VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ričardas MASIULIONIS

MAŽŲ DEFORMACIJŲ STEBĖSENOS ELEKTRONINIŲ ĮRENGINIŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2007–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

Prof. dr. Vygaudas KVEDARAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2111-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-424-5

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2012

© Ričardas, Masiulionis, 2012

ricardas.masiulionis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ričardas MASIULIONIS

RESEARCH OF ELECTRONIC DEVICES FOR MONITORING OF SMALL STRAINS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)

Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Vygaudas KVEDARAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos ir sprendžiamos konstrukcijų deformacijų (varžų mažų pokyčių) nustatymo daugelyje konstrukcijos taškų problemos. Tiriamų sistemų funkcionavimo esmė yra įtempių jutiklių varžos mažų pokyčių proporcingų poslinkiui ar deformacijai ir siekiančių tik tūkstantąsias procento dalis nustatymas. Pagrindiniai tyrimo objektai yra automatinių daugiataškių balansuojamo Vitstono tiltelio ir srovių balansavimo metodais veikiančios deformacijų nustatymo grandynai. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti sukurtų balansuojamų elektroninių įrenginių deformacijoms nustatyti savybes, sukurti naujus daugiataškius konstrukcijų deformacijų (varžų mažų pokyčių) nustatymo įrenginius bei juos ištirti.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame analizuojami praktikoje naudojami deformacijų nustatymo metodai, pateikiami jų privalumai ir trūkumai, galimybės naudoti šiuos metodus automatizuotose sistemose. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Antrajame skyriuje pasiūlyti konstrukcijų deformacijų stebėsenos balansuojami įrenginiai. Yra atlikta balansuojamo Vitstono tiltelio įrenginio analizė. Pateikti nauji deformacijų nustatymo balansuojant srovės įrenginiai ir atlikta jų analizė. Išskiriami du galimi būdai: su dviem srovės šaltiniais ir su vienu srovės šaltiniu. Taip pat sudarytos įrenginių balansuojant srovės struktūrinės schemos su vienu, dviem ir trimis srovės skaitmeniniais analoginiais keitikliais, turinčiais srovės išėjimus.

Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose pateikti kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai. Buvo sumodeliuotas ir praktiškai patikrintas pasiūlytų srovės balansavimo įrenginių praktinis veikimas. Patikrintas įrenginių stabilumas ir jų darbas imituojant realias sąlygas.

Disertacijos tema paskelbti penki straipsniai: vienas – moksliniame žurnale, įrašytame į Thomson Reuters ISI Web of Science duomenų bazę, vienas – moksliniame žurnale, įrašytame į ISI Proceedings duomenų bazę, du – moksliniuose žurnaluose, įrašytuose į Copernicus duomenų bazę, vienas – kitame recenzuojamame mokslo leidinyje. Disertacijos tema perskaityti aštuoni pranešimai respublikinėse bei tarptautinėse konferencijose.

Abstract

This thesis analyzes and solves the problems of monitoring of constructions strains (small resistance changes) in a number of points of the structure. The essence of investigated systems is test of the strain gauges small resistance changes proportional to displacement or strain and reaching only thousandths of parts of percent. The main objects of research is strain detection circuits working under automatic multipoint balanced Wheatstone bridge and the current balancing methods. The primary purpose – investigate created properties of balanced electronic devices for strain monitoring, create new devices for multipoint testing of constructions deformations (small resistance changes) and explore them.

The dissertation consists of four parts including introduction, four chapters, conclusions, references and the author's publications related to the subject of the dissertation.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and objects of research and describes the purpose and tasks of the work, research methods, scientific novelty, and the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends with the presentation of the author's publications on the subject of defended dissertation, offering the material of presentations made at conferences and defining the structure of the dissertation.

The first chapter is a review of literature. It analyzes practical use of strain measurement methods, their advantages and disadvantages, opportunities to use these methods in automated systems. The chapter ends with formulated conclusions.

The second section presents balanced methods of the strain monitoring. Analysis of balanced Wheatstone bridge device is made. New strain monitoring device by balancing currents are proposed and investigated. There are two possible ways: with two current sources and one current source. Block diagrams of devices by balancing currents with one, two and three digital to analog converters having a current output was created.

The third and fourth sections provide results of computer simulation and experimental models. The proposed devices of balancing currents has been modeled and tested in practice. Stability of the devices was tested and their work simulating in real conditions.

Five scientific articles related to the subject of the dissertation have been published: one – in the Thomson Reuters ISI Web of Science database; one – in the ISI Proceedings database; two – in the Copernicus database; one – in other peer-reviewed scientific journal. Results of research conducted on the dissertation subject have been reported at eight scientific conferences.

Žymėjimai

Pagrindiniai simboliai

D	– dešimtainis atskaitų skaičius;
i	– tiltelio grandinės variantas;
I_1	– pirmojo srovės šaltinio srovė;
I_2	– antrojo srovės šaltinio srovė;
I_{2n}	– kompensacinės šakos srovė;
I_{Am}	– nustatyta jutiklių vardinė srovė;
I_B	– tiltelio maitinimo srovė;
I_d	– maksimali perderinimo diapazono srovės vertė;
I_i	– šakos srovė;
$I_{iš}$	– skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo srovė;
I_{max}	– maksimali srovės vertė;
$I_{max\ pl}$	– maksimali srovės vertė, kai plieno deformacija yra maksimalios vertės;
I_{MRS}	– skaitmeninio-analoginio keitiklio mažiausio reikšminio skaičiaus srovė;
$I_{MRS\ lab.\ pl}$	– plieno deformacijų stebėsenos laboratorinės įrangos skaitmeninio-analoginio keitiklio mažiausio reikšminio skaičiaus srovė;
$I_{MRS\ st.\ pl}$	– plieno deformacijų stebėsenos įrangos skaitmeninio-analoginio keitiklio mažiausio reikšminio skaičiaus srovė;

k	– tapatumo koeficientas;
k_s	– koeficientas, įvertinantis trukdžių nesinfaziškumą;
l	– jutiklio vieleinės ilgis;
M	– minimalus diskretus dešimtainis skaičius matavimo diapazone;
m_a	– dešimtainis skaitmeninio-analoginio keitiklio valdymo kodas, kai įtempio jutiklis apkrautas;
m_m	– matuojamo rezultato dešimtainis skaitmeninio-analoginio keitiklio valdymo kodas;
m_n	– dešimtainis skaitmeninio-analoginio keitiklio valdymo kodas, kai įtempio jutiklis neapkrautas;
m_{nust}	– nustatytas srovės reguliavimo dešimtainis kodas;
m_s	– dešimtainis skaitmeninio-analoginio keitiklio valdymo kodas ($m = 1, 2, 3, \dots$);
n	– skaitmeninio-analoginio keitiklio skilčių skaičius;
N_{ASK}	– kvantavimo laiptelių skaičius (analoginio-skaitmeninio keitiklio kvantavimo lygis);
N_{ef}	– efektyvių, triukšmų nepaveiktų analoginio-skaitmeninio keitiklio skilčių skaičius;
N_t	– pikinės skaitmeninio signalo triukšmo amplitudinės vertės kodas;
p	– reikalaujamas skaitmeninio-analoginio keitiklio skilčių skaičius;
R	– grandinės varža;
r	– visas skaitmeninio-analoginio keitiklio skilčių skaičius;
R_{11}, R_{22}	– schemos pirmojo ir antrojo pečių atstojamosios varžos;
$R_1 - R_4$	– Vitstono tiltelio varžos;
R_3, R_4	– pastoviosios varžos;
R_{A1}, R_{A2}	– tikslios atraminės varžos;
R_C	– keičiama balansavimo varža;
R_i	– kanalo varža matavimo metu;
$R_{i\delta}$	– R - $2R$ skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo varža;
$R_{j\max}$	– jutiklio varžos kitimo diapazonas;
R_{j1}	– aktyviojo įtempio jutiklio varža;
R_{j1n}	– aktyvaus neapkrauto jutiklio varža;
R_{j1R}	– aktyviojo jutiklio varža matavimo metu;
R_{j2}	– pasyviojo įtempio jutiklio varža;
R_{j2n}	– kompensacinio neapkrauto jutiklio varža;
R_{ji}	– šakos jutiklio varža;
R_{jv}	– jutiklio vardinis varžos dydis;

R_{11}, R_{12}	– schemos aktyviojo ir kompensacinio pečių jutiklių prijungimo laidininkų varžos;
R_m	– jutiklio varžos dydis apkrautos konstrukcijos deformacijos nustatymo metu;
R_{MRS}	– skaitmeninio-analoginio keitiklio mažiausio reikšminio skaičiaus varža;
R_S	– įtempio jutiklių varžų skirtumas, įvertinantis jutiklių jungiamųjų kabelių, sujungtų jungikliais, varžas;
R_{SAK}	– skaitmeninio-analoginio keitiklio pilnoji varža;
S/T	– signalo-triukšmo santykis;
$TC1$	– temperatūrinis koeficientas;
$U_{0\max}$	– maksimali tiltelio disbalanso įtampa;
U_{0i}	– tiltelio disbalanso įtampa;
U_B	– tiltelio maitinimo įtampa;
U_e	– skaitmeninio-analoginio keitiklio etaloninė įtampa;
U_i	– šakos įtampos kritimas;
ΔI_{2n}	– kompensacinės šakos srovės pokytis;
δI_{2n}	– santykinis neapkrautų jutiklių varžų skirtumas;
ΔI_R	– skaitmeniniu būdu reguliuojamos antrojo srovės šaltinio srovės pokytis;
δR_3	– santykinis reikalingas varžo R_3 perderinimo diapazonas;
ΔR_3	– varžos R_3 perderinimo diapazonas;
δR_{3R}	– santykinis reikalingas varžo R_{3R} perderinimo žingsnis;
δR_d	– maksimalios matuojamos santykinės varžos vertė;
ΔR_j	– jutiklių varžų skirtumas;
δR_{j1m}	– santykinis aktyviojo jutiklio pokytis;
ΔR_{jap}	– apkrauto jutiklio varžos pokytis;
ΔR_{jn}	– neapkrautų jutiklių varžų skirtumas;
δR_{jn}	– santykinis antrosios (reguliuojamos) srovės pokytis;
ΔR_l	– prijungimo laidų varžų skirtumas;
δR_m	– maksimali santykinė leistina varžos neapibrėžtis;
ΔR_{ml}	– maksimali leistina varžos skiriamoji geba;
Δl	– jutiklio vielelės ilgio pokytis;
ΔR	– jutiklio varžos pokytis;
ΔR_{j1}	– aktyviojo įtempio jutiklio varžos pokytis;
ΔR_{j1a}	– apkrauto aktyviojo įtempio jutiklio varžos pokytis;
ΔR_{j1n}	– neapkrauto aktyviojo įtempio jutiklio varžos pokytis;
δl	– santykinis jutiklio vielelės ilgio pokytis;
$\delta \rho$	– santykinis savitosios varžos pokytis;

μ – Puasono koeficientas.

Santrumpos

ASK – analoginis-skaitmeninis keitiklis;
GPS – globalioji pozicionavimo sistema;
IG – integrinis grandynas;
K – komparatorius;
M – išėjimo kodas;
MP – mikroprocesorius;
OS – operacinis stiprintuvas;
SAK – skaitmeninis-analoginis keitiklis;
 S_{ji}, S_{ki} – jungikliai;
SŠ1 – pirmas srovės šaltinis;
SŠ2 – antras srovės šaltinis;
U – nuolatinės įtampos šaltinis.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektai	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Darbo sąsajos su kitų mokslininkų tyrimais	5
Disertacijos struktūra	5
 1. MAŽŲ DEFORMACIJŲ STEBĖSENOS ELEKTRONINIŲ ĮRENGINIŲ METODŲ ANALITINĖ APŽVALGA	 7
1.1. Deformacijų stebėjimui naudojami metodai	7
1.2. Įtempio jutikliai ir jų prijungimo schemos	9
1.3. Nebalansuojamo Vitstono tiltelio metodas	14
1.4. Balansuojamo Vitstono tiltelio metodas	16
1.5. Daugiataškiai elektroniniai įrenginiai deformacijų stebėjimui	20

1.6. Automatiniai daugiataškiai elektroniniai įrenginiai su nebalansuojamu tilteliu deformacijų stebėjimui	23
1.7. Automatiniai daugiataškiai elektroniniai įrenginiai su balansuojamu tilteliu deformacijų stebėjimui	27
1.8. Metodų privalumai ir trūkumai.....	29
1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	31
 2. MAŽŲ DEFORMACIJŲ STEBĖSENOS BALANSUOJAMŲ ELEKTRONINIŲ ĮRENGINIŲ STRUKTŪRŲ SUDARYMAS IR ANALIZĖ	33
2.1. Balansuojamo Vitstono tiltelio įrenginių analizė.....	33
2.2. Deformacijų stebėjimo įrenginių balansuojant sroves analizė.....	39
2.2.1. Deformacijų stebėjimo įrenginių balansuojant sroves su dviem srovės šaltiniais schema ir jos analizė.....	39
2.2.2. Deformacijų stebėjimo įrenginių balansuojant sroves su vienu srovės šaltiniu schema ir jos analizė	46
2.3. Skaitmeniniai-analoginiai keitikliai su srovės išėjimu konstrukcijų deformacijų stebėsenos įrenginiuose	48
2.4. Antrojo skyriaus išvados	56
 3. KONSTRUKCIJŲ DEFORMACIJŲ STEBĖSENOS ĮRENGINIŲ MODELIAVIMAS IR TYRIMAS	59
3.1. Deformacijų stebėsenos įrenginių kompiuterinis modeliavimas	60
3.2. Įtempių jutiklių temperatūrinės priklausomybės įtaka.....	68
3.3. Pramoninių trukdžių įtakos imitavimas	72
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	75
 4. KONSTRUKCIJŲ DEFORMACIJŲ STEBĖSENOS ĮRENGINIŲ MAZGŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	77
4.1. Konstrukcijų deformacijų stebėsenos įrenginių mazgų eksperimentinis tyrimas ..	77
4.2. Pramoninių trukdžių įtakos laboratorinei įrangai eksperimentiniai tyrimai	81
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados	86
 BENDROSIOS IŠVADOS	89
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	91
 AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	97

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the Problem.....	1
Importance of the Work.....	2
Objects of Research.....	2
The Aim of the Work	2
Tasks of the Work	2
Methodology of Research.....	3
The Importance of Scientific Novelty	3
Practical Significance of Achieved Results.....	4
Defended statements.....	4
Approval of the Results	4
Connection with Research of Other Scientists	5
Scope of the Dissertation.....	5
 1. ANALYTIC REVIEW OF METHODS OF ELECTRONIC DEVICES FOR MONITORING OF SMALL STRAINS	7
1.1. The methods used for monitoring of strains	7
1.2. The strain gauges and connections circuits	9
1.3. The method of unbalanced Wheatstone bridge.....	14
1.4. The method of balanced Wheatstone bridge.....	16
1.5. Multipoint electronic devices for monitoring of strains	20

1.6. Automatic multipoint electronic devices with unbalanced bridge for monitoring of strains	23
1.7. Automatic multipoint electronic devices with balanced bridge for monitoring of strains.....	27
1.8. The advantages and disadvantages of the methods	29
1.9. Conclusions of the first chapter and formulation of the dissertation tasks	31
 2. ANALYSIS AND FORMATION OF STRUCTURES OF BALANCED ELECTRONIC DEVICES FOR MONITORING OF SMALL STRAINS	33
2.1. Analysis of devices of balanced Wheatstone bridge.....	33
2.2. Analysis of balancing currents devices for monitoring of strains.....	39
2.2.1. Circuit of balancing currents devices with two currents sources for monitoring of strains and its analysis	39
2.2.2. Circuit of balancing currents devices with one current source for monitoring of strains and its analysis	46
2.3. Digital-to-analog converters with current output in devices for monitoring of constructions strains.....	48
2.4. The conclusions of the second chapter	56
 3. MODELING AND RESEARCH OF DEVICES FOR MONITORING OF CONSTRUCTIONS STRAINS	59
3.1. Computer-based modeling of devices for strain monitoring	60
3.2. Influence of temperature dependence of strain gauge	68
3.3. Simulation of industrial disturbances influence.....	72
3.3. The conclusions of the third chapter.....	75
 4. EXPERIMENTAL RESEARCH OF DEVICES NODS FOR MONITORING OF CONSTRUCTIONS STRAINS	77
4.1. Experimental research of devices nods for monitoring of constructions strains....	77
4.2. Experimental research of influence of industrial disturbances for laboratorial devices	81
4.3. The conclusions of the fourth chapter	86
 GENERAL CONCLUSIONS	89
 REFERENCES	91
 LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	97

Ivadas

Problemos formulavimas

Statant, tiriant ir eksploatuojant įvairias konstrukcijas dažnai tiriamos šių konstrukcijų deformacijos. Labai paranku yra stebėti įvairių jau pastatytų statinių ir konstrukcijų būklės, nes tada galima laiku pastebėti kai deformacijos pasiekia statinių konstruktorių užduotas kritines vertes, iš anksto numatyti galimą statinio avariją ir imtis atitinkamų priemonių jai išvengti. Taip pat svarbu nustatyti naujų konstrukcijų atsparumą.

Todėl konstrukcijų deformacijų nustatymas laboratorijose ir stebėsenos tikslais yra aktualus uždavinys. Šie įrenginiai turi būti automatiniai, vykdančys matavimus daugelyje sudėtingų konstrukcijų ar statinių dažnai nutolusių vienas nuo kito taškų. Įrenginiai turi turėti galimybę perduoti informaciją į nutolusius valdymo, dispečerinius ar pagalbos centrus. Deformacijos sukelia nedidelius jutiklio varžos pokyčius. Kai betono ar gelžbetonio konstrukcijų deformacija sukelia 3–6 % jutiklio varžos pokytį, konstrukcija dažniausia pradeda irti. Jeigu šis varžos diapazonas dalinamas į 100 (stebėsenos įrangai) ar 1000 (laboratorinei įrangai) dalių, gaunama, kad įrangos skiriamaoji geba turi sudaryti 0,03–0,06 % ar 0,003–0,006 % jutiklio varžos vardinės vertės. Įvertinant, kad deformacijų nustatymo įranga turi būti automatinė ir daugiataškė, matoma, kad yra daug spres-tinų problemų.

Darbo aktualumas

Daugelio konstrukcijų kūrimo, statybos ir eksploatavimo procese, siekiant užtikrinti konstrukcijų patikimumą ir atsparumą išoriniams poveikiams yra stebima ar siūloma stebėti jų būseną. Stebėjimo procese labai svarbią vietą užima statinių deformacijų stebėjimas daugelyje taškų ir avarinė signalizacija, kai deformacijos pasiekia statinių konstruktorių užduotas kritines vertes. Deformacijų nustatymai taip pat plačiai yra naudojami laboratoriniuose tyrimuose, tiriant naujų konstrukcijų, medžiagų savybes. Dažniausiai deformacijos yra labai mažos, stebimos ir fiksuojamos daugelyje konstrukcijos ar statinio taškų. Todėl įrenginiai turi būti tikslūs, patikimi ir santykinai nesudėtingi ir nebrangūs.

Darbe sprendžiamos konstrukcijų deformacijų (varžų mažų pokyčių) patikimo nustatymo konstrukcijos daugelyje taškų (kanalų) problemos. Problemų sprendimo metu be pagrindinio uždavinio – patikimo mažų pokyčių nustatymo, daug dėmesio skiriama sistemų veikimo patikrinimui kompiuteriniame ir eksperimentiniuose modeliuose.

Tyrimų objektai

Darbo tyrimų objektai yra:

- deformacijų kodo bei diapazono išraiškų išvedimas automatiniais balansuojamų tiltelių įrenginiams;
- naujų automatinių daugelio taškų konstrukcijų deformacijų stebėjimo balansuojant sroves įrenginių sudarymas bei eksperimentinis tyrimas.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – mažų deformacijų stebėsenos automatinių daugiataškių elektroninių įrenginių naujų struktūrinių schemų sukūrimas bei jų tyrimas.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mažų deformacijų stebėsenos elektroninių įrenginių metodų palyginamą analizę.

2. Nustatyti ryšį tarp balansavimo kodo ir nustatomos deformacijos (varžų mažų pokyčių) diapazono balansuojamų Vitstono tiltelių įrenginiuose.
3. Pasiūlyti mažų deformacijų stebėjimo automatinių daugiataškių elektroninių įrenginių ir nustatymo įrenginių naujas struktūrines schemas. Atlikti jų analizę, kompiuterinį modeliavimą ir ištirti jų savybes.
4. Atlikti pasiūlytų mažų deformacijų stebėjimo naujų elektroninių įrenginių pagrindinių mazgų eksperimentinį tyrimą.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi analitiniai, skaitmeniniai ir eksperimentinio tyrimo metodai. Varžų mažų pokyčių identifikavimo sistemos variantai analizuojami analitiniais metodais. Pasiūlytos naujos konstrukcijų deformacijoms nustatyti balansuojant srovės struktūros analizuojamos analitiniais metodais. Kompiuteriniam imitavimui naudojami skaitmeniniai programavimo paketai „Electronics Workbench“ ir „Multisim 11.0“. Sistemos veikimo ir pagrindinių parametrų nustatymui sukonstruotas laboratorinis maketas tiriamas eksperimentiniu metodu.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Išvestos varžų mažų pokyčių (konstrukcijų deformacijų) daugiataškio nustatymo naudojant balansuojamą Vitstono tiltelį balansavimo kodo priklausomybės nuo jutiklio varžos pokyčio ir jutiklių varžų pokyčių nustatymo diapazono išraiškos.
2. Pasiūlytas naujas konstrukcijų deformacijų automatinio daugiataškio stebėjimo balansuojant srovės įrenginys, sudaryta ir ištirta įrenginio su dviem srovės šaltiniais struktūra.
3. Sudaryta ir ištirta nauja konstrukcijų deformacijų daugiataškio stebėjimo balansuojant srovės su vienu srovės šaltiniu struktūra.
4. Sudarytos naujos konstrukcijų deformacijų automatinio daugiataškio stebėjimo balansuojant srovės struktūros naudojant skaitmeninius analoginius keitiklius su srovės išėjimu.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pasiūlyti sprendimai leidžia mažų varžų pokyčių ir konstrukcijų deformacijų daugiataškiams stebėjimams naudoti paprastesnės struktūros įrenginius. Pasiūlyti sprendimai gali būti naudojami mechaninių, aviacijos konstrukcijų deformacijoms tirti ir stebėti, pritaikyti ir kitų parametru (slėgio, masės, svorio ir t. t.) nustatymams.

Ginamieji teiginiai

1. Naujas varžų mažų pokyčių daugiataškio nustatymo balansuojant sroves su dviem srovės šaltiniais įrenginys skirtas daugiataškiams deformacijų stebėjimams, o jautikliai gali būti nutolę iki 10 m nuo pagrindinio įrenginio.
2. Naujas varžų mažų pokyčių daugiataškio nustatymo su vienu srovės šaltiniu įrenginys leidžia supaprastinti tyrimų įrenginius, sumažinti aplinkos sąlygų įtaką deformacijų stebėsenos rezultatams ir tinka tiek laboratorinei, tiek ir stebėsenos įrangai.
3. Pasiūlyti įrenginiai leidžia pasiekti stebimų deformacijų diapazoną iki $\pm 30\%$, naudojant mažesnius trimis skiltimis skaitmeninius-analoginius keitiklius lyginant su balansuojamo tiltelio įrenginiais ir mažesnius 8–12 skilčių skaitmeninius-analoginius keitiklius lyginant su nebalansuojamo tiltelio įrenginiais, sumažinti trukdžių ir triukšmų įtaką nustatymo rezultatams.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tematika atspausdinti penki moksliniai straipsniai: vienas – moksliniame žurnale, įrašytame į Thomson Reuters ISI Web of Science duomenų bazę, vienas – moksliniame žurnale, įrašytame į ISI Proceedings duomenų bazę, du – moksliniuose žurnaluose, įrašytuose į Copernicus duomenų bazę, vienas – kitame recenzuojamame mokslo leidinyje.

Darbo rezultatai pristatyti ir aptarti 8-iose mokslinėse konferencijose:

1. 25-ojoje tarptautiniame simpoziume „International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC-2008)“, Lietuvoje, Vilniuje.

2. 12-ojoje, 13-ojoje, 14-ojoje ir 15-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Elektronika“ 2008, 2009, 2010, 2011 Lietuvoje, Vilniuje.
3. 11-ojoje, 12-ojoje ir 13-ojoje respublikinėje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Elektronika ir elektrotechnika“ 2008, 2009, ir 2010, Lietuvoje, Vilniuje.

Darbo sąsajos su kitų mokslininkų tyrimais

Darbas yra Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakulteto profesoriaus habilituoto daktaro R. Martavičiaus, profesoriaus daktaro V. Kvedaro ir daktaro R. Kvedaro atliktų tyrimų tęsinys.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis yra 112 puslapių, tekste panaudotos 82 numeruotos formulės, 48 paveikslai, 2 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 65 literatūros šaltinių.

Mažų deformacijų stebėsenos elektroninių įrenginių metodų analitinė apžvalga

Skyriuje analizuojami šiuo metu praktikoje naudojami deformacijų matavimo metodai, deformacijų nustatymo šaltiniai, analizuojamos galimybės naudoti šiuos metodus automatizuotose sistemose. Pateikiamos naudojamos ir galimos naudoti automatizuotos daugiataškių elektroninių įrenginių deformacijoms matuoti struktūros, atlikta jų lyginamoji analizė.

Skyriaus medžiaga paskelbta autoriaus straipsnyje (Masiulionis 2008, Masiulionis *et al.* 2008).

1.1. Deformacijų stebėjimui naudojami metodai

Praktikoje konstrukcijų būsenos dažniausiai nustatomos matuojant jų fizikinius parametrus: deformacijas, poslinkius ir akceleracijas. Matuojant deformacijas ir poslinkius įvairiuose konstrukcijos taškuose galima nustatyti ne tik konstrukcinės charakteristikas, tokias kaip standinimo elementų trūkumus ar jų neefektyvumą, tačiau ir pačių konstrukcijos elementų pokyčius, tokius kaip nuovargi,

irimą dėl rūdijimo, lūžius ar įtrūkimus, atsiradusius perkrovos metu (pvz.: dėl sniego gausos) ir pan. Vienas iš svarbiausių ir dažnai tikrinamų parametų yra konstrukcijų deformacijos.

Keletas dažniausiai naudojamų metodų, kuriais galima įvertinti deformacijas (Masiulionis 2008, Chen *et al.* 2004, Chen *et al.* 2008, Grundig *et al.* 1995, Kubiuk *et al.* 2003, Maas 2007, Willshire *et al.* 2004, Bridgetest... 2003, Fonda *et al.* 2004, Khan *et al.* 2001, Kulkarni *et al.* 2004) yra:

- mechaniniai metodai. Objekto, kurio deformacija vertinama, galuose fiksuojama viela ir matuojamas jos ilgio pokytis mikrometru;
- interferometrijos metodai. Lazerio spindulys stiklo plokštele suskaidomas į dvi dalis, kurių viena nukreipiama tiesiai į interferometrijos ekraną, o kita atsispindėjusi nuo reflektoriaus, pritvirtinto prie judančio konstrukcijos taško. Šių spindulių interferencija registruojama ir atvaizduojama interferometrijos ekrane;
- optiniai metodai (fotografiniai metodai, difrakcinių Brago gardelių optinėse skaidulose metodai);
- naudojant globaliosios pozicionavimo sistemos (GPS) imtuvų ir antžeminių pozicionavimo bei klaidų korekcijos sistemų tinklą;
- Vitstono tiltelio metodas. Jis pagrįstas tiltelio sudaryto iš keturių varžų, iš kurių vienas, du ar visi keturi yra įtempių jutikliai, panaudojimu. Deformacijos dydis surandamas išmatavus įtampos skirtumą tarp tiltelio pečių – dviejų įtampos daliklių.

Tiriama sistema skirta konstrukcijų būsenų identifikavimui. Jos funkcionavimo esmė yra konstrukcijų deformacijų sukeltų įtempių jutiklių varžų mažų pokyčių (kurie gali sudaryti tūkstantąsias procento dalis), nustatymas. Iki šiol naudotos sistemos yra brangios, ypač kai tenka vertinti pokyčius daugelyje konstrukcijos taškų (daugelyje kanalų). Be to, žinomos sistemos lauko sąlygomis negarantuoja patikimų rezultatų. Daugumoje žinomų šios srities darbų ir sistemų (Curtis 1997; Kester 1999, 2004; Potter 2002; Tarchanidis *et al.* 2003; Williams 1990) siekiama įvairiais būdais patobulinti nebalansuotą Vitstono tiltelį, ko pasekoje sistema padaroma labai sudėtinga ir brangi. Kiti autoriai šiems tikslams taiko neelektroninius mažų pokyčių nustatymo metodus (Grundig *et al.* 1995; Kubiuk *et al.* 2003; Maas *et al.* 2007; Willshire. *et al.* 2004; Chen *et al.* 2004). Šios sistemos, dėl mažo jų paplitimo ir palyginti sudėtingų bei brangių lazerinių, vaizdo apdorojimo ir pan. technologijų panaudojimo yra dar sudėtingesnės ir brangesnės už įtempių jutiklių įrenginius. Svarbiausia, nerezistorinių sistemų eksploatacija labai sudėtinga ir brangi. VGTU eilę metų dirbama kuriant ir tiriant automatinius daugiataškius balansuojamo Vitstono tiltelio įrenginius mažų varžų pokyčių ir konstrukcijų deformacijų nustatymo metodų ir įrenginių kūrimo (Kvedaras R. 2004, 2005, Kvedaras R. *et al.* 2003, 2004, 2005, 2008). Tačiau

šiuose metoduose yra dalis neišnagrinėtų problemų. Todėl darbe nagrinėjamos šių įrenginių problemos ir naujų įrenginių sukūrimo sudarymo problemos.

1.2. Įtempio jutikliai ir jų prijungimo schemos

Šiuo metu deformacijų identifikavimui plačiausiai praktikoje naudojami įtempio jutikliai. Jie yra pigūs, mažų matmenų bei masės, turi labai mažą temperatūrinį varžos koeficientą (Kester 1999, Bonfiglioli *et al.* 2000, Carr 2002, Cimbala 2011, Djugum 2009, Electrical ... 2008, Hannah *et al.* 1992, Hertzberg 1996, Murray *et al.* 1992, Patranabis 2004, Window 1992). Įtempio jutikliai klijuojami prie deformuojamos konstrukcijos ar jos elemento ir deformuojami (tempiami ar gniuždomi) taip pat, kaip ir tiriamoji konstrukcija. Plačiai naudojami metaliniai įtempio jutikliai dažniausiai gaminami iš plonos metalinės vielos ar folijos. Siekiant padidinti deformacijos veikiamos vielos ilgį kompaktiškame jutiklyje jo dalys išilgai veikiančios deformacijos yra kiek galima ilgesnės (1.1 pav.). Deformacijos veikiamą jutiklio vielą ar foliją deformuojasi, kinta jos ilgis, skerspjūvio plotas ir santykinė varža, o jutiklio varžos pokytis išreiškiamas

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu + \alpha), \quad (1.1)$$

čia l ir Δl – vielelės ilgis ir jos pokytis; μ – Puasono koeficientas; $\alpha = \frac{\delta \rho}{\delta l}$, $\delta \rho$ ir δl – santykiniai savitosios varžos ir vielelės ilgio pokyčiai.

1.1 pav. Įtempių jutiklio sandara

Fig. 1.1. Strain gauge structure

Tuo būdu, deformacijų įrenginiuose, kuriuose naudojami įtempio jutikliai, reikia nustatyti varžos pokytį. Kadangi santykinų deformacijų dydžiai yra maži,

todėl ir varžų pokyčiai – maži, kuriuos ir būtina nustatyti šiuos mažus varžų pokyčius.

Varžų mažų pokyčių tiksliam matavimui plačiai naudojamas varžų tiltelio metodas. Pagrindinė Vitstono tiltelio, kurį faktiškai 1833 metais sukūrė S.H. Christie, schema parodyta 1.2 paveiksle. Ją sudaro keturi varžai, sujungti tarpusavyje tilteliu, maitinimo šaltinis (įtampos arba srovės), prijungtas prie vienos tiltelio įstrižainės, ir įtampos matuoklis, prijungtas prie kitos įstrižainės. Pastarasis įtampos matuoklis įjungtas tarp dviejų įtampos daliklių matuoja įtampų skirtumą tarp šių mazgų (Kester 1999, Kester 2002, Bridge ... 2012, Bridgetest ... 2003).

Vitstono tiltelyje jutiklio varžos pokytis nustatomas netiesiogiai, lyginant ją su kita panašaus dydžio varža. Yra du pagrindiniai būdai išmatuoti varžos pokytį: a) balansuojamas tiltelis, tada tiltelis naudojamas kaip nulio detektorius, o varžos pokytis tilteliu nustatomas netiesiogiai, palyginant nežinomą varžą su po tiltelio balansavimo nustatyta reguliuojama tiltelio varža arba b) nebalansuojamas tiltelis, kai nustatoma dėl pakitusios tiriamos varžos atsiradusi tiltelio disbalanso įtampa ir pagal jos dydį apskaičiuojamas varžos pokytis.

Pirmame būde Vitstono tiltelis yra subalansuotas, kai įtampų skirtumas $U_0 = 0$ ir yra tenkinama lygybė (Kester 1999):

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}. \quad (1.2)$$

1.2 pav. Vitstono tiltelio struktūra
Fig. 1.2. Structure of Wheatstone bridge

Taigi, balansuojamuose tilteliuose jutiklio varžos dydis (pokytis) nustatomas pagal reguliuojamos kalibruotos varžos dydį tiltelio balanso metu ir lygus

$$R_1 = \frac{R_2 R_4}{R_3}. \quad (1.3)$$

Lygybė (1.2) galioja nepriklausomai nuo tiltelio maitinimo būdo (kintamosios ar nuolatinės įtampos ar srovės) ir maitinimo įtampos ar srovės dydžio. Rezultatai įtakoja tik tiltelio varžų dydis ir galimybės tiltelį subalansuoti taip, kad U_0 būtų kuo artimesnis nuliui. Kadangi įtėmpio jutiklių varžos pokyčiai labai maži, tiltelio disbalanso įtampos pokyčiai neviršija dešimčių milivoltų, net kai tiltelis maitinamas 10 V įtampa (Kester 1999). Toks tiltelis gali būti balansuojamas tiksliai potenciometru, gali turėti grįžtamąjį ryšį, kuris dažniausia realizuojamas naudojant elektromechanines sistemas (Kester, 2004). Automatinėse elektroninėse sistemose ilgą laiką nebuvo galima gauti nedidelių elektriškai reguliuojamų nedidelių varžų ir tik pasiūlytame (Kvedaras R. 2005) automatiname elektroniniame varžų mažų pokyčių nustatymo įrenginyje panaudotas balansuojamas tiltelis.

Dėl tos priežasties, kad nebuvo skaitmeniniu būdu reguliuojamų, pakankamai tikslų varžų, buvo pradėti plačiai naudoti įrenginiai su nebalansuojamais tilteliais. Nebalansuojamose Vitstono tiltelio schemose varžų pokyčiams nustatyti siūloma naudoti ne tik vieną, bet ir kelis aktyviuosius jutiklius (2...4). Taip padidinamas tiltelio jautrumas. Galimi ir dažniausiai naudojami jungimo variantai pateikti 1.3 paveiksle (Kester, 2004). Matyti, kad tais atvejais, kai naudojami keli aktyvieji jutikliai, jie turi būti atitinkamai montuojami konstrukcijose ir jungiami į tiltelį taip, kad tiltelio disbalanso įtampa padidėtų. Taip 1.3 b paveiksle parodyta, kaip įjungti tiltelyje du aktyvius jutiklius, turinčius tokį pat varžos pokytį (pvz., abu gniuždomus arba abu tempiamus). 1.3 c paveiksle parodyta, kaip įjungti tiltelyje du aktyvius jutiklius, turinčius priešingą varžos pokytį (pvz., vie-

1.3 pav. Vitstono tiltelio grandinių su įtampos šaltiniu variantai

Fig. 1.3. Wheatstone bridge circuits variants with a voltage source

nas gniuždomas, kitas – tempiamas) ir 1.3 d paveiksle parodyta, kaip įjungti tiltelyje keturis aktyvius jutiklius, turinčius skirtingus pokyčius (pvz., du iš kurių

yra gniuždomi ir du – tempiami). Juose visos varžos parinktos lygios R , o jutiklių varža kinta dydžiu ΔR . Tada gaunamos disbalanso įtamos lygios

$$U_{0a} = \frac{U_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right], \quad (1.4)$$

$$U_{0b} = \frac{U_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right], \quad (1.5)$$

$$U_{0c} = \frac{U_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right], \quad (1.6)$$

$$U_{0d} = U_B \left[\frac{\Delta R}{R} \right], \quad (1.7)$$

čia: U_{0i} – tiltelio disbalanso įtampa; $i = a, b, c, d$ – tiltelio grandinės variantas; U_B – tiltelio maitinimo įtampa; R – grandinės varža; ΔR – jutiklio varžos pokytis.

Kaip matyti iš formulių, tiltelio disbalanso įtampa priklauso nuo jutiklio varžos pokyčio (t. y. deformacijų) bei maitinimo įtamos U_B .

Iš formulių matyti, kad naudojant du aktyviuosius jutiklius, tiltelio jautris padidėja du, o naudojant keturis aktyvius jutiklius – keturis kartus. Tačiau konstrukcija turi būti tokia, kad jutiklius galima būtų sumontuoti taip, kad jų tempimas ar gniuždymas būtų vienodo dydžio (atvejui, pateiktam 1.3 b pav.) arba, kad jų tempimas ir gniuždymas būtų vienodo dydžio bet priešingų ženklų (atvejams, pateiktiems 1.3 c ir d pav.). Tačiau konstrukcijų deformacijų matavimuose, dėl didelių konstrukcijų matmenų, dažniausia gali būti naudojamas tik vienas aktyvusis jutiklis. Taip pat dažnai naudojamas antrasis – pasyvusis jutiklis kaip kompensacinis jutiklis aplinkos įtakos nustatymo rezultatams kompensuoti.

Nuo pastovios maitinimo šaltinio įtamos U_B dydžio priklauso ir tiltelio disbalanso įtamos dydis, o nuo maitinimo šaltinio įtamos (srovės) stabilumo, priklauso varžos pokyčio nustatymo nuokrypos. Dėl šios priežasties būtina garantuoti ypač stabilų tiltelio maitinimą, nepriklausantį nuo išorės poveikių, kintančios apkrovos, išorės trukdžių ir kitų veiksnių (Kester, 2004).

Kaip buvo minėta anksčiau, didelių konstrukcijų deformacijų nustatyme dažnai naudojamas vienas aktyvusis jutiklis, o deformacijos iššaukia nedidelius jutiklio varžos pokyčius. Konkrečiam gelžbetonio konstrukcijų deformacijų ste-

bėjimo atvejui priėmus, kad tiltelio maitinimo įtampa 10 V, jutiklio varža 120 Ω , o maksimalus varžos nuokrypis nuo vardinės vertės sudaro 6%, tada maksimali tiltelio disbalanso įtampa lygi:

$$U_{0\max} = \frac{U_B}{4} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right) = \frac{10}{4} \left(\frac{7,2}{120 + \frac{7,2}{2}} \right) = 0,1456 \text{ V}. \quad (1.8)$$

Priėmus, kad stebėsenai pakanka 100 konstrukcijos deformacijų verčių pilnam diapazonui, gaunama reikalinga tiltelio skiriamoji geba lygi 1,45 mV. Laboratoriniuose tyrimuose reikia vertinti gerokai mažesnius (pvz. 1000 kartų mažesnius) įtampų pokyčius. Tokiu atveju tiltelio skiriamoji geba sudaro 150 μV . Matyti, kad įtampos pokyčiai, kuriuos būtina įvertinti yra labai maži. Patikimas įvertinimas yra sudėtingas, nes išoriniai triukšmai, trukdžiai bei elektroninių grandinių dreifai dažniausia yra ženklūs lyginant su šiais dydžiais.

Vitstono tilteliai taip pat gali būti maitinami ir pastovia srove. Lyginant su tilteliais, maitinamais pastovia įtampa, jie vartojami rečiau, bet turi privalumų, kai jutikliai yra nutolę nuo maitinimo šaltinio. Šiuo atveju prijungimo laidininkų varžos neįtakoja matavimo rezultato, todėl ir nutolusių jutiklių prijungimo schema yra paprastesnė ir pigesnė. Be to, kaip seka iš rezultatų, maitinant pastovia srove, tiltelį su vienu aktyviuoju jutikliu, tiltelio netiesiškumas ir jo įtaka nustatymo rezultatams yra du kartus mažesnė. (Kester, 2004). Pateikti tiltelių su srovės maitinimo šaltiniu variantai: su vienu (1.4 a pav.), dviem (1.4 b ir c pav.) bei keturiais (1.4 d pav.) aktyviaisiais jutikliais. Jų disbalanso įtampos išraiškos aprašomos (1.9–1.12) formulėmis.

1.4 pav. Vitstono tiltelio grandinių su srovės šaltiniu variantai

Fig. 1.4. Wheatstone bridge circuits variants with a current source

$$U_{0a} = \frac{I_B R}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}} \right], \quad (1.9)$$

$$U_{0b} = \frac{I_B}{2} [\Delta R], \quad (1.10)$$

$$U_{0c} = \frac{I_B}{2} [\Delta R], \quad (1.11)$$

$$U_{0d} = I_B [\Delta R]. \quad (1.12)$$

čia: U_{0i} – tiltelio disbalanso įtampa; $i = a, b, c, d$ – tiltelio grandinės variantas; I_B – tiltelio maitinimo srovė; R – grandinės varža; ΔR – jutiklio varžos pokytis.

Atkreiptinas dėmesys į tai, kad b, c, d jungimo variantuose, kai tiltelis maitinamas pastovia srove, priklausomybė tarp tiltelio išėjimo įtampos ir varžų pokyčio yra tiesinė.

Yra pateikiama įvairių srove maitinamų tiltelių schemų (Idzkowski *et al.* 2005, 2012), kuriose nagrinėjama keturių varžų tiltelio grandinė su dviem įtampos išėjimais. Ši grandinė, pavadinta dvigubu srovės tilteliu, yra maitinama dviejų vienodų srovės šaltinių, prijungtų lygiagrečiai prie priešingų pečių arba vienas iš tokių šaltinių perjungiamas tarp šių pečių. Pateikiamos dvi tiltelio išėjimo įtampų priklausomybės kaip peties varžos prieaugio funkcija absoliučiais ir santykiniais vienetais.

Įprastai tiltelių disbalanso įtampos sudaro nuo 1 mV/V iki 10 mV/V. Tiltelio disbalanso įtampa yra tiesiogiai proporcinga maitinimo šaltinio įtampai (srovei). Padidinus maitinimo įtampą galima padidinti schemos jautrį. Tačiau dėl to padidėtų tekanti per jutiklį srovė ir jis gali šilti. Tai iššauks deformacijų nustatymo nuokrypas, kurios atsiranda dėl jutiklių įkaitimo. Dėl to dažniausiai parenkama tiltelio maitinimo įtampa neviršijanti 10 V, o srovė 5–10 mA, kai jie maitinami visą laiką. Kitas būdas disbalanso įtampai padidinti parinkti jutiklius, turinčius didesnę vardinę varžą, taip mažinant jutiklio išsklaidomą galią ir tuo pačiu mažinant įšilimo poveikį.

1.3. Nebalansuojamo Vitstono tiltelio metodas

Tais atvejais, kada Vitstono tiltelis yra nebalansuojamas, skaitmeniniais metodais yra išmatuojama tiltelio išbalansavimo įtampa ir pagal jos dydį yra nustatoma matuojamo dydžio vertė. Tokio matavimo struktūrinė schema yra pateikta 1.5 paveiksle (Kvedaras R. *et al.* 2003). Schemą sudaro tiltelis ($R_1...R_4$), nuolati-

nės įtamos šaltinis, prijungtas keturiais laidais ir užtikrinantis pastovią tiltelio maitinimo įtampą, stiprintuvas ir analoginis-skaitmeninis keitiklis (ASK).

1.5 pav. Tiesioginio tiltelio disbalanso įtamos keitimo į skaitmeninį kodą schema

Fig. 1.5. Structure diagram of the bridge's direct disbalance voltage changing to digital code

Šiuo atveju tiltelis maitinamas nuolatine įtampa. Aktyviojo jutiklio (R_1) varžos kitimas keičia įtampą tarp tiltelio pečių (disbalanso įtampą). Ši įtampa stiprinama operaciniu stiprintuvu ir sustiprinta siunčiama į ASK. ASK keičia analoginę įtampą į skaitmeninį kodą. Maži disbalanso įtamos pokyčiai yra įvertinami naudojant 16 ir daugiau skilčių ASK. Temperatūriniai bei kitų aplinkos veiksnių sąlygoti jutiklio varžos pokyčiai eliminuojami priešingame tiltelio petyje įjungtu pasyviuoju tokios pačios konstrukcijos jutikliu (R_2). Analizuojant šią struktūrą matoma, kad matavimo paklaidų šaltiniais gali būti (Kvedaras, R. *et al.* 2003):

1. Tiltelio maitinimo įtamos dreifai. Kintant maitinimo įtampai keičiasi ir tiltelio disbalanso įtampa, o tai kartu įtakoja matavimo rezultatą. Norint išvengti maitinimo įtamos dreifų naudojami preciziški įtamos šaltiniai su reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais. Grįžtamasis ryšys dažniausiai prijungiamas atskirais laidais tiesiai prie tiltelio tam, kad eliminuoti įtamos kritimą laiduose, kuriais teka tiltelį maitinanti srovė.
2. Tiltelio maitinimo įtamos bei paties tiltelio triukšmai, kurie keičia momentinę nustatymo vertę. Tiltelio disbalanso įtampą stiprinantis operacinis stiprintuvas slopina sinfazinius triukšmus. Taigi, reikia siekti kad aktyviojo ir pasyviojo jutiklių, maitinimo bei grįžtamojo ryšio jungiamieji laidai būtų kiek galima arčiau (vyta pora), o tiltelio pečiai būtų kiek įmanoma vienodesni, tuomet didžioji dalis triukšmų bus sinfaziniai. Nenuslopintus triukšmus eliminuoti gali-

- ma integruojant sustiprintą signalą, nes matavimo rezultatas kinta lėtai, o triukšmų fonas yra baltojo triukšmo pobūdžio.
3. Stiprintuvo stiprinimo kanalo perdavimo koeficiento nestabilumai. Pasiikeitus stiprinimo koeficientui ar pakeitus jungiamuosius laidus keičiasi įtampa siunčiama į ASK ir gaunama rezultato paklaida. Paklaidos mažinamos naudojant precizinius instrumentinius stiprintuvus, stiprintuvus su programuojamu stiprinimo koeficientu, kalibruotos varžos kabelius.
 4. Stiprintuvo ir maitinimo įtampos dreifai. Jų įtaka matavimo rezultatui bei paklaidų mažinimo būdai analogiškai kaip ir 2-ame punkte.
 5. ASK keitimo klaidos tiesiogiai įtakojančios matavimo rezultatą. Norint jų išvengti naudojami daugelio skilčių preciziniai ASK.

Įvertinus šiuos veiksniai dažniausiai naudojami specializuoti integriniai grandynai (IG) su maitinimo šaltiniais, stiprintuvais ir ASK. Taigi, tokių schemų išėjime iš karto gaunamas matavimo rezultatas skaitmeniniu kodu. Toli nutolusiose vietose, šalia jutiklio gali būti montuojamas IG, skaitmeninio signalo perdavimo-priėmimo įranga, o į duomenų kaupimo ir valdymo įrenginius siunčiamas skaitmeninis signalas. Šiuo atveju išvengiama nutolusių jutiklių prijungimo problemų.

Tokio sprendimo privalumas – sparčiai atliekamas matavimas. Spartą apsprendžia stiprintuvo bei ASK nusistovėjimo po kitimo laikai.

Pagrindiniai šio metodo trūkumai :

1. Sudėtinga sudaryti daugiataškio stebėjimo įrenginio schemą, nes tuomet sunku prijungti maitinimo šaltinio grįžtamojo ryšio laidus prie kelių jutiklių. Aktyvieji ir pasyvieji jutikliai gali būti komutuojami komutatoriais, tačiau grįžtamasis ryšys tokiu atveju neįvertina ilgų laidų į aktyvųjų ir pasyvųjų jutiklius nuostolių.
2. Daug paklaidų šaltinių.
3. Ypač sudėtinga ir preciziška, reikalaujanti tikslaus derinimo schema.
4. Brangus sprendimas, nes specializuoti IG brangūs, be to kiekvienam jutikliui reikalinga atskira schema, būtinas preciziškas derinimas.
5. Sudėtinga surinkti skaitmeninius duomenis iš daugelio taškų, nes jutikliai ir matavimo IG turi būti kiek įmanoma arčiau.

1.4. Balansuojamo Vitstono tiltelio metodas

Yra pasiūlyta uždara automatinė sistema (Kvedaras R. *et al.* 2003), kurios esmė – naudoti automatiškai skaitmeniniu būdu balansuojamą Vitstono tiltelį. Sukurtos sistemos funkcinė schema parodyta 1.6 paveiksle. Schemą sudaro tiltelis (R_{j1} , R_{k1} , R_1 , R_2), nuolatinės įtampos šaltinis (U), stiprintuvai (OS), komparato-

rius (K), mikroprocesorius (MP) ir skaitmeniniu būdu reguliuojama varža. Šiuo atveju tiltelio disbalanso įtampa rodo subalansuotas ar ne yra tiltelis. Ši įtampa stiprinama stiprintuve, komparatoriuje lyginama su nulio įtampa, o pagal komparatoriaus signalą mikroprocesorius generuoja valdymo kodą, keičiantį varžos dydį, taip, kad tiltelio disbalanso įtampa galimai arčiau priartėtų prie 0. Pagal gautą reguliavimo kodą yra nustatomas jutiklio varžos pokytis.

1.6 pav. Skaitmeniniu būdu balansuojamo Vitsono tiltelio įrenginio struktūrinė schema

Fig. 1.6. Structure diagram of device of digitally balanced Wheatstone bridge

Vitsono tilteliu per aktyvųjį bei pasyvųjį jutiklį teka srovė, kurią sukuria tiltelio maitinimo šaltinis. Tiltelis specialiai išbalansuojamas varžais R_1 ir R_2 . Šios varžos parinktos taip, kad esant maksimaliam aktyviojo įtempių jutiklio varžos pokyčiui tiltelį galima būtų subalansuoti. Be to, tenka įvertinti, kad jutiklio varža gali tiek didėti, tiek ir mažėti, nes konstrukcija, o kartu ir jutiklis gali būti ir tempiamas, ir gniuždomas. Esant vienodoms aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžoms, tiltelio pečių įtampos skiriasi. Šis tiltelio pečių įtampų skirtumas stiprinamas stiprintuve tiek, kad esant maksimaliam tiltelio nesubalansuotumui atitiktų visą komparatoriaus dinaminį diapazoną (Kvedaras, R. *et al.* 2003).

Sustiprintas signalas perduodamas į komparatoriaus įėjimą. Komparatorius palygina įtampą įėjime su 0 V įtampa. Priklausomai nuo tiltelio būsenos, keičiasi komparatoriaus išėjimo signalas. Kai tiltelis nesubalansuotas gaunamas loginio 0 įtampos signalas, kai perbalansuotas – loginio 1. Signalas iš komparatoriaus išėjimo patenka į paskiltnio balansavimo registrą mikroprocesoriuje. Jei tiltelis nesubalansuotas ir iš loginio komparatoriaus išėjimo ateina loginio 0 įtampos signalas, į vyriausiąją šio registro skiltį įrašomas loginio 1 signalas. Šis signalas paduodamas į kodu valdomą varžą. Keičiasi jo varža, tuo pačiu keičiasi tiltelio peties, kuriame įjungtas šis varžas, varža, taigi, ir tiltelio balansas. Jei tiltelis iš-

lieka nesubalansuotas, tai loginio 0 įtampos signalas iš komparatoriaus registro jaunesnėje skiltyje įrašys loginio 1 įtampos signalą. Jei tiltelis perbalansuojamas, į registrą ateina loginio 1 signalas ir vyriausioje skiltyje ištrinamas loginis 1 signalas, įrašomas loginio 0 įtampos signalas. Kitu žingsniu parenkama jaunesnės skilties reikšmė. Taip tiltelis balansuojamas tol, kol pasiekama jauniausia skiltis. Parinkus jauniausią paskiltinio priartėjimo registro skiltį, tiltelio disbalansas yra mažesnis, nei leistina prietaiso paklaida, todėl registro išėjime nusistovėjęs kodas yra matavimo rezultatas (Kvedaras R. *et al.* 2003).

Dvejtainis kodas, esantis paskiltinio priartėjimo registro išėjime siunčiamas į matavimo mazgo valdiklį. Taip pat per lygiagretųjį prievadą siunčiamas signalas, kad duomenys paruošti nuskaitymui. Nuskaičius rezultatus suformuojamas registro nustatymo į pradinę būseną signalas. Atlikus šias operacijas, po nustatyto laiko tarpo procedūra kartojama iš naujo.

Analizuojant šią schemą matoma (Kvedaras R. 2005):

1. Tiltelio maitinimo įtampos dreifai šiuo atveju neturi įtakos matavimo rezultatui. Kintant maitinimo įtampai keičiasi tiltelio disbalanso įtampa, tačiau balansuojant tiltelį tai jokios įtakos neturi. Tiltelio balanso vieta (disbalanso įtampos poliarumas) nepriklauso nuo maitinimo įtampos. Taigi, nereikalingi preciziški įtampos šaltiniai su reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais.
2. Tiltelio maitinimo įtampos bei jungiamųjų laidų triukšmai gali įtakoti skilčių momentinę vertę. Tiltelio disbalanso įtampą stiprinantis operacinis stiprintuvas slopina sinfazinius triukšmus. Taigi, reikia siekti kad aktyviojo ir pasyviojo jutiklių jungiamieji laidai būtų kiek galima arčiau (vyta pora) vienas kito, o tiltelio pečiai būtų kiek įmanoma vienesni, tuomet didžioji dalis triukšmų bus sinfaziniai. Tiltelio maitinimo įtampos triukšmai taip pat yra sinfaziniai. Nenuslopintus triukšmus eliminuoti galima integruojant sustiprintą signalą, nes matavimo rezultatas kinta lėtai, o triukšmų fonas yra baltojo triukšmo pobūdžio. Be to, galima atlikti skaitmeninį signalo integravimą matavimo skiltyse vertinant jas po kelis kartus. Kelis kartus vykdomas kiekvienos skilties vertinimas tik nežymiai prailgintų matavimo trukmę, nes tiltelio balansas nesikeičia ir laiko tarpas tarp keletų vertinimų gali būti nedidelis. Jį apsprendžia komparatoriaus sparta. Taigi realiai laikas tarp vertinimų neturėtų viršyti 1 μ s. Kelis kartus įvertinus komparatoriaus išėjimo signalą nekintant tiltelio balansui ir apskaičiavus dažniau pasikartojančius rezultatus galima priimti sprendimą ar ši skiltis yra loginio 0 ar loginio 1. Tokį mechanizmą lengviau realizuoti kai paskiltinio balansavimo registras programiškai sudaromas pačiame valdiklyje.

3. Stiprintuvo stiprinimo koeficiento nestabilumai neturi jokios įtakos matavimo rezultatui. Pasikeitus stiprinimo koeficientui keičiasi įtampa paduodama į komparatorių, tačiau jos poliarumas, taigi ir rezultatas nesikeičia. Svarbu kad stiprinimo koeficientui sumažėjus į komparatorių patektų įtampa didesnė už jo slenksčio įtampą. Taigi, stiprintuvo stiprinimo koeficientas turi būti gana didelis.
4. Stiprintuvo ir komparatoriaus amplitudinių charakteristikų netiesiškumai visiškai neturi įtakos matavimo rezultatui, nes jie dirba tik kaip poliarumo detektoriai.
5. Stiprintuvo nulinio dreifai. Dreifų įtaka gali būti gana didelė, nes esant mažoms įėjimo įtampoms gali keistis stiprintuvo išėjimo įtamos. Tai gali įtakoti matavimo rezultatus.
6. Komparatoriaus klaidos tiesiogiai įtakoja matavimo rezultatą. Norint jų išvengti tiltelio disbalanso signalas stiprinamas tiek, kad sustiprinta mažiausiosios skilties įtampa viršytų komparatoriaus jautrumo ribą.
7. Kodu valdomos varžos paklaida tiesiogiai įtakoja matavimo rezultatus. Minimalus galimas šios varžos pokytis nustato prietaiso matavimo tikslumą. Dažniausiai kaip kodu valdoma varža naudojama ypač tiksli $R-2R$ matrica, kurios skilčių skaičius turi būti $m \geq (n+1)$, kur n – reikiamas matavimo skiltiškumas. Žemiausioji skiltis turi būti nuolat įjungta, nes kitaip gaunamas didelis varžos šuolis tiltelio petyje. Jei šioje ir visose kitose skiltyse nustatomas loginio 0 signalas, varža artėja į begalinę ir tampa lygi nuotėkio varžai. Patogiausia ir tikslingiausia kaip $R-2R$ matricą naudoti integrinį SAK be vidinių įtamos ir srovės stiprintuvų. Tuomet $R-2R$ matricos tikslumas yra didžiausias, nes naudojama integrinė SAK matrica, kurioje varžų tikslumą kitų atžvilgiu apsprendžia ypač tiksliai integrinėje technologijoje formuojami geometriniai matmenys. Vienintelis SAK panaudojimo trūkumas – galimos varžos R variavimas tarp keleto SAK pavyzdžių. Pagal technologinius apribojimus šis variavimas gali siekti iki $\pm 20\%$. Tačiau toks SAK varžos kitimas įtakoja tik absoliutinę matavimo vertę ir, kaip jau minėta anksčiau, matavimo procese yra kompensuojamas. Be to įtakos turi varžų matricos temperatūrinis nestabilumas, kuris yra ganėtinai mažas, tačiau atliekant tikslus matavimus jo įtaka gali lemti paklaidas.
8. Naudojant integrinius daugelio skilčių SAK su $R-2R$ matrica, savitoji matricos varža yra nemažesnė už $3,5 \text{ k}\Omega$. Tai labai susiaurina tiltelio automatinio balansavimo diapazoną. Diapazonas gali būti padidintas didinant varžų R_3 ir R_4 dydžius.

1.5. Daugiataškiai elektroniniai įrenginiai deformacijų stebėjimui

Įtempių jutikliai šiuo metu plačiai naudojami automatinuose įrenginiuose. Praktikoje automatiniai įrenginiai dažniausia yra naudojami nustatyti ar kontroliuoti (vykdyti stebėseną) konstrukcijų deformacijoms daugelyje konstrukcijos taškų, kurie yra nutolę vienas nuo kito, todėl dažniausia jutikliai jungiami prie matavimo įrenginio kabeliais. Todėl aplinkos trukdžiai gali turėti esminį poveikį matavimų tikslumui.

Daugeliu atvejų, kai reikia kontroliuoti deformacijas keliuose konstrukcijų vietose, naudojami keli ar daugiau įtempio jutikliai. Šiais atvejais nepapraktiška naudoti atskirą matavimo įreginį kiekvienam deformacijos matavimo taškui, todėl praktikoje, priklausomai nuo situacijos, jutikliai jungiami pagal skirtingas schemas prie vieno įrenginio. Tada jutikliai yra jungiami prie matavimo įrenginio pakankamai ilgais jungiamaisiais laidais. Skiriamos ketvirčio, pusės ir pilno Vitstono tiltelio jutiklių jungimo ilgais laidais būdai. Skiriami: a) tartiltelinis; b) ketvirčio tiltelio ir c) pusės tiltelio daugelio jutiklių jungimo būdai (Electrical ... 2008).

Paprasčiausias įtempių jutiklių jungimas yra tarptiltelinis jungimas. Šiuo atveju tiltelių matavimo įstrižainės prijungiamos nuosekliai nulinio indikatoriaus (1.7 pav.). Šioje schemoje kiekvienas tiltelis yra balansuojamas savo pakankamai mažos varžos potenciomtru. Pagrindinė šio įtempių jutiklių jungimo savybė yra maitinimo šaltinio įtampos prijungimas tuo pat metu prie visų tiltelių. Maitinimo šaltinis turi būti įjungiamas tik laiko tarpui kai vykdomas nustatymas

1.7 pav. Įtempių jutiklių jungimas tarptiltelinėje schemoje

Fig. 1.7. Structure diagram of strain gauges in interbridge switching

bent viename tiltelyje (t. y., kol potenciometru subalansuojamas tiltelis). Taip sumažinamas jutiklių įkaitimas ir jutiklių temperatūros įtaka matavimo rezultatams. Tai leidžia naudoti didesnę tiltelių maitinimo įtampą bei gaunamas didesnis tiltelių jautris (Electrical ... 2008). Pagrindinis šio jungimo privalumas yra tas, kad išlaikomas pilnas Vitstono tiltelių vientisumas ir galimybė atskirai balansuoti kiekvieną tiltelį. Trūkumas susijęs dėl iškylančių sunkumų dirbant su visiškai pilna tiltelio schema. Sudėtinga prijungti prie kiekvieno tiltelio maitinimo šaltinio grįžtamojo ryšio laidininkus, kurie užtikrintų pastovią kiekvieno tiltelio maitinimo įtampą. Lyginant su kitomis tiltelio jungimo schemomis, šis būdas reikalauja naudoti tris papildomus varžus kiekvienam aktyviam įtempių jutikliui, kas yra brangu ir sudėtinga.

Jutiklių ketvirčio tiltelio jungimo schemoje yra perjungiamas tik vienas tiltelio varžas (jutiklis) ir maitinamas tik vienas Vitstono tiltelis, kuriame vykdomas deformacijos nustatymas. Tai dažniausiai naudojama tiltelių konfigūracijų schema. 1.8 paveiksle pavaizduota tipinė ketvirčio tiltelio schema, kurioje naudojamas vieno poliaus kelių padėčių jungiklis, prijungiantis tik vieną Vitstono tiltelio varžą – aktyvųjį įtempių jutiklį. Kiekvienai ketvirčio tiltelio schemai balansuoti gali būti naudojama bendra schema.

1.8 pav. Įtempių jutiklių jungimas ketvirčio tiltelio schemoje

Fig. 1.8. Structure diagram of strain gauges in quarter bridge switching

Tai, tikriausiai, paprasčiausia iš visų jutiklių perjungimo konfigūracijų, atsižvelgiant į naudojamų komponentų skaičių, bet ji turi šiuos trūkumus:

- Jungiklio ir jungiamųjų laidų varžos sumuojasi su nuosekliai jungime esančia jutiklio varža, kas gali būti žymių nuokrypų šaltiniu. Jungiklio varža skirtingose padėtyse gali būti skirtinga ir taip įtakoti nustatymo nuokrypas. Aukštos kokybės jungikliai su paausuotais kontaktais dažnai gali išspręsti šią problemą, bet tuo pačiu padidina viso įrenginio kai-

ną. Taip pat galima naudoti MOSFET elektroninius raktus, kurių kanalo varža $< 50 \text{ m}\Omega$.

- Konkrečiu laiko momentu maitinamas tik tas jutiklis, kuriuo tuo metu stebimas deformacijos nustatymas. Todėl jutikliai mažiau įkaista, mažesnė temperatūros įtaka bei galima naudoti didesnę maitinimo įtampą ir gauti didesnę tiltelių jautrį.

Jutiklių jungimo pusės tiltelio schemoje perjungiami du besiribojantys Vinstono tiltelio pečiai (jutikliai) (1.9 pav.). Esant šiai konfigūracijai, kiti du pečiai sudaro vieną pusę tiltelio schemos ir yra bendra visiems perjungiamiems jutikliams. Šioje konkrečioje schemoje visi prijungti jutikliai yra nuolat maitinami iš šaltinio, o vienpoliu jungikliu perjungiami tik tiltelio išėjimai (atjungtos pusės tiltelio dalys su aktyviais jutikliais tiesiog apibrėžia išėjimo dydį viso tiltelio išėjimo grandinei). Kiekvienai pusės tiltelio schemai balansuoti gali būti naudojama bendra schema. Ši tiltelio konfigūracija suteikia bene geriausią universalumą visam matavimo įrenginiui. Pusės tiltelio schema daugiataškiuose matavimuose leidžia naudoti du aktyviusius jutiklius arba aktyvųjį ir kompensacinį jutiklį tais atvejais, kai jutikliai yra būna sumontuoti ant didelės konstrukcijos ar statinio (pvz., tilto, pastato stogo konstrukcijų ir pan.) ir veikia skirtingose temperatūrinėse sąlygose.

1.9 pav. Įtempių jutiklių jungimas pusės tiltelio schemoje

Fig. 1.9. Structure diagram of strain gauges in half bridge switching

Šie įrenginiai paprastai turi suprojektuotas pilno, pusės ir ketvirčio tiltelio jutiklių perjungimo schemas su atskira balansavimo dalimi kiekvienam kanalui. Siekiant gauti geriausias įrenginių eksploatacines savybes ir tikslumą, jungikliai ir jungtys juose yra paprastai padengiami auksu bei suprojektuojami taip, kad sumažinti klaidinančią kontaktų varžą. Jungiamieji kabeliai tarp perjungimo ir balansavimo įrenginių bei atitinkamo įtempio jutiklio yra konkretūs ir pažymėti.

1.6. Automatiniai daugiataškiai elektroniniai įrenginiai su nebalansuojamu tilteliu deformacijų stebėjimui

Daugiataškiai elektroniniai įrenginiai deformacijoms matuoti reikalingi, tada kai norima vienu metu stebėti deformacijas keliuose ar daugelyje taškų. Sudarant automatinių mažų varžų pokyčių nustatymo įrenginių struktūras, kaip matyti iš atliktos analizės, naudojamas nebalansuojamų tiltelių metodas. Todėl yra išskiriami du pagrindiniai būdai matuoti deformacijas daugelyje taškų. Pirmajame – jutikliai jungiami ilgais laidais tiesiogiai į duomenų surinkimo vietą. Čia kiekvieno kanalo signalas stiprinamas atskiru jutikliui kalibruotu stiprintuvu. Stiprintuvų išėjimai komutuojami į analoginį-skaitmeninį keitiklį ir paeiliui keičiami į skaitmeninį kodą. Antrajame būde visi jutikliai aprūpinami savu stiprintuvu ir ASK, o duomenys perduodami skaitmenine magistrale.

Daugiataškio deformacijų matavimo įrenginio struktūra pateikta 1.10 paveiksle (Potter 2002). Daugiataškio elektroninio įrenginio deformacijoms matuoti su nebalansuojamo Vitstono tiltelio metodu schema, sudaryta iš tiltelio maitinimo šaltinio, n tiltelių, n stiprintuvų, n kalibruotų jungimo kabelių, dviejų komutatorių bei analoginio-skaitmeninio keitiklio (ASK). Schemoje naudojama tarptiltelinė schema, su kiekvienam kanalui skirtais kalibruotais kabeliais ir stiprintuvais DA1... DAn su savais, kiekvienam kanalui kalibruotais stiprinimo koeficientais. Palyginus su 1.7 paveiksle pateikta schema, įvestas maitinimo įtampos kanalų komutatorius, kuris prijungia maitinimo įtampą ir jos grįžtamąjį ryšį tik tam kanalui, kuriame yra vykdomas deformacijos nustatymas. Komutatorius DD1 komutuoja įrenginio kanalų sustiprintus disbalanso signalus ir siunčia juos į ASK, čia disbalanso įtampa keičiama į skaitmeninį kodą, proporcingą jutiklio varžos pokyčiui. Dažnai kaip ASK panaudojami funkciniai moduliai montuojami į asmeninį kompiuterį.

Tiltelis, kurio aktyviojo jutiklio varžos pokytį reikia nustatyti, kanalų komutatorium yra prijungiamas prie nuolatinės įtampos šaltinio keturiais laidais: maitinimo įtampos šaltinio, kurio gnybtai pažymėti U_+ ir U_- ir šaltinio grįžtamojo ryšio įėjimų U_{gr+} ir U_{gr-} . Analoginis multiplekseris DD1 stiprintuvo DA1 išėjimą sujungia su ASK DD2 įėjimu. Tiltelyje deformacijų registravimui naudojamas varžinis įtempio jutiklis R11, kuris klijuojamas prie tiriamos konstrukcijos. Tai aktyvusis tiltelio elementas, nes jo varža kinta priklausomai nuo konstrukcijos deformacijos. Temperatūrinių ir kitų aplinkos veiksnių sąlygotų jutiklio varžos pokyčių eliminavimui priešingame tiltelio petyje įjungiamas pasyvusis tokios pačios konstrukcijos įtempio jutiklis R_{31} . Pakitus aktyviojo jutiklio varžai, tiltelis išsibalansuoja – tarp tiltelio pečių vidurinių taškų atsiranda įtampų skirtumas. Ši disbalanso įtampa U_d stiprinama operaciniu stiprintuvu ir siunčiama į analoginį-

1.10 pav. Daugiataškio elektroninio įrenginio deformacijoms matuoti su nebalansuojamo Vitsono tiltelio metodu schema

Fig. 1.10. Structure diagram of multipoint electronic device for measuring deformations with unbalanced Wheatstone bridge method

skaitmeninį keitiklį. ASK pakeičia sustiprintą analoginę tiltelio disbalanso įtampą skaitmeniniu disbalanso signalu. Taigi nebalansuojamame Vitsono tiltelyje skaitmeniniais metodais užregistruojamas tiltelio išbalansavimo dydis ir pagal jį apskaičiuojamas proporcingas varžos pokyčiui konstrukcijos deformacijos dydis. Po to kanalų komutatorius perjungia maitinimą į kitą matavimo jutiklį (pvz., R_{1n}), analoginis multiplexseris DD1 stiprintuvo DAn išėjimą sujungia su ASK DD2 įėjimu ir analogiškai anksčiau aprašytam atliekamas kito jutiklio varžos nustatymas.

Pagal analogišką schemą, pateiktą 1.10 paveiksle, gaminami moduliai, kurie jungia tiltelio maitinimo šaltinį ir specializuotą stiprintuvų bloką, bei turi galimybę plėsti ir keisti konfigūraciją.

1.11 paveiksle pateikti dinaminio bandymų rezultatai naudojant „Strainstall Bridge Test System“ sistema (Kvedaras R. 2003).

1.11 pav. Tiltlo dinaminio tyrimų „StrainStall“ sistema deformacijų priklausomybė
Fig. 1.11. Strain dependence of dynamic bridge research with „StrainStall“ system

Grafike matyti, kad iki penktos sekundės nėra išorinio dinaminio poveikio ir matomas sistemos baltojo triukšmo pobūdžio signalas. Jo pikų lygis prijungus vieną sistemos kanalą (jutiklius, maitinimą, jungiamuosius kabelius ir stiprintuvą) siekia 64 kvantavimo vienetus. Žinant, kad sistema turi 16 skilčių kvantavimo lygį, apskaičiuotas signalo-triukšmo santykis (Kvedaras R. 2005):

$$S/T = 20 \log \left(\frac{N_t}{N_{ASK}} \right) = 20 \log(64/65536) = -60,2 \text{ dB}, \quad (1.13)$$

čia: S/T – signalo-triukšmo santykis; N_t – pikinės skaitmeninio signalo triukšmo amplitudinės vertės kodas; N_{ASK} – kvantavimo laiptelių skaičius (ASK kvantavimo lygis).

Triukšmų nepaveiktų skilčių, kurios yra naudojamos deformacijai nustatyti, skaičių, tai yra efektyvų ASK skilčių skaičių N_{ef} galima suskaičiuoti pagal šią išraišką:

$$N_{ef} = \frac{|S/T| - 1,76}{6,02} = \frac{60,2 - 1,76}{6,02} = 9,7. \quad (1.14)$$

Galutiniame rezultate efektyviai naudojama tik 10 iš 16 ASK skilčių. Likusios skiltys nepanaudojamos, jos nenaudingos ir rezultate nepasiekiamas adekvatus įvertinimas. Analizuojant analogiškų sistemų principus ir galimus paklaidų šaltinius galima teigti, kad daugelis pagal šį principą suprojektuotų sistemų turėtų turėti panašų efektyvųjį skilčių skaičių. Todėl brangių daugelio skilčių ASK, turinčių iki 24 skilčių, naudojimas yra nepagrįstas. Labiausiai tikėtina, kad jų naudojimas labiau susijęs su siekiu išsiskirti rinkoje ir marketingo tikslais, nei su realiai pagrįstu poreikiu (Kvedaras R. 2005).

Iš šio tyrimų pavyzdžio matyti, kad net pramonės gaminamos deformacijų matavimo sistemos turi visą eilę problemų, be kurių dar reikia pažymėti kad ryšiui su jutikliais reikalingi daugiagysliai kabeliai, pereinant nuo matavimo viename kanale prie matavimų kitame kanale, turi būti komutuojama visa (nuo 4 iki 5) eilė grandinių.

Analog Device firma siūlo tiltelių jutiklių analoginius-skaitmeninius keitiklius AD7730, kuriuose sumontuoti analoginis komutatorius, stiprintuvai, sigma-delta ASK, kalibravimo mikrokontroleris, registrai, kintamosios srovės tiltelio maitinimo šaltinis. Šio ASK funkcinė-blokinė schema yra parodyta 1.12 paveiksle.

1.12 pav. AD7730 analoginio-skaitmeninio keitiklio funkcinė-blokinė schema

Fig. 1.12. Functional block diagram of AD7730 analog-to-digital converter

1.13 pav. AD7730 analoginio-skaitmeninio keitiklio prijungimo prie įtempių jutiklių tiltelio schema

Fig. 1.13. Structure diagram of AD7730 analog-to-digital converter connection to strain gauge

Vienas iš šio ASK panaudojimo ir prijungimo pavyzdžių pateiktas 1.13 paveiksle. Tokie ASK daugelio taškų stebėsenos įrenginyje turėtų būti montuojami šalia konstrukcijos *i*-tojo deformacijos nustatymo taško įtempių jutiklių ir varžų tiltelio. Juose nustatoma disbalanso įtampa ir konvertuojama į skaitmeninį kodą. Skaitmeninis kodas gali būti ilgais laidais siunčiamas į pagrindinį informacijos apdorojimo ir kaupimo įrenginį. Tokiu būdu galima išvengti pasitaikančių trukdžių įtakos perduodant signalus ilgais kabeliais. Kitas būdas yra perduoti skaitmenizuotus stebėjimo rezultatus internetu ar intranetu. Taip pat galima išvengti ilgų laidų panaudojimo problemą taikant belaidį ryšį (Chuah *et al.* 2000, SG-Link 2004). Todėl tokius ASK galima panaudoti deformacijų nustatymui daugelyje taškų. Tačiau įranga taps pakankamai sudėtinga ir brangi, nes kiekvienam konstrukcijos deformacijos nustatymo taškui turės būti naudojamas savas keitiklis ir skaitmeninės informacijos perdavimo modulis (mikrokontroleris).

1.7. Automatiniai daugiataškiai elektroniniai įrenginiai su balansuojamu tilteliu deformacijų stebėjimui

Pasiūlyta uždara automatinė balansuojamo Vitstono tiltelio mažų varžos pokyčių (deformacijų) įrenginio struktūra. Joje balansavimo funkcija vykdoma *R-2R* tipo skaitmeniniais-analoginiais keitikliais (SAK), įjungtais lygiagrečiai vienai iš

tiltelio pečių pastoviųjų varžų (Kvedaras R. 2003). Toks lygiagretusis jungimas leido gauti pakankamai mažą skaitmeniniu būdu keičiamą varžą. Tokios sistemos struktūrinė schema pateikta 1.14 paveiksle.

1.14 pav. Balansuojamo Vītstono tiltelio deformacijų stebėsenai su R - $2R$ skaitmeniniu-analoginiu keitikliu struktūrinė schema: U – tiltelio maitinimo šaltinis; OS – operacinis stiprintuvas; K – komparatorius; MP – mikroprocesorius; SAK – skaitmeninis-analoginis keitiklis; S – raktai; R_{ji} – įtempio jutiklis; R_{ki} – kompensacinis jutiklis; M – išėjimo kodas

Fig. 1.14. Structure diagram of balanced Wheatstone bridge with R - $2R$ digital-to-analog converter for monitoring of strains. U – bridge supply unit; OS – operational amplifier; K – comparator; MP – microprocessor; SAK – digital-to-analog converter; S – switch; R_{ji} – strain gauge; R_{ki} – compensation gauge; M – output code gauge

Šioje schemoje panaudota pusės tiltelio schema. Jungikliais $S_{j1}, \dots, S_{jn}$ prie operacinio stiprintuvo jungiami aktyvieji jutikliai, jungikliais $S_{k1}, \dots, S_{kn}$ – kompensaciniai jutikliai. Varžai R_1 ir R_2 yra pusės tiltelio bendrieji visų kanalų varžai. Maitinimo šaltinio U išėjimai prijungti prie visų jutiklių (R_{j1} ir $R_{k1}, \dots, R_{jn}$ ir R_{kn}) sujungimo mazgų. Tačiau maitinimo įtampa tiekama tik tiems jutikliams, kurių jungikliai S_{ji} ir S_{ki} yra sujungti. Kadangi naudojamas balansuojamas tiltelis, deformacijos nustatymo rezultatas praktiškai nepriklauso nuo maitinimo įtamos dydžio, todėl maitinimo šaltinyje nenaudojami grįžtamieji ryšiai ir jutiklių prijungimo kabeliai nėra kalibruojami, nes kaip parodyta 1.4 punkte, maitinimo įtamos ir kabelių savųjų varžų pasikeitimas praktiškai neturi įtakos varžos pokyčio nustatymo rezultatui.

Sumontavus ir prijungus jutiklius pirmiausia atliekamas sistemos balansavimas. Balansavimo metu įvertinama jutiklių (aktyviojo ir kompensacinio) var-

žų, SAK varžos, jungiamųjų laidų varžų skirtumai. Balansuojant i -tojo kanalo varžas, sujungiami tik S_{ji} ir S_{ki} jungikliai. Vitstono tilteliu, sudarytu iš jutiklių R_{ji} , R_{ki} ir aktyviojo varžo R_1 bei lygiagrečiai sujungtų varžo R_2 ir SAK varžos, teka srovės, kurias sukuria tiltelio maitinimo šaltinis.

Kai tiltelio jutiklių ir aktyviųjų varžų ir SAK varžos nėra vienodos tarp tiltelio mazgų a ir b susidaranti disbalanso įtampa sustiprinta operaciniu stiprintuvu OS perduodama į komparatoriaus K įėjimą. Komparatorius palygina įtampą įėjime „+“ su 0 V įtampa įėjime „–“. Priklausomai nuo tiltelio būsenos (nesubalansuotas ar perbalansuotas), komparatorius generuoja loginio nulio arba vieneto išėjimo signalą. Šis signalas siunčiamas į mikroprocesorių MP. MP programa, pagal komparatoriaus signalą generuoja SAK valdymo kodą taip, kad disbalanso įtampa artėtų prie nulio, analogiškai kaip pateikta 1.4 punkte. Po balansavimo procedūros MP išėjime nusistovėjęs SAK valdymo kodas yra fiksuojamas. Šis kodas yra tiltelio disbalanso prieš jį apkraunant kodu. Analogiškos procedūros atliekamos visuose kanaluose. Po to konstrukcija apkraunama ir taip pat vykdoma apkrovimo jėgų veikiamų tiltelio jutiklių varžų pokyčių nustatymas. Varžų pokytis randamas iš šių dviejų nustatymų metu gautų kodų skirtumo. Atlikus šias operacijas, kiti jutikliai prijungiami prie stiprintuvo MOSFET jungikliais ir nustatymo procesas kartojamas iš naujo, nustatant kitų jutiklių varžų pokyčius (deformacijas kitose tiriamosios konstrukcijos vietose).

1.8. Metodų privalumai ir trūkumai

Dabartiniai konstrukcijų deformacijų tyrimai ar jų stebėseną reikalauja deformacijų ilgalaikio stebėjimo ir dažniausia deformacijų kontrolė vykdoma daugelyje žymiai nutolusių vienas nuo kito konstrukcijų taškuose. Todėl įrenginiai skirti nustatyti ar stebėti deformacijas naudojant elektromechaninius įrenginius yra didelių matmenų, lėti, naudojantys daug energijos, todėl nenaudotini.

Visi išvardinti metodai turi savų privalumų ir trūkumų. Pagrindiniai nebalansuojamų metodų trūkumai, dėl kurių yra kuriamos vis tobulesnės bei paprastesnės matavimo sistemos, yra šie:

- sistemos yra be grįžtamo ryšio;
- sunkiai automatizuojamos;
- mažas matuojamų taškų skaičius;
- daug paklaidų šaltinių;
- sudėtingas jutiklių tvirtinimas;
- sistemos sudėtingos ir preciziškos, reikalaujančios labai tikslaus derinimo;
- elektromechaninės ir vienkanalės sistemos yra didelių matmenų.

Didesniuose objektuose, tokiuose kaip tiltai, nustatymo taškų skaičius gali siekti 200 ir daugiau, o patys taškai išdėstyti dideliu atstumu vienas nuo kito.

Siekiant užtikrinti tikslų konstrukcijos būsenos identifikavimą tenka įvertinti šiuos parametrus daugelyje konstrukcijos taškų. Kuo daugiau taškų vertinama, tuo tiksliau pagal sudarytus konstrukcijų matematinius modelius galima įvertinti konstrukcijos būseną (Masiulionis 2008).

Šiuos reikalavimus atitinka ir praktikoje naudojami automatiniai įrenginiai ir sistemos su nebalansuojamu tilteliu. Jos užtikrina automatizuotus deformacijų matavimus daugelyje nutolusių konstrukcijos taškų, skaitmeninį rezultatų saugojimą ir perdavimą į centralizuotus duomenų bankus.

Tačiau įrenginiai turi šiuos trūkumus:

- įrenginiai pakankamai sudėtingi ir brangūs;
- stiprintuvai ir jungiamieji kabeliai kalibruojami kiekvienam kanalui ir gali būti naudojami tik šiuose kanaluose;
- didelis savųjų triukšmų lygis reikšmingai sumažina ASK, o tuo pačiu ir įrenginio, efektyviųjų skilčių skaičių;
- deformacijų nustatymo nuokrypas įtakoja maitinimo įtampos nestabilumai, todėl maitinimo šaltiniai turi būti stabilūs, turi būti naudojami papildomi maitinimo šaltinio grįžtamojo ryšio laidai;
- panaudota atvira matavimo sistema yra jautri trukdžiams, trukdžių generuotos klaidos nėra kompensuojamos;
- tiltelis su vienu aktyviu jutikliu yra netiesinis, todėl turi būti kompensuojamas šis netiesiškumas.

Pasiūlyti automatiniai įrenginiai ir sistemos su balansuojamu tilteliu yra paprastesni, jie yra nejautrūs maitinimo įtampos nestabilumui, trukdžių įnešamos klaidos dažnai yra kompensuojamos uždaroje automatinėje sistemoje, deformacijų nustatymo rezultatams neturi įtakos jungiamųjų kabelių varžos dydis ir jų pokyčiai bei stiprintuvo stiprinimo koeficiento nustatymo netikslumai.

Tačiau šie įrenginiai dar nėra pilnai ištirti, nėra gautos išraiškos surišančios jutiklio varžos pokytį ir išėjimo kodą, nėra analizuota koks gaunamas varžų pokyčių diapazonas.

Dėl šios priežasties reikalingi tolesni tyrimai tobulinant automatinių mažų varžos pokyčių nustatymo būdus.

Kuriant naują sistemą galima pabrėžti bendrus reikalavimus konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemoms:

- pranašesnės yra matavimo sistemos su grįžtamoju ryšiu (uždarnosios);
- matavimo rezultatai turi būti kaip galima mažiau įtakojami išorinių faktorių;
- varžų maži pokyčiai turi būti įvertinami pakankamai tiksliai;
- turi būti galimybė varžų pokyčius nustatyti daugelyje konstrukcijos taškų;
- vertinimo taškai gali būti nutolę vienas nuo kito dideliu atstumu;
- matavimo sistema turi būti patikima;
- matavimo sistema turi būti palyginti pigi ir paprasta.

1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Deformacijų nustatymui yra taikoma visa eilė metodų, tačiau vienas iš dažniausiai praktikoje naudojamų automatizuotų ir daugelyje taškų deformacijas nustatančių būdų – tai įtempio jutiklių įjungtų į Vitstono tiltelių naudojimas.
2. Automatizuotiems daugelio nutolusių taškų deformacijų nustatymui naudojami balansuojamo ir nebalansuojamo tiltelio, maitinamo pastovia įtampa, įrenginiai.
3. Literatūroje akcentuojama, kad daugelio nutolusių taškų deformacijų nustatymo įrenginiai turi privalumų, tilteliai maitinami pastovia srove, tačiau jie nėra plačiai išnagrinėti. Todėl vienas darbo uždavinių yra pasiūlyti ir kompiuteriniu modeliavimu bei eksperimentiškai ištirti naujas deformacijų nustatymo įrenginių struktūras, kuriose naudojami srovės šaltiniai.
4. Nebalansuojamo tiltelio deformacijų matavimo sistemos dėl savo galimybių sudaryti schemas leidžiančias nustatyti deformacijas daugelyje konstrukcijų taškų ir automatizuoti procesą yra plačiai naudojamos. Tačiau jos turi visą eilę trūkumų: įrenginiai pakankamai sudėtingi ir brangūs; stiprintuvai ir jungiamieji kabeliai kalibruojami kiekvienam kanalui ir gali būti naudojami tik šiuose kanaluose; didelis savųjų triukšmų lygis reikšmingai sumažina ASK, o tuo pačiu ir įrenginio, efektyviųjų skilčių skaičių; deformacijų nustatymo nuokrypas įtakoja maitinimo įtampos nestabilumai, todėl maitinimo šaltiniai turi būti stabilūs, turi būti naudojami papildomi maitinimo šaltinio grįžtamojo ryšio laidai; panaudota atvira matavimo sistema yra jautri trukdžiams, trukdžių generuotos klaidos nėra kompensuojamos; tiltelis su vienu aktyviu jutikliu yra netiesinis, todėl turi būti kompensuojamas šis netiesiškumas.
5. Balansuojamo Vitstono tiltelio su $R-2R$ tipo SAK įrenginiai mažų varžos pokyčių nustatymui yra pranašesnis už nebalansuojamo tiltelio metodą, nes jie yra nejautrūs maitinimo įtampos nestabilumui, trukdžių įnešamos klaidos dažnai yra kompensuojamos uždaroje automatinėje sistemoje, deformacijų nustatymo rezultatams neturi įtakos jungiamųjų kabelių varžos dydis ir jų pokyčiai bei stiprintuvo stiprinimo koeficiento nustatymo netikslumai. Tačiau šie įrenginiai dar nėra pilnai ištirti. Todėl vienas iš uždavinių yra gauti išraiškas, surišančias jutiklio varžos pokytį ir išėjimo kodą, išanalizuoti koks gaunamas varžų pokyčių nustatymo diapazonas.

Mažų deformacijų stebėsenos balansuojamų elektroninių įrenginių struktūrų sudarymas ir analizė

Skyriuje analizuojama automatinių daugiataškių konstrukcijų deformacijų nustatymo būdai naudojantys įtempio jutiklius. Gautas žinomo automatinio įrenginio naudojant balansuojamą Vitstono tiltelį nustatyto kodo nuo jutiklio varžos pokyčio bei nustatomų jutiklių varžų pokyčių diapazono išraiškos. Pasiūlytos ir išanalizuotos naujos automatinių daugiataškių deformacijų nustatymo įrenginių struktūros ir atlikta jų analizė. Jame išskiriami du galimi būdai: su dviem srovės šaltiniais ir su vienu srovės šaltiniu. Taip pat sudarytos automatinių konstrukcijų deformacijų matavimo įrenginių balansuojant sroves struktūrinės schemos su vienu, dviem ir trimis srovės skaitmeniniais analoginiais keitikliais, parodyta, kad šiose schemose trukdžių įtaka deformacijų nustatymo rezultatui yra mažesnė.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Masiulionis 2008, Masiulionis 2010, Masiulionis *et al.* 2011).

2.1. Balansuojamo Vitstono tiltelio įrenginių analizė

Yra pasiūlyta naudoti uždara automatinį varžų mažų pokyčių nustatymo įrenginį, kuriame yra panaudotas automatinio balansavimo Vitstono tiltelis. Šiame įrengi-

nyje tiltelis balansuojamas keičiant R - $2R$ tipo skaitmeninio-analoginio keitiklio (SAK) kodą, tuo pačiu keičiant varžų matricos varžos, lygiagrečiai prijungtos prie vienos iš tiltelio pečių varžos dydį (Kvedaras R. 2003).

Minėtame darbe yra parodyta, kad SAK atstojamosios varžos dydis tarp at-raminės įtampos ir išėjimo yra proporcingas SAK valdymo kodui. Taigi, toks SAK gali būti naudojamas kaip skaitmeniniu būdu keičiamas rezistorius. Tačiau tokio SAK charakteringosios varžos būna tarp 5 ir 10 k Ω . Tuo tarpu, pramonės gaminamų įtempio jutiklių varžos yra tarp 100 ir 500 Ω . Todėl tiesiogiai panaudo-oti SAK varžų Vitstono tiltelių balansavimui netinka.

2.1 paveiksle parodytas balansuojamo Vitstono tiltelio modelis, kur R_{j1} – aktyvusis jutiklis, R_{j2} – pasyvusis jutiklis, R_3 ir R_4 – pastoviosios varžos, o keičiama balansavimo varža R_C yra lygiagrečiai prijungiama prie vieno iš pasy-viųjų tiltelių varžų.

2.1 pav. Vitstono tiltelio modelis

Fig. 2.1. Model of Wheatstone bridge

Priimkim, kad balansuojant Vitstono tiltelį, reguliuojama peties, kuriame yra pastovusis varžas R_3 , varža. Tada tiltelio balanso sąlyga bus:

$$\frac{UR_4}{R_{j1R} + R_4} = \frac{UR_{3R}}{R_{j2} + R_{3R}}, \quad (2.1)$$

$$R_{3R} = \frac{-R_4 R_{j2}}{R_{j1R}}, \quad (2.2)$$

čia R_{j1R} – aktyviojo jutiklio varža matavimo metu.

Iš šios priklausomybės matyti, kad tarp R_{3R} ir R_{j1R} yra atvirkštinė priklausomybė, todėl lygiagrečiai prijungus SAK – varža kis tiesiškai.

Balansavimui naudojamas R - $2R$ matrica su kodu keičiama jo išėjimo varža (varža, kuri yra tarp SAK etaloninės įtampos įėjimo gnybto ir jo išėjimo gnybto). SAK išėjimo srovė, nuosekliai keičiant valdymo kodą, keičiasi tiesiškai:

$$I_{is} = I_{MRS} \cdot m_s, \quad (2.3)$$

čia I_{MRS} – SAK mažiausio reikšminio skaičiaus srovė; m_s – dešimtainis SAK valdymo kodas ($m_s = 1, 2, 3, \dots$).

Balansuojant tiltelį, SAK išėjimo varža R_C turi kisti taip, kad SAK išėjimo srovė kistų tiesiniu dėsnio, taigi

$$R_{is} = R_C \cdot m_s = \frac{U_e}{I_{MRS}} \cdot m_s, \quad (2.4)$$

čia R_C – SAK mažiausioji varža; U_e – SAK etaloninė įtampa.

SAK varžos kitimo dėsnis yra parodytas 2.2 paveiksle.

2.2 pav. Skaitmeninio-analoginio keitiklio varžos priklausomybė nuo srovės

Fig. 2.2. Dependence of digital-to-analog converter resistance on current

Ši SAK varža jungiama lygiagrečiai su tiltelio varža, todėl reguliuojama tiltelio varža kis kaip parodyta 2.3 paveiksle.

2.3 pav. Reguliuojamos varžos R_{3R} dydžio priklausomybė nuo valdymo kodo, prie skirtingų pastovios varžos R_3 dydžių

Fig. 2.3. Dependence of adjustable R_{3R} resistance size on control code with a different constant R_3 resistance values

Jei priimama, kad $R_{j1R} = R_{j1} + \Delta R_{j1}$, o $R_{3R} = R_3 + m_s R_{MRS}$, čia m_s – dešimtainis SAK valdymo kodas, R_{MRS} – SAK mažiausio reikšminio skaičiaus varža, tada gauname

$$m_s = \frac{-1}{R_{j1} + \Delta R_{j1}} \frac{R_4 R_{j2}}{R_3 R_{MRS}}. \quad (2.5)$$

Atliekamas matavimas, kai įtėpio jutiklis neapkrautas ir gaunamas kodas:

$$m_n = \frac{-1}{R_{j1} + \Delta R_{j1n}} \frac{R_4 R_{j2}}{R_3 R_{MRS}}. \quad (2.5)$$

Taip pat atliekamas matavimas, kai įtėpio jutiklis apkrautas, o jo kodas:

$$m_a = \frac{-1}{R_{j1} + \Delta R_{j1a}} \frac{R_4 R_{j2}}{R_3 R_{MRS}}. \quad (2.7)$$

Varžos pokyčio kodas yra gaunamas iš šių kodų skirtumo:

$$m_m = \left(\frac{\Delta R_{j1a} - \Delta R_{j1n}}{(R_{j1} + \Delta R_{j1n})(R_{j1} + \Delta R_{j1a})} \right) \frac{R_4 R_{j2}}{R_3 R_{MRS}}. \quad (2.8)$$

Balansuojant tiltelį, galima reguliuoti kito peties, kuriame yra pastovioji varža R_4 , varžą. Tada gauname:

$$R_{4R} = \frac{R_4 R_{j1R}}{R_{j1}}. \quad (2.9)$$

Dabar priimkim, kad $R_{j1R} = R_{j1} + \Delta R_{j1}$, o $R_{4R} = R_4 + m_s R_{MRS}$, tada gauname

$$R_4 + m_s R_{MRS} = \frac{R_4 R_{j1} + R_4 \Delta R_{j1}}{R_{j1}}, \quad (2.10)$$

$$m_s = \frac{\Delta R_{j1} R_4}{R_{j1} R_{MRS}}. \quad (2.11)$$

Atliekami matavimai, kai įtempio jutiklis neapkrautas ir apkrautas, atitinkamai gaunami kodai bei jų skirtumas:

$$m_n = \frac{\Delta R_{j1n} R_4}{R_{j1} R_{MRS}}, \quad (2.12)$$

$$m_a = \frac{\Delta R_{j1a} R_4}{R_{j1} R_{MRS}}, \quad (2.13)$$

$$m_m = \frac{\Delta R_{j1a} - \Delta R_{j1n}}{R_{j1}} \frac{R_4}{R_{MRS}} = \delta R_{j1m} \frac{R_4}{R_{MRS}}. \quad (2.14)$$

Iš šios išraiškos matyti, kad skirtuminio matavimo kodas yra lygus santykiui aktyviojo jutiklio pokyčiui $\delta R_{j1m} = \frac{\Delta R_{j1a} - \Delta R_{j1n}}{R_{j1}}$ padaugintam iš tiltelyje

sumontuotos varžos R_4 santykio su SAK mažiausio reikšminio skaičiaus keičiamos varžos dydžiu R_{MRS} , o šie du dydžiai yra pastovūs. Varžą R_{MRS} galima išreikšti per SAK pilnąją varžą R_{SAK} :

$$R_{MRS} = \frac{R_{SAK}}{2^n}, \quad (2.15)$$

čia n – SAK skilčių skaičius.

Tada (2.14) galima užrašyti

$$m_m = \delta R_{j1m} \frac{2^n R_4}{R_{SAK}}. \quad (2.16)$$

Akivaizdu, kad reguliuojamą varžą tikslinga įjungti tame pat petyje kaip ir aktyvųjį jutiklį.

Kaip matyti iš (2.16), dviejų kodų skirtumas yra tiesiog proporcingas jutiklio varžos santykiniam pokyčiui, įvertinus jutiklių prijungimo laidų varžų pokytį, t. y. lygus deformacijai. Be to, vykdant du matavimus, iš matavimo rezultato eliminuojami: aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžų skirtumas, jutiklių prijungimo laidų varžų įtaka bei pradinis srovės šaltinių srovių nesutapimas $\Delta I = I_1 - I_2$. Klimatinių sąlygų iššauktas aktyviojo jutiklio varžos pokytis yra kompensuojamas įjungto pasyviojo jutiklio. Aplinkos sąlygų pokytis, laidų senėjimas ir pan. gali sąlygoti prijungimo laidų varžų skirtumą ΔR_{1l} , kuris gali sukelti matavimo paklaidą. Tačiau naudojant dviejų vytų porų kabelį, šis pokytis gali būti labai mažas.

Grandyne SAK gali būti prijungta lygiagrečiai ir varžai R_4 . Tada suminė varža R_{4R} kis analogiškai varžos R_{3R} pokyčiui, o tiltelio balanso sąlyga

$$\frac{UR_{4R}}{R_{j1R} + R_{4R}} = \frac{UR_3}{R_{j2} + R_3}. \quad (2.17)$$

Analogiškai ankstesniam išvedimui, dviejų matavimų skirtuminis kodas, t. y. varžos pokyčio kodas lygus

$$m_m = \frac{-2^n R_{SAK} R_4 R_{j2}}{R_3 R_4} \left(\frac{\Delta R_1 + \Delta R_{lp}}{(R_{j2} + \Delta R_{jli} + \Delta R_j + \Delta R_1 + \Delta R_{lp})(R_{j2} + \Delta R_{jli} + \Delta R_j)} \right), \quad (2.18)$$

Matyti, kad išraiška yra gana sudėtinga ir galimai netiesinė. Todėl labiausiai priimtinas yra pirmas tiltelio balansavimo variantas.

Varžų pokyčių matavimo ribas apibrėžia varžos R_{3R} reguliavimo diapazonas. Šį reguliavimo diapazoną, įtakoja varžo R_3 ir SAK charakteringosios varžos R_{SAK} dydžiai. Varžo R_3 dydis, užtikrinantis reikiamą perderinimo diapazoną yra

$$R_3 = \frac{\delta R_3 \cdot R_{SAK}}{(1 - \delta R_3)}, \quad (2.19)$$

čia δR_3 – santykinis reikalingas varžo R_3 perderinimo diapazonas.

Jeigu dauginančiojo SAK charakteringoji varža $R_{SAK} = 3,5 \text{ k}\Omega$, $\delta R_3 = 20 \%$, tai $R_3 = 875 \Omega$, $\delta R_3 = 30 \%$, tai $R_3 = 1500 \Omega$. Kaip matyti, tiltelių pastoviosios

varžos gaunamos pakankamai didelės, lyginant su jutiklių varžomis (100–500 Ω), kas yra nepageidautina, nes mažina įrenginio jautrį.

Varžos R_{3R} perderinimo žingsnis nustatomas

$$\delta R_{3R} = \frac{\delta R_d \delta R_m}{M \cdot 100}, \quad (2.20)$$

čia δR_d – maksimalios matuojamos santykinės deformacijos vertė; δR_m – maksimali santykinė leistina deformacijos matavimo neapibrėžtis; M – minimalus diskretus dešimtainis skaičius matavimo diapazone.

Galima nustatyti reikiamą SAK skilčių skaičių

$$n \geq \frac{1}{\log 2} \log \frac{\Delta R_3}{\Delta R_{ml}}, \quad (2.21)$$

čia ΔR_3 – varžos R_3 perderinimo diapazonas; ΔR_{ml} – maksimali leistina deformacijos matavimo skiriamoji geba.

Priėmus $M = 100$ ir $\delta R_d = 10\%$, tai gaunama $n \geq 12$ skilčių, jei $M = 1000$, o $\delta R_d = 5\%$, tai $n > 17$ skilčių.

2.2. Deformacijų stebėjimo įrenginių balansuojant sroves analizė

2.2.1. Deformacijų stebėjimo įrenginių balansuojant sroves su dviem srovės šaltiniais schema ir jos analizė

Atsižvelgiant į atliktą literatūros analizę buvo priimta, kad vienas iš būdų padidinti deformacijų nustatymo diapazoną, sumažinti triukšmų ir trukdžių įtaką yra naudoti balansuojamas srove maitinamas schemas.

Buvo pasiūlyta daugiataškė metodo schema, sudaryta iš dviejų srovės šaltinių I_1 ir I_2 , o vieno iš jų (I_2) išėjimo srovė yra skaitmeniniu būdu reguliuojama. Šie du šaltiniai maitina du – aktyvųjį ir kompensacinį įtempio jutiklius R_{j1n} ir R_{j2n} (2.4 pav.).

Deformacijų nustatymas vykdomas dviem etapais. Pirmiausia jutikliai yra tvirtinami ant tiriamosios konstrukcijos, kol ji nėra apkrauta. Iš pradžių vykdomas schemas ir jutiklių balansavimas. Valdymo schema jungikliais S_{11} ir S_{21} prijungia prie matavimo schemas pirmąjį jutiklių porą R_{j11} ir R_{j21} , po to keičiamas vieno iš srovės šaltinių srovės dydis, kol įtampos skirtumas U_{12} tampa lygus nuliui. Kodas yra išimamas valdymo įrenginyje (valdiklyje, asmeniniame kompiuteryje). Po to tas pat kartojama su kitų kanalų jutiklių poromis. Tuo būdu yra įvertinama jutiklių varžų ir matavimo schemas (jutiklių prijungimo kabelių,

2.4 pav. Daugiataškio konstrukcijų deformacijų nustatymo balansuojant srovės įrenginio struktūrinė schema

Fig. 2.4. Structure diagram of multipoint construction strain monitoring device by balancing currents

srovės šaltinių) parametrų nevienodumas. Konstrukcija yra apkraunama ir pagal užduotą programą vėl yra prijungiami reikiami sistemos kanalai ir schema balansuojama. Šių dviejų kodų skirtumas yra lygus varžų pokyčiui (konstrukcijos deformacijos dydžiui).

Srovių balansavimo įrenginio, naudojant du srovės šaltinius, apibendrintas modelis pateiktas 2.5 paveiksle. Nustatant deformacijas ir pakitus įtępio jutiklio R_{j1} varžai, atsiranda disbalanso įtampa U_{12} . Valdymo blokas VB generuoja kodą, kuris keičia reguliuojamo srovės šaltinio I_2 srovės dydį taip, kad įtampa U_{12} taptų lygi nuliui.

Du schemos pečiai sudaryti iš vienodo dydžio tikslių atraminių varžų R_{A1} , R_{A2} ($R_{A1}=R_{A2}=R_A$) ir dviejų įtępio jutiklių R_{j1} ir R_{j2} , kurie yra vienodi, bet jų pradinės varžos bendru atveju skirtingos dydžiu R_S . Varža R_S – taip pat įvertina jutiklių jungiamųjų kabelių, įjungiamų jungikliais, varžas, taip pat ir R_{A1} ir R_{A2} varžų nevienodumą. Kadangi tiek jutiklių, tiek ir kitos varžos esančios kanale gali skirtis viena nuo kitos, todėl schema prieš atliekant matavimus (kol kon-

2.5 pav. Mažų varžų pokyčių (deformacijų) stebėjimo balansuojant srovės įrenginio schema: I_1, I_2 – srovės šaltiniai; VB – valdymo blokas

Fig. 2.5. Structure diagram of monitoring of small resistance changes (strains) by balancing currents: I_1, I_2 – first and second current source; VB – control unit

struktūra yra neapkrauta) yra balansuojama taip, kad įtampa U_{12} taptų lygi nuliui, tada įtampų išraiška užrašoma taip:

$$0 = I_1 R_{J1} + I_1 R_A - I_2 R_{J2} - I_2 R_A. \quad (2.22)$$

Kaip minėta anksčiau, srovės balansuojamos skaitmeniniu būdu. Skaitmeniniam srovės reguliavimui dažniausia yra naudojami skaitmeniniai-analoginiai keitikliai. Kaip matyti iš (2.22) balansą galima pasiekti reguliuojant tiek srovę I_1 tiek ir srovę I_2 . Tarkim, kad yra keičiama srovė I_2 . Priimam, kad srovė keičiama žingsniu I_{MRS} , kur $I_{MRS} = I_{\max} / 2^n$ – mažiausias srovės pokyčio žingsnis, $I_{\max}$ – maksimali srovės vertė, n – SAK skilčių skaičius.

Tada srovė I_2 po balansavimo (kai $U_{12} = 0$) lygi:

$$I_2 = I_1 + m \frac{I_{\max}}{2^n}, \quad (2.23)$$

čia: m – dešimtainio kodo vertė.

Lygtį (2.23) įstatę į lygtį (2.22) ir įvertinę, kad $R_{J1} = R_{J2} + R_S$, kur R_S – įtempio jutiklių varžų skirtumas, įvertinantis jutiklių jungiamųjų kabelių, sujungtų jungikliais, varžas, gauname korekcijos kodo vertę:

$$m_n = 2^n \frac{I_1}{I_{\max}} \cdot \frac{R_S}{R_A + R_{J2}}. \quad (2.24)$$

Iš šios išraiškos matyti, kad nustatyto dešimtainio kodo vertė m yra tiesiog proporcinga jutiklių varžų skirtumui R_S .

Apkrovis konstrukciją, t.y. pakitus matavimo jutiklio varžai ji tampa lygi $R_{j1} = R_{j2} + R_m + R_S$. Analogiškai gaunama matavimo kodo išraiška:

$$m_a = 2^n \frac{I_1}{I_{\max}} \cdot \frac{R_m + R_S}{R_A + R_{j2}}, \quad (2.25)$$

čia: $R_m = R_{j1} - R_{j2}$ – jutiklio varžos pokyčio dydis apkrautos konstrukcijos deformacijos nustatymo metu.

Nustatyta deformacija yra lygi apkrautos ir neapkrautos konstrukcijos gautų kodo verčių skirtumui:

$$m_m = m_a - m_n = 2^n \frac{I_1}{I_{\max}} \cdot \frac{R_m}{R_A + R_{j2}}, \quad (2.26)$$

čia: I_1 – pirmojo srovės šaltinio srovė, $I_{\max}$ – maksimali reguliuojamo srovės šaltinio srovė, R_m – jutiklio varžos dydis deformacijos nustatymo metu, R_A – atraminės tikslios varžos vertė, R_{j2} – neapkrauto įtempio jutiklio varža.

Naudojamos srovės šaltinių schemos, kuriose jutikliai gali būti jungiami tarp srovės šaltinio išėjimo ir nulinio laidininko, t.y. $R_{A1} = R_{A2} = 0$ (žr. 2.5 pav.).

Tada įtampos kritimas jutiklio varžoje lygus

$$U_i = I_i \cdot R_{ji}, \quad (2.27)$$

čia I_i – šakos srovė; R_{ji} – šakos jutiklio varža.

Jei reguliuojama srovė šakoje su kompensaciniu jutikliu kol matuojama konstrukcija nėra apkrauta, įtampų kritimai lygūs:

$$U_{1n} = I_1 \cdot R_{j1n}, \quad (2.28)$$

$$U_{2n} = I_{2n} \cdot R_{j2n}, \quad (2.29)$$

čia I_1 – aktyvios šakos atraminė srovė; I_{2n} – kompensacinės šakos srovė, kai $U_{1n} = U_{2n}$; R_{j1n} – aktyvaus neapkrauto jutiklio varža; R_{j2n} – kompensacinio neapkrauto jutiklio varža.

Keičiant kompensacinės šakos srovę I_{2n} taip, kad būtų $U_{1n} = U_{2n}$ turėsime

$$I_1 \cdot R_{j1n} = I_{2n} \cdot R_{j2n}, \quad (2.30)$$

$$I_{2n} = \frac{I_1 \cdot R_{j1n}}{R_{j2n}}. \quad (2.31)$$

Priėmus, kad neapkrautų jutiklių varžos yra $R_{j1n} = R_{j2n} + \Delta R_{jn}$, kur ΔR_{jn} – neapkrautų jutiklių varžų skirtumas ir ištačius į (2.31) gauname

$$I_{2n} = I_1 \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_{jn}}{R_{j2n}} \right). \quad (2.32)$$

Informaciją apie neapkrautų jutiklių varžų skirtumą ΔR_j gauname iš I_{2n} pokyčio, nes kai $R_{j1} = R_{j2}$, tada $I_{2n} = I_1$. Priėmus, kad $I_{2n} = I_1 + \Delta I_{2n}$ ir ištačius į (2.32) galima užrašyti:

$$\Delta I_{2n} = I_1 \frac{\Delta R_{jn}}{R_{j2n}} \quad (2.33)$$

arba

$$\frac{\Delta I_{2n}}{I_1} = \frac{\Delta R_{jn}}{R_{j2n}}, \quad (2.34)$$

$$\delta I_{2n} = \delta R_{jn}. \quad (2.35)$$

Matyti, kad santykinis neapkrautų jutiklių varžų skirtumas yra lygus santykiniam antrosios (reguliuojamos) srovės pokyčiui.

Srovės pokytis priklauso nuo srovės reguliavimo kodo ir srovės mažiausio reikšminio skaičiaus:

$$\Delta I_{2n} = m_{\text{nust}} I_{\text{MRS}}, \quad (2.36)$$

čia m_{nust} – nustatytas srovės reguliavimo dešimtainis kodas; $I_{\text{MRS}} = I_{\text{max}} / 2^n$ – srovės reguliavimo mažiausia reikšminė vertė, I_{max} – maksimali reguliavimo srovė.

Tada neapkrautų jutiklių balanso kodas bus

$$m_n = \left(\frac{\Delta R_{jn}}{R_{j2n}} \right) \frac{I_1}{I_{\text{MRS}}}. \quad (2.37)$$

Apkrauto jutiklio lygtis bus

$$\delta I_{2a} = \delta R_{ja}, \quad (2.38)$$

čia $\delta R_{ja} = (\Delta R_{jn} + \Delta R_{jap}) / R_{j2n}$; ΔR_{jap} – apkrauto jutiklio varžos pokytis.

Arba:

$$\delta I_{2a} = \delta R_{jn} + \delta R_{jap} \quad (2.39)$$

ir

$$\delta I_{2ap} = \delta I_{2a} - \delta I_{2n} = \delta R_{jn} + \delta R_{jap} - \delta R_{jn} = \delta R_{jap}. \quad (2.40)$$

Analogiškai neapkrautam jutikliui, apkrauto jutiklio kodas ir matuojamo pokyčio kodas bus

$$m_a = \left(\frac{\Delta R_{ja}}{R_{j2a}} \right) \frac{I_1}{I_{MRS}} = \left(\frac{(\Delta R_{jap} + \Delta R_{jn})}{R_{j2n}} \right) \frac{I_1}{I_{MRS}}, \quad (2.41)$$

$$m_m = m_a - m_n = \frac{\Delta R_{ja}}{R_{j2n}} \cdot \frac{I_1}{I_{MRS}}. \quad (2.42)$$

Nagrinėjant grandinę su reguliuojama srove I_1 (srovė per aktyvųjį jutiklį), Modelyje (2.5 pav.) atsiradus disbalansui, keičiama srovės I_1 vertė, kol bus pasiektas balansas. Atlikus analogiškus veiksmus, dviejų grandinės balansavimų kodų skirtumas bus lygus

$$m_{m1} = \frac{2^n I_2}{I_{\max}} \frac{\Delta R_{ja} (2R_{j1} + 2\Delta R_{j10} + 2\Delta R_{l1} - R_{j2})}{(R_{j1} + \Delta R_{j10} + \Delta R_{l1} + \Delta R_{ja})(R_{j1} + \Delta R_{j10} + \Delta R_{l1})}. \quad (2.43)$$

Matyti, kad gaunama sudėtinga išraiška, matavimo kodas neturi tiesioginės priklausomybės nuo matuojamo varžos pokyčio. Todėl labiau priimtinas variantas, kai reguliuojama srovė I_2 .

Srovės šaltinių reguliavimo ribos priklauso nuo maksimalaus galimo matuojamų varžų pokyčio. Plieno deformacijų matavimams šis dydis gali būti iki $\pm 30\%$, betono gaminiais – iki $\pm 6\%$ ir pan. Srovės kitimo diapazonas turi būti

$$I_{\max} \geq \frac{I_1 R_{j\max}}{R_A + R_{j1}}, \quad (2.44)$$

čia $R_{j\max}$ – jutiklio varžos kitimo diapazonas.

Plieno deformacijų matavimui priimama, kad $I_1 = 5 \text{ mA}$, $R_A = R_{j1} = 100 \, \Omega$, $R_{j\max} = 30 \, \Omega$, tada srovės keitimo diapazonas lygus:

$$I_{\max pl} \geq \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{100 + 100} = 0,75 \text{ mA}. \quad (2.45)$$

Matavimams įrangos skiriamoji geba turi būti K kartų mažesnė už maksimalų jos dydį, tada mažiausias srovės pokytis (mažiausiąjį skirtis) lygus

$$I_{\text{MRS}} = \frac{I_1 R_{j\text{max}}}{K(R_A + R_{j1})}. \quad (2.46)$$

Pramoniniams matavimams (pvz., stebėsenai) reikia turėti įrangos skiriamąją gebą apie 100 kartų mažesnę už maksimalų dydį ($K = 100$), tada mažiausias srovės pokytis lygus

$$I_{\text{MRSst,pl}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{100 \cdot (100 + 100)} = 7,5 \mu\text{A}. \quad (2.47)$$

Laboratoriniams matavimams reikia turėti įrangos skiriamąją gebą apie 1000 kartų mažesnę už maksimalų dydį ($K = 1000$), tada mažiausias srovės pokytis lygus

$$I_{\text{MRSlab,pl}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{1000 \cdot (100 + 100)} = 0,75 \mu\text{A}. \quad (2.48)$$

Iš (2.44) ir (2.46) galima nustatyti reikalaujamą srovės šaltinio reguliavimo verčių skaičių

$$m_m \geq \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{MRS}}}. \quad (2.49)$$

Įrenginiams leidžiantiems stebėti plieninių konstrukcijų deformacijas, reikalingas SAK turintis

$$n \geq \frac{\log m_m}{\log 2} \quad (2.50)$$

skilčių. Tuo būdu, stebėsenos įrangai reikia $n = 7$ skilčių, o laboratorinei įrangai – $n = 10$ skilčių, skaitmeninio reguliavimo srovės šaltiniai.

Kaip matyti, reikalavimai skaitmeninio reguliavimo srovės šaltiniui arba SAK reguliuojantiems srovės šaltinio srovę yra priimtini ir dar gali būti padidinti, be to, šiose schemose gali būti naudojami bet kokio tipo SAK.

Priėmus šias sąlygas, laboratorinės įrangos matuojamos įtampos skirtumo U_{12} skiriamaoji geba, esant tam tikrai deformacijai, turi būti mažesnė nei $\pm 90 \mu\text{V}$.

2.2.2. Deformacijų stebėjimo įrenginių balansuojant sroves su vienu srovės šaltiniu schema ir jos analizė

Tobulinant srovių balansavimo įrenginius buvo pasiūlyta daugiataškės konstrukcijų deformacijų nustatymo su vienu srovės šaltiniu įrenginio struktūrinė schema, pateikta 2.6 paveiksle.

2.6 pav. Daugiataškio konstrukcijų deformacijų stebėjimo su vienu srovės šaltiniu įrenginio struktūrinė schema

Fig. 2.6. Structure diagram of device for multipoint monitoring of construction strain using one current source

Analogiškai ankstesnėms schemoms, schemą sudaro dvi grandinės – matavimo ir kompensacinė, tačiau panaudotas tik vienas skaitmeniniu būdu reguliuojamas srovės šaltinis. Grandinės srovė komutuojama raktais S_i tarp aktyvaus ir kompensacinio jutiklių visuose grandinės kanaluose. Matavimas vykdomas taip. Jungiklis perjungiamas į padėtį, jungiančioje srovės šaltinį su aktyviuoju jutikliu R_{j11} . Valdymo įrenginyje lyginami įtampos kritimai tarp aktyviojo jutiklio grandinėje tekant srovei I_i atsirandančio įtampos kritimo U_j ir atraminės įtampos U_0 . Valdymo įrenginys keičia srovės šaltinio srovės dydį taip, kad būtų įvykdyta sąlyga

$$U_0 = I_i R_i, \quad (2.51)$$

čia I_i – nustatyta srovės vertė ir R_i – kanalo varža matavimo metu.

Po to perjungiamas jungiklis S ir matavimas kartojamas prijungus kompensacinio jutiklio grandinę.

Šios grandinės modelis pateiktas 2.7 paveiksle.

2.7 pav. Balansavimo schemas su vienu srovės šaltiniu modelis

Fig. 2.7. Model of balancing circuit using one current source

Matyti, kad po šių dviejų matavimų, yra įvykdoma (2.22) sąlyga, tik abu balansavimai atliekami ne vienu metu, bet vienas po kito atraminės įtamos U_0 atžvilgiu. Schema yra paprastesnė už 2.5 paveiksle pateiktą schemą, nes joje eliminuojama skirtingų srovės šaltinių generuojamų srovių nepastovumo (pvz.: dreifų, nes deformacijų matavimai gali būti vykdomi ilgą laiko tarpą – mėnesius ar konstrukcijų stebėsenos atvejais, eilę metų) įtaka. Daugiataškėse matavimo sistemose raktai S plačiai naudojami jutiklių kanalų perjungimui. Jų įjungtų raktų varžos gali būti pakankamai mažos (pvz.: MOSFET raktų $\leq 0,1 \Omega$), o srovės šaltinio dreifai neturės žymesnės įtakos varžų pokyčio nustatymui, nes vieno balansavimo trukmė paprastai neviršija kelių milisekundžių, todėl schema turi akivaizdžių privalumų. Be to, naudojant vytų porų kabelius, raktas gali būti iškeltas prie jutiklių ir abiems balansavimams bus naudojami tie patys jungiamieji laidai.

Varžos pokyčio nustatymas atliekamas analogiškai anksčiau aprašytiems atvejams: iš pradžių dviejų balansavimų metu įvertinama jutiklių ir jungiamųjų laidų varžų skirtumas, o po to nustatytais laiko momentais yra matuojamas apkrautų jutiklių varžų pokytis. Pagal valdymo bloko VB gautą matavimų skirtumo kodą ir (2.42) išraišką yra nustatomas matuojamas varžų pokytis.

Analizuojant deformacijų stebėjimo įrenginius su srovių balansavimu matoma, kad: a) stiprintuvo stiprinimo koeficiento nestabilumai neturi jokios įtakos matavimo rezultatui, b) stiprintuvo ir komparatoriaus amplitudinių charakteristikų netiesiškumai visiškai neturi įtakos matavimo rezultatui, nes jie dirba tik kaip poliarumo detektoriai, c) stiprintuvo nulinio dreifų įtaka gali būti gana didelė, nes esant mažoms įėjimo įtampoms gali keistis stiprintuvo išėjimo įtamos, d) komparatoriaus klaidos gali tiesiogiai įtakoti matavimo rezultatą.

2.3. Skaitmeniniai-analoginiai keitikliai su srovės išėjimu konstrukcijų deformacijų stebėsenos įrenginiuose

Šiandien pramonė gamina specialius SAK su srovės išėjimu, tai MAX5548, MAX5550, AD5510, AD5512, AD5520, AD8810 tipų SAK. Tai srovės šaltiniai, kuriuose išėjimo srovė reguliuojama į grandyno įėjimą persiunčiamu valdymo kodu. Šių SAK valdymui naudojami nuo 8 iki 16 skilčių skaitmeniniai kodai. Kaip minėta stebėsenos įrenginiams reikia 7 ir daugiau skilčių srovės valdymo skilčių, o laboratoriniams įrenginiams – 10 ir daugiau skilčių.

MAX5548 ir MAX5550 turi eilę privalumų lyginant su AD5510, AD5520 ar AD8810 gaminiais: viename grandyne turi sumontuotus du srovės SAK; galimybę keisti išėjimo srovės diapazoną dviem būdais: keičiant grandyno valdymo kodą (2.1 lentelė) ir keičiant varžos R_{JA} (R_{JB}) dydį (2.2 lentelė).

2.1 lentelė. MAX5548 skaitmeninio-analoginio keitiklio srovės diapazoną nustatantys valdymo kodai

Table 2.1. Current range setting control codes for MAX5548 digital-to-analog converter

Valdymo kodas ir duomenys	Kodo paskirtis	Maksimali išėjimo srovė, mA
0 1 0 0 0 0 XXXXXXXXXXXX	SAK A	1mA–2mA
0 1 0 0 0 1 XXXXXXXXXXXX	SAK A	1,5mA–3mA
0 1 0 0 1 0 XXXXXXXXXXXX	SAK A	2,5mA–5mA
0 1 0 0 1 1 XXXXXXXXXXXX	SAK A	4,5mA–9mA
0 1 0 1 0 0 XXXXXXXXXXXX	SAK A	8mA–16mA
0 1 0 1 0 1 XXXXXXXXXXXX	SAK A	15mA–30mA
1 1 0 0 0 0 XXXXXXXXXXXX	SAK B	1mA–2mA
1 1 0 0 0 1 XXXXXXXXXXXX	SAK B	1,5mA–3mA
1 1 0 0 1 0 XXXXXXXXXXXX	SAK B	2,5mA–5mA
1 1 0 0 1 1 XXXXXXXXXXXX	SAK B	4,5mA–9mA
1 1 0 1 0 0 XXXXXXXXXXXX	SAK B	8mA–16mA
1 1 0 1 0 1 XXXXXXXXXXXX	SAK B	15mA–30mA

Kuo didesnė srovė teka per jutiklius, tuo didesnė disbalanso įtampa gaunama esant nesubalansuotai grandinei, tuo mažesnė triukšmų įtaka. Tačiau, tiriant kai kurių medžiagų (pvz. plastikų) deformacijas, didelių jutiklių žadinimo srovių

taikyti negalima, nes gali atsirasti didelės deformacijų nustatymo nuokrypos dėl konstrukcijų įkaitimo. Iš 2.1 ir 2.2 lentelių matyti, kad srovės SAK išėjimo srovės diapazonas priklausomai nuo tiriamųjų konstrukcijų medžiagų, nustatomų deformacijų dydžio gali būti lanksčiai keičiamas programiniu būdu. Reikalui esant srovių diapazono dydžiai gali būti nustatyti ir aparatinio būdu, pvz., vieno SAK srovės diapazonas nustatomas lygus 5 mA ($R_{JA} = 20 \text{ k}\Omega$), o kito – 3,75 mA ($R_{JB} = 30 \text{ k}\Omega$), taip pasiekiant, kad antrojo SAK maksimali srovė leistų matuoti deformacijas, kai jutiklio varžos dydis pakinta iki $\pm 25 \%$ nuo vardinės jutiklio vertės. Reikia pažymėti, kad vietoj varžos R_{JA} (R_{JB}) įjungus skaitmeninį potenciometrą išėjimo srovė ir nuo šios varžos dydžio gali būti keičiama programiškai.

2.2 lentelė. MAX5548 skaitmeninio-analoginio keitiklio srovės diapazoną nustatantys varžos R_{JA} (R_{JB}) dydžiai

Table 2.2. Resistor R_{JA} (R_{JB}) values of current range setting for MAX5548 digital-to-analog converter

R_{JA} (R_{JB}), k Ω	Maksimali (viso diapazono) išėjimo srovė, mA					
	1 mA– 2 mA	1,5 mA– 3 mA	2,5 mA– 5 mA	4,5 mA– 9 mA	8 mA– 16 mA	15 mA– 30 mA
40	1,00	1,500	2,500	4,500	8,00	15,00
35	1,25	1,875	3,125	5,625	10,00	18,75
30	1,50	2,250	3,750	6,750	12,00	22,50
25	1,75	2,625	4,375	7,875	14,00	26,25
20	2,00	3,000	5,000	9,000	16,00	30,00

Buvo pasiūlyta konstrukcijų deformacijų matavimo įrenginio schema su dviem srovės SAK 2.8 paveiksle. Šiame MAX5548 SAK, kaip ir MAX5550, viename grandyne yra suformuoti du analogiški srovės SAK. Tokiame SAK, kuriame abu SAK yra viename korpuse, naudoja tą pačią atraminę įtampą, o tai sumažina aplinkos sąlygų įtaką matavimo rezultatams, nes temperatūros pokyčiai beveik vienodai veikia abiejų SAK išėjimo sroves ir jų dreifus. Įrenginio schemos struktūra leidžia kompensuoti šiuos pokyčius.

Įrenginį sudaro: valdymo mikroprocesorius DD1, dvigubas srovės SAK DD2, skirtuminis stiprintuvas DA1A, ribotuvas R5, D2, D4, MOSFET komutatoriai VT11, VT2i, vytų porų linijos Li, aktyvieji R_{ji1} ir kompensaciniai R_{ji2} įtempio jutikliai, dvi atraminės varžos R1, R2 bei elementai užtikrinantys normalų SAK darbą.

2.8 pav. Deformacijų nustatymo įrenginys naudojantis du srovės skaitmeninius-analoginius keitiklius

Fig. 2.8. Strain monitoring device using two current digital-to-analog converters

Varžos R_1 ir R_2 skirtos įvertinti atsiradusioms įrenginio nuokrypoms pakitus aplinkos sąlygoms ir atsiradus SAK išėjimo srovių, komparatoriaus DA1A dreifams vykdant ilgalaikius deformacijų stebėjimus.

Įrenginys veikia taip. Kai prie tiriamos konstrukcijos yra pritvirtinami jutikliai, prie įrenginio prijungiami vytų porų kabeliais, iš mikrovaldiklio DD1 užkraunamas SAK DD2 A keitiklio valdymo ir duomenų kodas, kurio perduodamas aukštasis lygis aukščiausioje duomenų skiltyje. Tuo būdu nustatomas srovės, tiekiamos į matavimo jutiklį R_{j11} reikiamas diapazonas ir srovės vertė. Perduodamas antrojo SAK B valdymo kodas, kuris nustato SAK B išėjimo srovės diapazoną ir dydį, kurio vertė (dydžiu įvertinančiu galima jutiklių varžų skirtumą) mažesnė už SAK A perduotą valdymo kodą. Po to valdymo signalas siunčiamas į pirmąją jungiklį VT11, VT12 porą ir jie yra įjungiami. Per jutiklius R_{j11} ir R_{j12} pradeda tekėti srovės, kurių dydis yra lygus SAK A ir B išėjimo srovių dydžiams. Dėl to, kad jutiklių ir jungimo kabelių varžos skiriasi, o SAK A ir B srovės nustatytos nevienodos, įtampų kritimai jutiklių varžose yra skirtingi, tuo būdu skiriasi įtampos komparatoriaus DA1A įėjimuose. DA1A išėjime generuojamas loginio vieneto lygio įtampos signalas, kuris siunčiamas į valdiklį DD1. DD1 siunčia į SAK B keitiklį valdymo ir duomenų kodą, kuriame abiejose aukščiausiose (2^n ir 2^{n-1}) skiltyse nustatoma loginio vieneto lygio įtampa. Srovė tekanti per jutiklį R_{j12} padidės. Jei dėl šios srovės padidėjimo, įtampos kritimas R_{j12} taps didesnis už įtampos kritimą R_{j11} , stiprintuvo DA1A ir ribotuvo R5, D2, D4 išėjime bus generuota loginio nulinio lygio įtampa, jei įtampos kritimo vertė

nepakis – bus generuota loginio vieneto lygio įtampa. Loginiai lygiai perduodami į DD1. Jei buvo perduota loginio nulio lygio įtampa, valdiklis SAK B 2^{n-1} valdymo skiltį nustato į loginio nulio lygį, jei aukštoji – šioje skiltyje paliekama loginio vieneto lygio įtampa. Sekančiame cikle loginio vieneto lygio įtampa nustatoma 2^{n-2} skiltyje ir procedūra kartojama. Tai atliekama visuose SAK B skiltyse. Baigus procedūrą disbalanso įtampa DA1A įėjimuose praktiškai lygi nuliui, o SAK B valdymo kodas yra proporcingas jutiklių R_{j11} ir R_{j12} varžų skirtumui. Šis kodas įsimenamas. Analogiška procedūra kartojama su visomis jutiklių poromis. Tuo būdu DD1 atmintinėje yra patalpinti visų jutiklių porų varžų dydžių skirtumų kodai.

Apkrovus konstrukciją balansavimo procedūra yra kartojama užduotu laiko tarpu. Analogiškai gaunami deformacijų nustatymo pirminių kodų masyvai, kurie įsimenami. Iš gautų apkrautos konstrukcijos kodų yra atimami jutiklių varžų nevienodumo kodai, o gautas skirtuminis kodas (deformacijos vertė) yra įsimenama.

Ilgų bandymų (pvz., stebėsenos atvejais) metu pakitus aplinkos sąlygoms (pvz., žiemą pakeitus vasarai ir pan.), gali būti įjungiami tranzistoriai VTr1 ir VTr2 ir atliktas srovių, tekančių per didelio tikslumo varžus R_1 ir R_2 , balansavimas. Šis papildomo balansavimo kodas bus proporcingas DA1A bei SAK A ir B keitiklių dreifams. Šį kodą atėmus iš matavimo rezultato gaunama deformacijos vertė su įvertintais minėtais dreifais.

Tokia schema turi eilę privalumų: abu SAK yra viename kristale, maitinami iš vieno atraminės įtampos šaltinio, todėl vieno ir kito SAK išėjimo srovės nestabilumai bus beveik vienodi. Priklausomai nuo tiriamųjų konstrukcijų medžiagų, gali būti parenkamos skirtingos srovės tekančios per jutiklius, tuo sumažinant jutiklių kaitimo įtaką matavimo rezultatams.

Įvertinkime kiek skilčių SAK reikia realizuojant pasiūlytą schemą. Anksčiau nustatyta, kad balansuojant sroves reikia 7 skilčių SAK reguliavimo stebėsenos tikslams ir 10 skilčių laboratorinei įrangai kai yra užduodamas $\pm 30\%$ jutiklių varžos kitimo diapazonas. Akivaizdu, kad 7 ar 10 skilčių SAK keis srovę nuo 0 iki $I_{\max}$. Tačiau nustatyta, kad 7 ar 10 skilčių srovės reguliavimo reikia, kad keistųsi srovė SAK B išėjime lyginant su nustatyta SAK A išėjime.

Jeigu SAK A nustatoma srovė lygi aukščiausiai skilčiai, tai jos vertė bus

$$I_{AB} = \frac{I_{\max}}{2}, \quad (2.52)$$

čia $I_{\max}$ – maksimali SAK srovė.

Tada perderinimo diapazonui d ($d = 30\%$) bus

$$I_d = \frac{I_{\max}}{k} d = \frac{d}{k} I_{\max}, \quad (2.53)$$

$$I_{30} = \frac{I_{\max}}{2} 0,3 = 0,15 I_{\max},$$

$$k = \frac{I_{AB}}{I_{\max}}. \quad (2.54)$$

Taigi 7 (10) skiltys turi sudaryti $d/2$ viso SAK B diapazono.
Tada

$$\frac{d}{k} : 2^p = 1 : 2^r, \quad 0,075 : 2^p = 1 : 2^r, \quad (2.55)$$

čia p – reikalaujamas skilčių skaičius, r – visas SAK skilčių skaičius.

$$\frac{d}{k 2^p} = \frac{1}{2^r}, \quad \frac{d}{k} \cdot 2^r = 2^p, \quad 2^r \geq \frac{k 2^p}{d} = \frac{k D}{d} = \frac{I_{AB} D}{I_m d}.$$

$$\frac{0,15}{2^p} = \frac{1}{2^r}, \quad 0,15 \cdot 2^r = 2^p, \quad 2^r \geq 6,7 \cdot 2^p.$$

$$\frac{0,075}{2^p} = \frac{1}{2^r}, \quad 0,075 \cdot 2^r = 2^p, \quad 2^r \geq 13,3 \cdot 2^p.$$

$$2^r \geq \frac{.5 \cdot 250}{.2} = 625. \quad r \geq 10. \quad (2.56)$$

čia D – dešimtainis atskaitų skaičius.

Sakykim $p = 7$, tada

$$2^r \geq 6,7 \cdot 2^7 = 857,6; \quad 2^{10} = 1024 > 857,6. \quad (2.57)$$

Nustačius $d = 20 \%$, $r = 10$. Ir, kai $p = 10$, tada

$$2^r \geq 6,7 \cdot 2^{10} = 6861, \quad 2^{13} = 8192 > 6861. \quad (2.58)$$

Taigi, pasiūlytoje schemoje stebėsenai reikalingi 10–11 skilčių SAK, o laboratorinei įrangai reikės 12–13 skilčių SAK. Akivaizdu, jei nustatomų deformacijų diapazonas bus mažesnis, tada reikės mažiau skilčių SAK. Taip pat akivaizdu, kad įrenginys naudojantis pasiūlytą schemą iš dalies tenkina stebėsenos reikalavimus, bet netenkina laboratorinei įrangai keliamų reikalavimų.

Tačiau ir viename korpuse patalpintų dviejų (A ir B) SAK išėjimo srovės, nustačius tą patį diapazoną gali skirtis iki 2 %, o tai gali iššaukti neapibrėžtis, netenkinančias reikiamų sąlygų. Įvertinkime galimą SAK išėjimo srovių įtaką

deformacijų nustatymui. Tam pagal 2.5 paveikslo schemą ir priėmus, jog $R_{A1} = R_{A2}$ gauname

$$0 = I_1 R_{11} - I_2 R_{22}, \quad (2.59)$$

čia $R_{11} = R_{j1} + R_{l1}$ ir $R_{22} = R_{j2} + R_{l2}$ – schemos pirmojo ir antrojo pečių atstojamosios varžos; R_{j1} ir R_{j2} – aktyviojo ir kompensacinio jutiklių varžos; R_{l1} ir R_{l2} – schemos aktyviojo ir kompensacinio pečių jutiklių prijungimo laidininkų varžos.

Tada srovės I_2 vertė lygi

$$I_2 = \frac{I_1 R_{11}}{R_{22}}. \quad (2.60)$$

Išraiškai (2.60) priėmus, kad $I_2 = I_1 + \Delta I_R + \Delta I_1$; čia ΔI_R – skaitmeniniu būdu reguliuojamos antrojo srovės šaltinio srovės pokytis; $\Delta I_1 = I_1 - I_2$ – srovių I_1 ir I_2 verčių skirtumas ir R_{11} išraišką gaunam

$$\Delta I_R = \frac{I_1 (\Delta R_{j1} + \Delta R_{l1})}{R_{j2}} - \Delta I_1. \quad (2.61)$$

Skaitmeninio reguliavimo srovės pokytis gali būti išreikštas

$$\Delta I_R = \frac{m_s I_{\max}}{2^n} - \Delta I_1, \quad (2.62)$$

čia $I_{\max}$ – didžiausia reguliuojamos srovės vertė; m_s – dešimtainė nustatyto kodo vertė; n – srovės reguliavimo skilčių skaičius.

Tada balanso metu kodo vertė bus

$$\begin{aligned} \frac{m_s I_{\max}}{2^n} &= \frac{I_1 (\Delta R_{j1} + \Delta R_{l1})}{R_{j2}} + \Delta I_1, \\ m_s &= \frac{2^n I_1 (\Delta R_{j1} + \Delta R_{l1})}{I_{\max} R_{j2}} + \frac{2^n \Delta I_1}{I_{\max} R_{j2}}. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Nustatytos balanso srovės kodas, kai jutiklis neapkrautas, lygus

$$m_n = \frac{2^n I_1 (\Delta R_{j10} + \Delta R_{l1})}{I_{\max} R_{j2}} + \frac{2^n \Delta I_1}{I_{\max} R_{j2}}. \quad (2.64)$$

Kai jutiklis apkrautas (deformacijos nustatymo proceso metu) jutiklio varža pakinta ir pokytis gali būti išreikštas kaip ΔR_{j1a} , o po naujo schemos balansavimo, naujas kodas

$$m_a = \frac{2^n I_1 (\Delta R_{j1} + \Delta R_{11} + \Delta R_{j1a})}{I_{\max} R_{j2}} + \frac{2^n \Delta I_1}{I_{\max} R_{j2}}. \quad (2.65)$$

Stebimos deformacijos (varžos pokyčio) kodas nustatomas, kaip šių dviejų kodų skirtumas

$$m_m = \frac{2^n I_1}{I_{\max}} \delta R_{j1a}, \quad (2.66)$$

čia $\delta R_{j1a} = \Delta R_{j1a} / R_{j2}$ – apkrauto aktyviojo įtempio jutiklio varžos pokyčio ir kompensacinio jutiklio varžos santykis.

Kaip matyti, gautas kodas yra tiesiog proporcingas jutiklio varžos pokyčiui, o A ir B SAK srovių nevienodumas yra kompensuotas ir neturi įtakos nustatymo rezultatams.

Norint pasiekti didesnę skyrą panaudoti 12–16 skilčių SAK (AD5398, AD5410, AD5412, AD5420, AD5422, AD8810) sudėtinga, nes juose nėra numatytas išėjimo srovių diapazonų keitimas, o generuojamas srovių diapazonas dažniausiai yra per didelis (20–300 mA) įtempio jutikliams žadinti.

Norint padidinti skyrą buvo pasiūlyta įrenginio schema su trimis srovės SAK, pateikta 2.9 paveiksle. Šio įrenginio veikimo principas analogiškas prieš tai aprašyto įrenginio schemai su dviem srovės SAK. Skirtumas tarp jų tame, kad antrojo SAK išėjimo srovė nustatoma lygi $I_B = I_A - I_d$, kur I_d – maksimali perderinimo srovė, o tokio paties tipo trečiasis srovės SAK C (DD3) yra skirtas srovės balansavimui ir jo srovės išėjimas yra prijungtas lygiagrečiai SAK B išėjimui. SAK C išėjimo srovės diapazonas nustatomas (valdymo kodu ir/arba varžu R5) prisilaikant sąlygos $I_C \geq \pm I_d$.

Šioje scheme pirmieji du SAK yra pastovios srovės šaltiniai, o trečiasis apsprendžia srovės balansavimą, todėl jo pradinis ir deformacijos matavimo kodai apsprendžia deformacijos dydį ir neturi įtakos deformacijos nustatymui.

Šio trečiojo SAK skilčių skaičius turi atitikti stebėsenos ar laboratorinės įrangos keliamus reikalavimus.

Buvo pasiūlyta įrenginio schema su vienu srovės šaltiniu, pateikta 2.10 paveiksle. Joje pradinę srovę per jutiklius užduoda SAK A, o balansavimo srovę – lygiagrečiai prijungtas SAK B. SAK B diapazonas nustatomas analogiškai, kaip ir scheme su trimis srovės SAK. Tačiau srovė balansuojama atžvilgiu pastovios U_a . Jos dydis turi būti analogiškas įtampos kritimui jutikliuose

2.9 pav. Deformacijų nustatymo įrenginys naudojantis tris srovės skaitmeninius-analoginius keitiklius

Fig. 2.9. Strain monitoring device using three current digital-to-analog converters

2.10 pav. Deformacijų nustatymo įrenginys naudojantis vieną srovės šaltinį

Fig. 2.10. Strain monitoring device using one current source

$U_0 \approx I_{Am} R_{jv}$ (čia I_{Am} – nustatyta jutiklių vardinė srovė, R_{jv} – jutiklio vardinis varžos dydis).

Tokia schema yra pakankamai universali: pagal tiriamos konstrukcijos medžiagą leidžia nustatyti tai medžiagai ar jutikliams leidžiamą žadinimo srovę ir leisdamas eliminuoti stebėsenos nuokrypas dėl konstrukcijos savybių ar jutiklio varžos kitimo iššaukto jutiklio kaitimo; leidžia lanksčiai (programiniu nustatymu) keisti matavimų diapazoną ir skyrą; leidžia nustatyti dideles deformacijas su didele skyra (tam atitinkamai nustatant antrojo SAK tiekiamą srovę).

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Gautos skaitmeninio balansavimo Vitstono tiltelio įrenginių balansuojamuose tilteliuose konstrukcijų deformacijų dydžių kodų matematinės išraiškos, kai keičiamos viena arba kita tiltelio pečių pastoviosios varžos.
2. Nustatyta, kad skaitmeninio balansavimo Vitstono tiltelio įrenginyje skaitmeniniu būdu keičiamą varžą tikslinga jungti tiltelio petyje su pasyviuoju jutikliu, šiuo atveju gauto kodo priklausomybė nuo matuojamo varžos pokyčio yra tiesinė.
3. Pasiūlyta, sudaryta ir ištirta nauja srovių balansavimo konstrukcijų deformacijų stebėsenos struktūrinė schema su dviem ir su vienu skaitmeninio reguliavimo srovės šaltiniais. Nustatytos balansavimo procese gautų kodų verčių ir jutiklio varžos (deformacijų dydžių) pokyčio, kai reguliuojamos vienos arba kitos šakos srovės, matematinės išraiškos. Gautos išraiškos leidžia nustatyti reikiamą srovės reguliavimo skilčių skaičių tam, kad gauti užduotą skiriamąją gebą. Nustatyta, kad paprastesnė išraiška ir tiesinė priklausomybė gaunama, kai srovė yra reguliuojama šakoje, kurioje yra įjungtas kompensacinis jutiklis, todėl tikslinga reguliuoti šią srovę. Parodyta, kad schema su vienu srovės šaltiniu yra mažiau jautri srovės šaltinio dreifams.
4. Parodyta, kad balansuojamose varžų mažų pokyčių matavimo schemose su srovės šaltiniais galima naudojami 2–3 skiltimis mažiau turintys skaitmeniniai-analoginiai keitikliai tai pačiai skiriamajai gebai pasiekti, kaip balansuojamuose Vitstono tilteliuose ir 8–12 skiltimis mažiau turintys skaitmeniniai-analoginiai keitikliai nei nebalansuojamuose tilteliuose.
5. Pasiūlyta konstrukcijų deformacijų matavimo įrenginio schema su dviem srovės skaitmeniniais-analoginiais keitikliais, kurie yra viename kristale, maitinami iš vieno atraminės įtampos šaltinio, todėl

vieno ir kito skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo srovės nestabilumai bus beveik vienodi. Išvesta jutiklio varžos pokyčio kodo išraiška, kurioje kodas yra tiesiog proporcingas jutiklio varžos pokyčiui, o skaitmeninių-analoginių keitiklių srovių nevienodumas yra kompensuotas ir neturi įtakos nustatymo rezultatams.

6. Pasiūlyta konstrukcijų deformacijų stebėjimo įrenginio schema su trimis srovės skaitmeniniais-analoginiais keitikliais. Joje trečiasis skaitmeninis-analoginis keitiklis naudojamas srovės balansavimui, todėl jo pradinis ir deformacijos nustatymo kodai apsprendžia deformacijos nustatymo diapazoną. Tokia schema pagal tiriamos konstrukcijos medžiagą leidžia nustatyti tai medžiagai ar jutikliams tinkamą žadinimo srovę ir eliminuoja stebėsenos nuokrypas dėl konstrukcijos savybių ar jutiklio varžos kitimo iššaukto jutiklio kaitimo; leidžia lanksčiai (programiniu nustatymu) keisti matavimų diapazoną ir skyrą; leidžia nustatyti dideles deformacijas su didele skyra (tam atitinkamai nustatant antrojo skaitmeninio-analoginio keitiklio tiekiamą srovę).

Konstrukcijų deformacijų stebėsenos įrenginių modeliavimas ir tyrimas

Kaip buvo nustatyta 2 skyriuje, konstrukcijų deformacijų nustatymui tiek laboratorinėmis sąlygomis, tiek jų konstrukcijų stebėsenai yra reikalinga pakankamai tiksli įranga. Ten pat buvo pasiūlytos ir išanalizuotos naujų įrenginių su srovių balansavimų schemos. Modeliavimo tikslas buvo patikrinti pasiūlyto konstrukcijų deformacijų stebėjimo (varžų mažų pokyčių nustatymo) balansuojant sroves įrenginių analizės teisingumą, gautas teorines išvadas, bei nustatyti įrenginių atskirų elementų parametrų ir aplinkos sąlygų pokyčių bei trukdžių įtaką įrenginių darbui. Įvertinti šių veiksmų įtaką darant teorinę analizę yra pakankamai sudėtinga. Dėl šios priežasties buvo sudaryti kompiuteriniai tiriamųjų dviejų įrenginių modeliai ir atliktas jų darbo imitavimas, keičiant įrenginių elementų parametrus bei imituojant aplinkos sąlygų ir jų sukeltų trukdžių pokyčius ir atliktas jų palyginimas.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Masiulionis 2008, Masiulionis *et al.* 2011).

3.1. Deformacijų stebėsenos įrenginių kompiuterinis modeliavimas

Pasiūlyto skaitmeninio srovių balansavimo su SAK įrenginio veikimui patikrinti EWB 5.12 programavimo paketu buvo sudarytas kompiuterinis balansuojamos grandinės su dviem srovės šaltiniais modelis (3.1 pav.). Schemoje dviejų srovės šaltinių schemos sudarytos iš operacinių stiprintuvų OS1, OS2 su atitinkamomis varžomis (R_2 , $RA1$ bei R_5 , $RA2$), srovės dydžio reguliavimui prie abiejų šaltinių įėjimų įjungti SAK (DD1, DD2), įtempio jutiklius imituoja potenciometrai R_{j1} ir R_{j2} , kuriuos reguliuojant galima imituoti jutiklių varžų pokyčius. Pakeitus vieno potenciometro varžą kito atžvilgiu, schema išsibalansuoja ir atsiranda disbalanso įtampa U_2 . Buvo modeliuojama, kaip priklauso skaitmeninio srovės reguliavimo kodas atsiradus jutiklio varžos R_{j1} pokyčiui. Pakeitus varžos R_{j1} dydį, schema buvo balansuojama (U_2 nustatoma lygi nuliui), keičiant vieno arba kito srovės šaltinio srovės dydį. Tai buvo pasiekama keičiant iš pradžių vieno (DD1) po to kito SAK (angl. DAC) (DD2) valdymo kodus. Keičiant valdymo kodą, kinta SAK išėjimo įtampa, o tuo pačiu ir srovės šaltinio srovė. Tuo pačiu kinta ir įtampos kritimas grandinės varžuose (pvz., R_{j2} , R_5 , $RA2$), kinta ir įtampa U_2 . Modeliavimas parodė, kad pakeitus matavimo jutiklio R_{j1} dydį, keičiant tiek vie-

3.1 pav. Srovių balansavimo įrenginio kompiuterinio modelio schema
Fig. 3.1. Structure diagram of computer-based model of balancing currents device

no tiek kito SAK valdymo kodą, galima subalansuoti schemą, kad įtampa U_2 būtų artima (leidžiamos nuokrypos ribose) nuliui (Masiulionis 2008). Modeliavimo metu nustatyta (3.2 pav.), kad tiek reguliuojant SAK DD1, tiek ir SAK DD2 schema gali būti subalansuota, o priklausomybės tarp kodo ir jutiklio R_{j1} varžos pokyčio yra tiesinės. Tuo būdu tyrimas parodė, kad galima realizuoti mažų varžų pokyčių nustatymą naudojant pasiūlytą srovių balansavimo įrenginį.

Tačiau vykdant šios schemos tyrimus realiame sumontuotame makete, buvo nustatyta, kad naudojami srovės šaltiniai turi nepakankamą stabilumą laiko bėgyje, todėl ši schema toliau tiriama nebuvo.

Po to buvo modeliuojama naudojant kito tipo srovės šaltinius (Carter 2001). Jų eksperimentinis tyrimas parodė, kad jo srovių stabilumo laiko bėgyje charakteristikos tenkina reikalavimus keliamus šiems įrenginiams. Programiniu paketu Multisim11 buvo sudarytas konstrukcijų deformacijų stebėjimo (varžų mažų pokyčių nustatymo) balansuojant sroves su dviem srovės šaltiniais modelis (3.3 pav.). Jame įtempio jutikliai R_{j1} ir R_{j2} taip pat pakeisti potenciometais. Pirmasis srovės šaltinis SS1 yra maitinamas iš atraminio įtampos šaltinio U1.

Dešimtainis

SAK kodas

3.2 pav. Skaitmeninio-analoginio keitiklio nustatyto kodo dešimtainėje skaičiavimo sistemoje priklausomybė nuo aktyviojo jutiklio varžos pokyčio subalansavus įrenginį

Fig. 3.2. Dependence of digital-to-analog converter code in the decimal counting-system on gauge resistance on balanced device

Skaitmeninis-analoginis keitiklis (SAK) U2 maitina antrąjį srovės šaltinį (SS2). Multisim11 esančio SAK veikimui yra įjungti du papildomi šaltiniai V1 ir

V2. Prie SAK valdymo įėjimų jungikliais S0–S15 prijungiant loginio 1 (šaltinis V3) ar loginio 0 (nulinis laidininkas) valdymo įtampa galima keisti srovės šaltinio SŠ2 atraminės įtampos dydį, o tuo pačiu ir šio šaltinio srovės stiprį. Pakitus srovės stipriui per jutiklį R_{j2} , pakis įtampos kritimas joje, o tuo pačiu ir disbalanso įtampa V_{sk} .

3.3 pav. Konstrukcijų deformacijų stebėjimo (varžų mažų pokyčių nustatymo) balansuojant sroves su dviem srovės šaltiniais kompiuterinio modelio schema

Fig. 3.3. Circuit of computer-based model of balancing currents methods with two current sources for monitoring of small resistance changes

Pirmiausia buvo patikrinta srovės balansavimo kodo priklausomybė nuo jutiklio varžos pokyčio ir nustatytas jutiklio varžos pokyčio diapazonas, kuriam esant įrenginys yra balansuojamas. Tam buvo keičiama potencimetro R_{j1} (realiame įrenginyje tai atitiktų aktyvųjį įtempio jutiklį) varžos dydis, taip imituojant

konstrukcijos deformacijos pokytį. Keičiant SAK U2 valdymo kodą, o tuo pačiu ir peties srovę, buvo pasiekama, kad V_{sk} taptų artima nuliui. Subalansavus įrenginį nustatoma SAK kodo vertė, pakeičiama potenciometro varžos vertė ir balansavimas kartojamas.

Modeliavimo metu buvo reguliuojama 10 SAK skilčių. 3.4 paveiksle pateiktas SAK valdymo kodo reikšmių dešimtainėje skaičiavimo sistemoje kodo priklausomybė nuo jutiklio R_{j1} varžos pokyčio dydžio. Matyti, kad SAK valdymo kodas yra tiesiog proporcingas jutiklio varžos pokyčiui, ji yra tiesinio pobūdžio, kaip ir buvo analitiškai nustatyta 2 skyriuje. SAK kodo reikšmė nustačius $\Delta R_{j1} = 0$, rodo pradinį schemos disbalansą dėl jutiklių varžų ir srovės šaltinių pradinį srovių nevienodumo.

Dešimtainis
SAK kodas

3.4 pav. Skaitmeninio-analoginio keitiklio valdymo kodo dešimtainėje skaičiavimo sistemoje priklausomybė nuo jutiklio varžos pokyčio

Fig. 3.4. Dependence of digital-to-analog converter control code in the decimal counting system on gauge resistance changes

Gauti modeliavimo rezultatai rodo, kad naudojant 10 skilčių SAK, įrenginys yra dar subalansuojamas, kai jutiklio varžos pokytis yra $> 33\%$. Matyti, kad 10 skilčių SAK užtenka pasiekti įrenginio balansavimą užduotam varžos pokyčių diapazonui kas patvirtina antrame skyriuje paskaičiuotą reikiamą skaitmeninio reguliavimo srovės šaltinio skilčių skaičių. Taigi, galima daryti išvadą, kad įrangą užtikrina pokyčių nustatymą diapazone reikalingame laboratorinei įrangai. Naudoto SAK žemiausiosios valdymo skilties perjungimas iš loginio 0 į loginio 1 būseną sumažina antrojo srovės šaltinio srovę $1 \mu A$, o disbalanso įtampą V_{sk}

keičia 176 μV . Perjungus visas SAK valdymo skiltis iš loginio 0 į loginio 1 būseną, antrojo srovės šaltinio srovė sumažėja 1,441 mA, disbalanso įtampa padidėja 173 mV.

Kadangi šie įrenginiai gali būti naudojami ne tik laboratorijose, bet ir esant sudėtingomis oro sąlygomis (pvz., žiemą, nešildomose patalpose) stebėti statinių (ypač tiltų, lengvų konstrukcijų pastatų ir pan.) būseną jų eksploatacijos metu, todėl svarbu nustatyti įrenginių parametrų priklausomybę nuo šaltinius sudarančių elementų parametrų nestabilumo. Buvo tiriama įrenginio išėjimo srovės stabilumo priklausomybė nuo įrenginio elementų parametrų pokyčio kintant įrenginio temperatūrai. Įrenginį sudaro du identiški srovės šaltiniai, kurie yra sudaryti iš vienodų elementų: operacinių stiprintuvų OPA277UA, balansuojančių stiprintuvus potenciometrų, filtravimo kondensatorių ir srovės darbo režimą užtikrinančių varžų R_0 – R_3 pirmame srovės šaltinyje (SŠ1), bei analogiškų varžų R_4 – R_7 antrame srovės šaltinyje (SŠ2). Balansavimo metu tikrinamas jų sukurtas įtampų kritimų skirtumas. Todėl veikiant aplinkos sąlygų pokyčiams bei dėl to keičiantis elementų parametrų dydžiams, srovės šaltinių išėjimo srovių dydžiai turėtų kisti vienodai. Tačiau dėl galimo elementų temperatūrų ir parametrų kitimo kintant temperatūrai nevienodumo gali atsirasti nustatomų deformacijų nuokrypos. Buvo tiriama analogiškų varžų abiejuose srovės šaltiniuose pokyčių įtaka. Tam buvo keičiami tik šaltinio SŠ1 varžų dydžiai, o šaltinio SŠ2 varžų dydžiai palikti pastovūs. Gautos disbalanso įtampų verčių priklausomybės nuo R_0 – R_3 varžų pokyčio dydžio pateiktos 3.5 paveiksle.

Matyti, kad gautos disbalanso įtampų priklausomybės yra tiesinės, o leistina disbalanso įtampa ($\pm 90 \mu\text{V}$) gaunamas kai R_2 varžos pokytis antro srovės šaltinio analogiškam varžui R_6 sudaro $-\pm 1,2 \Omega$ (t. y. $\pm 0,12 \%$), varžų R_1 ir R_3 varžų pokytis antro srovės šaltinio analogiškiems varžams R_5 ir R_7 sudaro $-\pm 0,1 \Omega$ (t. y. $\pm 0,01 \%$), ir R_2 varžos pokytis antro srovės šaltinio analogiškam varžui R_4 sudaro $-\pm 0,1 \Omega$.

Nustatyta, kad įrenginys labiausiai jautrus varžų R_1 ir R_5 , R_3 ir R_7 bei R_2 ir R_4 tarpusavio pokyčiams. Todėl šių varžų temperatūrinis stabilumas turi būti labai geras. Reikia pažymėti, kad pradinis šių varžų dydžių nevienodumas įtakos įrenginio darbui neturi, nes yra eliminuojamas vykdant skirtuminius matavimus. Tačiau akivaizdu, kad, kai srovės šaltiniai ir jų elementai yra vienodi, elementų parametrų tarpusavio pokyčiai, keičiantis aplinkos sąlygoms, neišsaus tokio įtampų skirtumo V_{sk} pokyčio.

Buvo atliktas schemos modeliavimas, kai imituojamas pirmo srovės šaltinio R_0 – R_3 varžų pokytis dėl besikeičiančios jų temperatūros, o antrojo šaltinio temperatūra nekinta. Priimta, jog srovės šaltinių varžai yra pagaminti metalo plėvelės (angl. "*metal film*") technologijos būdu, kurių temperatūrinis koeficientas $0,000050 \text{ } 1/^\circ\text{K}$, o nominali darbo temperatūra 20°C . Gauta disbalanso įtampos V_{sk} priklausomybė nuo pirmo srovės šaltinio varžų R_0 – R_3 temperatūros pokyčio,

3.5 pav. Disbalanso įtampa priklausomybės nuo varžų R_0 – R_3 varžų dydžio
Fig. 3.5. Dependences of disbalance voltage on resistance values of resistors R_0 – R_3

kai antrojo šaltinio varžų temperatūra lygi nominaliajai ir nekinta (3.6 pav.). Ši priklausomybė yra tiesinė ir parodo, kad pirmo srovės šaltinio varžų temperatūrai keičiantis iki 22 °C, o antro srovės šaltinio varžų temperatūrai išliekant pastoviai ir lygiai nominaliajai, dar neperžengiama leistina $\pm 90 \mu\text{V}$ disbalanso įtampa V_{sk} . Pasiekus 23 °C temperatūrą (t.y. 3-jais laipsniais didesnę nei nominali) ir didesnę, ši riba yra viršijama. Matyti, kad varžų temperatūrai tapus skirtingai 3 °C, pasiekama laboratorinės įrangos ($\pm 90 \mu\text{V}$) skytos įtampa.

Tačiau, reikia atsižvelgti į tai, jog srovės šaltiniai yra montuojami vienas šalia kito, vienoje spausdintinėje plokštėje. Todėl juos veikianti aplinkos temperatūra turėtų skirtis nedaug ir srovės šaltinių varžų temperatūros turėtų skirtis nedaug. Be to, pageidautina, kad įrenginio konstrukcijoje srovės šaltinių SŠ1 ir SŠ2 visi elementai būtų patalpinti viename pasyviame termostate. Šiuo atveju elementų temperatūra kis beveik vienodai ir nuokrypos bus tenkinančios reikalavimų nustatytas vertes. 3.6 paveiksle pateikti duomenys rodo, kad tik šių varžų temperatūrai tapus skirtinga 2 °C, nuokrypos disbalanso įtampa viršys užduotąjį $\pm 90 \mu\text{V}$ dydį, todėl galima teigti, jog tokia schema yra stabili šių varžų temperatūros kaitai.

3.6 pav. Disbalanso įtamos priklausomybė nuo pirmo srovės šaltinio varžų R_0-R_3 temperatūros

Fig. 3.6. Dependence of disbalance voltage on temperature of resistors R_0-R_3 in first current source

Atskirai buvo tiriama, kaip disbalanso įtampa V_{sk} priklauso nuo varžų R_3 ir R_7 temperatūros kitimo, nes buvo nustatyta, kad jų pokyčiai labiausiai įtakoja šios įtamos dydį. Todėl tikslinga ištirti, kaip kinta išėjimo įtampa esant skirtingoms šių varžų temperatūrinėms sąlygoms.

Varžai R_3 ir R_7 parinkti pagaminti iš metalo plėvelės (angl. "metal film"), kurių temperatūrinis koeficientas (TC1) $0,000050 \text{ } 1/^{\circ}K$. Tačiau dėl aplinkos temperatūrų, veikiančių šiuos varžus, skirtumo, jų varžų dydžių priklausomybė nuo temperatūros skirsis. Priimta, kad antrojo srovės šaltinio varžo R_7 temperatūrinis koeficientas, dėl varžų temperatūrų skirtumo, skiriasi nuo varžo R_3 temperatūrinio koeficiento ir lygus

$$TC1_{R7} = k \cdot TC1_{R3}, \quad (3.1)$$

čia k – tapatumo koeficientas.

Taip pat priimama: nominali temperatūra – $+20^{\circ}C$, o aparatūros darbo sąlygos kinta ribose nuo $-30^{\circ}C$ iki $+30^{\circ}C$. Gautos disbalanso įtamos V_{sk} priklausomybės nuo varžų R_3 ir R_7 temperatūros pateiktos 3.7 paveiksle.

3.7 pav. Disbalanso įtampos priklausomybės nuo varžų R_3 ir R_7 temperatūros esant skirtingiems jų temperatūrų tapatumo koeficientams

Fig. 3.7. Dependence of disbalance voltage on temperature of resistors R_3 and R_7 with different temperature identity coefficients

Iš gautų priklausomybių matyti, kad, kai $k = 0,95\text{--}1,05$ disbalanso įtampa V_{sk} neviršija leistinos $\pm 90\text{ }\mu\text{V}$ ribos visame temperatūrų nuo -30 iki $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ diapazone, o kai $k = 0,85\text{--}1,15$ – ši riba viršijama pasiekus $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir žemesnę aplinkos temperatūrą. Matyti, kad laboratoriniams tyrimams (aplinkos temperatūros kitimo diapazone nuo $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$) bei statinių ir konstrukcijų stebėsenai (aplinkos temperatūros kitimo diapazone tarp -30°C ir $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$) skirtuose įrenginiuose, disbalanso įtampos nuokrypos dėl temperatūros kitimo pasėkoje gaunamo varžų R_7 ir R_3 dydžių skirtumo neviršys užduotų ribų, kai šių varžų temperatūros tapatumo koeficientas yra lygus $k = 0,85\text{--}1,15$. Todėl galima daryti išvadą, kad esant panašiam ir kitų srovės šaltinių varžų temperatūrų tapatumo koeficientų dydžiui, atsirandančios nuokrypos neviršys leidžiamų ribų. Kaip minėta aukščiau, temperatūros įtaka dar gali būti sumažinta naudojant tiek pasyviuosius tiek aktyviuosius termostatus.

3.2. Įtempių jutiklių temperatūrinės priklausomybės įtaka

Aplinkos temperatūra veikia ne tik pačius matavimo įrenginius, bet ir įtempių jutiklius. Realiuose įrenginiuose stebint realių konstrukcijų deformacijas, įtempių jutikliai gali veikti labai skirtingose sąlygose. Pavyzdžiui, stebėsenos įrenginiuose jutikliai turi veikti tiek žiemą, tiek ir vasarą. Todėl reikia ištirti ir temperatūros iššauktus įtempių jutiklių varžų pokyčius bei šių pokyčių įtaką disbalanso įtampos dydžiui. Tolimesni tyrimai skirti įtempio jutiklių temperatūros įtakos konstrukcijų deformacijų stebėjimo (varžų mažų pokyčių nustatymo) srovių balansavimo įrenginiuose.

Disbalanso įtampos dydžiui nuo įtempio jutiklių varžų temperatūros buvo tiriama naudojant įrenginio modeliavimo schemą, pateiktą 3.8 paveiksle, kurioje taip pat yra įvertintos jutiklių jungiamųjų laidų varžos. Modeliuojant schemą, buvo įvertintas įtempių jutiklių R_{j1} ir R_{j2} temperatūrinis koeficientas ($TC1$). Įtempio jutikliai dažniausia gaminami iš konstantano, kurio temperatūrinis koeficientas lygus $0,000008\ 1/^{\circ}K$, ir kuris buvo priimtas tyrime. Priimta, jog darbo temperatūra yra lygi $20\ ^{\circ}C$.

Kompiuteriniame modelyje imituotos situacijos ir gautos priklausomybės, kai įtempio jutikliai nėra vienodose aplinkos sąlygose. Priimta, kad šie jutikliai yra iš to paties konstantano su vienodu temperatūriniu koeficientu ($TC1$), bet jie yra veikiami skirtingų aplinkos temperatūrų (pvz.: blogai ar neteisingai išdėsčius aktyvųjų ir kompensacinių jutiklius), tada jutiklio $TC1_{Rj1}$ lygus

$$TC1_{Rj1} = k \cdot TC1_{Rj2}, \quad (3.2)$$

čia k – temperatūrų tapatumo koeficientas.

Priimta, kad įtempių jutiklių temperatūra kinta nuo $-30\ ^{\circ}C$ iki $+30\ ^{\circ}C$. Disbalanso įtampos dydžio priklausomybės nuo temperatūros esant skirtingiems temperatūros tapatumo koeficientams pateiktos 3.9 paveiksle.

Iš jų matyti, kad atvejais kai temperatūrų tapatumo koeficientais k kinta nuo 0,85 iki 1,15 visame bandytų temperatūrų diapazone yra neviršijama leistina $90\ \mu V$ disbalanso įtampos V_{sk} skyros riba. Todėl galima teigti, kad esant tokioms aktyviojo ir kompensacinio jutiklių aplinkos temperatūroms, schemos nuokrypos neviršys užduotų ribų.

Taip pat 3.9 paveiksle yra pateikta disbalanso įtampos priklausomybė nuo temperatūros, kai jutiklis R_{j2} veikiamas pastovios $20\ ^{\circ}C$ temperatūros, o jutiklis R_{j1} – nuo $-30\ ^{\circ}C$ iki $+30\ ^{\circ}C$ temperatūrų, $TC1_{Rj1}=0,5 \cdot TC1_{Rj2}=0,000004\ 1/^{\circ}K$, $TC1_{Rj2} = 0,000008\ 1/^{\circ}K$, bei priklausomybė kai $TC1_{Rj1}=TC1_{Rj2}=0,000008\ 1/^{\circ}K$. Iš jų matyti, kad esant vienodiems temperatūriniais koeficientams, disbalanso įtampa V_{sk} peržengia leistiną $90\ \mu V$ tarp srovės šaltinių ribą, kai temperatūra yra

3.8 pav. Kompiuterinio modelio balansuojant sroves schema

Fig. 3.8. Circuit of computer-based model of balancing currents

1 °C ir žemesnė. Tai parodo, kad esant vienodų parametrų įtempių jutikliams, laboratoriniams matavimams skirtos įrangos disbalanso įtampos V_{sk} riba viršijama temperatūrai skiriantis 9 °C, o tuo atveju, kai temperatūrų tapatumo koeficientas lygus 0,5 – kai temperatūra skirsis 38 °C.

Buvo priimta pastovi pirmojo jutiklio R_{j1} temperatūra ir tiriamas įrenginio darbas keičiant antrojo jutiklio R_{j2} temperatūrą. Tyrimo metu gauta disbalanso įtampos V_{sk} priklausomybė nuo temperatūros (3.10 pav.).

3.9 pav. Disbalanso įtampos priklausomybės nuo įtempio jutiklių temperatūros prie skirtingų temperatūrinio tapatumo koeficientų

Fig. 3.9. Dependence of disbalance voltage on temperature of strain gauge with different temperature identity coefficients

Modeliavimo metu gauta (3.10 pav.) disbalanso įtampos V_{sk} priklausomybė parodo, kad jutikliui R_{j2} pasiekus $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrą, kai R_{j1} temperatūra yra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, dar neperžengiama leistina $90\text{ }\mu\text{V}$ disbalanso įtampos V_{sk} skyra laboratorinei įrangai ir $900\text{ }\mu\text{V}$ – stebėsenos įrangai. Toliau didinant jutiklio temperatūrą viršijama laboratorinės įrangos disbalanso įtampa V_{sk} tarp srovės šaltinių riba. Jei temperatūra yra mažinama nuo vardinės, tada gaunama priklausomybė simetriška aprašytajai koordinačių pradžios ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) atžvilgiu. Tuo būdu, galima teigti, kad tais atvejais, kai vieno jutiklio temperatūra kinta $\pm 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ kito jutiklio atžvilgiu, tai matavimo nuokrypa neviršys laboratoriniams tikslams skirto įrenginio skiriamosios gebos. Galima teigti, kad tais atvejais, kai vieno jutiklio temperatūra kinta $\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ kito jutiklio atžvilgiu, tai matavimo nuokrypa neviršys stebėsenos tikslams skirto įrenginio skiriamosios gebos. Todėl, jei temperatūrų skirtumas tarp matavimo jutiklio ir įrenginio bazinės dalies (ar kompensacinio jutiklio tvirtinimo vietos) neviršija šių dydžių, tai įrenginyje gali būti naudojamas tik vienas, įrenginio bazėje ar ant matavimo konstrukcijos sumontuotas kompensacinis jutiklis visiems matavimo kanalams.

3.10 pav. Disbalanso įtampos priklausomybė nuo įtempio jutiklio R_{j2} varžos keičiant jo temperatūrą

Fig. 3.10. Dependence of disbalance voltage on changing resistance of strain gauge R_{j2} temperature

Jeigu ši sąlyga nėra išpildoma, kompensacinis jutiklis turi būti montuojamas šalia arba virš aktyviojo jutiklio. Tada aktyvusis jutiklis, matuojantis varžos pokytį (konstrukcijos deformaciją), yra tvirtinamas išilgai deformacijos veikiamai jėgai, o kitas kompensacinis, kompensuojantis temperatūros įtaką – statmenai ant pirmojo, todėl juos veikia praktiškai ta pati aplinkos temperatūra. Gauta priklausomybė nuo temperatūros parodo, kad modeliuojama schema yra gana stabili įtempimų jutiklių temperatūrų skirtumui.

Jungiamųjų laidų įtaka yra analogiška jutiklių varžų pokyčiui, taigi ir temperatūros pokytis iššaukia tokį pat poveikį disbalanso įtampai, kaip ir jutiklių varžų pokytis dėl aplinkos temperatūros pokyčio. Vario $TC1 = 0,0039 \text{ } 1/^{\circ}\text{K}$, o 10 m ilgio vytos poros kabelio varža sudaro $R_{\text{laid}} = 1,758 \text{ } \Omega$. Taigi, pakitus temperatūrai $\pm 30 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, varža pakis $\Delta R_{\text{laid}} = 0,412 \text{ } \Omega$, o tai nesukels disbalanso įtampos pokyčio. Be to, abiejų pečių laidininkai yra vienodose temperatūrinėse sąlygose.

3.3. Pramoninių trukdžių įtakos imitavimas

Daugiataškiai konstrukcijų deformacijų stebėjimo įrenginiai gali būti naudojami didelių konstrukcijų, statinių būsenų stebėjimui ir jų deformacijų dydžių nustatymui. Dažniausia konstrukcijų deformacijų stebėjimo (varžų mažų pokyčių nustatymo) jutikliai yra išdėstomi vienokiu ar kitokiu atstumu nuo matavimo įrangos, todėl pramoninio dažnio trukdžiai daugiau ar mažiau veikia jungiamuosius laidininkus, o tuo pačiu gali veikti ir nustatymo rezultatą. Todėl svarbu įvertinti pramoninio dažnio trukdžių įtaką konstrukcijų deformacijų (varžų mažų pokyčių) nustatymui. Buvo sudarytas konstrukcijų deformacijų stebėjimo balansuojant sroves įrenginio modelis, kai veikia pramoniniai trukdžiai. Trukdžio signalą generuoja kintamosios įtampos šaltinis, kuris prijungtas prie įtempio jutiklių R_{j1} ir R_{j2} per potenciometrus R21 ir R22. Lygiagrečiai voltmetrui V_{sk} prijungtas oscillografas XSC1, kuriame fiksuojama skirtuminė trukdžių, generuotų prijungimo laidininkuose, įtampa siunčiama į balansavimo nustatymo komparatorių.

Potenciometrų R21 ir R22 varžų keitimas įgalina generuoti skirtingo dydžio trukdžius įtempių jutiklių jungiamuosiuose laiduose. Nustačius vienodas šių potenciometrų varžas, jungiamuosiuose laiduose generuojamos vienodo dydžio trukdžio įtampos. Sudaryta tokia įrenginio schema (jutikliai maitinami pastovia srove, naudojamas ekranuotas „vytos poros“ tipo jutiklių jungiamųjų laidų kabelis ir operacinis stiprintuvas, kurio įėjimai jungiamuoju kabeliu sujungti su aktyviuoju ir pasyviuoju jutikliais), kad sinfaziniai trukdžiai generuojami matavimo grandinėje būtų kaip galima mažesni ir eliminuojami. Modeliavimo metu buvo keičiamas kintamos įtampos šaltinio generuojamos įtampos dydis ir keičiama tik potenciometro R21 varža. Potenciometro R21 varžos santykis su nustatytu potenciometro R22 varžos dydžiu yra koeficientas k_s , įvertinantis trukdžių nesinfaziškumą. Keičiant trukdžio signalo įtampą ir koeficiento k_s dydį gautos disbalanso įtampos ΔV_{sk} priklausomybės nuo trukdžių generuojamų jutiklių jungiamuosiuose laiduose ir koeficiento k_s dydžio (3.11 pav.).

Iš 3.11 paveikslą matyti, kad įtampų skirtumo ΔV_{sk} priklausomybės nuo koeficiento k_s yra tiesinio pobūdžio. Kai koeficientas k_s yra lygus 1, įtampų skirtumas ΔV_{sk} lygus nuliui, nepriklausomai nuo prijungto trukdžio įtampos dydžio ir deformacijų nustatymo nuokrypos neatsiranda. Keičiant trukdžių veikiančių viename ir kitame jungiamuosiuose laidininkuose dydį, ΔV_{sk} didėja. Be to, kuo didesnė trukdžio įtampa, tuo koeficiento k_s turi būti mažesnis, norint neperžengti laboratorinės įrangos matuojamos disbalanso įtampos $\pm 90 \mu V$ skiriamosios gebos vertės. Pavyzdžiui, esant 133,5 mV indukuotam į jutiklį prijungimo laidininkus trukdžio signalui koeficiento galimos ribos yra nuo 0,9993 iki 1,0007, o

esant 267 mV indukuotam į jutiklių prijungimo laidininkus trukdžio signalui – tik nuo 0,99965 iki 1,00035. Tyrimo rezultatai rodo, kad įrenginys yra pakankamai jautrus pramoniniams ne sinfaziniams trukdžiams, todėl realiuose įrenginiuose turėtų būti skiriamas didelis dėmesys jutiklių prijungimo laidininkų ilgiui, jų tipui, pvz., naudoti „vytos poros“ ekranuotuosius kabelius, tiesimo vietai.

3.11 pav. Disbalanso įtampos vertės priklausomybės nuo trukdžių jungiamuosiuose laiduose koeficiento k_s dydžio

Fig. 3.11. Dependences of disbalance voltage on coefficient k_s of disturbances in conductive leads

Atliktas kompiuterinis konstrukcijų deformacijų stebėjimo (varžų mažų pokyčių nustatymo) balansuojant srovės modeliavimas ir tyrimas, kai veikia srovės trukdžiai. Taip pat, kaip ir ankstesniame tyrime, keičiant srovės trukdžio signalo dydį gautos disbalanso įtampos V_{sk} laiko diagramos (3.12 pav.), kai laidininkus veikia skirtingų dažnių trukdys. Šiose priklausomybėse pastebime, kad įtampų skirtumas V_{sk} yra kintamoji įtampa. Tam tikrais laiko momentais peržengiama leistina $\pm 90 \mu\text{V}$ įtampų skirtumo V_{sk} tarp srovės šaltinių riba, todėl su tokiu trukdžiu įrenginį būtų galima naudoti tik stebėjimui.

a)

b)

3.12 pav. Skirtingo dažnio srovės trukdžio signalų indukuotos disbalanso įtamos laiko diagramos

Fig. 3.12. Time chart of different frequency current disturbance signals induced disbalance voltage

Matyti, kad jungiamuosius laidininkus veikiant ne sinfaziniam trukdžiui, įrenginyje bus generuotos neleistinai didelės skirtuminės kintamojo dažnio įtamos, kurios, be papildomų apsaugos priemonių, gali generuoti neleistinai dideles nuokrypas. Todėl naudojant įrangą arti galios įrenginių generuojančių skirtingo dažnio galios signalus (pvz., dažnio keitiklių), reikia būti labai atidiems ir įvertinti šių įrenginių sukuriamus trukdžius ir jų įtaką konstrukcijų deformacijų nustatymui.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Kompiuterinis pasiūlytų konstrukcijų deformacijų nustatymo įrenginių balansuojant srovės schemas imitavimas patvirtino teorines išvadas, parodė, kad balansuojant srovės gaunami skaitmeniniai kodai proporcingi varžų (t. y. konstrukcijų deformacijų) pokyčiams, užtikrinama $\pm 28\%$ varžų pokyčių nustatymo diapazonas srovių balansavimui naudojant 8 skilčių SAK stebėsenai ir 10 skilčių – laboratorinei įrangai.
2. Vykdam kompiuterinį modeliavimą buvo nustatyta, kad didžiausią įtaką išėjimo skirtuminės įtampos nuokrypoms turi srovės šaltinių darbo režimą nustatančių varžų stabilumas, parodyta, kad naudojant temperatūros stabilizavimo priemones (pvz., pasyviuosius ar aktyviuosius termostatus) šios nuokrypos gali būti reikšmingai sumažintos. Taip esant temperatūros tapatumo koeficientui tarp 0,95 ir 1,05 disbalanso įtampos nuokrypa neviršys užduotos nuokrypos maksimalios vertės temperatūrų diapazone – $-30 - +30\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Vykdam kompiuterinį modeliavimą buvo nustatyta, kad kintant jutiklių temperatūrai, kai tapatumo koeficientas tarp jutiklių temperatūrų yra 0,5, disbalanso įtampos nuokrypa neviršys užduotos nuokrypos maksimalios vertės temperatūrų diapazone $-18 - +30\text{ }^{\circ}\text{C}$, o prie koeficientų tarp 0,85 ir 1,15 disbalanso įtampos nuokrypa neviršys užduotos nuokrypos maksimalios vertės temperatūrų diapazone $-30 - +30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šie rezultatai konkrečiais atvejais leidžia pasirinkti matavimo schemas su vienu kompensaciniu jutikliu visiems kanalams.
4. Modeliavimas parodė, kad naudojant jutiklių prijungimui ilgus jungiamuosius laidininkus pramoninių trukdžių įtaka pokyčių nustatymo nuokrypoms gali būti esminė, todėl turi būti naudojami „vytos poros“ jungiamieji laidininkai, o įrenginio schema turi efektyviai slopinti sinfazinius trukdžius.

Konstrukcijų deformacijų stebėsenos įrenginių mazgų eksperimentinis tyrimas

Eksperimentinio tyrimo tikslas buvo praktiškai patikrinti pasiūlyto srovės balansavimo įrenginių praktinį veikimą, pasiekiamą diapazoną ir pasiekiamą užduotą skiriamąją gebą tiek konstrukcijų stebėsenos tiek laboratorinei konstrukcijų deformacijų nustatymo įrangai. Eksperimentiškai buvo tikrinama ilgalaikis įrenginių stabilumas bei jų darbas imituojant realias sąlygas: jutikliams prijungti naudojant ilgus vytos poros kabelius bei kabelius veikiant stipriais pramoninio dažnio elektromagnetiniais trukdžiais.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Masiulionis *et al.* 2008, Masiulionis 2010, Masiulionis *et al.* 2011).

4.1. Konstrukcijų deformacijų stebėsenos įrenginių mazgų eksperimentinis tyrimas

Eksperimentiniam pasiūlyto skaitmeninių srovių balansavimo įrenginių veikimo ir darbo stabilumo patikrinimui buvo pagaminti ir ištirti keli maketai. Pirmajame makete (4.1 pav.) kaip ir kompiuteriniame modelyje srovės šaltinius sudarė opera-

ciniai stiprintuvai U1 ir U2, įtempių jutiklius imitavo potenciometrų R_2 ir R_5 bei varžai R_3 ir R_6 , o įtampos kritimas varžuose R_4 ir R_7 užtikrina srovės šaltinio pastovią srovę. Antrojo srovės šaltinio atraminę įtampą sudaro pirmojo srovės šaltinio išėjimo srovės įtampos kritimas varže R_4 . Tuo būdu, pakitus pirmojo šaltinio srovei, pakis antrojo šaltinio atraminė įtampa ir pakis jo išėjimo srovė taip, kad abiejų šaltinių išėjimo srovės išliks vienodos. Grandinė buvo balansuojama keičiant potenciometrų R_8 – R_{10} varžų dydį ir tuo pačiu antrojo šaltinio srovę.

4.1 pav. Srovių balansavimo įrenginio eksperimentinio maketo schema

Fig. 4.1. Circuit of experimental model of balancing currents device

Eksperimentų metu buvo keičiamas aktyvųjį jutiklį imituojančio potenciometro R_2 varžos dydis ir keičiant antrojo šaltinio atraminę įtampą (potenciometrų R_8 – R_{10}) pasiekiamas schemos balansas ($V4 \cong 0$). Atlikus seriją matavimų nustatyta antrojo šaltinio generuojamos srovės I_2 priklausomybė nuo jutiklio R_2 varžos (jutiklio R_{j1} varžos) (4.2 pav.). Matyti, kad gauta priklausomybė yra tiesinė, kas patvirtina gautus teorinius rezultatus. Atliktas tyrimas parodė, kad schemos ilgalaikis srovės šaltinių generuojamos srovės stabilumas (įtampos V4 nestabilumas) didesnis už $\pm 0,75 \mu A$. Nustatyta, kad naudojami srovės šaltiniai su operaciniais stiprintuvais OP-07E, kurių stiprinimo koeficientas $K_U = 316\,000$, neužtikrina reikiamo srovės stabilumo laboratoriniams įrenginiams. Todėl maketo (4.3 pav.) srovės šaltiniuose buvo panaudoti kiti OS (OPA 2277,

$K_U = 10\,000\,000$), bei sudaryta kita atraminės įtamos antrajam šaltiniui formavimo schema su trečiuoju OS.

4.2 pav. Srovės I_2 priklausomybės nuo R_2 varžos (jutiklio R_{j1} varžos)
Fig. 4.2. Dependence of current I_2 on R_2 resistance (resistance of gauge R_{j1})

4.3 pav. Srovių balansavimo konstrukcijų deformacijų stebėjimo įrenginio eksperimentinio maketo schema

Fig. 4.3. Circuit of experimental model of balancing currents device for monitoring of constructions strains

4.4 pav. Eksperimentinio maketo srovių priklausomybės nuo įtampos U_2

Fig. 4.4. Dependence of currents on voltage U_2 in experimental model

Antrojo šaltinio atraminė įtampa – tai pirmojo šaltinio srovės sukurtas įtampos kritimas varžuose R_3 ir R_4 . Antrajam srovės šaltiniui atraminė įtampa nustatyta didesnė (įtampos kritimas varžuose R_3 ir R_4) už pirmojo šaltinio įtampą (įtampos kritimas varžoje R_4), todėl ši schema leidžia nustatyti ne tik tempimo bet ir gniuždymo deformacijas (t. y. tiek teigiamus, tiek neigiamus jutiklio varžos pokyčius). Atraminė įtampa antrajam srovės šaltiniui gaunama panaudojus įtampos kartotuvą (U_3). Tokiu būdu, dėl išorės poveikių, pakitus I_1 vertei, pakis ir I_2 vertė ir bus išvengta srovės pokyčio įtakos matavimo rezultatams. Makete reguliavimo SAK pakeistas potenciometru R_5 . Makete, įtempių jutiklius R_{j1} ir R_{j2} , taip pat imituoja potenciometrai. Kai R_{j1} ir R_{j2} varžos nelygios atsiranda disbalanso įtampa V . Keičiant potenciometro R_5 varžą, ši įtampa nustatoma lygi nuliui.

Eksperimento metu buvo tikrinama srovių šaltinių srovių I_1 , I_2 ir jų skirtumo $I_1 - I_2$ priklausomybė nuo įtampos U_2 keičiant R_{j1} vertę. Gauta įrenginio pečių srovių priklausomybė nuo įtampos, kurią matuoja voltmetras V_2 (4.4 pav.).

Eksperimento rezultatai rodo, kad keičiant varžos R_{j1} dydį, t. y. įtampą U_2 , plačiose ribose, srovės I_1 dydis kinta $\pm 13 \mu A$ ribose, o srovės I_2 dydis reguliuojamas pagal I_1 kitimą, taip kad srovių skirtumas $I_1 - I_2$ sudaro tik $\pm 3,5 \mu A$, tai sudarys $\pm 350 \mu V$ disbalanso įtampos pokytį. Reiškia pasiūlyta schema užtikrina stabilų stebėsenos įrangos darbą visame jutiklio varžos kitimo diapazone.

4.2. Pramoninių trukdžių įtakos laboratorinei įrangai eksperimentiniai tyrimai

Aukščiau tirti maketai dėl esamo temperatūrinio srovės šaltinių nestabilumo ilgalaikiuose bandymuose netenkina laboratoriniams įrenginiams keliamų reikalavimų. Buvo sumontuotas eksperimentinis maketas ir ištirtas įrenginio veikimas naudojant kitą srovės šaltinio schemą (4.5 pav.). Maketo schema pateikta 4.6 paveiksle. Srovės šaltinių schemeje jutikliai jungiami į korpusą, todėl supaprastėja jutiklių prijungimas. Šio maketo eksperimentinių tyrimų metu buvo tiriamas ilgalaikis rezultatų stabilumas, kai ilgu (~ 10 m) vytos poros kabeliu yra prijungti jutiklius imituojantys varžai ir kabelio poveikis rezultatų stabilumui. Be to vytos poros kabelis buvo patalpintas kartu su didelės srovės (~ 10 A) pramoninio dažnio laidininku ir tiriama elektromagnetinio trukdžio įtaka deformacijų stebėjimo rezultatams. Gauti tyrimo rezultatai šiems atvejams pateikti 4.7 paveiksle.

4.5 pav. Srovės šaltinio schema

Fig. 4.5. Circuit of current source

Matyti, kad skirtuminės srovės nestabilumas šiame makete sudaro $\pm(20...50) \mu\text{A}$, tai sudarys $\pm(20...50) \mu\text{V}$ disbalanso įtampos pokytį. Tuo būdu, ši schema potencialiai yra tinkama laboratorinei įrangai, be to galima daryti išvadą, kad ilgi jutiklių prijungimo vytos poros kabeliai ir juos veikiantys elektromagnetiniai trukdžiai nesukūrė pastebimų matavimų nuokrypų. Eksperimento metu buvo stebimas įtampų skirtumo U_{12} ir srovių I_1 bei I_2 skirtumo verčių stabilumas laiko bėgyje (4.8 pav.). Srovės, kaip ir ankstesnės schemos bandymuose, laiko bėgyje kinta, bet jų skirtumas yra pastovus. Įtampų skirtumo vertė kinta $0,249 \text{ mV}$ ribose, todėl ši schema dėl esamų nestabilumų netinka laboratorinių tyrimų įrangai, bet tinka deformacijų stebėsenos įrangai. Iš šių rezultatų, galima teigti, jog paskutinė schema veikia stabiliau nei ankstesnės.

4.6 pav. Srovių balansavimo įtaiso eksperimentinio maketo schema

Fig. 4.6. Circuit of experimental model of balancing currents device

4.7 pav. Eksperimentinio maketo srovių skirtumų priklausomybės nuo laiko

Fig. 4.7. Dependence of currents difference on time in experimental model

4.8 pav. Eksperimentinio maketo srovių skirtumų ir įtampos U_{12} priklausomybės nuo laiko

Fig. 4.8. Dependence of currents difference and voltage U_{12} on time in experimental model

Eksperimento metu nustatytas disbalanso įtampos nestabilumas sudaro $\pm 110 \mu\text{V}$, tai netenkina laboratorinei įrangai keliamų reikalavimų. Siekiant sumažinti disbalanso įtampos V_{sk} , bei srovės I_2 nestabilumą, eksperimentų metu buvo nustatyta, kad to priežastis yra operacinio stiprintuvo OS2 nestabilumas, generuojantis didžiąją dalį disbalanso įtampos nuokrypų. Gautos naujos srovių skirtumų priklausomybės, kai buvo prijungti 10 metrų ilgio kabeliai, jungiantys jutiklius ir matavimo įrenginį. Taip pat gautos priklausomybės kai tuos laidus veikia elektromagnetiniai 50 Hz trukdžiai (4.11 pav.). Gauti geresni srovių skirtumo stabilumo rezultatai (blogiausiu atveju nestabilumas sudaro $\pm 0,1 \mu\text{A}$) lyginant juos su 4.7 paveiksle pateiktomis priklausomybėmis.

Norint nustatyti disbalanso įtampos (U_{sk}) nestabilumo priklausomybę nuo atraminės (U_{at}), maitinimo šaltinių (U_{mait}) įtampų nestabilumų buvo nustatytos šių įtampų nestabilumų priklausomybės laiko bėgyje, kai įtempių jutikliai nenu-tolinti nuo pagrindinės maketo plokštės, (4.9 pav.) ir kai įtempių jutikliai patal-pinti pasyviame termostate ir nutolę nuo pagrindinės maketo plokštės 10 m ka-beliu (“vyta pora”) (4.10 pav.).

a)

b)

4.9 pav. Atraminės, skirtumo, maitinimo šaltinio įtampų priklausomybės nuo laiko

Fig. 4.9. Dependences of reference, disbalance, power supply voltages on time

a)

b)

4.10 pav. Atraminės, skirtumo, maitinimo šaltinio įtampų priklausomybės nuo laiko kai įtampių jutikliai prijungti 10 m ilgio laidais

Fig. 4.10. Dependences of reference, disbalance, power supply voltages on time when strain gauges connected with 10 m long wire

$I_{sk}, \mu A$ **4.11 pav.** Eksperimentinio maketo srovių skirtumų priklausomybės nuo laiko**Fig. 4.11.** Dependence of currents difference on time in experimental model

Iš jų matyti, kad disbalanso įtampos nestabilumas per 18 bandymo minučių sudaro $\pm 16 \mu V$, o kai įtempių jutikliai patalpinti termostate ir nutolinti nuo pagrindinės maketo plokštės – $\pm 25 \mu V$. Matyti, kad disbalanso įtampos nestabilumas yra žymiai mažesnis už laboratorinės įrangos skiriamąją gebą ($\pm 90 \mu V$). Matyti, kad atraminės įtampos ir maitinimo įtampų nestabilumai neturi įtakos disbalanso įtampos nestabilumui. Be to disbalanso įtampos nestabilumą laike (galimus dreifus) galima įvertinti ir eliminuoti nustatant deformacijų dydį, naudojant 2.8–2.10 paveiksluose pasiūlytas schemas.

Taip pat galima teigti, kad nėra pastebima jutiklių prijungimo ilgais laidais įtaka. Todėl maketo schemą galima tobulinti ir išbandyti realiomis aplinkos sąlygomis.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Pasiūlytų srovių balansavimo įrenginių eksperimentinis tyrimas patvirtino, kad srovių balansavimo būdas leidžia deformacijas nustatyti daug didesniame konstrukcijų deformacijų diapazone (jutiklio varžos pokyčiui esant iki $\pm 30\%$) ir tinka stebėti tiek betoninių, gelžbetoninių, tiek ir plieninių konstrukcijų deformacijas.

2. Eksperimentais nustatyta, kad pasirinkta srovių balansavimo schema srovių skirtumą palaiko pastovų ($0,2 \mu\text{A}$) kintant įtampos kritimui įtempio jutiklio varžoje nuo 2,5 iki 5,4 V.
3. Eksperimentai parodė, kad naudotos srovių šaltinių schemos tinka konstrukcijų deformacijų stebėsenai; laboratoriniams tikslams skirtų įrenginių srovės šaltinių schemos turi tenkinti stabilumo reikalavimus, jose turi būti naudojami atrinkti labai didelio stiprinimo operaciniai stiprintuvai ir pageidautina patalpinti pasyviuose termostatuose.
4. Laboratorinei įrangai skirtų srovės šaltinių tyrimas parodė, kad disbalanso įtampos ilgalaikis nestabilumas sudaro $\pm 16\text{--}25 \mu\text{V}$ ir yra mažesnis už nustatytą įrenginių skiriamąją gebą ($\pm 90 \mu\text{V}$), todėl ši schema tenkina laboratorinei įrangai keliamus reikalavimus.
5. Eksperimentinių bandymų rezultatai patvirtino tokias prielaidas:
 - disbalanso įtampos nestabilumas nepriklauso nuo atraminės įtampos ir operacinių stiprintuvų maitinimo įtampų nestabilumo;
 - prijungus jutiklius ilgais jungiamaisiais kabeliais bei generavus elektromagnetinius trukdžius, disbalanso įtampos nestabilumai nepadidėjo.

Bendrosios išvados

1. Balansuojamo Vitstono tiltelio su $R-2R$ tipo skaitmeniniais-analoginiais keitikliais įrenginiai varžos mažų pokyčių nustatymui yra pranašesni už nebalansuojamo tiltelio įrenginius, nes jie yra nejautrūs maitinimo įtampos nestabilumui. Trukdžių įnešamos klaidos dažnai yra kompensuojamos uždaroje automatinėje sistemoje, deformacijų nustatymo rezultatams neturi įtakos jungiamųjų kabelių varžos dydis ir jų pokyčiai bei stiprintuvo stiprinimo koeficiento nustatymo netikslumai.
2. Pasiūlyta, sudaryta ir ištirta nauja srovių balansavimo konstrukcijų deformacijų stebėsenos struktūrinė schema su dviem ir su vienu skaitmeninio reguliavimo srovės šaltiniais. Nustatytos balansavimo procese gautų kodų verčių ir jutiklio varžos (deformacijų dydžių) pokyčio, kai reguliuojamos vienos arba kitos šakos srovės, matematinės išraiškos. Gautos išraiškos leidžia nustatyti reikiamą srovės reguliavimo skilčių skaičių tam, kad gauti užduotą skiriamąją gebą. Nustatyta, kad paprastesnė išraiška ir tiesinė priklausomybė gaunama, kai srovė yra reguliuojama šakoje, kurioje yra įjungtas kompensacinis jutiklis, todėl tikslinga reguliuoti šią srovę. Parodyta, kad schema su vienu srovės šaltiniu yra mažiau jautri srovės šaltinio dreifams.
3. Pasiūlytos, sudarytos ir ištirtos dvi naujos srovių balansavimo konstrukcijų deformacijų stebėsenos schemas su srovės skaitmeniniais-analoginiais keitikliais, turinčios žymiai didesnes galimybes: leidžiančios programiniu bū-

- du keisti žadinimo srovės dydį, skiriamąją gebą ir stebimų deformacijų diapazoną.
4. Kompiuterinis pasiūlyto konstrukcijų deformacijų nustatymo metodo balansuojant srovės schemas imitavimas patvirtino teorines išvadas, parodo, kad balansuojant srovės gaunami skaitmeniniai kodai proporcingi varžų (t. y. konstrukcijų deformacijų) pokyčiams, užtikrinamas $\pm 28\%$ varžų pokyčių nustatymo diapazonas srovių balansavimui naudojant 8 skilčių skaitmeninius-analoginius keitiklius stebėsenai ir 10 skilčių – laboratorinei įrangai.
 5. Kompiuterinio modeliavimo rezultatai parodo, kad kintant jutiklių temperatūrai, kai tapatumo koeficientas tarp jutiklių temperatūrų yra 0,5 disbalanso įtampos nuokrypa neviršys užduotos nuokrypos maksimalios vertės temperatūrų nuo -18 iki $+30$ °C diapazone, o prie koeficientų tarp 0,85 ir 1,15 disbalanso įtampos nuokrypa neviršys užduotos nuokrypos maksimalios vertės temperatūrų diapazone nuo -30 iki $+30$ °C diapazone. Šie rezultatai konkrečiais atvejais leidžia pasirinkti matavimo schemas su vienu kompensaciniu jutikliu visiems kanalams.
 6. Pasiūlyta nauja balansuojama konstrukcijų deformacijų nustatymo schema su dviem skaitmeninio reguliavimo srovės šaltiniais yra pilnai automatizuojama ir pranašesnė už praktikoje dažnai naudojamus deformacijų nustatymo įrenginius su nebalansuojamo Vitstono tiltelio metodais. Joje srovės pokytis yra tiesiogiai proporcingas įtempio jutiklio varžos pokyčiui, nustatymo rezultatai nepriklauso nuo atraminės įtampos nestabilumo, o stiprūs pramoniniai elektromagnetiniai trukdžiai, generuoti 10 m ilgio jutiklių prijungimo laiduose, neturi įtakos varžų mažų pokyčiams (konstrukcijų deformacijų nustatymo rezultatams). Todėl nutolusius nuo pagrindinės deformacijų nustatymo plokštės įtempių jutiklius galima prijungti iki 10 m jungimo kabeliais.

Literatūra ir šaltiniai

Bonfiglioli B.; Pascale G. 2000. *Internal Strain Measurements in Concrete Specimens in Compression* [interaktyvus]. Bologna [žiūrėta 2008 m. vasario 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn524/idn524.htm>>.

Bridge Transducer ADC. AD7730/AD7730L. 2012.[interaktyvus]. Analog Devices, Inc. [žiūrėta 2012 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7730_7730L.pdf>.

Bridgetest System Vehicle Mounted [interaktyvus]. 2003. Straininstall Monitoring. [žiūrėta 2007 m. rugsėjo 14 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.straininstallmonitoring.com/hres/b107_ds%20rev%201%20bridgetest%20spec%20vehicle%20mounted%20_2_.pdf>.

Carr J. J. 2002. *Elements of electronic instrumentation and measurement*. Upper Saddle River (N. J.): Prentice Hall. 594 p.

Carter, B; Brown T.R. 2001. *Handbook Of Operational Amplifier Applications* [interaktyvus]. Texas Instruments [žiūrėta 2008 m. lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf>>.

Chen G.; Deng Y.; Sun L.; Xu T. 2008. A Modified Algorithm for Reducing Calculation Errors in Large Strain Measurement with Strain Gauges. *Applied Mechanics and Materials*. – Switzerland: Trans Tech Publications, Vols. 13–14. 261–264.

Chen J.; Bock W. J. A. 2004. Novel Fiber-Optic Pressure Sensor Operated at 1300-nm Wavelength. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Volume 53, Number 1. 10–14. ISSN 0018-9456.

Chen W.K. 2009. *The Circuits and Filters Handbook, Third Edition*. CRC Press. 3364 p. ISBN 1420055275.

Chuah, Y.T.; Chan, P.K.; Siek, L. 2000. A Wireless Telemetry System For Strain Measurement, in *Electrical and Computer Engineering, 2000 Canadian Conference*, vol.2, 1018–1021. ISBN: 0-7803-5957-7.

Cimbala J. M. 2011. *Stress, Strain and Strain Gages* [interaktyvus]. The Pensilvania State University [žiūrėta 2011 m. lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.mne.psu.edu/me345/Lectures/Strain_gages.pdf>.

Curtis D. J. 1997. *Process Control Instrumentation Technology*. Prentice Hall PTR. 243 p.

Djugum R. 2009. *Strain Gauges: Fabrication Processes and Techniques*. VDM Verlag Dr. Müller. 144 p. ISBN 978-3639222593.

Dual, 10-Bit, Programmable, 30mA High-Output-Current DAC. MAX5550. 2005. [interaktyvus]. Maxim Integrated Products. [žiūrėta 2012 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5550.pdf>>

Dual, 8-Bit, Programmable, 30mA High-Output-Current DAC. MAX5548. 2005. [interaktyvus]. Maxim Integrated Products. [žiūrėta 2012 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5548.pdf>>.

Dunn P. F. 2005. *Measurement and data analysis for engineering and science*. Dunn McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 540 p.

Electrical Resistance Strain Gage Circuits. 2008. [interaktyvus] Georgia: Georgia Institute of Technology [žiūrėta 2008 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://soliton.ae.gatech.edu/people/jcraig/classes/ae3145/Lab2/strain-gages.pdf>>.

Elsevier Rathore T. S. 2006. *Цифровые измерения. АЦП/ЦАП*; перевод с английского Ю.А. Заболотной; под редакцией Е.Л. Свинцова, 2-е, доп. изд. Москва: Техносфера. 390 с.

Fonda J. W.; Watkins S. E. 2004. *Embedded fiber optic sensing for bridge rehabilitation* [interaktyvus]. University of Missouri-Rolla, USA [žiūrėta 2007 m. lapkričio 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/civil_structures/150_fonda.pdf>.

Grigorjeva T. 2007. *Stress and deformation state of suspension steel bridges with rigid cables: summary of doctoral dissertation*. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika. 21 p.

Grundig L.; Moncrieff E.; Schewe H. 1995. *On the Feasibility of Using Large Scale Photogrammetry to Accurately Determine In-service Strain Distribution Across Three-Dimensional Textile Roofs* [interaktyvus]. Lyon [žiūrėta 2008 m. vasario 24 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.technet-gmbh.com/download/Publikationen/lyon95.pdf>>.

Hannah R.L.; Reed S.E. 1992. *Strain Gage Users' Handbook*. Springer. 496 p. ISBN 978-0412537202.

Hertzberg R. W. 1996. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. Fourth edition. New York [N.Y.] [etc.]: John Wiley & sons. 786 p.

Idzkowski A.; Makal J. 2005. Testing double current bridge for resistance measurements. *Photonics applications in astronomy, communications, industry, and high-energy physics experiments III – Proceedings of SPIE*, vol.5775. Bellingham. 422–427.

Idzkowski A.; Makal J.; Warsza Z. L. 2012. Simultaneous Measurement of Two Parameters by Double Current Supplied Bridge. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*. Vol. 6, N° 2. 26–31. ISSN 1897-8649.

Intelligent IC Conditions Pressure-Sensor Signals. 2000. [interaktyvus]. MAXIM [žiūrėta 2007 m. spalio 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://dbserv.maximic.com/tarticle/view_article.cfm?article_id=73>.

Jung W. G. 2004. *Op Amp Applications Handbook*. Analog Devices Series. Elsevier. 896 p. ISBN 0-7506-7844-5.

Kasemaa A.; Annus P. 2010. CMOS Technology based Current Source with Harmonic Reducing Properties. *Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas: Technologija, No. 10(106). 143–146.

Kester W. 1999. *Practical design techniques for sensor signal conditioning*. Analog Devices Inc. Printed in USA. ISBN-0-916550-20-6.

Kester W. 2004. *Analog-Digital Conversion*. Analog Device Inc: 1055 p. ISBN 0-916550-27-3.

Kester, W. 2002. *Bridge Circuits. OP AMP Applications*. Analog Devices Inc. Printed in USA. 4.37-4.7.

Khan A. S.; Wang X. 2001. *Strain Measurements and Stress Analysis*. Prentice Hall. 247 p. ISBN 978-0130800763.

Klaassen K. B. 1996. *Electronic Measurement and Instrumentation*. Cambridge: Cambridge University Press. 336 p.

Kubiuk D. L.; Greenwood J. A. 2003. *Development of Photogrammetric Methods of Stress Analysis and Quality Control* [interaktyvus]. Northern Illinois University, USA [žiūrėta 2008 m. vasario 24 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.group.slac.stanford.edu/et/IWAA/TOC_S/PAPERS/DKubi02.pdf>.

Kulkarni M. N.; Radhakrishnan N.; Rai D. 2004. GPS & Structural Monitoring: Deformation Studies of Koyna Dam. *GPS World*. Vol. 15. 14–19. ISSN 1048-5104.

Kvedaras R. 2003. „Karaliaus Mindaugo“ tilto Vilniuje dinaminių bandymų signalų analizės ataskaita. Vilnius.

Kvedaras R. 2004. Fulfillment of General Requirements for Construction State Identification Systems. *VI International Workshop for Candidates for a Doctor's Degree OWD*. Vol. 19. PTETIS. 60–63. ISBN 83-915991-8-3.

Kvedaras R. 2005. *Investigation of digital automatic systems for evaluation of small changes*. Vilnius: Technika. 24 p.

Kvedaras R.; Kvedaras V.; Martavičius R. 2003. Elektroninė sistema unikalių konstrukcijų būsenos pokyčiams įvertinti. *Elektronika ir elektrotechnika* 6(48): 28–32. ISSN 1392–1215.

- Kvedaras V.; Kvedaras R. 2008. Strain measurements and monitoring of constructions. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: Technologija. No. 1(81). 65–68.
- Kvedaras, R. 2004. Reikalavimai konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemoms. *Elektronika ir elektrotechnika*. Vilnius: Technika. 70–76. ISBN 9986-05-695-0.
- Kvedaras, R. 2005. *Automatizuotų skaitmeninių sistemų mažiems pokyčiams įvertinti tyrimas, Daktaro disertacija*. Vilnius, VGTU. 157 p.
- Kvedaras, R.; Martavičius, R. 2004. Requirements for construction state identification systems. *Известия Белорусской инженерной академии*, Минск, № 1(17)/1. 104–107.
- Kvedaras, R.; Martavičius, R. 2005. Balanced Wheatstone bridges in strain measurements. *Measurement 2005, Proceedings of the 5th international conference*. Smolenice, Slovakia. 388–391. ISBN 80-967402-8-8.
- Linear products databook*. 1988. Analog Devices, Inc. 122 p.
- Maas H. G. 2007. *Photogrammetric techniques for deformation measurements on reservoir walls* [interaktyvus]. TU Dresden. [žiūrėta 2007m. lapkričio 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.tu-dresden.de/fhgipf/forschung/material/publ_maas/nalps.pdf>.
- Measuring Strain with Strain Gages*. 2012. [interaktyvus]. National Instruments. [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://sine.ni.com/nipdfgenerator/nipdfgenerator?pageURL=http://www.ni.com/white-paper/3642/en&clientAppName=dz&dotsPerPixel=&dotsPerPoint=>>>.
- Murray W. M.; Miller W. R. 1992. *The Bonded Electrical Resistance Strain Gage: An Introduction*. Oxford University Press. 424 p. ISBN, 978-0195072099.
- Pallás-Areny R.; Webster J.G. 2001. *Sensors and signal conditioning, 1 t.* J. Wiley. 587 p. ISBN 978-0471332329.
- Patranabis D. 2004. *Sensors And Transducers 2Nd Ed.* PHI Learning Pvt. Ltd. 344 p. ISBN 978-8120321984.
- Per Pin Parametric Measurement Unit/Source Measure Unit. AD5520*. 2005. [interaktyvus]. Analog Devices, Inc. [žiūrėta 2012 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5520.pdf>.
- Pilkey W. D. 2004. *Formulas for stress, strain, & structural matrices, (2nd Ed.)*. John Wiley & Sons, Inc. 1536 p. ISBN 978-0-471-03221-2.
- Potter, D. 2002. Smart Plug and Play Sensors. *IEEE Instrumentation & Measurement magazine* Vol. 5, No.1 March. 28–30.
- Rangan C.S.; Sarma G.R.; Mani V.S.V. 1997. *Instrumentation: Devices & Systems*. Tata McGraw-Hill Education. 549 p. ISBN 0-07-463350-3.
- SG-Link. Wireless Strain Gauge* [interaktyvus]. 2004. MicroStrain [žiūrėta 2008 m. kovo 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.microstrain.com/sg-link_specs.aspx>.
- Smith S. W. 2003. *Digital Signal Processing – A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Elsevier. 643 p. ISBN 0-7506-7444-7.
- Tarchanidis, K. N.; Lygouras, N. 2003. Data Glove With a Force Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. June Volume 52, Number 3. 984-989. ISSN 0018-9456.

- Test and Measurement Catalog*. 2004. Tektronix Inc. 60 p.
- The Pressure, Strain and Force Handbook*. 1995. Omega Engineering. Vol. 29. 1189 p.
- Van de Plassche R. J. 2003. *CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters*. Springer. 640 p. ISBN 978-1-4020-7500-1.
- Williams, J. 1990. *Bridge Circuits – Marrying Gain and Balance*. Linear Technology. Application. Note 43. 48 p.
- Willshire A. J.; Niewczas P.; Dziuda L.; Fusiek G.; McDonald J. R. 2004. Dynamic Strain Measurement Using an Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor and an Arrayed Waveguide Grating Device. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Volume 53, Number 1. 4–9. ISSN 0018-9456.
- Window A.L. 1992. *Strain Gauge Technology*. Springer. 376 p. ISBN 978-1851668649.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose

Masiulionis, R.; Kvedaras, V.; Kvedaras, R. 2011. Analysis of balancing methods of measurement of small resistance changes. *Elektronika ir elektrotechnika*. 8(114): 3–6. ISSN 1392-1215. (Thomson Reuters ISI Web of Science).

Masiulionis, R. 2010. Deformacijų matavimo balansuojant sroves metodo tyrimas. „*Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania*“. *Elektronika ir elektrotechnika*. Vilnius: Technika. 2(1): 68–72. ISSN 2029-2341. (IndexCopernicus).

Masiulionis, R. 2011. Elektroninių įrenginių tyrimas deformacijai matuoti. „*Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania*“. *Elektronika ir elektrotechnika*. Vilnius: Technika. 3(1): 63–67. ISSN 2029-2341. (IndexCopernicus).

Straipsniai kituose leidiniuose

Kvedaras, V.; Kvedaras, R.; Masiulionis, R. 2008. Methods of strain measurements in construction monitoring systems. *The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*. Vilnius: Technika: 343–349. ISBN 9789955283041. (ISI Proceedings).

Masiulionis, R. 2008. Mažų varžos pokyčių nustatymo balansuojant sroves metodas. *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA. Vilnius: Technika: 32–41. ISBN 9789955283737.

Ričardas MASIULIONIS

MAŽŲ DEFORMACIJŲ STEBĖSENOS
ELEKTRONINIŲ ĮRENGINIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

RESEARCH OF ELECTRONIC DEVICES
FOR MONITORING OF SMALL STRAINS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2012 12 28. 9,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius