir išjungta pavara, 4 – išjungtos visos pneumatinės sistemos ir pavara įjungiama po 16 sekundžių.



3.4 pav. Granitinės kreipiamosios (3.2 pav.) taško B absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

Fig. 3.4. Graphs of absolute vibrations (a) of granite guideways point B (see Fig. 3.2) and vibration spectrum (b) in longitudinal direction

3.2 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos**Table 3.2.** Statistical characteristics of vibrations

Matavimo kryptis	Pneumatinių sistemų ir pavaros būsenos	Statistiniai parametrai						
		Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis S_x , μm	Minimali reikšmė x_{\min} , μm	Maksimali reikšmė x_{\max} , μm	Sklaida, μm	
Išilginė	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	-1,810E-5	0,0496	3,873E-4	-0,131	0,173	0,304	
Išilginė	išjungtos visos pneum. sistemos ir įjungta pavara	-6,86E-4	0,0635	4,960E-4	-0,195	0,232	0,427	
Išilginė	išjungtos visos pneum. sistemos ir pavara	Iki 15 sek.	7,379E-4	0,0479	5,452E-4	-0,128	0,135	0,263
	įjungtama po 16 sek.							
Išilginė	įjungtos visos pneum. sistemos ir įjungta pavara	0,0176	0,108	0,00238	-0,230	0,203	0,43	

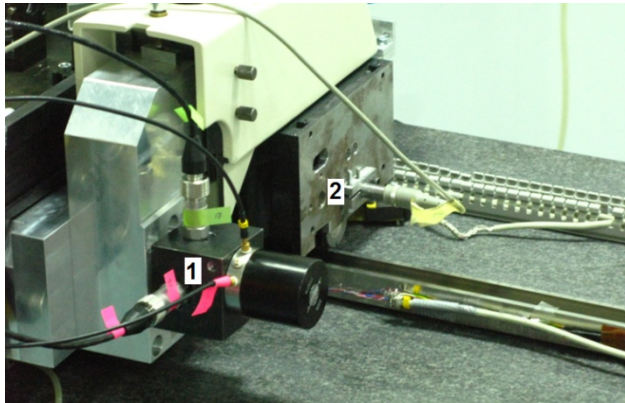
Rezultatai rodo, kad įjungtas, bet nesisukantis variklis ženkliai padidina granitinės kreipiamosios virpesius išilgai kreipiamosios. Abiem atvejais dominuoja žemo dažnio virpesiai, artimi dominuojantiems pamato žemo dažnio virpesiams.

Vertikalia kryptimi (rezultatai pateikti A priede) būdingi tų pačių, kaip ir išilgai kreipiamosios, dažnių virpesiai, tačiau variklio įjungimo įtaka nepastebima.

3.3. Karietėlės virpesiai ir judesio tolygumas

Judesio tolygumui vertinti buvo priimti tokie sistemos požymiai:

- Mikroskopo ir lazerinio interferometro atspindžio veidrodėlio, pritvirtinto prie precizinės matavimo karietėlės, santykiniai virpesiai;
- Absoliutūs taško (3.2 pav. taškas D) ant precizinės karietėlės (3.5 pav.) virpesiai išilgai matavimo judesio.



3.5 pav. Karietėlės virpesių matavimo taškai: 1 absoliutūs precizinės karietėlės;
2 santykiniai mikroskopo interferometro veidrodėlių atžvilgiu virpesiai

Fig. 3.5. Vibrations measurement points of the carriage: 1 absolute vibration (a) of precision carriage; 2 relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors

Abiems parametrms buvo registruojamos virpesių amplitudės, skaičiuojami jų spektriniai tankiai, o absoliutiems taško ant precizinės karietėlės svyravimams buvo nustatomi ir poslinkio greičiai bei sudaromos jų dažnio histogramos.

Šie du parametrai buvo tirti:

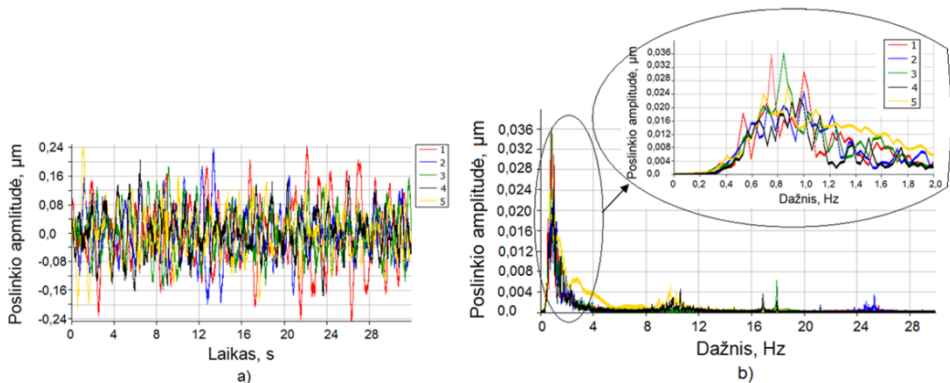
- ✓ Karietėlės ramybės būsenoje, esant įjungtoms skirtingoms pneumatiniams sistemoms;
- ✓ Karietėlei judant skirtingais greičiais;
- ✓ Karietėlei judant neveikiant elektromechaninei pavarai;
- ✓ Slopavimo elementų pastatymo įtaka judėjimo tolydumui.

Karietėlės stabilumas ramybės būsenoje. Buvo tiriami du minėti stabilumo kriterijai esant:

- išjungtoms visoms pneumatiniams sistemoms – vibroizolacinėms atramoms ir visiems aerostatiniam guoliams;
- įjungtoms tik vibroizolacinėms atramoms;
- įjungtoms visoms pneumatiniams sistemoms.

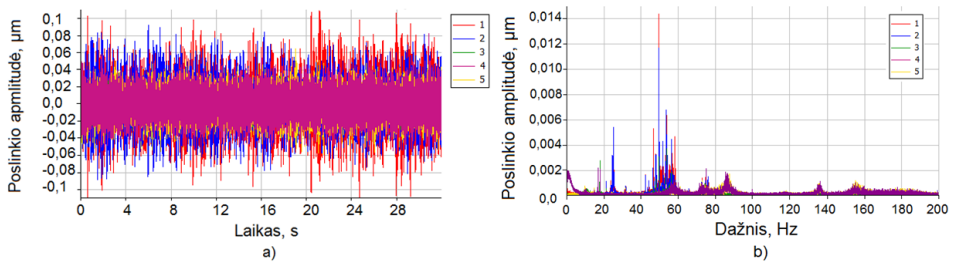
Šių tyrimų rezultatai pateikti 3.6 paveiksle ir 3.3 lentelėje taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės karietėlės, absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai bei statistinės charakteristikos. Santykinių mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (3.5 pav.) virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai 3.7 paveiksle, o virpesių statistinių charakteristikų skaičiavimo rezultatai 3.4 lentelėje. 3.6 ir 3.7 paveiksluose pažymėtos kreivės reiškia: 1 – išjungtos visos pneumatinės sistemos ir išjungta pavarą, 2 – išjungtos visos pneumatinės

sistemos ir įjungta pavara, 3 – įjungtos vibroatramos, bet oras į kariatėlės oro guolius nepaduodamas, ir įjungta pavara, 4 – įjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara, 5 – įjungtos visos pneumatinės sistemos ir išjungta pavara.



3.6 pav. Taško 1 (3.5 pav. 1) absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

Fig. 3.6. Graphs of absolute vibrations of point 1 (a) (see Fig. 3.5. 1) and vibration spectrum in longitudinal direction (b)



3.7 pav. Santykinių mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (3.5 pav. 2) virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai

Fig. 3.7. Graphs of relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors (see Fig. 3.5 2) (a) and vibrations spectrum (b)

Absoliučių virpesių matavimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje. Lentelėje pateiktos statistinės charakteristikos esant įvairioms pavaros būsenoms: išjungtos visos pneumatinės sistemos ir išjungta pavara, išjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara, įjungtos vibroatramos, bet oras į kariatėlės oro guolius nepaduodamas, ir įjungta pavara, – įjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara, – įjungtos visos pneumatinės sistemos ir išjungta pavara.

3.3 lentelė. Statistinės absoliučių (3.5 pav. 1) virpesių charakteristikos
Table 3.3. Statistical characteristics of the absolute vibrations (see Fig. 3.5. 1)

Matavimo kryptis	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė
Pneumatinių sistemų ir pavaros būsenos	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos vibrotramos, bet oras į karterėles oro guolius nepaduodamas, ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara
	3,249E-4	-6,860E-4	5,914E-4	-4,055E-4	-5,728E-4	
Aritmetinis vidurkis, μm	0,0881	0,0635	0,0580	0,0591	0,0638	
Standartinis nuokrypis, μm	6,885E-4	4,960E-4	4,530E-4	4,613E-4	4,987E-4	
Standartinis vidurkio nuokrypis, μm	-0,248	-0,195	-0,154	-0,175	-0,207	
Minimali reikšmė, μm	0,242	0,232	0,185	0,201	0,236	
Maksimali reikšmė, μm	0,49	0,427	0,339	0,376	0,443	
Sklaida, μm						

Statistiniai parametrai

3.4 lentelė. Statistinės santykių (3.5 pav. 2) virpesių charakteristikos
Table 3.4. Statistical characteristics of the relative vibrations (see Fig. 3.5 2)

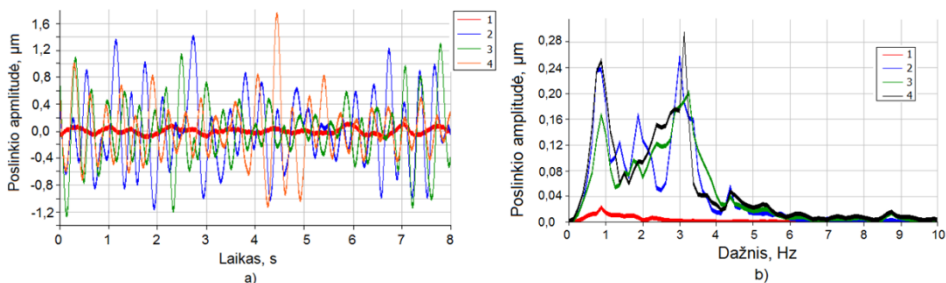
Matavimo kryptis	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė	Išilginė
Pneumatinių sistemų ir pavaros būsenos	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos vibracijos, bet oras į kametėlės oro guolius nepaduodamas, ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara
	Aritmetinis vidurkis, μm	-1,436E-5	-1,112E-5	-1,581E-5	-5,938E-5	-5,099E-6
Statistiniai parametrai	Standartinis nuokrypis, μm	0,0295	0,0257	0,00947	0,0167	0,0153
	Standartinis vidurkio nuokrypis, μm	2,308E-4	2,011E-4	7,396E-5	1,307E-4	1,199E-4
Minimali reikšmė, μm	-0,11	-0,0882	-0,0375	-0,0635	-0,0594	
Maksimali reikšmė, μm	0,109	0,0922	0,0353	0,0821	0,0648	
Skłaida, μm	0,219	0,180	0,0728	0,146	0,124	

3.3 lentelėje pateikti rezultai rodo, kad įjungus pavarą absoliučių virpesių sklaida sumažėja 14 %, o kai pavaros tvirtinimo vieta buvo (3.20 pav. F) ant jėginės kariatėlės įjungus pavarą absoliučių precizinės kariatėlės virpesių amplitudė padidėjo.

Matuojant santykinius virpesius (3.4 lent.) tarp mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio nustatyta, kad įjungiant pavarą standartinis nuokrypis padidėjo 15 %, kai išjungtos visos pneumatinės sistemos, ir 9 % – kai įjungtos visos pneumatinės sistemos. Paduodamas oras į kariatėlių oro guolius padidina standartinį nuokrypį 76 %.

Virpesių matavimas dinamiame režime. Kariatėlei judant skirtingais greičiais buvo matuojami taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės kariatėlės, absoliutūs virpesiai ir santykiniai mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (3.5 pav.) virpesiai. Kariatėlės judėjimo greičiai buvo pasirinkti artimi darbiniam 3 mm/s greičiui (1 mm/s, 2 mm/s, 4 mm/s, 5 mm/s) bei 10 mm/s. Absoliutūs virpesiai buvo matuojami trimis kryptimis. Matavimo rezultatai išilgine kryptimi, kai kariatėlės greičiai buvo iki 3 mm/s, grafiškai pateikti 3.8 ir 3.9 paveiksluose, o virpesių statistinių charakteristikų skaičiavimo rezultatai 3.5 ir 3.6 lentelėse. Matavimo rezultatai skersine ir vertikalia kryptimis, kai kariatėlės greičiai buvo iki 3 mm/s, bei kai greičiai buvo didesni už 3 mm/s, rezultatai pateikti priede A.

3.8 paveiksle pažymėtos kreivės reiškia: 1 – kariatėlės greitis 0 mm/s, 2 – kariatėlės greitis 1 mm/s, 3 – kariatėlės greitis 2 mm/s, 4 – kariatėlės greitis 3 mm/s. 3.9 paveiksle pažymėtos kreivės reiškia: 1 – kariatėlės greitis 1 mm/s, 2 – kariatėlės greitis 2 mm/s, 3 – kariatėlės greitis 3 mm/s.

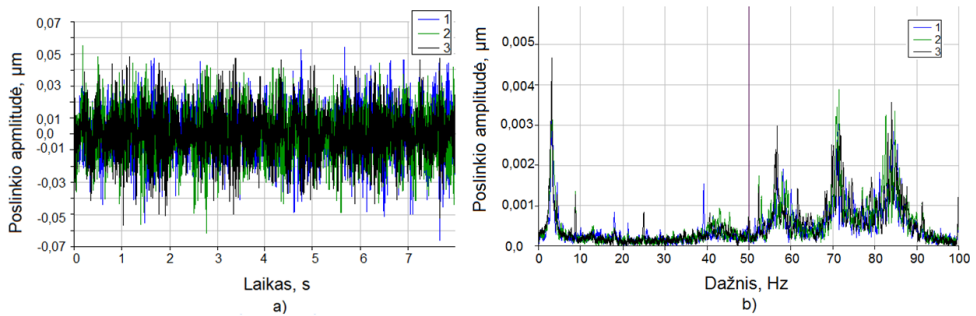


3.8 pav. Taško 1 (3.5 pav.) absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

Fig. 3.8. Graphs of absolute vibrations of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum in longitudinal direction (b)

3.5 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos**Table 3.5.** Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis S_x^- , μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
0	-5,938E-5	0,0167	1,307E-4	-0,0635	0,0821	0,146
1	-0,00299	0,522	0,0115	-1,136	1,397	2,533
2	-0,00303	0,441	0,00975	-1,243	1,279	2,522
3	0,00239	0,420	0,00928	-1,103	1,737	2,84

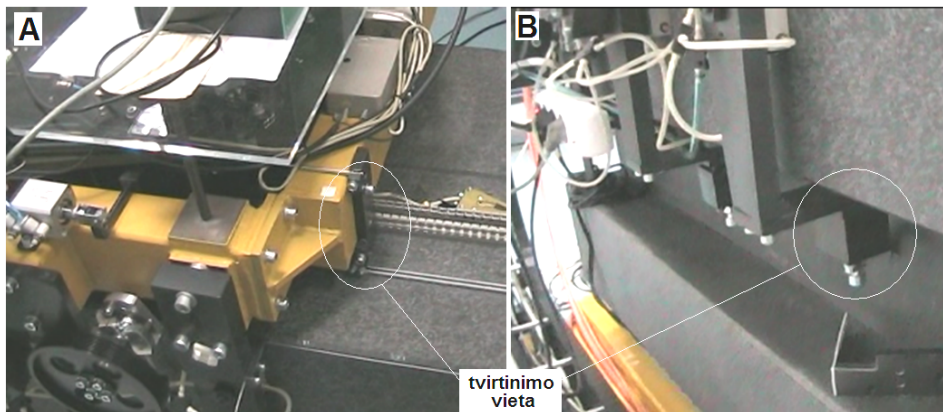
**3.9 pav.** Santykinių mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (3.5 pav.) virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai**Fig. 3.9.** Graphs of relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors (a) and vibrations spectrum (b)**3.6 lentelė.** Statistinės virpesių charakteristikos**Table 3.6.** Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis S_x^- , μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
1	-4,93E-5	0,0165	3,655E-4	-0,0663	0,0541	0,120
2	1,48E-5	0,0170	3,75E-4	-0,0616	0,0553	0,117
3	4,76E-5	0,0162	3,57E-4	-0,0568	0,0491	0,106

3.5, 3.6 lentelių ir 3.8, 3.9 paveikslų analizė parodė, kad optimaliausias karietėlės greitis yra 3 mm/s vertinant santykinius mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio ir precizinės karietėlės taško 1 (3.5 pav.) absoliučius išilgine kryptimi virpesius. Mažiausios precizinės karietėlės taško 1 absoliučių virpesių reikšmės skersine ir vertikalia kryptimi yra kai karietėlės greitis yra 2 mm/s.

Slopinimo įrenginių tvirtinimo vietos įtaka judėjimo tolygumui. Judėjimo tolygumui užtikrinti buvo atlikti tokie tyrimai. Buvo pagaminti slopinimo įrenginiai, kurie buvo tvirtinami: vienas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, viršuje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. A), kitas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. B).

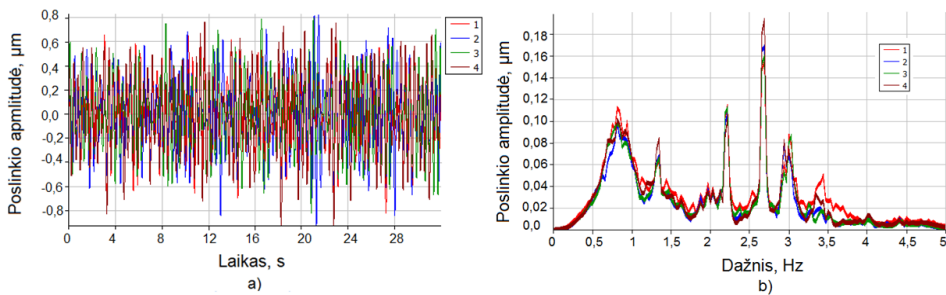
Tyrimo metu kariatėlė judėjo 3 mm/s greičiu. Buvo ištirti keturi atvejai: be slopinimo elementų; slopinimo elementas tvirtinamas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. B); slopinimo elementas tvirtinamas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, viršuje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. A); kai uždėti du slopinimo elementai (3.10 pav. A ir B).



3.10 pav. Slopinimo įrenginių tvirtinimo vieta: A šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, viršuje granitinės kreipiančiosios; B šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios

Fig. 3.10. Mounting of the damping equipment: near air bearing of the force carriage, on the top of the granite guidway (view A); near air bearing of the force carriage, at the bottom of the granite guidway (view B)

Rezultatai įvertinantys slopinimo įrenginių tvirtinimo vietos įtaką kariatėlės judėjimo tolygumui pateikti 3.11 (absoliutūs precizinės kariatėlės virpesiai) ir 3.12 (santykiniai virpesiai tarp mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio) paveiksluose ir 3.7 ir 3.8 lentelėse. 3.11 ir 3.12 paveiksluose pažymėtos kreivės reiškia: 1 – be slopinimo elementų, 2 – slopinimo elementas yra šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. B), 3 – slopinimo elementas yra šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, viršuje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. A), 4 – kai uždėti du slopinimo elementai (3.10 pav. A ir B).



3.11 pav. Taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės kariatėlės, absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

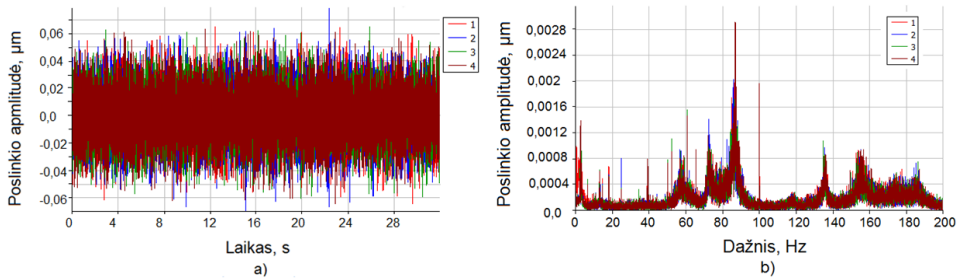
Fig. 3.11. Graphs of absolute vibrations of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum in longitudinal direction (b)

3.7 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 3.7. Statistical characteristics of vibrations

Slopinimo elementų tvirtinimo vieta	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis S'_x , μm	Minimali reikšmė x_{min} μm	Maksimali reikšmė x_{max} μm	Sklaida, μm
Be slopinimo elementų	-1,539E-4	0,283	0,00221	-0,873	0,713	1,586
Slopinimo elementas yra 3.10 pav. B	0,0015	0,30	0,00235	-0,926	0,821	1,747
Slopinimo elementas yra 3.10 pav. A	0,00177	0,290	0,00226	-0,823	0,797	1,620
Kai uždėti du slopinimo elementai (3.10 pav. A ir B)	7,328E-4	0,318	0,00248	-0,925	0,767	1,691

Eksperimentiniai matavimų rezultatai, pateikti 3.11 ir 3.12 paveisluose ir 3.7 ir 3.8 lentelėse, rodo, kad mažiausi absoliutūs precizinės kariatėlės taško 1 (3.5 pav.) virpesiai yra, kai nėra slopinimo įrenginių, o santykiniai mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio virpesiai – kai slopinimo įrenginys pritvirtintas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios. Slopinimo įrenginiai, vertinant precizinės kariatėlės absoliučius virpesius, padidina virpesių statistinių charakteristikų reikšmes 2,5–8,5%. Didžiausia standartinio nuokrypio reikšmė 0,318 μm yra kai uždėti du slopinimo elementai (3.10 pav. A ir B). Didžiausia virpesių sklaidos reikšmė 1,747 μm – kai slopinimo elementas uždėtas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. B).



3.12 pav. Santykinių mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (3.5 pav.) virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai

Fig. 3.12. Graphs of relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors (a) and vibrations spectrum (b)

3.8 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 3.8. Statistical characteristics of vibrations

Slopinimo elementų tvirtinimo vieta	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
Be slopinimo elementų	6,30E-4	0,166	0,0130	-0,645	0,648	0,129
Slopinimo elementas yra 3.10 pav. B	-2,889E-5	0,0150	3,316E-4	-0,0463	0,047	0,0933
Slopinimo elementas yra 3.10 pav. A	-1,915E-4	0,0154	3,394E-4	-0,0473	0,0554	0,1027
Kai uždėti du slopinimo elementai (3.10 pav. A ir B)	-1,24E-4	0,0158	3,50E-4	-0,0490	0,0509	0,0999

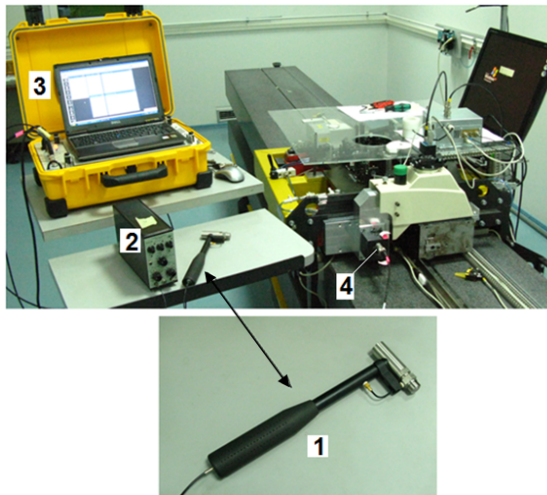
Slopinimo įrenginiai, vertinant santykiniai virpesius tarp mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio, sumažina virpesių statistinių charakteristikų reikšmes 5–11 %. Santykiniai virpesiai yra mažiausi, kai slopinimo įrenginys pritvirtintas šalia jėginės kariatėlės aerostatinio guolio, apačioje granitinės kreipiančiosios (3.10 pav. B).

3.4. Būdingų kariatėlės taškų virpesiai, veikiant smūginiam virpesių žadinimui

Šie duomenys reikalingi modeliavimui ir skaičiavimų rezultatų, pagal sudarytus modelius, patikrinimui.

Buvo tiriami būdingų jėginės ir precizinės kariatėlių virpesiai veikiant virpesius žadinantiems smūgiams būdinguose abiejų kariatėlių taškuose. Matavimai buvo atlikti akcelerometru išilgai matavimo judesio ir dviem jam statmenomis kryptimis – vertikalia ir skersine horizontalia kryptimis. Žadinimas buvo atliekamas dinamometriniu plaktuku. Virpesiai buvo žadinami ir matuojami įjungus visas pneumatines sistemas.

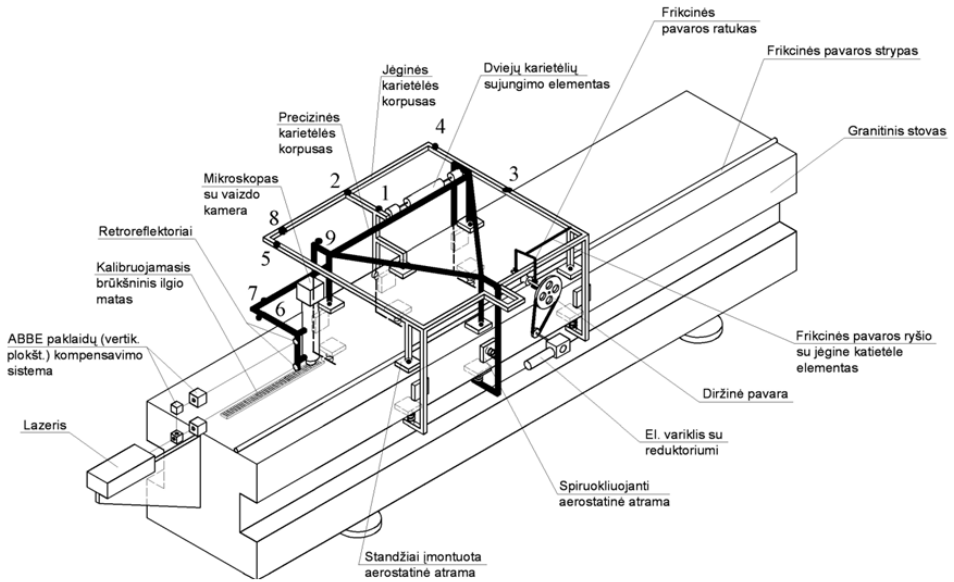
Atliekant matavimus buvo naudojamas akcelerometras 8341. Tačiau matuojant sistemos atsaką į išorinį žadinimą, kai akcelerometras buvo pritvirtintas ant precizinės kariatėlės, o žadinama buvo jėginė kariatėlė, akcelerometro 8341 jautris buvo per mažas, tai tuose matavimuose buvo naudojamas seisminis akcelerometras 8306 su vibrometru 2511.



3.13 pav. Smūginiam virpesių žadinimui naudojamos Danijos firmos "Brüel & Kjær" matavimo priemonės: 1. Žadinimo plaktukas 8202 su jėgos matavimo keitliu 8200; 2. Stiprintuvas 2626; 3. Kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“ su kompiuteriu DEEL; 4. Akcelerometras 8341

Fig. 3.13. Equipment used for the impact excitation ("Brüel & Kjær"): 1) the impact hammer 8202 with the force transducer 8200, 2) the amplifier 2626, 3) the portable measurement results processing station „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“

Virpesių matavimo bei žadinimo taškai parodyti 3.14 paveiksle.



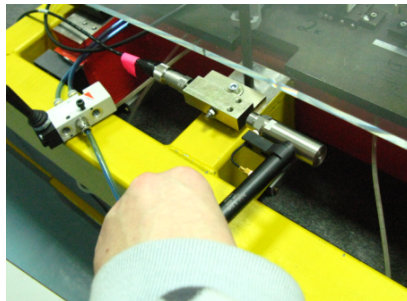
3.14 pav. Komparatoriaus struktūrinė schema ir matavimo taškai

Fig. 3.14. A structural scheme of the comparator and the measuring points

Jėginės kariatėlės virpesiai žadinant pačią kariatėlę. Matavimai buvo atliekami 1 taške (3.14 pav.).

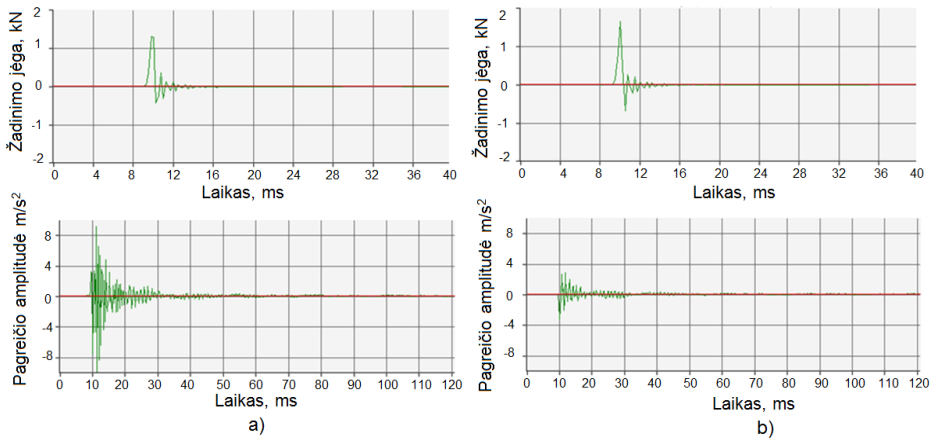
Išilginė kryptis. Žadinama buvo šalia acelerometro 1 taške ir per penį 150 mm 5 taške (3.14 pav.). Akcelerometro tvirtinimas ir žadinimo vieta pateikti 3.15 paveiksle.

Kariatėlių ramybės būsenoje buvo atlikti keli vienas po kito žadinimai. Virpesių žadinimo metu bei po jo, užgesus žadinimo poveikiui, grafikas parodytas 3.16 paveiksle.



3.15 pav. Akcelerometro tvirtinimas (jėginė kariatėlė) ir žadinimo vieta (išilginė kryptis)

Fig. 3.15. The fixing place of the accelerometers (force carriage) and the excitation point (in longitudinal direction)



3.16 pav. Akcelerometras ant jėginės kariatėlės (3.14 pav. taškas 1), matuojama išilgine kryptimi: a) žadinama šalia acelerometro, b) žadinama atstumu 150 mm nuo acelerometro

Fig. 3.16. Accelerometer on the force carriage (Fig. 3.14. point 1), measuring is performed in longitudinal direction: a) excitation near to the accelerometer, b) through the distance 150 mm from the accelerometer

Skersinė kryptis. Žadinima buvo šalia acelerometro 1 taške ir per petį 280 mm 8 taške (3.14 pav.).

Vertikali kryptis. Žadinama buvo šalia acelerometro 1 taške ir per petį 80 mm 2 taške (3.14 pav.).

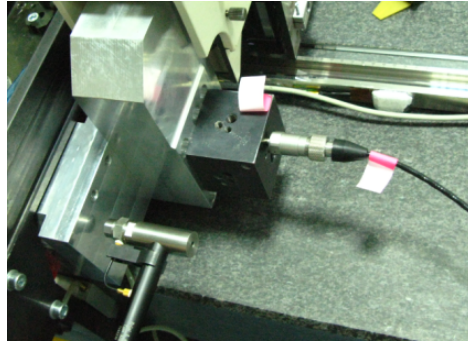
Akcelerometro tvirtinimas ir žadinimo vietos bei matavimo rezultatų grafikai pateikti A priede.

Remiantis 3.16 ir A priede paveikslų rezultatais, kai jėginė kariatėlė žadinama 1,2 kN jėga, sukelti virpesiai greičiausiai nuslopsta vertikalia kryptimi (per 10 ms), išilgine kryptimi per 20 ms ir skersine – 15 ms.

Precizinės kariatėlės virpesiai žadinant pačią kariatėlę. Matavimai buvo atliekami 6 taške (3.14 pav.).

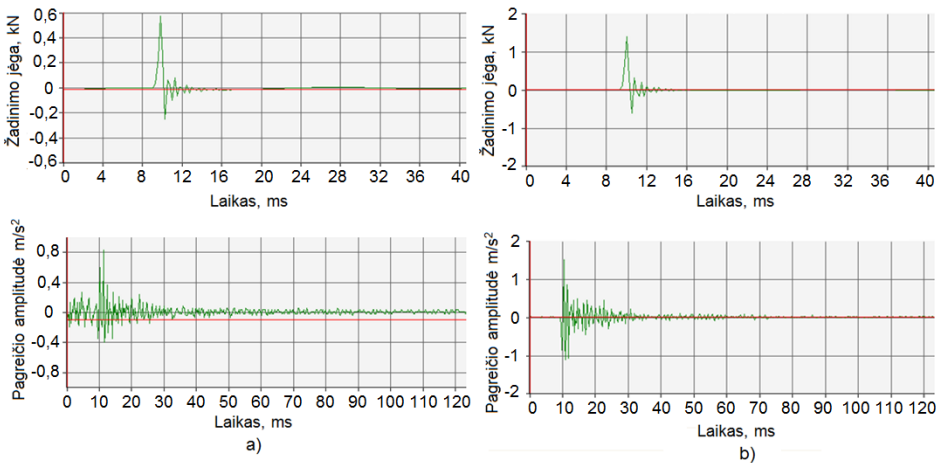
Išilginė kryptis. Žadinima buvo šalia acelerometro 6 taške ir per petį 80 mm 7 taške (3.14 pav.). Akcelerometro tvirtinimas ir žadinimo vieta pateikti 3.17 paveiksle.

Kariatėlių ramybės būsenoje buvo atlikti keli vienas po kito žadinimai. Virpesių žadinimo metu bei po jo, užgesus žadinimo poveikiui, grafikas parodytas 3.18 paveiksle.



3.17 pav. Akcelerometro tvirtinimas (precizinė kariatėlė) ir žadinimo vieta (išilginė kryptis)

Fig. 3.17. The fixing place of the accelerometers (precise carriage) and the excitation point (in longitudinal direction)



3.18 pav. Akcelerometras ant precizinės kariatėlės (3.14 pav. taškas 6), matuojama išilgine kryptimi: a) žadinama šalia acelerometro, b) žadinama atstumu 80 mm nuo acelerometro

Fig. 3.18. Accelerometer on the precise carriage (Fig. 3.14. point 6), measuring is performed in longitudinal direction: a) excitation near to the accelerometer, b) through the distance 80 mm from the accelerometer

Skersinė kryptis. Žadinama buvo šalia acelerometro 6 taške ir per petį 80 mm 7 taške (3.14 pav.).

Vertikali kryptis. Žadinama buvo šalia acelerometro 6 taške ir per petį 80 mm 9 taške (3.14 pav.).

Akcelerometro tvirtinimas ir žadinimo vietos bei matavimo rezultatų grafiškai pateikti A priede.

Kai žadinama precizinė kariatėlė ir jos virpesiai greičiausiai nuslopsta vertikaliai kryptimi per 20 ms, mažiausiai slopinami virpesiai išilgine kryptimi (40 ms), o skersine kryptimi virpesiai nuslopsta per 30 ms.

Precizinės kariatėlės virpesiai žadinant jėginę kariatėlę. Matavimai buvo atliekami 6 taške (3.14 pav.). Akcelerometro tvirtinimas parodytas 3.17 paveiksle, tik vietoj akcelerometro 8341 buvo naudojamas seisminis akcelerometras 8306 su vibrometru 2511.

Išilginė kryptis. Žadinama buvo jėginė kariatėlė šalia dviejų kariatėlių sujungimo elemento 3 taške ir per petį 280 mm 4 taške (3.14 pav.).

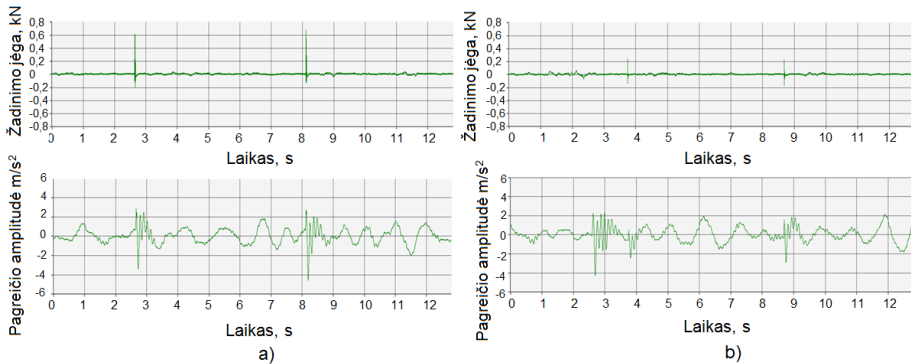
Gauti rezultatai pateikti 3.19 paveiksle.

Skersinė kryptis. Žadinama buvo jėginė kariatėlė 8 taške (3.14 pav.).

Vertikali kryptis. Žadinama buvo jėginė kariatėlė šalia dviejų kariatėlių sujungimo elemento 3 taške (3.14 pav.).

Akcelerometro tvirtinimas parodytas A priede, tik vietoj akcelerometro 8341 buvo naudojamas seisminis akcelerometras 8306 su vibrometru 2511. Žadinimo vietos bei matavimo rezultatų grafikai pateikti A priede.

Atliekant matavimus skersine ir vertikalia kryptimis nustatyta, kad atsakas į žadinimą yra nykstantai mažas. Ir standumo bei slopinimo koeficientai, kurie naudojami 2 darbo dalyje, tarp jėginės ir precizinės kariatėlių tomis kryptimis buvo piimti lygūs nuliui.



3.19 pav. Akcelerometras ant precizinės kariatėlės (3.14 pav. taškas 6), matuojama išilgine kryptimi: a) žadinama jėginė kariatėlė šalia dviejų kariatėlių sujungimo elemento, b) žadinama atstumu 280 mm nuo dviejų kariatėlių sujungimo elemento

Fig. 3.19. Accelerometer on the precise carriage (Fig. 3.14. point 6), measuring is performed in longitudinal direction: a) excitation is added to the force carriage near to joint member of two carriages, b) excitation through the distance 80 mm from joint member of two carriage

Šios darbo dalies rezultatai panaudoti nustatant, dinaminiam ilgio matavimo komparatoriaus sistemos modeliui, modeliavimui reikalingus koeficientus

(slopinimo, standumo). 2 darbo dalyje skaičiuojant slopinimo dekrementą buvo imamos po žadinimo dviejų gretimų pagreičio amplitudžių reikšmės.

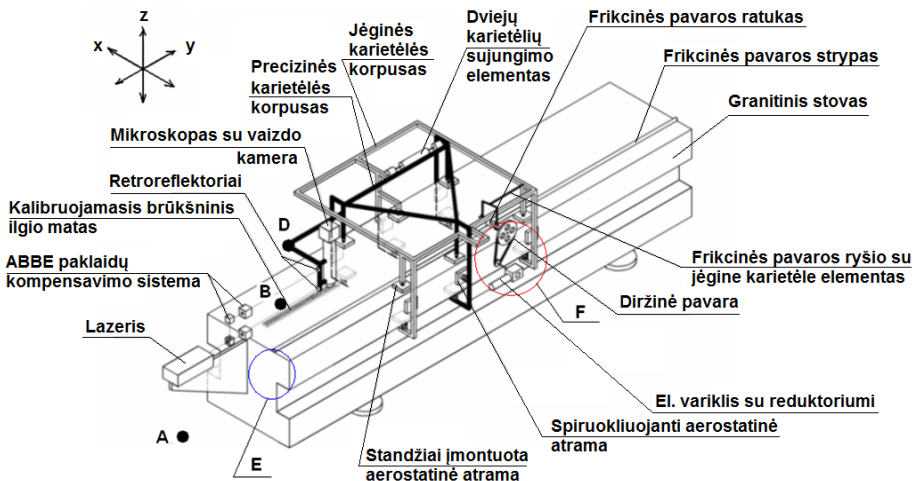
3.5. Karietėlės konstrukcijos ir pavaros įtaka sistemos dinaminėms charakteristikoms

Šioje dalyje pagrindinis dėmesys skirtas nustatyti karietėlės konstrukcijos koregavimo ir pavaros tvirtinimo vietos keitimo įtaka sistemos dinaminėms charakteristikoms.

Skyriuje yra palyginami atliktų matavimų rezultatai, nes buvo atlikti pakartotini tyrimai patobulinus karietėlės konstrukciją bei pakeitus pavaros tvirtinimo vietą. Pavaros tvirtinimo vietos ant ilgio matavimo komparatoriaus parodytos 3.20 paveiksle E ir F. 3.21 paveiksle vaizde F pavara tvirtinama prie jėginės karietėlės ir karietėlė juda frikcinės pavaros dėka, vaizde E pavara tvirtinama ant granitinės kreipiančiosios šalia lazerio stovo bei karietėlė juda plieninio lyno dėka.

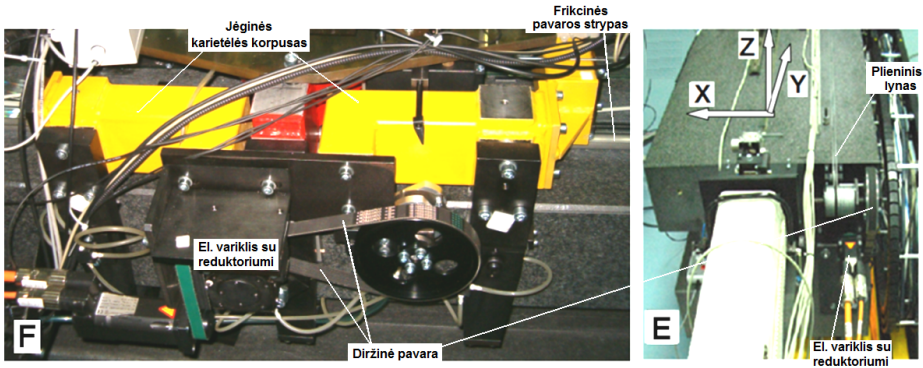
Pakeitimų įtakai vertinti pasirinkti tokie požymiai:

- Komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios virpesiai išilgai kreipiamosios (Y) ir vertikalioje plokštumoje (Z),
- Karietėlės stabilumas ramybės būsenoje,
- Judesio tolygumas karietėlei judant skirtingais greičiais.



3.20 pav. Virpesių matavimo taškai (A, B ir D) ir pavaros tvirtinimo vieta ant ilgio matavimo komparatoriaus (F ir E)

Fig. 3.20. Points of measurement of vibrations (A, B and D), and positions of location of the drive (F and E)



3.21 pav. Pavaros tvirtinimo vietų (F ir E) ant ilgio matavimo komparatoriaus bendri vaizdai

Fig. 3.21. Positions of location of the drive (F and E) on the length measurement comparator overall picture

Komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios taško B virpesiai (3.20 pav.) išilgai kreipiamosios (Y) ir vertikalioje plokštumoje (Z). Virpesių matavimai dviem būsenom – esant įjungtam ir išjungtam varikliui, esant išjungtoms visoms pneumatinėms sistemoms, t. y. vibroizoliacinėms atramoms ir visiems aerostatiniams guoliams.

Matavimo rezultatai rodo, kad kai yra įjungtas arba išjungtas variklis matosi sumažėję granitinės kreipiančiosios virpesiai po to, kai buvo pakeista pavaros tvirtinimo vieta.

Kariatėlės stabilumas ramybės būsenoje. Palyginimui vertinti pasirinkti tokie požymiai:

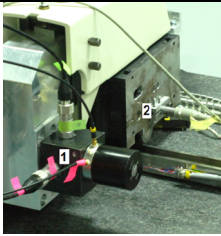
- Esant išjungtoms visoms pneumatinėms sistemoms – vibroizoliacinėms atramoms ir visiems aerostatiniams guoliams;
- Esant įjungtoms tik vibroizoliacinėms atramoms;
- Esant įjungtoms visoms pneumatinėms sistemoms.

Palyginti komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios virpesiai (A priedas), kariatėlės virpesiai ramybės būsenoje (3.9 lent.).

3.9 lentelėje pateikti matavimo rezultatai rodo, kaip ir granitinės kreipiančiosios virpesiai, po pakeitimų ženkliai sumažėjusius virpesius. Dominuojantys virpesiai po atliktų sistemos pakeitimų pasislinko į žemus dažnius, matuojant absoliučias reikšmes, ir atvirkščiai – į aukštus dažnius, matuojant santykinės virpesių reikšmes.

3.9 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 3.9. Statistical characteristics of vibrations

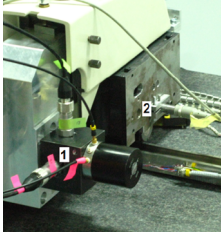
<i>Matavimo vieta</i>	Matavimo kryptis (matavimo taškas)	Pavaros tvirtinimo vieta (3.20 pav.)	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Dominuojantys virpesiais prie dažnių, Hz	Dominuojančių virpesių reikšmė, μm	Pastabos
 <p>Absoliutūs taško ant precizinės kariatėlės virpesiai išilgai matavimo judesio (1) ir mikroskopo bei lazerinio interferometro atspindžio veidrodėlio, pritvirtinto prie precizinės matavimo kariatėlės, santykiniai virpesiai (2)</p>	$Y(1)$	F	0,228	-0,728	0,728	2; 25	0,055; 0,056	išjungtos pneum. sistemos
	$Y(2)$	F	0,0661	-0,378	0,378	25; 40	0,0105; 0,0115	
	$Y(1)$	E	0,0635	-0,195	0,232	1	0,025	
	$Y(2)$	E	0,0257	-0,0882	0,0922	50	0,012	
	$Y(1)$	F	0,181	-0,676	0,882	2	0,042	įjungtos tik vibro-izoliacinės atramos
	$Y(2)$	F	0,0410	-0,158	0,080	12	0,0045	
	$Y(1)$	E	0,06449	-0,198	0,235	1	0,19	
	$Y(2)$	E	0,0217	-0,0821	0,072	50	0,0105	
	$Y(1)$	F	0,262	-0,947	0,827	2; 12	0,045; 0,067	įjungtos pneum. sistemos
	$Y(2)$	F	0,0475	-0,182	0,138	12; 35	0,006; 0,0065	
	$Y(1)$	E	0,0428	-0,0904	0,109	1	0,024	
	$Y(2)$	E	0,0151	-0,0544	0,0554	70	0,0016	

Judesio tolygumas kariatėlei judant skirtingais greičiais. Judesio tolygumui vertinti priimti tokie požymiai:

- Absoliutūs taško ant precizinės kariatėlės virpesiai išilgai matavimo judesio;
- Mikroskopo ir lazerinio interferometro atspindžio veidrodėlio, pritvirtinto prie precizinės matavimo kariatėlės, santykiniai virpesiai.

Šių tyrimų rezultatai pateikti 3.10 lentelėje.

3.10 lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos**Table 3.10.** Statistical characteristics of vibrations

<i>Matavimo vieta</i>	Matavimo kryptis (matavimo taškas)	Pavaros tvirtinimo vieta (3.20 pav.)	Standartinis nuokrypis S_y , μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Dominuojantys virpesiais prie dažnių, Hz	Dominuojančių virpesių reikšmė, μm	Pastabas
 Absoliutūs taško ant precizinės kariatėlės virpesiai išilgai matavimo judesio (1) ir mikroskopo bei lazerinio interferometro atspindžio veidrodėlio, pritvirtinto prie precizinės matavimo kariatėlės, santykiniai virpesiai (2)	$Y(1)$	F	0,684	-2,812	2,233	10	0,27	Greitis 1mm/s
	$Y(2)$	F	0,510	-1,599	1,533	60	0,12	
	$Y(1)$	E	0,522	-1,136	1,397	1; 3	0,24 0,26	
	$Y(2)$	E	0,0165	-0,066	0,054	3; 72	0,0032 0,003	
	$Y(1)$	F	1,258	-4,241	3,775	10	0,74	Greitis 3mm/s
	$Y(2)$	F	0,662	-1,747	1,787	60	0,175	
	$Y(1)$	E	0,420	-1,103	1,737	1; 3	0,255 0,295	
	$Y(2)$	E	0,0162	-0,059	0,049	3; 85	0,0046 0,0035	Greitis 5mm/s
	$Y(1)$	F	1,461	-5,797	6,214	2	0,35	
	$Y(2)$	F	0,355	-1,253	1,303	70	0,058	
$Y(1)$	E	0,508	-1,72	2,13	1; 3	0,36 0,335		
$Y(2)$	E	0,0227	-0,083	0,079	3; 66	0,0068 0,0092		

Matavimo rezultatai rodo po pakeitimų ženkliai sumažėjusius absoliučius taško ant precizinės kariatėlės (standartinis nuokrypis sumažėjo nuo 0,162 μm , kai kariatėlės judėjimo greitis 1 mm/s, iki 0,838 μm , kai kariatėlės judėjimo greitis 3 mm/s) išilgai matavimo judesio virpesius bei mikroskopo ir lazerinio interferometro atspindžio veidrodėlio, pritvirtinto prie precizinės matavimo kariatėlės, santykinius virpesius (dominuojančių virpesių reikšmės sumažėjo nuo 0,049 μm , kai kariatėlės judėjimo greitis 5 mm/s, iki 0,169 μm , kai kariatėlės judėjimo greitis 3 mm/s).

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Tiriant komparatoriaus granitinės kreipiamosios virpesius nustatyta, kad įjungtas, bet nesisukantis variklis ženkliai padidina granitinės kreipiamosios virpesius išilgai kreipiamosios.
2. Vertinant precizinės kariatėlės virpesius jai judant skirtingais greičiais nustatyta, kad geriausias kariatėlės greitis yra 3 mm/s, kai matuojami mikroskopo ir lazerinio interferometro atspindžio veidrodėlio santykiniai virpesiai, ir 2 mm/s, kai matuojami absoliutūs taško 1 (3.5 pav.) virpesiai.
3. Tiriant kariatėlės taškų virpesius veikiant smūginiam virpesių žadinimui iki 2 kN, nustatyta, kad virpesiai po žadinimo gesta nuo 10 iki 40 milisekundžių. Atlikus tyrimus nustatyta, kad didžiausias virpesių gesimas yra vertikalia kryptimi, o mažiausias – išilgine.

4

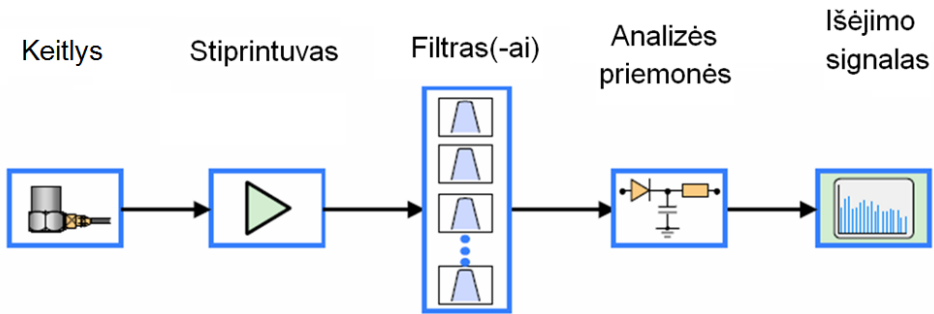
Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimas

Šio tyrimo tikslas kurti ir tobulinti virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo metodą.

4.1. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis

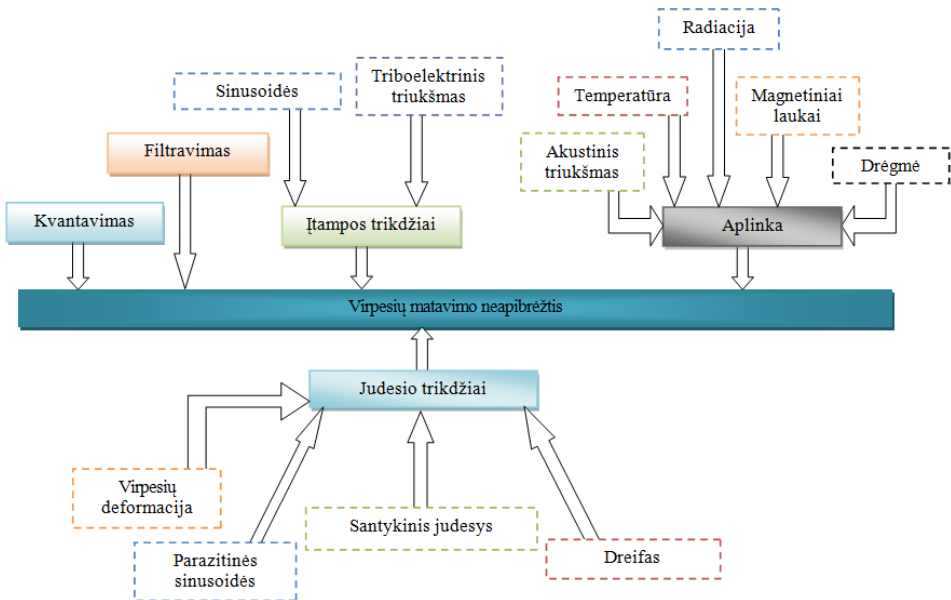
Virpesių matavimo rezultatų patikimumas gali būti apibūdinamas matavimo neapibrėžties įverčiu. Pavyzdžiui, kuo mažesnė matavimo rezultatų neapibrėžtis, tuo mažesnis informacijos iškreipimas ir tikslesnis realios techninės objekto būklės atvaizdavimas.

Jei nagrinėsime paprasčiausią virpesių matavimo kanalą (4.1 pav.), šio kanalo matavimo neapibrėžties įtakos faktorių diagramą galima atvaizduoti taip, kaip pateikta 4.2 paveiksle.



4.1 pav. Virpesių matavimo kanalo schema

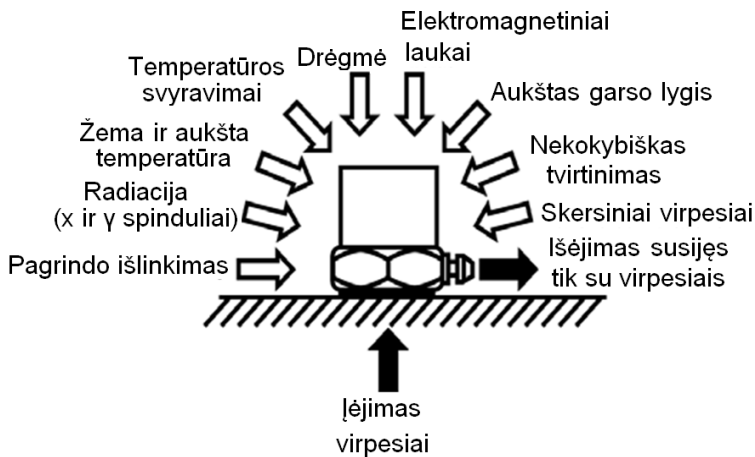
Fig. 4.1. The scheme of the vibration measurement channel



4.2 pav. Virpesių matavimo neapibrėžties įtakos faktorių išsidėstymas

Fig. 4.2. The distribution of factors affecting the vibration measurement uncertainty

Analizuojant daugiakanalę virpesių matavimo sistemą, daroma prielaida, kad tai yra matavimo sistemų aibė, sudaryta iš n virpesių matavimo kanalų. Kiekvieno virpesių matavimo kanalo matavimo patikimumą galima apibūdinti atskiru neapibrėžties įverčiu. Daroma prielaida, kad kanalai, matuojantys tą patį virpesių parametą, veikia tomis pačiomis sąlygomis, ir keitlių atsakas į aplinkos poveikį (4.3 pav.) yra vienodas, todėl teigiama, jog neapibrėžtis atskiriems kanalams yra vienoda, ir skiriasi tik statistinis atskiro kanalo matavimo neapibrėžties sandas (Eidukevičiūtė 2006, Eidukevičiūtė 2007).



4.3 pav. Aplinkos poveikis virpesių matavimo keitliams

Fig. 4.3. The Environmental impact to the vibration measuring transducers

Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įtakos faktorių analizė.

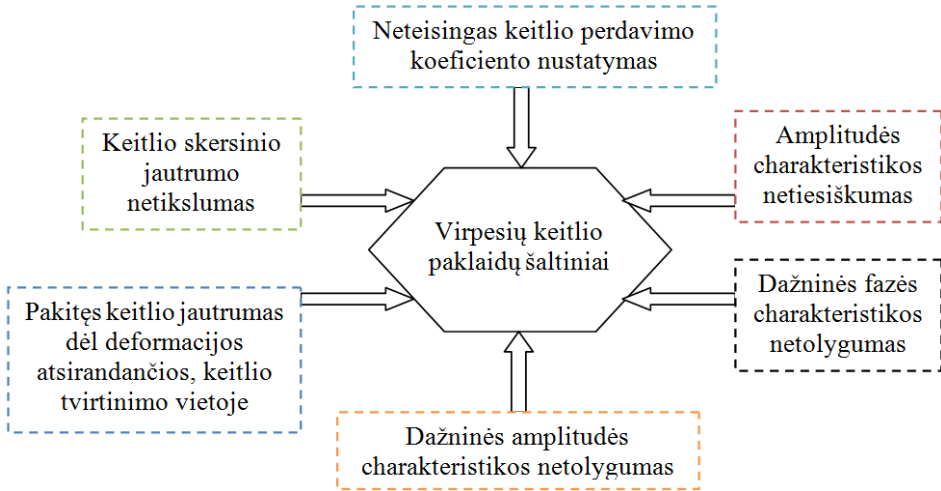
Analizuojant virpesių matavimo rezultatų patikimumo problematiką, būtina iširti virpesių matavimų neapibrėžties modelio įtakos faktorius. Virpesių matavimo neapibrėžties įtakos faktorių dedamosios pagal kilmę gali būti skirstomos į:

- *prietaiso paklaidų dedamosios*: kiekvienam matavimo įtaisui kalibravimo metu yra apskaičiuojama kalibravimo neapibrėžtis. Ši neapibrėžties dedamoji turi būti įtraukiama į bendrąjį matavimo neapibrėžties modelį.
- *aplinkos poveikio dedamosios*: virpesių matavimo sistemų tikslas – pagal išmatuotus virpesius įvertinti mašinos būklę. Dauguma stebimų mašinų dirba nelaboratorinėmis sąlygomis, todėl dėl aplinkos poveikio gali būti netikslumų išmatuotame virpesių dydyje, kuris savo ruožtu, įtakoja galutinį priimamą sprendimą bei jo pasekmes.

Nors kiekvienas keitlys turi nurodytą savo kalibravimo neapibrėžti, ji nėra nekintanti ir neįtakojama. Todėl atsižvelgiant į matavimo posistemės atskirų prietaisų kalibravimo ir patikros periodiškumą, reikėtų įvertinti ir matavimo prietaisų įtakos faktorius, kurie gali turėti įtakos virpesių matavimams. Literatūros analizė leidžia įvardinti šiuos pagrindinius virpesių matavimų aparatūros, pvz., virpesių keitlio paklaidų šaltinius (4.4 pav.) (Quinn 1994, Brüel 1998):

- ✓ neteisingas keitlio perdavimo koeficiento nustatymas;
- ✓ dažninės amplitudės charakteristikos netolygumas;
- ✓ amplitudės charakteristikos netiesiškumas;
- ✓ dažninės fazės charakteristikos netolygumas;
- ✓ keitlio skersinio jautrumo netikslumas;

✓ pakitęs keitlio jautrumas dėl deformacijos atsirandančios, keitlio tvirtinimo vietoje.



4.4 pav. Virpesių keitlio paklaidų šaltiniai

Fig. 4.4. Vibration transducer errors sources

Virpesių matavimo prietaiso amplitudės dažnio charakteristikos netolygumas vertinamas pagal formulę (Isermann 1997, Eidukevičiūtė 2006, Eidukevičiūtė 2007):

$$\gamma_{mat} = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\delta}}, \quad (4.1)$$

čia ΔX_{\max} – maksimalus prietaiso parodymo nuokrypis nuo reikšmės, gautos nustatytame dažnyje, X_{δ} – prietaiso parodymas, esant fiksuotam dažniui.

Prietaiso perdavimo koeficientas \hat{K} gali būti vertinamas pagal formulę:

$$\hat{K}_a = \frac{V_{\delta}}{\gamma_s \cdot \bar{a}} \quad (4.2)$$

arba

$$\hat{K}_v = \frac{V_{\delta}}{\bar{v}}, \quad (4.3)$$

čia V_{δ} – įtampos matavimo prietaiso rodmuo, esant pagrindiniam dažniui, mV; \hat{K}_a – perdavimo koeficiento vertė pagreičiui mV/mm s⁻²; \hat{K}_v – perdavimo

koeficiento vertė greičiui, mV/mm s^{-1} ; \bar{a} – vibropagreičio vertė, mm/s^2 ; \bar{v} – vibrogreičio vertė, mm/s ; γ_s – stiprintuvo perdavimo koeficientas (jei stiprintuvo nėra $\gamma_s = 1$).

Tada skersinio santykinio transformacijos K_{ss} koeficientas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$K_{ss} = \frac{V_{\max}}{\gamma_s \cdot \bar{a} \cdot \hat{K}_a}, \quad (4.4)$$

čia V_{\max} – įtampos matavimo prietaiso rodmuo.

Amplitudės dažnio charakteristikos netolygumas apibūdinamas santykiu:

$$\gamma = \frac{|V_r - V_\delta|_{\max}}{V_\delta}, \quad (4.5)$$

čia V_r – įtampos matavimo prietaiso maksimalus arba minimalus voltmetro rodmuo, mV , V_δ – prietaiso rodmuo, esant fiksuotam dažniui;

Amplitudės charakteristikos netiesiškumas aprašomas formule:

$$\delta_a = \frac{K_i - K_{vid}}{K_{vid}}, \quad (4.6)$$

čia K_i – perdavimo koeficientas z-tajai vibropagreičio arba vibrogreičio vertei; K_{vid} – vidutinė perdavimo koeficiento vertė.

Dažninės amplitudės charakteristikos netolygumo charakteristika γ_{mat} pasiskirsčiusi pagal trikampį tikimybinį pasiskirstymo dėsnį. Šis skirstinys rodo, kad tikimybė P , kad charakteristika įgys vidutinę reikšmę, yra didžiausia, ir tolygiai mažėja, kitose intervalo vietose. Neapibrėžties įvertis skaičiuojamas pagal formulę:

$$u_{mat}^2 = \frac{1}{6} \frac{\Delta X_{\max} (X_{\delta \max} - X_{\delta \min})}{X_{\delta \min} X_{\delta \max}}. \quad (4.7)$$

Vibrometro transformacijos koeficiento įvertis pasiskirstęs pagal stačiakampį dėsnį. Tai reiškia, kad tikimybė, kad koeficientas įgys bet kurią reikšmę iš paklaidos intervalo yra vienoda. Šio koeficiento standartinę neapibrėžtį galima išreikšti:

$$u_{\hat{K}_a}^2 = \frac{V_{\delta \max} - V_{\delta \min}}{3\gamma_s \bar{a}} \quad (4.8)$$

arba (jei matuojamas greitis)

$$u_{\hat{K}_v}^2 = \frac{V_{\delta_{\max}} - V_{\delta_{\min}}}{3\bar{v}}. \quad (4.9)$$

Skersinio santykinio transformacijos koeficiento paklaida pasiskirsčiusi pagal stačiakampį pasiskirstymo dėsnį:

$$u_{K_{ss}}^2 = \frac{V_{\max}(\hat{K}_{a\max} - \hat{K}_{a\min})}{\gamma_s \cdot \bar{a} \cdot \hat{K}_{a\min} \cdot \hat{K}_{a\max}}. \quad (4.10)$$

Kai atliekami nuolatiniai virpesių matavimai, išauga matuojamųjų dydžių imties tūris N , o statistinis neapibrėžties sandas, apskaičiuojamas pagal formulę

$$u_{stat} = \frac{S_x}{\sqrt{N}}$$

yra priklausomas nuo dydžio N .

Šis dydis, tęsiant matavimus ir didėjant N skaičiui, mažėja. Standartinis nuokrypis, kuris išreiškiamas formule $S_x^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N-1}$ savo ruožtu, taip pat priklauso nuo imties tūrio, ir jam didėjant, artėja į vienetą. Statistinio neapibrėžties sando u_{stat} dydis lygus trečioje darbo dalyje skaičiuojamo standartinio vidurkio nuokrypio S_x reikšmei (3.3 lygtis). Dar šią lygtį būtų galima užrašyti taip:

$$u_{stat} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{N}. \quad (4.11)$$

čia x_i – imties narys, \bar{x} – imties vidurkis.

Virpesių matavimo neapibrėžties įtakos faktorių aplinkos atžvilgiu dedamosios – temperatūros T ir drėgmės H sandai, atitinkamai u_T^2 ir u_H^2 . Šie faktoriai yra tarpusavyje koreliuojantys bei gali įtakoti matavimų neapibrėžtį. Jų koreliacinė dedamoji:

$$u_{korel}^2 = 2 \cdot u_T u_H r(T, H). \quad (4.12)$$

Tačiau virpesiai buvo matuojami patalpoje, kurioje palaikomi pastovūs drėgmė ir temperatūra, tai ši koreliacija neapibrėžties modeliui įtakos neturi.

4.2. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimo modelio tyrimas

Pagal šiame skyriuje nurodytus įtakos faktorius, nuolatinio virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo pagrindiniai faktoriai pateikti 4.1 lentelėje (Vekteris 2000, Volkovas 2004).

4.1 lentelė. Virpesių matavimo sistemos rezultatų neapibrėžties įvertinimo pagrindiniai faktoriai

Table 4.1. Vibration measurements in the assessment of the uncertainty of main factors

Žymėjimas	Aprašymas	Neapibrėžties įvertinimo metodas
u_{stat}	Statistinis neapibrėžties sandas, apskaičiuojamas iš matavimo duomenų	A
u_{mat}	Matavimo priemonės kalibravimo neapibrėžtis, nurodoma matavimo priemonės dokumentuose	B
$u_K, u_{K_{SS}}$	Neapibrėžties sandai, atsirandantys dėl matavimo priemonės besikeičiančių charakteristikų	B
u_T, u_H	Neapibrėžties sandai, atsirandantys dėl besikeičiančių aplinkos sąlygų	B
u_{stip}	Pirminio signalo stiprinimo neapibrėžties sandas	B
u_{keit}	Analoginio signalo keitimo į skaitmeninį kodą neapibrėžties sandas	B
$u_{mat,duom}$	Matavimo duomenų apdorojimo neapibrėžties sandas	B
u_{tr}	Neapibrėžties sandas, atsirandantis dėl triukšmingos aplinkos, vertinamas iš turimų duomenų	A

Remiantis realiais duomenimis, apskaičiavus statistinį neapibrėžties įvertį u_{stat}^2 , pagal išmatuotus duomenis bei remiantis aukščiau pateiktomis prielaidomis, virpesių matavimo sistemos rezultatų neapibrėžties modelis (Eidukevičiūtė 2007, Volkovas 2004):

$$U_{VMS} = 2 \cdot \sqrt{u_{stat}^2 + u_{mat}^2 + u_K^2 + u_{K_{SS}}^2 + u_T^2 + u_H^2 + 2 \cdot u_T u_H r(T, H) + u_{stip}^2 + u_{keit}^2 + u_{mat,duom}^2 + u_{tr}^2}, \quad (4.13)$$

čia u_{stat} – statistinis neapibrėžties sandas; u_{mat} – matavimo prietaiso neapibrėžties sandas; $u_{\dot{K}}^2$ – prietaiso perdavimo koeficiento neapibrėžties sandas; $u_{K_{ss}}^2$ – transformacijos koeficiento neapibrėžties sandas; u_T – temperatūros įtakos neapibrėžties sandas; u_H – drėgmės įtakos neapibrėžties sandas; u_{stip} – pirminio signalo stiprinimo neapibrėžties sandas; u_{keit} – analoginio signalo keitimo į skaitmeninį kodą neapibrėžties sandas; $u_{mat,duom}$ – matavimo duomenų apdorojimo neapibrėžties sandas; u_{tr} – triukšmo įtakos neapibrėžties sandas.

Naudojant šiame skyriuje pateiktą matavimo rezultatų neapibrėžties nustatymo metodiką, virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įverčiai (įvertinant imties standartinį nuokrypį kaip reikšminį dydį) pateikti formulėse 4.14 ir 4.15. Virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis buvo vertinama, kai precizinio ilgio matavimo komparatoriaus kariatėlės greitis buvo 3 mm/s, bei buvo matuojami santykiniai mikroskopo virpesiai (3.5 pav. 2) interferometro veidrodėlių atžvilgiu ir absoliutūs precizinės kariatėlės virpesiai (3.5 pav. 1). Buvo atlikti šeši matavimai ir buvo įvertintos šių matavimų vidutinės parametru reikšmės. Virpesių matavimo rezultatų ir neapibrėžties įvertinimas pateiktas 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Virpesių matavimo rezultatų ir neapibrėžties įvertinimas

Table 4.2. Results of the vibration measurements and the assessment of the uncertainty

Virpesių matavimo rezultatai	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Statistinis neapibrėžties sandas u_{stat} , μm
Absoliučių virpesių	-0,0993	0,2039	0,00160
Santykinių virpesių	0,00118	0,00474	1,048E-4

Iš 4.2 lentelėje pateiktų rezultatų galima matyti, kad dėl didelio duomenų kiekio, statistinė neapibrėžties dedamoji, nusakanti pagrindinį skirtumą tarp duomenų (kai matuojami absoliutūs precizinės kariatėlės virpesiai), yra nedidelė, tada neapibrėžties įvertis, laikant statistinį neapibrėžties sandą nereikšmingu, būtų toks:

$$U_{VMSa} = 2 \cdot \sqrt{u_{mat}^2 + u_{\dot{K}}^2 + u_{K_{ss}}^2 + u_{stip}^2 + u_{keit}^2 + u_{mat,duom}^2} \quad (4.14)$$

Vertinant santykinių virpesių statistinį neapibrėžties sandą, iš 4.2 lentelėje pateiktų duomenų, laikyti nereikšmingu negalima. Tada matavimo sistemos rezultatų neapibrėžtis:

$$U_{VMSs} = 2 \cdot \sqrt{u_{stat}^2 + u_{mat}^2 + u_{\dot{K}}^2 + u_{K_{ss}}^2 + u_{stip}^2 + u_{keit}^2 + u_{mat,duom}^2} \quad (4.15)$$

Temperatūros ir drėgmės neapibrėžties sandai prilyginami nuliui. Triukšmo dedamoji taip pat prilyginama nuliui, kadangi yra nykstamai maža, nes patalpa, kurioje atliekami matavimai yra izoliuota nuo išorinių triukšmo šaltinių. Absoliučių virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis:

$$U_{VMSa} = 0,47 \%$$

Vertinant santykinius virpesius matavimo rezultatų neapibrėžtis yra:

$$U_{VMSs} = 1,03 \%$$

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Sudarytas virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo modelis, išnagrinėti matavimo neapibrėžties sandai.
2. Atliktas absoliučių ir santykinų virpesių amplitudžių neapibrėžties įvertinimas rodo matavimo kokybę. Nustatytos absoliučių ir santykinų virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis: absoliučių virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis – 0,47%; santykinų virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis – 1,03%.

5

Kalibravimo paklaidų, atsirandančių dėl virpesių poveikio, tyrimas

Šių tyrimų tikslas išanalizuoti būdingas gautų duomenų dinamines paklaidas, atsirandančias dėl virpesių poveikio, ir numatyti šių paklaidų įtaką kompensavimo galimybes bei eksperimentiškai ištirti virpesių įtaką matavimo rezultatui, esant skirtingiems matavimo greičiams, sukeltiant sistemai išorinį žadinimą ir išmatuoti virpesius kalibravimo metu siekiant nustatyti priklausomybę tarp virpesių ir kalibravimo tikslumo.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Kilikevičius 2008; Kasparaitis 2009; Kaušinis 2009).

5.1. Virpesių įtaka kalibravimo tikslumui

Kalibravimo paklaidų nustatymo metodika. Kalibravimo paklaidos realiomis darbo sąlygomis įvertinamos nustatant sistemingąsias ir atsitiktines paklaidos komponentes. Sistemingoji kalibravimo paklaidos komponentė įvertinta kalibruojant 1 m ilgio pavyzdinį brūkšninį ilgio matą, pagamintą iš plieno, kurio

linijinis plėtimosi koeficientas lygus $11,35 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Pavyzdinio ilgio mato kalibravimo neapibrėžtis yra $\pm(0,03+0,1L) \mu\text{m}$ (Precizinių 2007).

Sistemos paklaidos visame 3,5 m ilgyje įvertinimui matas buvo perslenkamas išilgai komparatoriaus per 1m ir kalibruojama po 6 kartus kiekvienoje mato padėtyje ir iš 6 matavimų surandamas vidurkis. Iš vidutinės paklaidų reikšmės buvo eliminuota sistemingoji pavyzdinio mato paklaida – pagaminimo bei atsirandanti dėl jos temperatūrinių deformacijų. Suminė sistemingoji komparatoriaus paklaida rasta nuosekliai sudedant minėtu būdu rastas sistemintąsias paklaidas 1 m ilgyje atskirose jo padėtyse.

Daroma prielaida (Precizinių 2007), kad didesnės dalies tiesinės sistemintosios paklaidos komponentės priešastimi yra pavyzdinio mato temperatūros nustatymo paklaida. Skaičiavimai rodo, kad ji siekė apie $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$.

Atsitiktinė kalibravimo paklaidos komponentė įvertinta kalibruojant serijiniu būdu UAB Precizika Metrology įmonėje gaminamą rastrinę liniuotę.

Tyrimams buvo naudojama 3200 mm ilgio stiklinė liniuotė. Jos rastro žingsnis yra lygus $20 \mu\text{m}$. Liniuotė pneumatiniu būdu buvo tvirtinama ant kalibravimo sistemos granitinio pagrindo. Ją veikė visi faktoriai, kurie veiks kalibruojant darbinėmis sąlygomis.

Prieš tyrimus buvo kalibruota brūkšnių tarpusavio padėtis visame skalės ilgyje.

Buvo įvertinta šešių realizacijų matematinė viltis ir rezultatų sklaidos laukas kiekvienam brūkšniui. Šie tyrimo rezultatai išsamiai išnagrinėti literatūroje (Precizinių 2007).

Visą kalibravimo procesą ir sistemos atliekamas operacijas valdo pagrindinis personalinis kompiuteris, dirbantis pagal specifinį algoritmą, apimančią paklaidų kompensaciją.

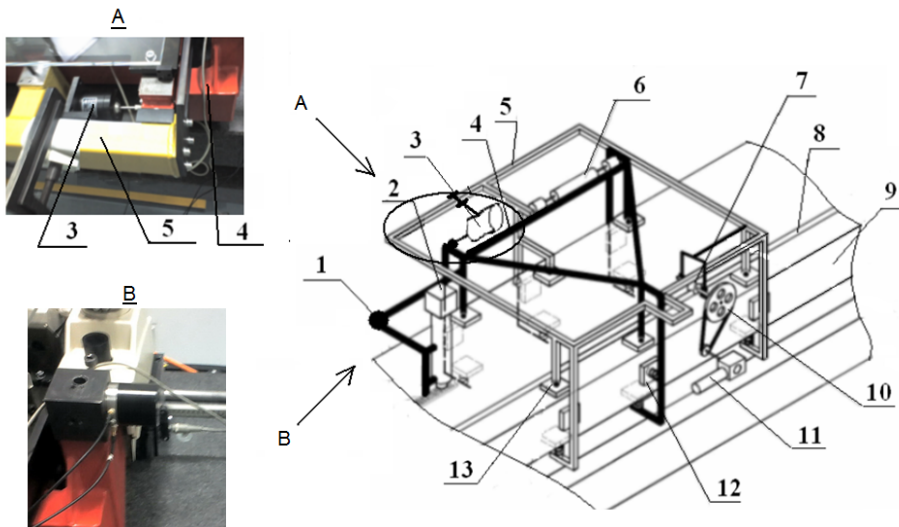
Virpesių įtaka kalibravimo tikslumui. Kad būtų ištirtas kalibravimo sistemos atsakas į išorinius virpesius ir nustatyta, kaip kinta, priklausomai nuo virpesių dažnio ir amplitudės kitimo, kalibravimo tikslumas buvo atliktas tyrimas, plačiau aprašytas literatūroje (Kilikevičius 2008, Kasparaitis 2009).

Kalibravimo paklaidoms, priklausančioms nuo virpesių poveikio, ištirti buvo pasirinktas toks kelias:

- Ištirti ar virpesiai turi įtakos nuskaitymo tikslumui, nes atlikus sistemos virpesių matavimus nustatyta, kad dominuojančios komparatoriaus kariatėlės virpesių amplitudės pasireiškia žemuose dažniuose (iki 15 Hz), o kalibravimo metu lazerinio interferometro sistemos duomenų nuskaitymo dažnis yra žymiai didesnis apie 2 GHz.
- Jei virpesiai turi įtakos nuskaitymo tikslumui, tai reikia nustatyti paklaidos biudžeto sando, priklausančio nuo virpesių poveikio, dydį.

Tyrimo stendas pavaizduotas 5.1 paveiksle yra sudarytas iš: 1 – virpesių matavimo taškas, 2 – mikroskopas su vaizdo kamera, 3 – išorinius virpesius sukuliantis prietaisas, 4 – precizinės kariatėlės korpusas retroreflektoriai, 5 – jėginės kariatėlės korpusas, 6 – dviejų kariatėlių sujungimo elementas, 7 – frikcinės pavaros ratukas, 8 – frikcinės pavaros strypas, 9 – granitinis stovas su kreipiamosiomis, 10 – diržinė pavara, 11 – elektros variklis su reduktoriumi, 12 – spyruokliuojanti aerostatinė atrama, 13 – standžiai įmontuota aerostatinė atrama. Ant jėginės kariatėlės buvo pritvirtintas virpesius sukuliantis prietaisas (5.1 pav. A), kurio žadinimo dažnį ir amplitudę galima reguliuoti, reikšminguose tyrimui taškuose buvo matuojami virpesiai. Dirbtinai sukeltų virpesių dažniai pasirinkti artimi dažnių reikšmės, prie kurių buvo didžiausios eksperimentiškai pamatuotos dominuojančių virpesių reikšmės.

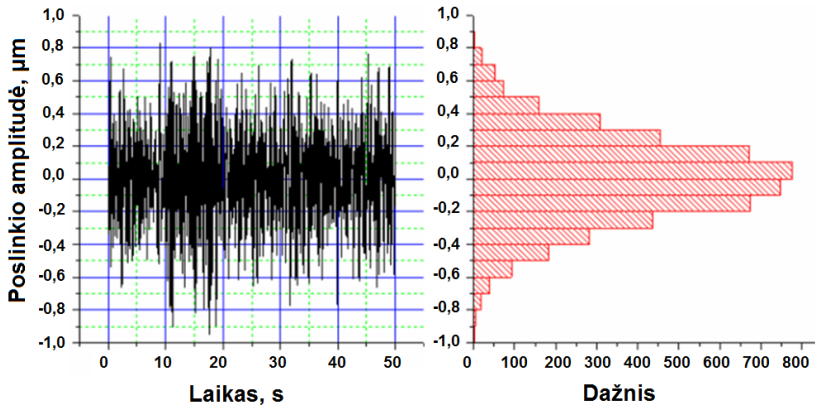
Kartu su virpesių matavimų (5.1 pav. B) buvo atliekamas ir brūkšninio mato kalibravimas. Žadinant komparatoriaus jėginę kariatėlę pasirinktais dažniais buvo lygiagrečiai atliekamas brūkšninio mato kalibravimas. Kad išvegti atsiktinių dedamųjų įtakos kalibravimas buvo atliekamas šešis kartus. Matavimai buvo atliekami, esant pavarai pritvirtintai prie jėginės kariatėlės (3.20 pav. F).



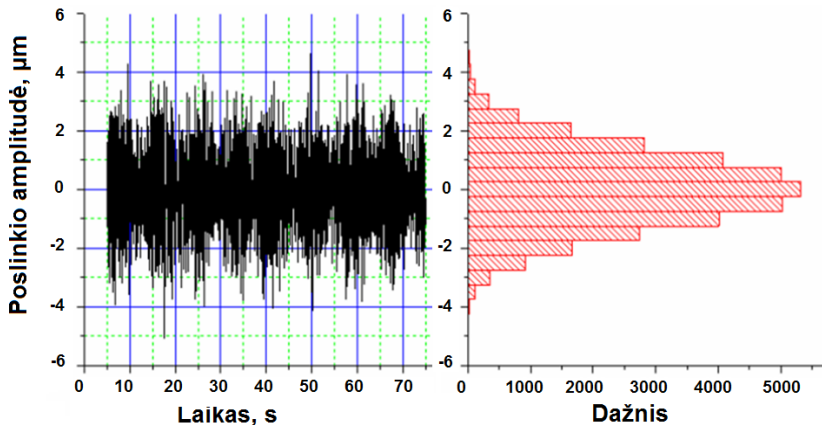
5.1 pav. Išorinių žadinimų įtakos komparatoriaus kariatėlei tyrimo stendas ir komparatoriaus kariatėlės schema

Fig. 5.1. The investigation stand of the external excitation influence to the comparator's carriage and the structural diagram of the comparator's carriage

Virpesių matavimo rezultatai parodyti 5.2 paveiksle, kai nebuvo žadinimo, ir 5.3 paveiksle pavaizduota tipinė poslinkio amplitudė, daugiau matavimo rezultatų pateikta 5.1 lentelėje.



5.2 pav. Taško 1 (5.1 pav.) poslinkio amplitudė ir histograma (be žadinimo)
 Fig. 5.2. The vibration displacement amplitude and its histogram (without excitation)



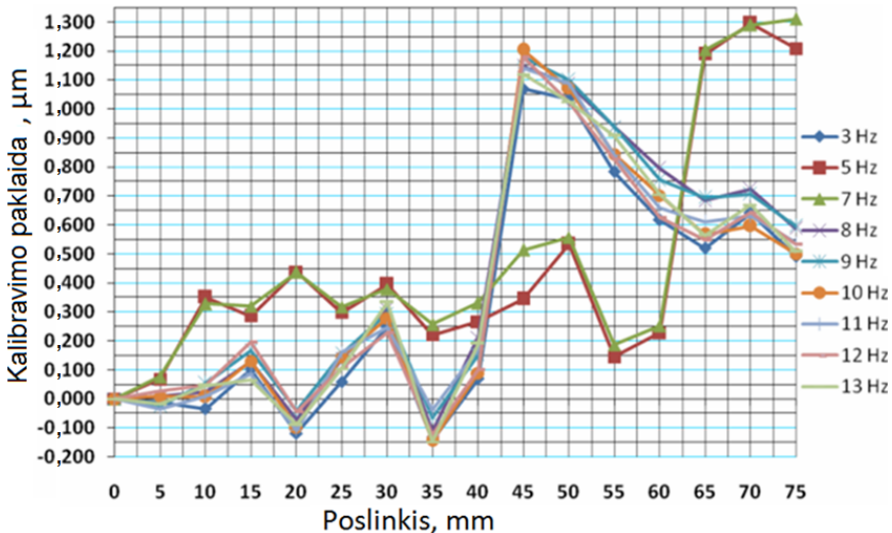
5.3 pav. Tipinė taško 1 (5.1 pav.) poslinkio amplitudė ir histograma (su žadinimu)
 Fig. 5.3. Typical vibration displacement amplitude of point 1 (Fig. 5.1) and its histogram (with excitation)

Taške 1 (5.1 pav.) matuojant akcelerometru absoliučius virpesius maksimalus standartinis nuokrypis gautas kai žadinimas buvo 9 Hz. Didžiausia kalibravimo paklaida gauta: iš kalibravimo paklaidos (esant įvairiems žadinimams) atėmus kalibravimo paklaidą (be žadinimo).

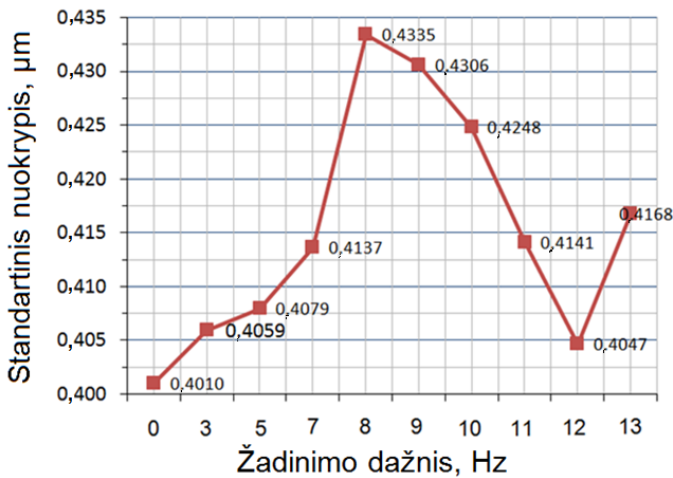
5.1 lentelė. Statistiniai virpesių poslinkio amplitudės parametrai**Table 5.1.** Statistical parameters of the vibration displacement amplitude

Žadinimo dažnis, Hz	Statistiniai parametrai				
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Minimali reikšmė, μm	Maksimali reikšmė, μm	Sklaida, μm
Be žadinimo	-2,162E-6	0,262	-0,947	0,827	1,774
3	-1,858E-5	1,273	-5,052	4,635	9,687
5	3,908E-5	1,262	-4,622	4,943	9,565
7	-2,616E-5	1,277	-4,359	4,986	9,345
9	-4,954E-6	1,388	-4,747	4,824	9,571
11	2,834E-5	1,376	-5,728	5,380	11,108
13	7,877E-6	1,339	-4,642	4,679	9,321
15	2,514E-5	1,349	-5,117	5,034	10,150

Priklausomybė tarp žadinimo dažnio ir kalibravimo paklaidos pateikta 5.4 paveiksle. Standartinio nuokrypio priklausomybė nuo žadinimo dažnio pateikta 5.5 paveiksle.

**5.4 pav.** Priklausomybė tarp žadinimo dažnio ir kalibravimo paklaidos**Fig. 5.4.** The relationship between excitation frequency and the calibration errors

Kalibravimo paklaida (5.4 pav.), kai žadinimas 5 Hz ir 7 Hz svyruoja nuo 0 iki 1,3 μm , ir kai žadinimas 3 Hz ir 8–13 Hz svyruoja nuo -0,175 iki 1,2 μm .



5.5 pav. Standartinio nuokrypio priklausomybė nuo žadinimo dažnio
Fig. 5.5. The standard deviation dependence to the excitation frequency

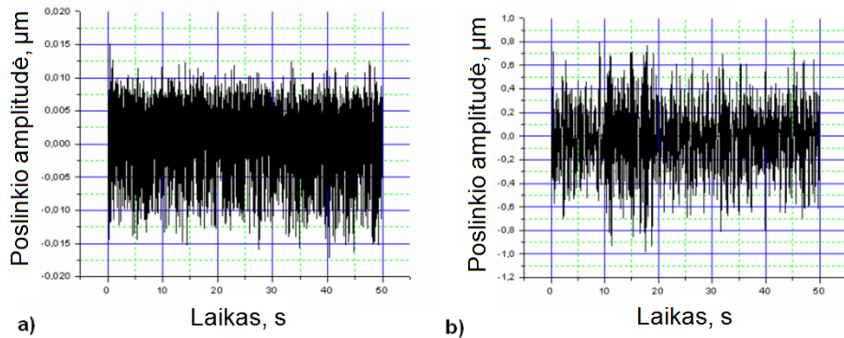
Iš 5.5 paveikslo matyti, kad mažiausias standartinis nuokrypis yra 0,4059 μm (žadinimas 3 Hz) ir 0,4047 μm (žadinimas 12 Hz), maksimalus – 0,4335 μm (žadinimas 8 Hz) ir 0,4306 μm (žadinimas 9 Hz). Rezultatai rodo, kad maksimalus standartinis nuokrypis yra dažnių ruože, kuris yra artimas kariatėlės savajam dažniui.

Kalibravimo paklaidos priklausomybė nuo judesio greičio. Kalibravimo tikslumo priklausomybės nuo judesio greičio įvertinimui 1 m serijinės gamybos rastrinė liniuotė buvo kalibruojama skirtingais, didesniais ir mažesniais už skaičiuotąjį ir priimtą darbinį 3 mm/s greitį. Kadangi matavimo greitis didžiausią įtaką daro atsitiktinei kalibravimo paklaidos komponentei, tai šio tyrimo kriterijumi priimta 10 matavimų vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis šių matavimų vidurkio reikšmių atžvilgiu (Kasparaitis 2009, Kilikevičius 2008).

Tyrimai atlikti esant šiems matavimo greičiams: 2 mm/s, 3 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s, ir 10 mm/s.

Kiekvienam greičiui buvo atlikta po 10 rastrinės liniuotės paklaidos matavimų, iš jų rastos vidurinės paklaidos reikšmės, suskaičiuotas vidutinių kvadratinų nuokrypių įvertis šių vidurinių kreivių atžvilgiu.

Lygiagrečiai buvo matuojami ir kariatėlės virpesiai, matavimų rezultatai pateikti 5.6 paveiksle. Plačiau šių tyrimų rezultatai apžvelgti literatūroje (Kilikevičius 2009).



5.6 pav. Statika: a) santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu; b) absoliutus taško 1 (5.1 pav.) virpesiai

Fig. 5.6. Longitudinal direction, static: a) are relative vibrations of microscope in regard to interferometer mirrors; b) are absolute vibrations of point 1 (Fig. 5.1)

Virpesių statistinės charakteristikos judant kariatėlei skirtingais greičiais pateiktos 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Statistiniai virpesių poslinkio amplitudės parametrai

Table 5.2. Statistical parameters of the vibration displacement amplitude

Kariatėlės greitis, mm/s	Matavimo vieta (1 – santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu, 2 – absoliutūs taško 1 (5.1 pav.) virpesiai)	Statistiniai parametrai				
		Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Minimali reikšmė, μm	Maksimali reikšmė, μm	Skaida, μm
0	1	0,00118	0,00475	-0,0171	0,0151	0,0321
	2	-0,0993	0,262	-1,0461	0,7284	1,774
1	1	0,0134	0,0516	-0,148	0,1484	0,296
	2	0,0176	0,677	-2,635	2,233	4,868
2	1	0,0108	0,0204	-0,0647	0,0777	0,142
	2	0,570	0,748	-2,251	3,733	5,984
3	1	0,00332	0,0219	-0,0537	0,0580	0,112
	2	-0,170	1,26	-4,272	3,603	7,875
4	1	0,00718	0,0787	-0,192	0,212	0,403
	2	0,568	1,195	-4,002	5,002	9,0036
6	1	0,00979	0,0351	-0,111	0,137	0,248
	2	0,573	1,278	-4,319	5,270	9,589
10	1	-0,0540	0,139	-0,529	0,331	0,860
	2	-0,311	2,613	-11,334	17,788	29,121

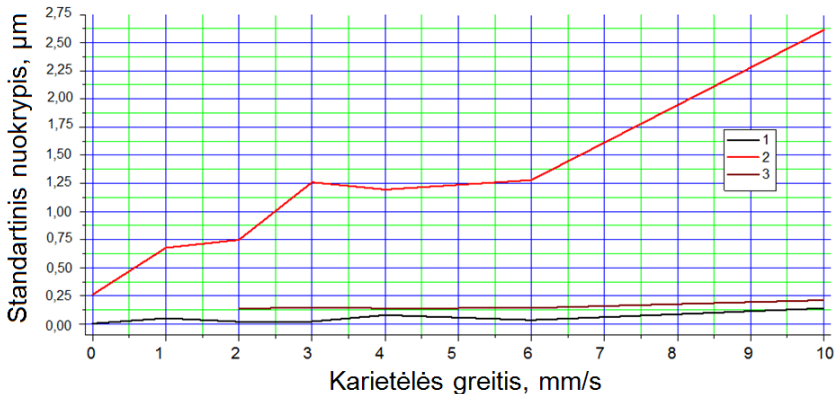
Virpesių standartinio nuokrypio priklausomybė nuo kariatėlės judėjimo greičio pateikta 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. Virpesių standartinio nuokrypio priklausomybė nuo kariatėlės judėjimo greičio

Table 5.3. Dependence of standard deviation on of the carriage motion speed

Kariatėlės greitis, mm/s	Standartinis nuokrypis S_x , μm		
	Santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu	Absoliutūs taško 1 (5.1 pav.) virpesiai	Kalibravimo paklaida
0	0,00475	0,262	–
1	0,0516	0,677	–
2	0,0204	0,748	0,137
3	0,0219	1,26	0,147
4	0,0787	1,195	0,140
6	0,0351	1,278	0,142
10	0,139	2,613	0,211

5.7 paveiksle parodyta nurodytu būdu gauta standartinio nuokrypio priklausomybė nuo matavimo greičio.



5.7 pav. Virpesių standartinio nuokrypio priklausomybė nuo kariatėlės judėjimo greičio:

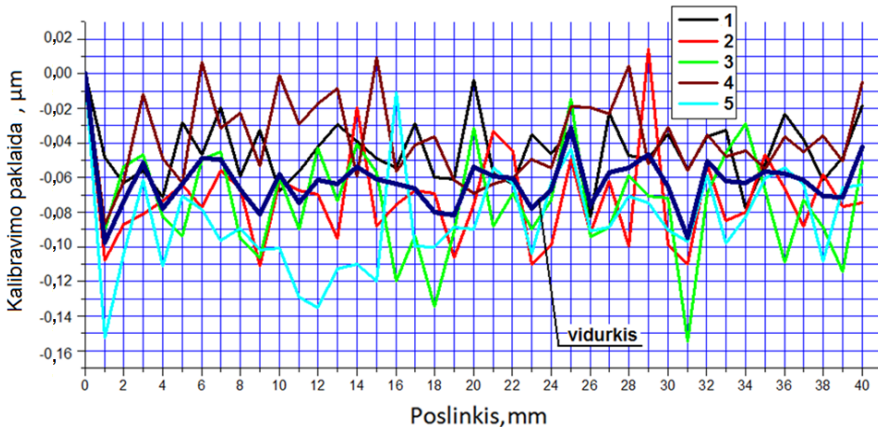
1. Santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu; 2. Absoliutūs taško 1 (5.1 pav.) virpesiai; 3. Kalibravimo paklaida

Fig. 5.7. Dependence of standard deviation on the carriage speed: 1. relative vibrations of the laser microscope with respect to mirrors of laser interferometer; 2. Absolute vibrations of point 1 (Fig. 5.1); 3. Calibration error

Rezultatai rodo, kad virpesių dydis priklauso nuo kariatėlės judėjimo greičio. Esant darbiniam kariatės greičiui 3 mm/s santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu yra 0,06 μm , o absoliutūs taško 1 (5.1 pav.) virpesiai yra 5 μm .

5.2. Kalibravimo paklaidų, priklausančių nuo virpesių poveikio, nustatymas

Norint nustatyti kokią įtaką nuskaitymo tikslumui daro virpesiai, buvo atlikti kalibruoto brūkšninio ilgio matavimai, kartu buvo matuojami ir virpesiai (santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu ir absoliutūs taško 1 (5.1 pav.) virpesiai). Visi matavimų rezultatai buvo užrašomi vienoje laiko skalėje. Matavimai buvo atliekami kariatėlei judant 3 mm/s greičiu ir kaip pavaros tvirtinimo vieta yra ant granitinės kreipiančiosios šalia lazerio stovo. Matuojama buvo 5 kartus, šių matavimų gautos paklaidos parodytos 5.8 paveiksle. Matuojamos brūkšninės liniuotės atstumas tarp gretimų brūkšnių buvo 1 milimetras, o matuojamas atstumas buvo 40 mm.

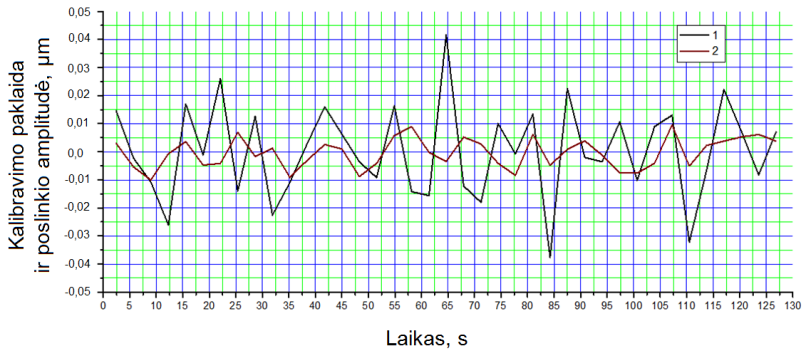


5.8 pav. Kalibravimo paklaidos kitimas atlikus penkis matavimus

Fig. 5.8. Variation of calibration errors of the five measurements

Apdorojus gautus matavimų rezultatus bei radus, konkrečiu laiko momentu, kalibravimo paklaidos, santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu ir absoliučius taško B (5.1 pav.) virpesių dydžius, 5.9 paveiksle parodytas pirmo matavimo kalibravimo paklaidos ir poslinkio amplitudės grafikas.

Atliktų matavimų kalibravimo paklaidos, santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu ir absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių standartinio nuokrypio reikšmės pateiktos 5.4 lentelėje.



5.9 pav. Kalibravimo paklaida (1) ir santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu poslinkio amplitudė (2)

Fig. 5.9. Calibration error (1) and the relative vibrations of the laser microscope with respect to mirrors of laser interferometer (2)

5.4 lentelė. Matavimo duomenų standartinio nuokrypio reikšmės

Table 5.4. The standard deviation values of measurement data

Matavimo nr.	Standartinis nuokrypis S_x , μm		
	Matavimo paklaida	Absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių	Santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu
1	0,0694	0,2013	0,00469
2	0,0655	0,1961	0,00460
3	0,0729	0,2028	0,00472
4	0,0741	0,2073	0,00478
5	0,0783	0,2118	0,00491
Vidutinė reikšmė	0,0713	0,2039	0,00474

Ryšio tarp matavimo paklaidos, absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių ir santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu, nustatymui apskaičiuotas koreliacijos koeficientas:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n C^2 - \sum_{i=1}^n A^2 - \sum_{i=1}^n B^2}{2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n A^2 \cdot \sum_{i=1}^n B^2}}, \quad (5.1)$$

čia $\sum_{i=1}^n A^2$ – vienos skaičių eilės nuokrypio nuo aritmetinio vidurkio kvadratų suma $\sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2$; $\sum_{i=1}^n B^2$ – vienos skaičių eilės nuokrypio nuo aritmetinio vidurkio kvadratų suma $\sum_{i=1}^n (x_{2i} - \bar{x}_2)^2$; $\sum_{i=1}^n C^2$ – vienos skaičių eilės nuokrypio nuo aritmetinio vidurkio kvadratų suma $\sum_{i=1}^n [(x_{1i} - \bar{x}_1) + (x_{2i} - \bar{x}_2)]^2$.

Gauti koreliacijos koeficientai:

– tarp kalibravimo paklaidos ir santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu $r_1 = 0,56$.

– tarp kalibravimo paklaidos ir absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių $r_2 = 0,186$.

– tarp absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių ir santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu $r_3 = 0,74$.

Gauti koreliacijos koeficientai parodė, kad tiesinė priklausomybė yra tarp kalibravimo paklaidos ir santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu ir absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių, o tarp kalibravimo paklaidos ir absoliučių taško 1 (5.1 pav.) virpesių tiesinės priklausomybės praktiškai nėra.

Kad nustatyti ryšį tarp kelių kintamųjų reikia apskaičiuoti daugiamatės koreliacijos koeficientą R :

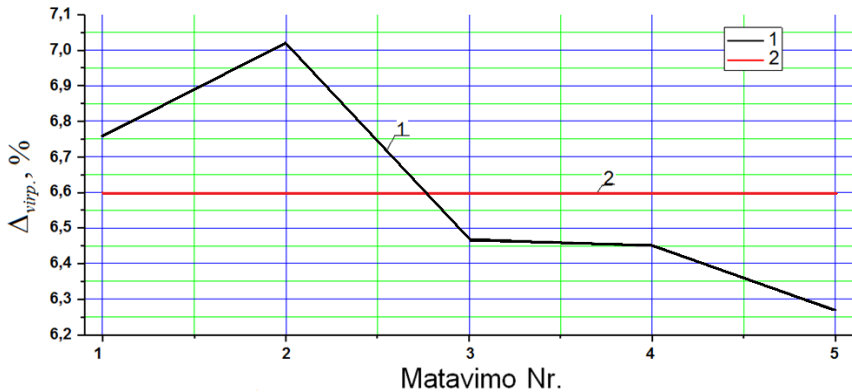
$$R = \sqrt{\frac{r_{xz}^2 - 2r_{xy}r_{xz}r_{yz} + r_{yz}^2}{1 - r_{xy}^2}}, \quad (5.2)$$

čia r_{xy} , r_{xz} ir r_{yz} – koreliacijos koeficientai tarp dydžių x (absoliutūs taško 1 (5.1 pav.) virpesiai) ir y (santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu), x ir z (kalibravimo paklaida) bei y ir z .

Gautas daugiamatės koreliacijos koeficientas $R = 0,655$, jis parodo, kad kalibravimo paklaidos sąryšis su santykiniais mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu virpesiais ir absoliučiais taško 1 (5.1 pav.) virpesiais yra vidutinio stiprumo.

Paklaidos sandas $\Delta_{virp.}$ (5.10 pav.), atsirandantis dėl virpesių poveikio, apskaičiuotas padalinus santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu standartinį nuokrypį $S_{x,sant.}$ iš kalibravimo paklaidos standartinio nuokrypio $S_{x,kal.}$:

$$\Delta_{virp.} = \frac{S_{x,sant.}}{S_{x,kal.}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$



5.10 pav. Paklaidos sando $\Delta_{virp.}$, atsirandančio dėl virpesių poveikio, kitimas atlikus penkis matavimus (1) ir penkių matavimų vidurkis (2)

Fig. 5.10. The variation of five measurements of the errors component, arising from the effects of vibration (1), and the average of five measurements (2)

Atlikus skaičiavimus, buvo gauta tokia vidutinė paklaidos sando, atsirandančio dėl virpesių poveikio, reikšmė $\Delta_{virp.} = 6,6\%$.

Matavimų rezultatai rodo, kad norint sumažinti paklaidos sando, atsirandančio dėl virpesių poveikio, dydį reikia mažinti tiek absoliučius kariatėlės virpesių, tiek ir santykinus mikroskopo virpesius interferometro veidrodėlių atžvilgiu. Kad sumažinti absoliučius kariatėlės virpesius reikia tobulinti jos konstrukciją, bei mažinti pavaros įtaką virpesiams, tobulinant jos veikimo algoritmą bei tvirtinimą. Norint sumažinti santykinus mikroskopo virpesius interferometro veidrodėlių atžvilgiu reikia standinti kariatėlės konstrukcijos dalį, kurioje yra interferometro veidrodėliai ir mikroskopas.

5.3. Penktojo skyriaus išvada

Kalibravimo paklaidos standartinis nuokrypis kinta proporcingai virpesių, absoliučių precizinės kariatėlės virpesių ir santykinų mikroskopo virpesių interferometro veidrodėlių atžvilgiu, standartinių nuokrypių kitimui.

Apibendrintos išvados

1. Atlikus literatūros apie precizinių brūkšninių ilgio matų komparatorių kokybinę analizę, nustatyta, kad dinaminis poveikis kalibravimo tikslumui nėra ištirtas, nenustatytas atsirandančios dėl virpesių poveikio paklaidos sandas bei jo svoris neapibrėžties biudžete.

2. Sudarius mechatroninio ilgio matavimo komparatoriaus matematinį modelį, atlikus pagal šį modelį kompiuterinį eksperimentą ir patikrinus jį natūriniais bandymais, suformuluotos šios mokslinės ir praktinės išvados:

2.1. Nustatyta, kad seismiškai žadinant realiomis kinematinio žadinimo amplitudžių reikšmėmis virpesiai yra maži ($0,1 \mu\text{m}$ eilės) ir neturi didelės įtakos komparatoriaus sistemos dinaminėms charakteristikoms.

2.2. Rasta, kad precizinės ir jėginės kariatėlių tarpusavio virpesiai esant rezonansiniams dažniams 24 Hz ir 296 Hz vyksta priešfaziais ir tuo yra labai nepageidautini.

3. Eksperimentiškai nustatyta, kad didžiausią įtaką virpesių kilimui turi komparatoriaus kariatėlių konstrukcija ir judesį jėginei kariatėlei suteikianti pavara.

4. Nustatyta, kad virpesių įtaka kalibravimo paklaidai yra mažiausia, kai ilgio matavimo komparatoriaus kariatėlės judėjimo greitis yra 3 mm/s.

5. Išaiškintos dinaminių paklaidų atsiradimo priežastys susijusios su pavaros padėtimi: keičiant pavaros tvirtinimo padėtį nuo komparatoriaus

karietėlių sistemos ant granitinės kreipiamosios sumažėjo absoliučių virpesių dažniai nuo 10 Hz iki 3 Hz, prie kurių yra didžiausios dominuojančių virpesių amplitudžių reikšmės.

6. Virpesių matavimo tikslumą rekomenduojama nustatyti naudojant drauge A ir B neapibrėžčių įvertinimo metodus. Sukurti paklaidų įvertinimo modeliai ir eksperimentiniais metodais gauti duomenys leidžia nustatyti būdingųjų sandų reikšmes, jų svorį neapibrėžties biudžete. Nustatytos absoliučių ir santykinų virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtys: absoliučių virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis – 0,47 %; santykinų virpesių matavimo rezultatų neapibrėžtis – 1,03 %.

7. Sukurta dinaminių paklaidų ir virpesių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimo metodika bei atlikti eksperimentiniai tyrimai leidžia teigti, kad dėl seisminio žadinimo, sukeliančio dinamines konstrukcijos deformacijas, didžiausią įtaką kalibravimo tikslumui turi mikroskopo konstrukcijos tipas. Santykiniai mikroskopo virpesiai interferometro veidrodėlių atžvilgiu duoda tiesioginę kalibravimo paklaidą, kuri sudaro 6,6 % paklaidos biudžeto.

Literatūros sąrašas

Augustaitis, V. K. 2000. *Mechaninių virpesių pagrindai*. Vilnius: Žiburio I–kla.

Barkov, A.; Azovtsev, A. 2007. A New Generation of Condition Monitoring And Diagnostic System. Available from internet: <<http://www.vibrotek.com/ref.htm>>.

Beers, J. S.; Penzes, W. B. 1999. The NIST Length Scale Interferometer, *Journal of Research of NIST* 104: 225–252.

Bentkus, R.; Kasparaitis, A.; Šukys, A. 2005. Optimization of Linear Precise Movements, *Mechanika* 1 (51): 49–53, ISSN 1392–1207.

Birch, K.P. 1993. The effect of variations in the refractive index of industrial air upon the uncertainty of precision length measurement, *Metrologia* 30: 7–14.

Bobroff, N.H. 1993. Recent advances in displacement measuring interferometry, *Measurement Science Technology* 4: 907–926.

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

Bosse, H.; Flügge, J. 2001. Requirements and recent developments in high precision length metrology, in *Proceedings of the 159. PTB–Seminar*.

Bosse, H.; Häbeler–Grohne, W.; Flügge, J.; Köning, R. 2003. Final report on CCL–S3 supplementary line scale comparison Nano3, *Metrologia* 40 (Technical Supplement) 04002.

Bosse, H.; Häbeler–Grohne, W.; Flügge, J.; Köning, R. 2003. *Line scale comparison Nano3 in Proc. SPIE, „Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements“*, Jennifer E. Decker; Nicholas Brown; (Eds.) 5190: 122 – 133.

Brüel & Kjær. 1998. *Vibrations transducers and Signal Conditioning*.

- Chapman, M. 2002. *Heterodyne and homodyne interferometry*, Renishaw.
- Downs, M. J. 1998. Realisation of the optimum performance from length-measuring interferometers by atmospheric refractometry, *Proc. of SPIE*, 3477: 46–53.
- Eidukevičiūtė, M.; Volkovas, V. 2006. On the impact of vibration measurement uncertainty to diagnostics in vibromonitoring systems, *Vibroengineering 2006 : proceedings of the 6th international conference, Kaunas University of Technology*, 116–120, ISSN 1822–1262.
- Eidukevičiūtė, M. 2007. *Rotorinių mašinų virpesių monitoringo neapibrėžčių ir diagnostikos patikimumo tyrimas*, Daktaro disertacija, KTU, Kaunas.
- Evans, C.J. 1989. *Precision Engineering: An Evolutionary View*, Cranfield Press, Cranfield, England.
- Evolving needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the Role of the BIPM. 2003. Bureau International des Poids et Mesures April, 142 p.
- Ferrero, A.; Salicone, S. 2004. The Random–Fuzzy Variables: A New Approach to the Expression of Uncertainty in Measurement, *IEEE Transaction on instrumentation and measurement*, 63(5): 1370–1377.
- Flügge, J.; Dai, G.; Köning, R. 2001. Software and Control System of the PTB nanometer length comparator, *Proc. 2nd euspen Int. Conf., Torino (Italy)*, 548–551.
- Flügge, J.; Dangschat, H.; Spies, A.; Tschirnich, J.; Piele, H. 1999. Concept of a interferometric length comparator with measurement uncertainties in the nanometer scale, *Proceedings of 1st Euspen Conference*, 227–230.
- Flügge, J.; Köning, R.; Bosse, H. 2001. Status of the nanometer comparator at PTB, *Proc. SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements*, Jennifer E. Decker; Nicholas Brown; Eds 4401: 275–283.
- Flügge, J.; Köning, R.; Bosse, H. 2005. Characterising the performance of the PTB line scale interferometer measuring photoelectric encoders, in *Proc. SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements*, Jennifer E. Decker; Gwo–Sheng Peng; Eds. San Diego, 5879: 08–1 – 08–9.
- Flügge J.; Köning R.; Bosse H. 2003. Recent activities at PTB nanometer comparator, *Proc. SPIE, "Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements"*, J. E. Decker; N. Brown; Eds. 5190: 391–399.
- Flügge, J.; Köning, R. 2001. *Status of the nanometer comparator at PT in Proc. SPIE, "Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements"*, Jennifer E. Decker; Nicholas Brown; (Eds.) 4401: 275–283
- Giniotis, V.; Grattan, K.T.V.; Rybokas, M.; Kulvietienė, R. 2004. Uncertainty and indeterminacy of measurement data. *Measurement*, 36: 195–202.
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 1995. International Organization for Standardization (ISO), Geneva.
- Ignacio, H. L. Wolfgang, W. 1998. Evaluation of the Uncertainty Associated with a Measurement Result not Corrected for Systematic Effects, *Measurement Science Technology*, 8: 1010–1011.
- ISO 13373–1:2002 Condition monitoring and diagnostics of machines. 2002. – Vibration condition monitoring – Part 1: General procedures. ISO.
- ISO 13373–2:2005 Condition monitoring and diagnostics of machines. 2005. – Vibration condition monitoring – Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data. ISO.

- Isermann, R. 1997. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods – Advanced methods and applications, *XIV IMEKO World Congress New Measurements – Challenges and Visions*, Finland, Tampere, 1(I): 1–28.
- Daniel, J. Inmann. 2001. *Engineering Vibration*. Prentice Hall.
- Yim, N.B., Eom, C.II, Kim, S.W. 2000. Dual mode phase measurement for optical heterodyne interferometry. *Measurement Science Technology*, 11: 1131–1137.
- Jakštas, A. 2007. *Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas*. Daktaro disertacija, KTU, Kaunas.
- Jonušas, R.; Jurkauskas, A.; Volkovas, V. 2001. *Rotorinių sistemų dinamika ir diagnostika*. Kaunas: Technologija.
- Kaušinis, S.; Jakštas, A.; Barauskas, R.; Kasparaitis, A. 2006. Dynamic mode of the line scale calibration, *Solid State Phenomena*, 113: 457–463.
- Kildišas, V.; Tekorius, T. 2003. *Procesų valdymo uždavinių sprendimas taikant MATLAB sistemą*. Kaunas: „Technologija“.
- LAB 12 The Expression of Uncertainty in Testing. 2000. *United Kingdom Accreditation Service*.
- Lassila, A.; Ikonen, E.; Riski, K. 1994. Interferometer for calibration of graduated line scales with a moving CCD camera as a line detector, *Applied Optics*, 16(33): 3600–3603.
- Mauris, G.; Lasserre, V.; Foulloy, L. 2001. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement, *Measurement*, 29: 165–177.
- Moore, Wayne R. 1970. *Foundations of Mechanical Accuracy*. The Moore Special Tool Company.– Bridgeport, Connecticut.
- Martens H. J. 2002. Evaluation of uncertainty in measurements – problems and tools, *Optics and Lasers in Engineering*, 38: 185–206.
- Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. 2004. The Royal Society & The Royal Academy of Engineering.
- Nakazava, H. 1994. Principles of Precision Engineering, *Oxford University Press*.
- Natke, H. G.; Cempel, C. 1997. *Model Aided Diagnosis of Mechanical Systems*. ISBN 3–540–61065–0, Springer–Verlag.
- Ostaševičius, V. 1998. *Mechaninių konstrukcijų dinamika ir modeliavimas*. Kaunas, „Technologija“.
- Phillips, S. D.; Eberhardt, K. R. 1997. Guidelines for Expressing the Uncertainty of Measurement Results Containing Uncorrected Bias, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 102(5): 577–585.
- Phillips, S. D.; Estler, W. T.; Levenson, M. S.; Eberhardt, K. R. 1998. Calculation of Measurement Uncertainty Using Prior Information, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 103: 625–632.
- Precizinių ilgio kalibravimo sistemų sukūrimas ir tyrimas, 2007, ATP programa, VMS Fondas, Reg. Nr. B–07039, 2007 m. ataskaita, Kaunas, p. 59–72.
- Prieiga per internetą (2006–05–14): <http://www.bsp.lt>.
- Prieiga per internetą (2006–05–21): <http://www.microscopyu.com>.
- Pugh, D.J. 1987. *A White Light Interferometer*, National Physical Laboratory, UK.
- Rolt, F. H. 1929. *Gauges and Fine Measurements*. Macmillan and Co. Limited, London.

- Sawabe, M.; Maeda, F.; Yamaryo, Y.; Simomura, T.; Saruki, Y.; Kubo, T.; Sakai, H. and Aoyagi, S. 2004. A new vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear encoders and scales, *Precision Engineering*, 28: 320–328.
- Slocum, A. H. 1992. *Precision Machine Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Swyt, D. A. 2001. Length and Dimensional Measurements at NIST, *Journal of Research of NIST*, 106: 1–23.
- The International Definition of the Metre and its Realization. 1986. *Metrologia*, 22: 201–203.
- Truchetet, F.; Nicolier, F.; Lalignant, O. 2001. Subpixel edge detection for dimensional control by artificial vision, *Journal of Electronic Imaging*, 10: 234–239.
- Quinn, T.J. 1994. Mise en Pratique of the Definition of the Metre, *Metrologia*, 30: 523–541.
- Webb, C.E.; Jones, J.D.C. 2004. *Handbook of laser technology and applications*. Institute of Physics, Bristol.
- Wu, C.M.; Su, C.S. 1996. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry, *Measurement Science Technology*, 7: 62–68.
- Weise, K.; Wöger, W. A Bayesian. 1993. Theory of Measurement Uncertainty, *Measurement Science Technology*, 4 (1): 1–11.
- WDGM–7 Preliminary comparison on nanometrology according to the rules of CCL key comparison Nano3. 2003. *Line Scale Standards*, Final Report. Braunschweig, 119 p.
- Xia, X.; Wang, Z. and Gao, Y. 2004. Estimation of non–statistical uncertainty using fuzzy–set theory, *Measurement Science Technology*, 11: 430–435
- Urbanski, M.; Wařowski, J. Fuzzy. 2003. Approach to the theory of measurement inexactness, *Measurement*. 34: 67–74.
- Valiukėnas, V.; Žilinskas, P. J. 2006. *Penkiakalbis aiřkinamasis metrologijos terminų žodynas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas.
- Vekteris, V.; Jurevičius, M.; Daktariūnas, A. 1999. Kompiuterinė diagnostinių matavimų sistema, *Matavimai*, 2(11): 11–17.
- Vekteris, V.; Jurevičius, M. 2000. Technologinių mašinų diagnostiniai matavimai, *Matavimai*, 3(13): 21–26.
- Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Žiburio l–kla.
- Vobolis J. 1996. *Lengvosios pramonės mašinų diagnostika*. Kaunas, Technologija.
- Volkovas, V.; Eidukevičiūtė, M. 2004. Uncertainty in vibromonitoring systems of rotating machinery, *Vibroengineering: proceedings of 5th International Conference, October 14–15*, p. 111–113. ISSN 1392–8716.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

1. Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevičius, A. 2008. Line scale Comparator Carriage vibrations during dynamic calibration, *Journal of Vibroengineering* 10(3): 347–354. ISSN 1392–8716 (Thomson ISI Web of Science).
2. Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevičius, A. 2009. Precision Measurement of the Carriage Vibrations at the Different Speeds, *Solid State Phenomena* 147–149: 690–695. ISSN 1012–0394 (Thomson ISI Web of Science).
3. Kausinis, S.; Kasparaitis, A.; Barakauskas, A.; Barauskas, R.; Jakstas, A.; Kilikevičius, A. 2009. Line scale Calibration in Non–Ideal Measurement Situation, *Solid State Phenomena* 147–149: 682–685. ISSN 1012–0394 (Thomson ISI Web of Science).
4. Kilikevičius, A.; Vekteris, V. 2006. Diagnostic testing of the comparator carriage vibrations, *Ultragarsas* 2(59): 26–30. ISSN 1392–2114 (INSPEC).
5. Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevičius, A. 2007. Investigation of vibrations acting on mechatronical comparator, *Ultragarsas* 1(62): 38–41. ISSN 1392–2114 (INSPEC).
6. Kilikevičius, A.; Sabaitis, D. 2008. Stability of Length Measurement Comparator’s Carriage Generative Unnatural Excitation, *Ultragarsas* 1(63): 33–37. ISSN 1392–2114 (INSPEC).
7. Vekteris V.; Kilikevičius A.; Jurevičius M.; Striška V. 2007. Comparison of the Comparator Carriage Vibration Velocity Measurement Methods, *Matavimai* 2(40): 24–27. ISSN 1392–1223 (EBSCO).
8. Trumpa A.; Vekteris V.; Kilikevičius A.; Striška V. 2007. Diagnostics of the Centrifugal Milk Separator, *Matavimai* 2(40): 21–23. ISSN 1392–1223 (EBSCO).
9. Kilikevichius, A.; Vekteris, V. 2008. Research of vibrations acting the comparators Carriage, *Journal Materials, Methods & Technologies* 2(1): 11–23. ISSN 1313–2539.

Kituose leidiniuose

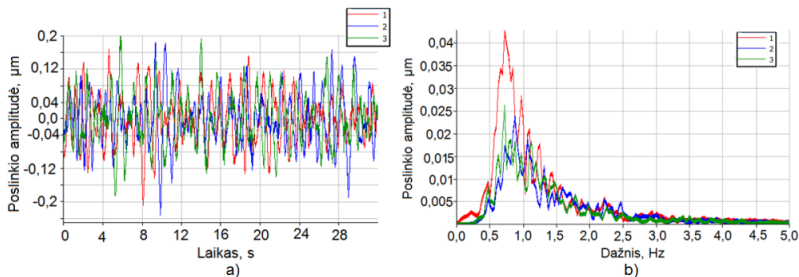
10. Kilikevičius, A.; Vekteris, V. 2006. Vibrations Sources Acting the Comparator Stand, in *Mechanika 2006 Proceedings of the 11th international conference*. 168–172. ISSN 1822–2951.
11. Kilikevičius, A.; Vekteris, V. 2006. Research of vibrations acting the mechatronical comparator, *Zbornik 4. „KOD 2006“ Zbornik Radova Proceedings. Palič*. 233–236. ISBN 86–85211–92–1.
12. Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevičius, A. 2006. A Vibration Source in Comparator, in *Seventh International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Ancona, Italy*, 6345: 1O1–1O5. ISBN 0277–786X/06 (ISI Proceedings).
13. Kilikevičius, A.; Vekteris, V.; Kasparaitis, A. 2008. Definition of the comparator dynamic reading errors, in *Proceedings of the International conference Vibroengineering*, 68–72. ISSN 1822–1262 (ISI Proceedings).
14. Kilikevičius, A.; Kasparaitis, A. 2005. Precizinio ilgio matavimo komparatoriaus virpesių tyrimai, iš *8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, įvykusios Vilniuje 2005 m. balandžio 21–22 d., medžiaga *Mechanika. Vilnius 2005 m.* 18–23. ISBN 9986–05–907–0.
15. Juchnevičius, Ž.; Kilikevičius, A. 2007. Komparatoriaus dinaminiai tyrimai, iš *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, įvykusios Vilniuje 2007 m. balandžio 19–20 d., straipsnių rinkinys. *Technika. Vilnius 2007 m.* 27–33. ISBN 978–9955–28–214–3.

Priedai

A priedas. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šiame priede pateikti papildomi matavimų rezultatai, kurie aptariami 3 darbo dalyje.

Granitinės kreipiančiosios virpesių matavimo rezultatai pateikti 1A paveiksle (kreivės reiškia: 1 – išjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara, 2 – išjungtos visos pneumatinės sistemos ir išjungta pavara, 3 – įjungtos visos pneumatinės sistemos ir įjungta pavara) ir 1A lentelėje.



1 A. pav. Granitinės kreipiamosios (3.2 pav.) taško B absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, vertikali kryptis

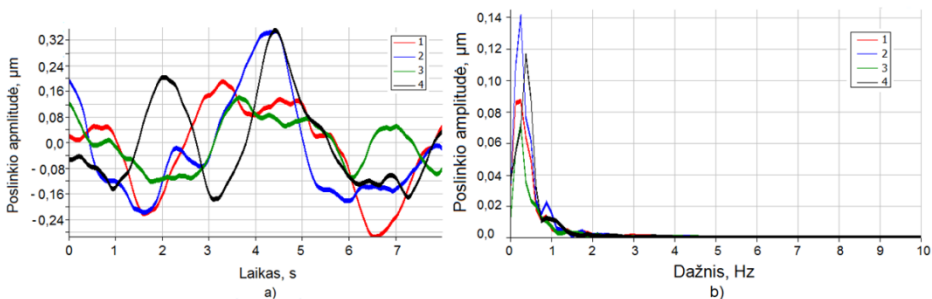
Fig. 1 A. Graphs of absolute vibrations in vertical direction of granite guidways at the point B (a) (see Fig. 3.2) and vibration spectrum (b)

1 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 1 A. Statistical characteristics of vibrations

Matavimo kryptis	Pneumatinių sistemų ir pavaros būsenos	Statistiniai parametrai					
		Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
Vertikali	išjungtos visos pneum. sistemos ir išjungta pavara	-2,148E-4	0,0616	4,813E-4	-0,233	0,185	0,418
Vertikali	išjungtos visos pneum. sistemos ir įjungta pavara	5,725E-5	0,0602	4,703E-4	-0,208	0,168	0,376
Vertikali	įjungtos visos pneum. sistemos ir įjungta pavara	-0,00347	0,0898	0,00198	-0,207	0,259	0,466

Paveiksluose 2A ir 3A (kreivės reiškia: 1 – kariatėlės greitis 0 mm/s, 2 – kariatėlės greitis 1 mm/s, 3 – kariatėlės greitis 2 mm/s, 4 – kariatėlės greitis 3 mm/s) pateikti matavimo rezultatai kariatėlei judant greičiais 0 mm/s, 1 mm/s, 2 mm/s ir 3 mm/s, o statistinės charakteristikos pateiktos 2A ir 3A lentelėse. Paveiksluose 4A, 5A, 6A ir 7A (kreivės reiškia: 1 – kariatėlės greitis 4 mm/s, 2 – kariatėlės greitis 5 mm/s, 3 – kariatėlės greitis 10 mm/s) pateikti matavimo rezultatai kariatėlei judant greičiais 4 mm/s, 5 mm/s ir 10 mm/s, o statistinės charakteristikos pateiktos 4A, 5A, 6A ir 7A lentelėse.



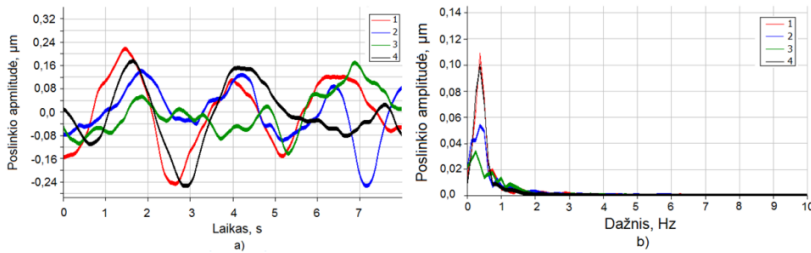
2 A. pav. Taško 1 (3.5 pav) absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, skersinė kryptis

Fig. 2 A. Graphs of absolute vibrations in transverse direction of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b)

2 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 2 A. Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
0	-5,041E-4	0,0486	3,801E-4	-0,137	0,18	0,317
1	-0,0221	0,159	0,00352	-0,218	0,349	0,568
2	-0,00263	0,0756	0,00167	-0,121	0,141	0,262
3	-0,00121	0,139	0,00307	-0,177	0,352	0,528



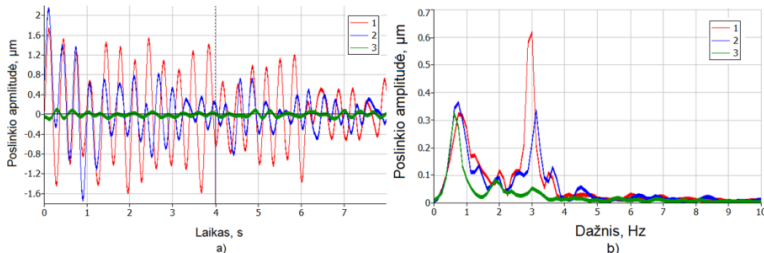
3 A. pav. Taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės karietėlės, absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, vertikali kryptis

Fig. 3 A. Graphs of absolute vibrations in vertical direction of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b)

3 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 3 A. Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
0	-5,018E-4	0,0486	3,801E-4	-0,137	0,18	0,317
1	-0,00417	0,0878	0,00194	-0,252	0,142	0,395
2	-0,00469	0,0705	0,00156	-0,143	0,169	0,312
3	-0,0110	0,103	0,00227	-0,254	0,175	0,429



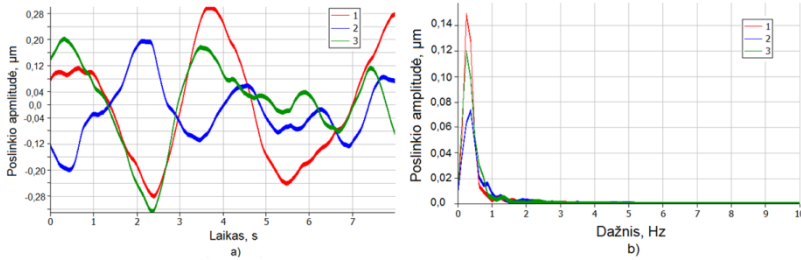
4 A. pav. Taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės karietėlės, absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

Fig. 4 A. Graphs of absolute vibrations in longitudinal direction of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b)

4 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 4 A. Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
4	0,025	0,738	0,0163	-1,567	1,724	3,294
5	0,043	0,508	0,011	-1,72	2,13	3,846
10	-0,0049	0,038	8,355E-4	-0,095	0,096	0,191



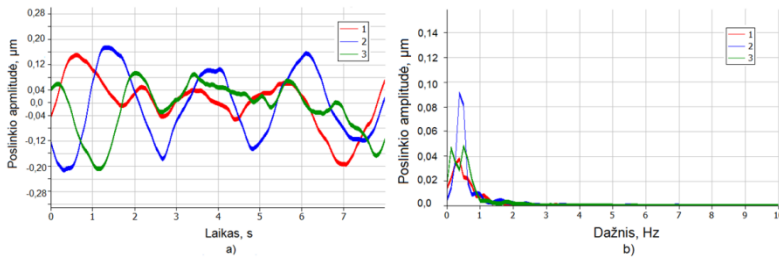
5 A. pav. Taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės karietėlės, absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, skersinė kryptis

Fig. 5 A. Graphs of absolute vibrations in transverse direction of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b)

5 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 5 A. Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
4	-0,00229	0,167	0,00369	-0,279	0,297	0,577
5	-0,0201	0,0906	0,0020	-0,199	0,195	0,395
10	0,00637	0,125	0,00276	-0,326	0,202	0,528



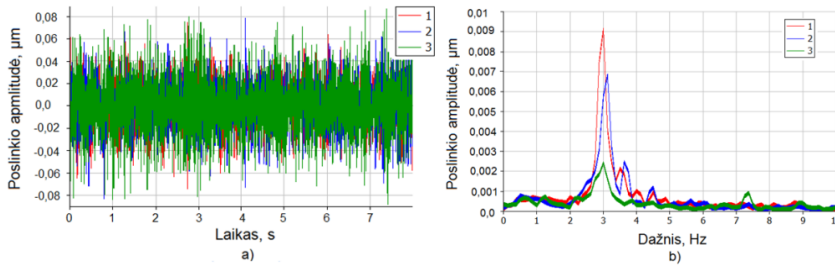
6 A. pav. Taško 1 (3.5 pav.), esančio ant precizinės karietėlės, absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, vertikali kryptis

Fig. 6 A. Graphs of absolute vibrations in vertical direction of point 1 (a) (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b)

6 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 6 A. Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
4	5,274E-4	0,0774	0,00171	-0,194	0,151	0,345
5	-0,0130	0,110	0,00244	-0,212	0,174	0,387
10	-0,0142	0,0785	0,00174	-0,208	0,0936	0,302



7 A. pav. Santykinų virpesių tarp mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai

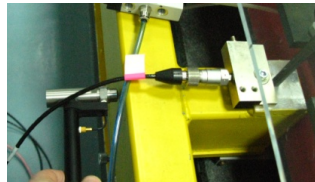
Fig. 7 A. Graphs of relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors (a) and vibrations spectrum (b)

7 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

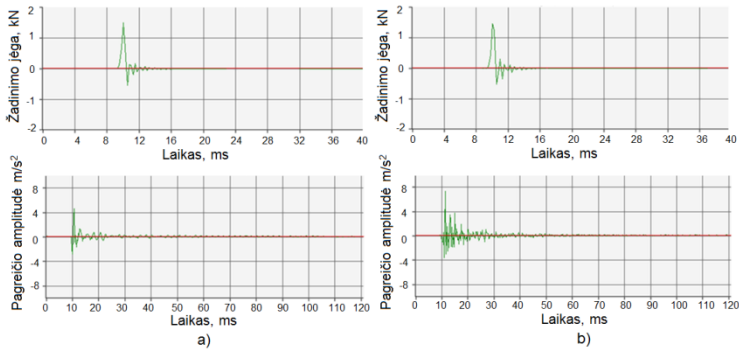
Table 7 A. Statistical characteristics of vibrations

Karietėlės greitis, mm/s	Statistiniai parametrai					
	Aritmetinis vidurkis \bar{x} , μm	Standartinis nuokrypis S_x , μm	Standartinis vidurkio nuokrypis $S_{\bar{x}}$, μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Sklaida, μm
4	-3,57E-5	0,0212	4,69E-4	-0,0746	0,0746	0,149
5	-8,596E-5	0,0227	5,02E-4	-0,0831	0,0785	0,162
10	5,625E-4	0,0284	6,28E-4	-0,0883	0,0868	0,175

Būdingų karietėlės taškų virpesiai, veikiant smūginiam virpesių žadinimui pateikti 9A, 11A, 13A, 15A ir 16A paveiksluose.



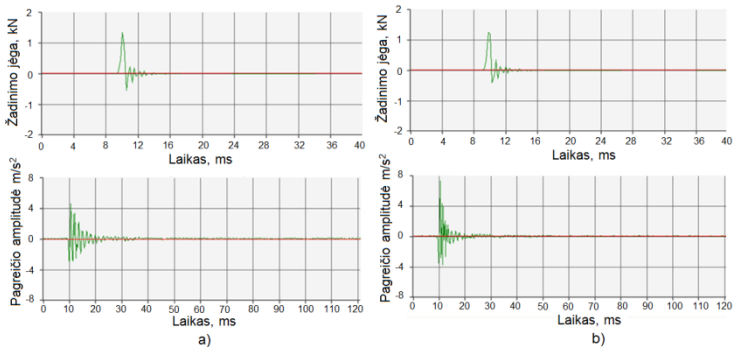
8 A pav. Akcelerometro tvirtinimas (jėginė karietėlė) ir žadinimo vieta (skersinė kryptis)
Fig. 8 A. The fixing place of the accelerometers (force carriage) and the excitation point (for excitation in the transverse direction)



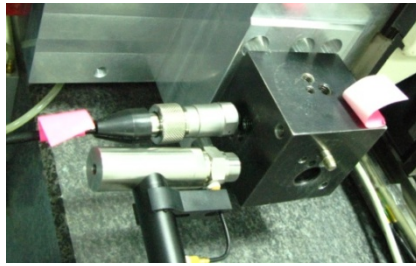
9 A. pav. Akcelerometras ant jėginės kariatėlės (3.14 pav. taškas 1) matuojant skersine kryptimi:
 a) žadinama šalia acelerometro, b) žadinama atstumu 280 mm nuo acelerometro
Fig. 9 A. Accelerometer on the force carriage (Fig. 3.14. point 1), for measuring in the transverse direction: a) excitation near to the accelerometer, b) through the distance 280 mm from the accelerometer



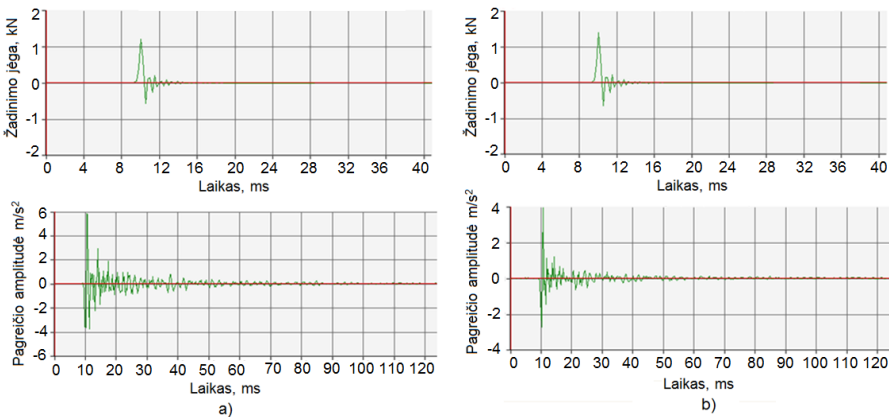
10 A. pav. Akcelerometro tvirtinimas (jėginė kariatėlė) ir žadinimo vieta (vertikali kryptis)
Fig. 10 A. The fixing place of the accelerometers (force carriage) and the excitation point (for excitation in the vertical direction)



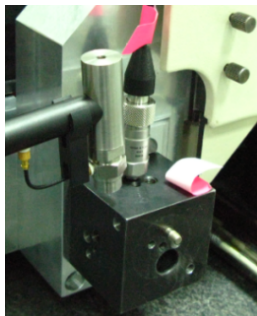
11 A. pav. Akcelerometras ant jėginės kariatėlės (3.14 pav. taškas 1) matuojant vertikalia kryptimi: a) žadinama šalia acelerometro, b) žadinama atstumu 80 mm nuo acelerometro
Fig. 11 A. Accelerometer on the force carriage (Fig. 3.14. point 1), for measuring in the vertical direction: a) excitation near to the accelerometer, b) through the distance 80 mm from the accelerometer



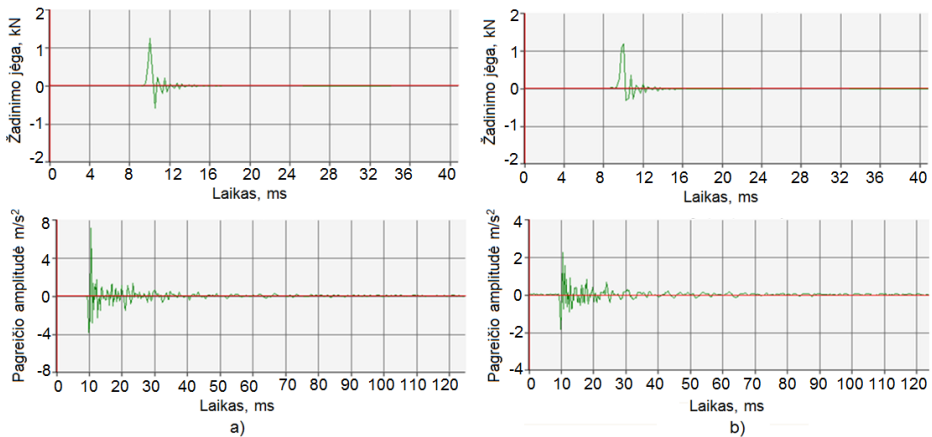
12 A. pav. Akcelerometro tvirtinimas (precizinė kariatėlė) ir žadinimo vieta (skersinė kryptis)
Fig. 12 A. The fixing place of the accelerometers (precise carriage) and the excitation point (for excitation in the transverse direction)



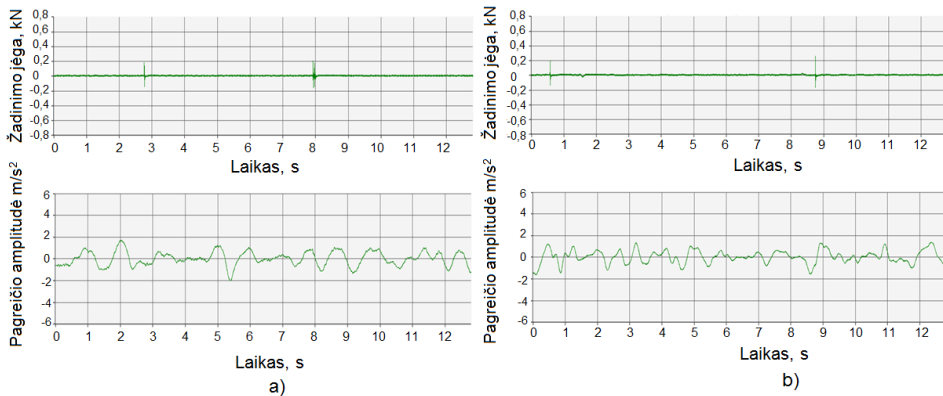
13 A. pav. Akcelerometras ant precizinės kariatėlės (3.14 pav. taškas 6), matuojant skersine kryptimi: a) žadinama šalia acelerometro, b) žadinama atstumu 80 mm nuo acelerometro
Fig. 13 A. Accelerometer on the precise carriage (Fig. 3.14. point 6), for measuring in the transverse direction: a) excitation near to the accelerometer, b) through the distance 80 mm from the accelerometer



14 A. pav. Akcelerometro tvirtinimas (precizinė kariatėlė) ir žadinimo vieta (vertikali kryptis)
Fig. 14 A. The fixing place of the accelerometers (precise carriage) and the excitation point (for excitation in the vertical direction)



15 A. pav. Akcelerometras ant precizinės kariatėlės (3.14 pav. taškas 6), matuojant vertikaliai kryptimi: a) žadinama šalia acelerometro, b) žadinama atstumu 80 mm nuo acelerometro
Fig. 15 A. Accelerometer on the precise carriage (Fig. 3.14. point 6), for measuring in the transverse direction: a) excitation near to the accelerometer, b) through the distance 80 mm from the accelerometer



16 A. pav. Akcelerometras ant precizinės kariatėlės (3.14 pav. taškas 6): a) matuojant vertikali kryptis žadinama jėginė kariatėlė šalia dviejų kariatėlių sujungimo elemento, b) skersinė kryptis žadinama jėginė kariatėlė (3.14 pav. taškas 8)

Fig. 16 A. Accelerometer on the precise carriage (Fig. 3.14. point 6): a) the excitation acts the force carriage near to the joint member of two carriage in vertical direction, b) excitation acts the force carriage through the distance 80 mm from the accelerometer in transverse direction

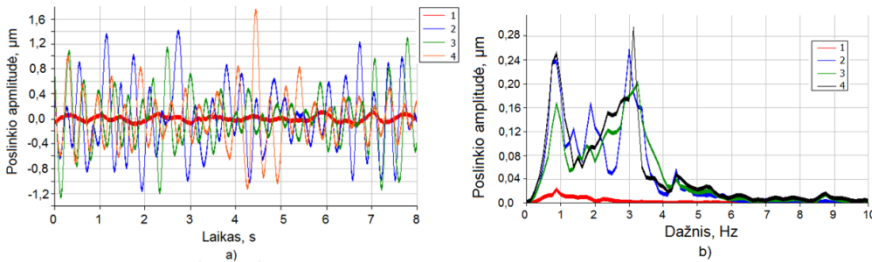
Komparatoriaus bazės – granitinės kreipiamosios taško B virpesių matavimo rezultatai (3.20 pav.) išilgai kreipiamosios (Y) ir vertikaloje plokštumoje (Z) pateikti 8 A lentelėje.

8 A. lentelė. Statistinės virpesių charakteristikos

Table 8 A. Statistical characteristics of vibrations

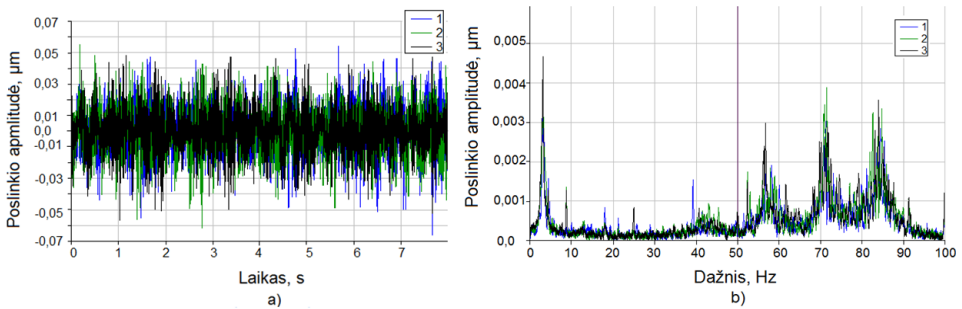
Matavimo taškas	Matavimo kryptis	Pavaros tvirtinimo vieta (3.20 pav.)	Standartinis nuokrypis S_v , μm	Minimali reikšmė x_{min} , μm	Maksimali reikšmė x_{max} , μm	Dominuojantys virpesiais prie dažnių, Hz	Dominuojančių virpesių reikšmė, μm	Pastabos
Virpesiai matuoti taške B (3.20 pav.)	Y	F	0,429	-1,092	1,253	2; 25	0,06; 0,16	įjungtas variklis
	Z	F	0,211	-0,750	0,715	2; 25	0,042; 0,04	
	Y	E	0,0635	-0,195	0,232	1	0,18	
	Z	E	0,0602	-0,208	0,168	1	0,042	
	Y	F	0,295	-0,863	1,100	2; 25	0,06; 0,105	išjungtas variklis
	Z	F	0,205	-0,762	0,746	2; 25	0,042; 0,045	
	Y	E	0,0496	-0,131	0,173	1	0,02	
	Z	E	0,0616	-0,233	0,185	1	0,024	

Matavimo rezultatų grafinis vaizdavimas po atliktų pavaros tvirtinimo vietos pakeitimo bei kariatėlės tobulinimo pateikti paveiksluose 17A ir 18A, (kreivės reiškia: 1 – kariatėlės greitis 0 mm/s, 2 – kariatėlės greitis 1 mm/s, 3 – kariatėlės greitis 2 mm/s, 4 – kariatėlės greitis 3 mm/s) pateikti matavimo rezultatai kariatėlei judant greičiais 0 mm/s, 1 mm/s, 2 mm/s ir 3 mm/s. Paveiksluose 19A ir 20A (kreivės reiškia: 1 – kariatėlės greitis 4 mm/s, 2 – kariatėlės greitis 5 mm/s, 3 – kariatėlės greitis 10 mm/s) pateikti matavimo rezultatai kariatėlei judant greičiais 4 mm/s, 5 mm/s ir 10 mm/s.



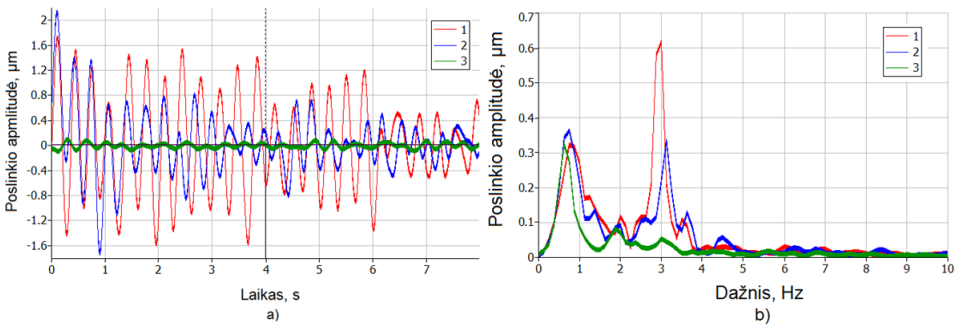
17 A. pav. Taško 1 (3.5 pav.) absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

Fig. 17 A. Graphs of absolute vibrations (a) of point 1 (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b) in longitudinal direction



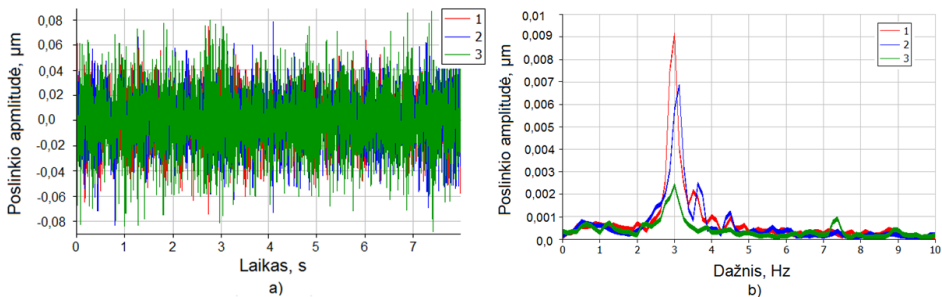
18 A. pav. Santykinių virpesių tarp mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai

Fig. 18 A. Graphs of relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors (a) and vibrations spectrum (b)



19 A. pav. Taško 1 (3.5 pav.) absoliučių virpesių (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai, išilginė kryptis

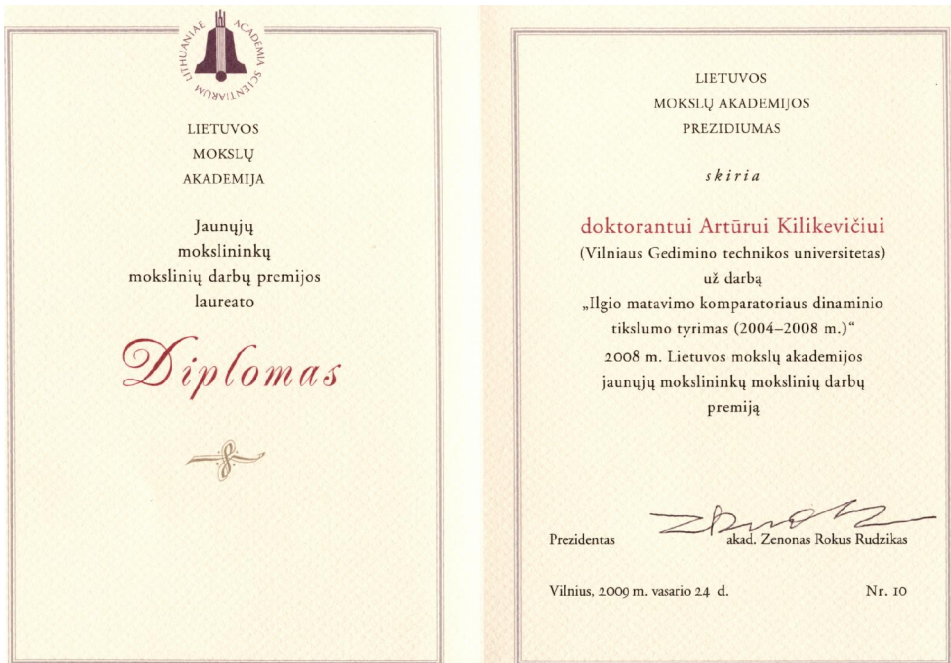
Fig. 17 A. Graphs of absolute vibrations (a) of point 1 (see Fig. 3.5) and vibration spectrum (b) in longitudinal direction



20 A pav. Santykinių virpesių tarp mikroskopo ir lazerinio interferometro veidrodėlio (a) ir spektrinio tankio (b) grafikai

Fig. 20 A. Graphs of relative vibrations of the laser microscope with respect to the laser interferometer mirrors (a) and vibrations spectrum (b)

B priedas. Lietuvos mokslų akademijos 2008 metų jaunųjų mokslininkų mokslinių darbų premijos laureto diplomas



1 B pav. Lietuvos mokslų akademijos 2008 metų jaunųjų mokslininkų mokslinių darbų premijos laureto diplomas

Fig. 1 B. Diploma of Lithuanian Academy of Sciences of the winner between young scientists of scientific works 2008

Artūras Kilikevičius

ILGIO MATAVIMO MECHATRONINIO KOMPARATORIAUS
DINAMINIŲ PAKLAIDŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
matavimų inžinerija (10T)

THE RESEARCH OF DYNAMIC ERRORS
OF THE MECHATRONICAL
LINE SCALE COMPARATOR

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement Engineering (10T)

2009 05 04. 13,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11,
10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino „Biznio mašinų kompanija“
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius