

Elektronika T 170

DEFORMACIJŲ MATAVIMO BALANSUOJANT SROVES METODO TYRIMAS

Ričardas Masiulionis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas: ricardas.masiulionis@el.vgtu.lt

Santrauka. Aptariama deformacijų matavimų reikšmė statinių saugumui. Nagrinėjami šiuo metu naudojami konstrukcijų deformacijų matavimo metodai ir jų trūkumai. Aprašomas plačiai naudojamas įtempio jutiklis. Pateikiami reikalavimai naujai deformacijų matavimo sistemai. Analizuojamas naujas konstrukcijų deformacijas įvertinimo metodas, kuris pagrįstas mažų varžų pokyčių nustatymu balansuojant sroves. Pateiktos varžos pokyčio kodo apskaičiavimo formulės bei suskaičiuoti reikalingi parametrai matuoti deformacijas plieno konstrukcijose. Sudaryti kompiuteriniai ir eksperimentiniai matavimo metodo modeliai. Gauti rezultatai ir įvairių dydžių priklausomybės, kurios pagrindžia teorines prielaidas. Pateiktos tyrimo išvados.

Reikšminiai žodžiai: deformacijų matavimas, srovių balansavimas, įtempio jutiklis, varžos pokytis.

Įvadas

Daugelio konstrukcijų kūrimo, statybos ir eksploataavimo 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 ir avarinė signalizacija, kai deformacijos pasiekia statinių konstruktorių užduotas kritines vertes. Pasaulyje naudojamos sistemos, kurios padeda iš anksto numatyti galimą avariją ir imtis atitinkamų priemonių jos išvengti, apsaugoti statinius nuo katastrofiško jų griuvimo ir išvengti žmonių aukų. Galima tiksliai lokalizuoti būsimos remonto vietas ar taškus, tirti konstrukcijos patvarumą ir išvengti avarijų įvairių stichinių nelaimių metu (Kvedaras *et al.* 2008). Konstrukcijos perkrovos, senėjimo, griuvimo ribos, atsparumo dideliems temperatūros pokyčiams ar rezonansinių dažnių įtakai nustatymas garantuoja ilgą bei saugų tokių konstrukcijų eksploatavimą (Kvedaras *et al.* 2003). Deformacijų matavimai taip pat plačiai yra naudojami laboratoriniuose tyrimuose, tiriant naujų konstrukcijų, medžiagų savybes.

Deformacijų matavimui yra taikoma daug metodų. Tačiau jie turi trūkumų. Straipsnyje pateiktas naujas deformacijų matavimo metodas, kuris pagrįstas varžų mažų pokyčių nustatymu balansuojant sroves. Taip pat yra pateikti eksperimentiniai rezultatai, gauti naudojantis šiuo metodu.

Deformacijoms nustatyti naudojami metodai

Praktikoje dažniausiai konstrukcijų būsenos nustatymas matuojant jų fizikinius parametrus: deformacijas, po-

slinkius ir akceleracijas. Matuojant deformacijas ir poslinkius įvairiuose konstrukcijos taškuose galima nustatyti ne tik konstrukcines charakteristikas, tokias kaip standinimo elementų trūkumą ar jų neefektyvumą, tačiau ir pačių konstrukcijos elementų pokyčius, tokius kaip nuovargį, irimą dėl rūdijimo, lūžius ar įtrūkimus ir pan.

Žinomi keli dažniausiai naudojami metodai, kuriais galima įvertinti deformacijas (Masiulionis *et al.* 2008):

- mechaniniai metodai;
- interferometrijos metodai;
- optiniai metodai (fotografiniai metodai, difrakcinių Brago gardelių optinėse skaidulose metodai);
- metodai pagrįsti globaliosios pozicionavimo sistemos (GPS) imtuvų ir antžeminių pozicionavimo bei klaidų korekcijos sistemų tinklų panaudojimu (Kulkarni *et al.* 2004);
- Wheatstone'o tiltelio metodai.

Šie metodai turi savų privalumų ir trūkumų. Pagrindiniai 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;
- didelių matmenų.

Didesniuose objektuose, pvz., tiltuose, parametru nustatymo taškų skaičius gali siekti iki 200 ir daugiau, o patys taškai išdėstyti dideliu atstumu vienas nuo kito. Siekiant užtikrinti tikslių konstrukcijos būsenos identifikavimą tenka įvertinti šiuos parametrus daugelyje konstrukci-

jos taškų. Kuo daugiau taškų vertinama, tuo tikslesnius matematinis modelius galima sudaryti ir atitinkamai tuo tiksliau galima įvertinti unikalios konstrukcijos būseną (Masiulionis *et al.* 2008).

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

- matavimo sistemos turi būti su grįžtamoju ryšiu;
- matavimo rezultatai turi būti neįtakojami išorinių faktorių;
- parametrų įvertinimo metodas turi būti pakankamai tikslus;
- parametrai vertinami daugelyje konstrukcijos taškų;
- vertinimo taškai gali būti nutolę vienas nuo kito dideliu atstumu;
- fizikinių parametrų įvertinimo jutikliai turi būti pigūs ir nesudėtingai montuojami;
- matavimo sistema turi būti labai patikima;
- matavimo sistema turi būti palyginti pigi ir paprasta.

Šiuo metu praktikoje dažnai yra naudojami įtempio jutikliai, kurie atitinka aukščiau išvardytus reikalavimus. Jie yra pigūs, mažų matmenų bei masės, turi labai mažą temperatūrinį varžos koeficientą. Tokius jutiklius siūloma naudoti deformacijų matavimo balansuojant srovės metode.

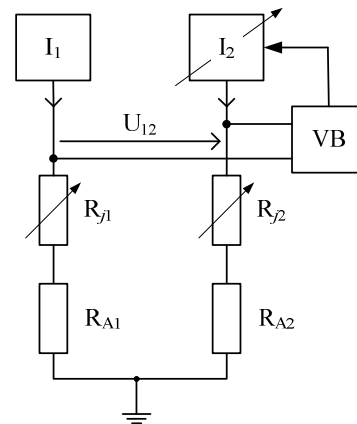
Jutikliai naudojami šiuo metu dažnai taikomame nebalansuojamame Wheatstone'o tiltelio metode. Praktikoje dažniausiai yra matuojamos deformacijos daugelyje taškų, kurie yra nutolę vienas nuo kito. Todėl jutikliai būna nutolę nuo matavimo įrenginio ir aplinkos trukdžiai neišvengiamai įtakoja matavimų tikslumą. Nebalansuojami tilteliai yra netiesiški. Tai taip pat didina matavimo klaidas. Matavimo grandinė yra atvira, todėl matavimo metu generuotos klaidos yra įskaičiuojamos į matavimo rezultatus.

Deformacijų matavimo balansuojant srovės metodas

Naujas deformacijų matavimo balansuojant srovės metodas leidžia išplėsti deformacijų matavimo diapazoną ir galimybę naudoti bet kokio tipo skaitmeninį-analoginį keitiklį (SAK). Jis pagrįstas skaitmeniniu srovių balansavimu. Naudojant balansavimui srovę pagerėja informacijos perdavimas iš nutolusių matavimo jutiklių. Tai paaiškinama tuo, kad perduodant informaciją srove pašalinių triukšmų ir trikdžių įtaka yra daug mažesnė negu naudojant įtampą (pvz.: nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodo atveju).

Skaitmeninio srovių balansavimo metodą įgyvendinančio įtaiso struktūrinė schema pateikta 1 pav. Matuo-

jant deformacijas ir pakitus įtempio jutiklio R_{j1} varžai, atsiranda įtampa U_{12} . Valdymo blokas VB generuoja kodą, kuris keičia srovės I_2 dydį taip, kad U_{12} taptų lygi nuliui.



1 pav. Skaitmeninio srovių balansavimo įtaiso schema: I_1 – srovės šaltinis; I_2 – skaitmeniniu būdu reguliuojamas srovės šaltinis; VB – valdymo blokas

Fig. 1. Scheme of digital device for balancing of currents: I_1 – current source; I_2 – digitally adjustable current source; VB – control unit

Dvi schemos šakos sudarytos iš atraminių tikslių rezistorių turinčių vienodo dydžio varžas R_{A1} , R_{A2} ($R_{A1} = R_{A2} = R_A$) ir dviejų įtempio jutiklių R_{j1} ir R_{j2} , kurie yra vienodo tipo, bet jų pradinės varžos bendru atveju skiriasi dydžiu R_S . Todėl įtaisas, prieš atliekant matavimus, yra balansuojamas taip, kad įtampa U_{12} taptų lygi nuliui, tada tiltelio įtampas išreiškiamas taip:

$$0 = I_1 R_{j1} + I_1 R_A - I_2 R_{j2} - I_2 R_A . \quad (1)$$

Kaip minėta, srovės balansuojamos skaitmeniniu būdu. Tuo tikslu yra naudojamas skaitmeninis-analoginis keitiklis. Tarkim, kad srovė I_2 keičiama žingsniu I_{MRS} , čia: $I_{MRS} = I_{max} / 2^n$ – mažiausias srovės pokyčio žingsnis; I_{max} – maksimali srovės vertė, n – SAK skilčių skaičius.

Tada srovė I_2 po balansavimo lygi:

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

čia m – dešimtainis I_{MRS} žingsnių skaičius.

Lygtį (2) įrašę į lygtį (1) ir įvertinę, kad $R_{j1} = R_{j2} + R_S$, čia R_S – įtempio jutiklių varžų skirtumas, gauname korekcijos kodo vertę:

$$m = 2^n \frac{I_1}{I_{max}} \cdot \frac{R_S}{R_A + R_{j2}} . \quad (3)$$

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

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

$$m_m = 2^n \frac{I_1}{I_m} \cdot \frac{R_m + R_S}{R_A + R_{j2}}, \quad (4)$$

čia R_m – jutiklio varžos pokyčio dydis matavimo metu.

Matuojamos varžos (deformacijos) pokyčio kodas bus lygus:

$$M = m_m - m = 2^n \frac{I_1}{I_{\max}} \cdot \frac{R_m}{R_A + R_{j2}}. \quad (5)$$

Matyti, kad nustatytas kodas yra tiesiog proporcingas matuojamam varžos pokyčiui R_m , kiti dydžiai yra pastovūs ir priklausomi nuo grandinės elementų dydžių.

Maksimali srovės reguliavimo vertė yra I_{\max} . Ši vertė turi būti lygi arba didesnė už maksimalią matuojamą deformaciją. Šitokia maksimali deformacija sudarys matavimo įtempio jutiklio varžos pokytį, kurio išraiška yra:

$$R_{j1} = R_{j2} + R_{m \max} + R_S, \quad (6)$$

čia $R_{m \max}$ – maksimalus jutiklio varžos pokytis.

Tada srovės keitimo diapazonas, priėmus, kad $R_{j1} = R_{j2}$, bus lygus:

$$I_{\max} = \frac{I_1 R_{m \max}}{R_A + R_{j1}}. \quad (7)$$

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

$$I_{\max \text{ pl}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{100 + 100} = 0,75 \text{ mA}. \quad (8)$$

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

$$I_{\max \text{ st}} = \frac{I_1 R_{m \min}}{R_A + R_{j1}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,30}{100 + 100} = 7,5 \mu\text{A}. \quad (9)$$

Laboratoriniams matavimams reikia turėti įrangos skiriamąją gebą apie 1 000 kartų mažesnę už maksimalų dydį, tada mažiausias srovės pokytis lygus

$$I_{\max \text{ lab}} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,030}{100 + 100} = 0,75 \mu\text{A}. \quad (10)$$

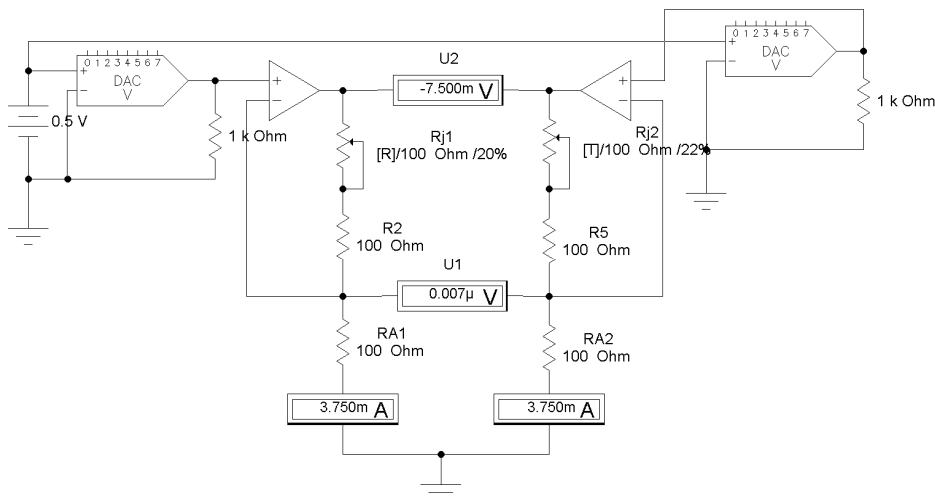
Tada stebėsenos įrangai leidžiančiai stebėti plieninių konstrukcijų deformacijas, reikalingas SAK turintis

$$m_{\text{st}} = \frac{I_{\max \text{ pl}}}{I_{\max \text{ st}}} \quad (11)$$

dešimtinių laiptelių arba $n = 7$ skilčių SAK, o laboratorinei įrangai – $n = 10$ skilčių SAK. Priėmus šias sąlygas, laboratorinės įrangos matuojamos įtampos skirtumo U_{12} svyravimas turi būti nedidesnis nei $90 \mu\text{V}$.

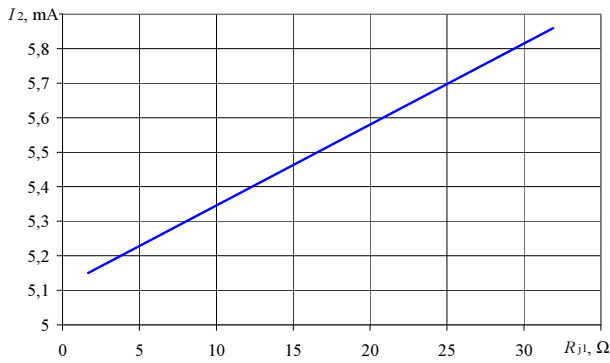
Eksperimentinių modelių tyrimas

Skaitmeninio srovių balansavimo metodui patikrinti pirmiausia programavimo paketu EWB 5.12 buvo sudarytas kompiuterinis modelis (2 pav.). Jo schemeje įtempio jutikliai R_{j1} ir R_{j2} , pakeisti potenciometrais, kuriuos reguliuojant galima imituoti jutiklių varžų pokyčius. Keičiant vieno potenciometro varžą, atsiranda įtampos skirtumas U_2 , kurį galima panaikinti prijungiant loginio 1 ar loginio 0 signalus į SAK (angl. DAC) atitinkamas skiltis. Atliktas įrenginio darbo modeliavimas patvirtino gautus teorinius rezultatus (Masiulionis *et al.* 2008).



2 pav. Srovių balansavimo metodo kompiuterinio modelio schema

Fig. 2. Scheme of computerized model of balancing currents method

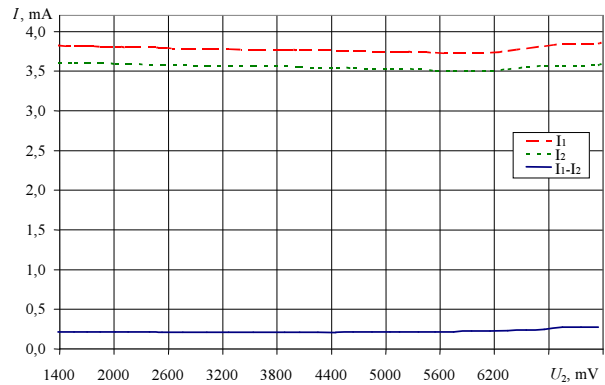


3 pav. Srovės I_2 priklausomybės nuo jutiklio R_{j1} varžos
Fig. 3. Dependence of current I_2 to strain gauge resistance R_{j1}

Tolimesniems skaitmeninio srovių balansavimo metodo tyrimams buvo sudaryti keli fizikiniai modeliai. Pirmajame modelyje srovės šaltiniai buvo sukurti naudojant operacinius stiprintuvus OP-07E, kurių stiprinimo koeficientas lygus 316 000. Jame, kaip ir kompiuteriniame modelyje įtampių jutikliai R_{j1} ir R_{j2} , pakeisti potenciometrais. Atlikus daug matavimų gauta I_2 priklausomybė nuo jutiklio R_{j1} varžos (3 pav.).

Matyti, kad gauta priklausomybė yra tiesinė, kas patvirtina gautus teorinius rezultatus.

Kitiems tyrimams buvo sudarytas fizikinis modelis (4 pav.), kuriame srovės šaltiniai buvo sukurti iš operacinių stiprintuvų OPA2277 turinčių 10 000 000 stiprinimo koeficientą. Jame, taip pat įtampių jutikliai R_{j1} ir R_{j2} , pakeisti potenciometrais. Antrojo šaltinio atraminė įtampa – tai pirmojo šaltinio srovės įtampos kritimas rezistoriuje R4. Tokiu būdu, dėl išorės poveikių, pakitus I_1 vertei, pakis ir I_2 vertė ir bus išvengta jų įtakos matavimo rezultatams. Reguliavimo SAK pakeistas potenciometru R5.

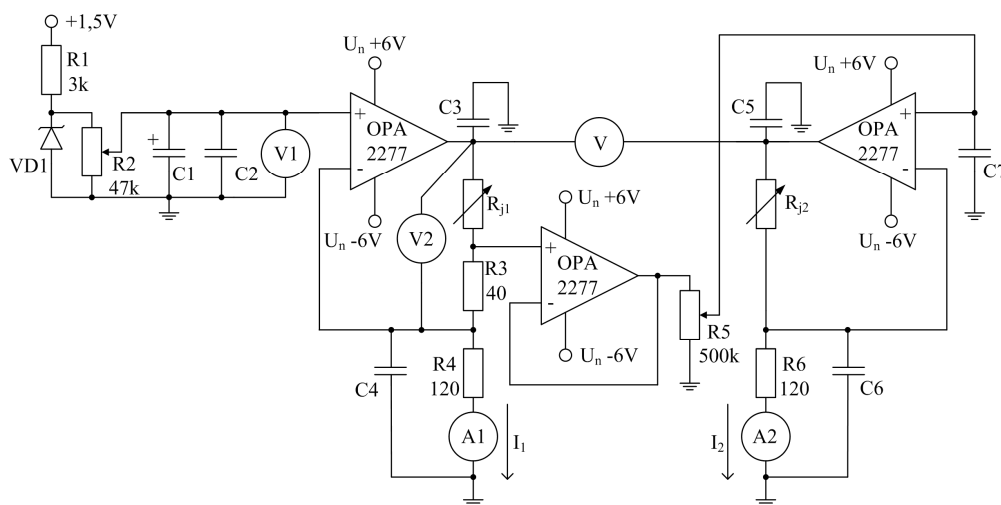


5 pav. Antro eksperimentinio modelio srovių priklausomybės nuo įtampos U_2
Fig. 5. Dependence of currents on supporting voltage U_2 in second experimental model

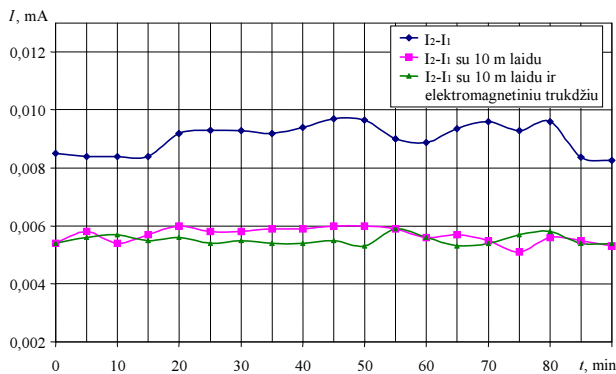
Matavimų metu buvo keičiama potenciometro R_{j1} varža ir taip imituota konstrukcijos deformacija. Esant nelygioms R_{j1} ir R_{j2} varžoms voltmetre V atsiranda įtampos skirtumas. Keičiant potenciometro R5 varžą, ši įtampa nustatoma lygi nuliui.

Eksperimentinio tyrimo metu gauta įtaiso pečių srovių priklausomybė nuo įtampos, kurią matuoja voltmetras V2 (5 pav.). Iš jos matyti, kad srovė kinta, nors teoriškai taip neturėtų būti, bet jų skirtumas bandymo metu beveik išliko toks pat.

Eksperimentiškai ištirtas kitas įtaisas, kurio schemoje panaudoti vienodo stiprinimo koeficiento balansuojami operaciniai stiprintuvai. Šio eksperimento metu buvo stebimas ilgų laidų poveikis rezultatų stabilumui. Taip pat gauti rezultatai, kai tuos laidus veikia elektromagnetiniai trukdžiai (6 pav.). Nustatyti skirtuminės srovės nestabilumo padidėjimo įvedus ilgą laidą ir elektromagnetinius trukdžius nepavyko. Eksperimento metu buvo stebima

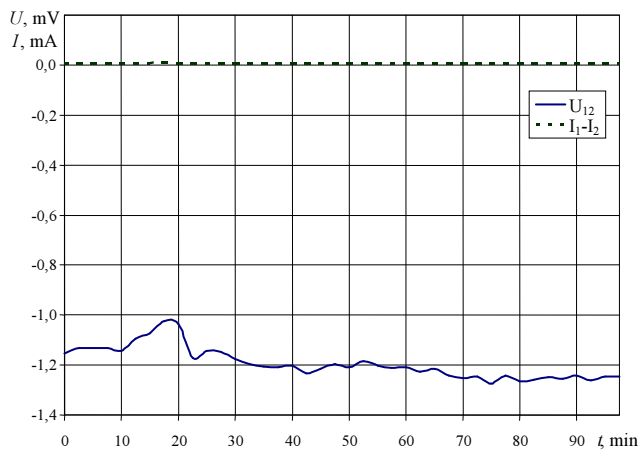


4 pav. Srovių balansavimo metodo 2 eksperimentinio modelio schema
Fig. 4. Scheme of second experimental model of balancing currents method



6 pav. Trečio eksperimentinio modelio srovių skirtumų priklausomybės nuo laiko

Fig. 6. Dependence of currents difference on time in third experimental model



7 pav. Trečio eksperimentinio modelio srovių skirtumų ir įtampos U_{12} priklausomybės nuo laiko

Fig. 7. Dependence of currents difference and voltage U_{12} on time in third experimental model

įtampų skirtumo U_{12} ir srovių I_1 bei I_2 skirtumo verčių stabilumas laike (7 pav.). Srovės, kaip ir ankstesnio įtaiso bandymuose, laikui bėgant kinta, bet jų skirtumas yra pastovus. Įtampų skirtumo vertė kinta 0,249 mV ribose, todėl šis įtaisas dėl gaunamo nestabilumo netinka laboratorinių tyrimų įrangai, bet tinka deformacijų stebėsenos įrangai. Iš šių rezultatų, galima teigti, jog paskutinis įtaisas veikia stabiliau nei kiti.

Išvados

1. Taikant pasiūlytą skaitmeninį srovių balansavimo metodą sumažinamas jungčių ir jungiamųjų laidų savųjų varžų, generuojamų triukšmų ir trukdžių poveikį mažų varžų pokyčių nustatymui.

2. Metodas leidžia nustatyti deformacijų daug didesniame deformacijų diapazone.

3. Sistemą galima visiškai automatizuoti ir panaudoti deformacijų daugelyje toli vienas nuo kito nutolusiuose konstrukcijos taškų matavimui.

4. Laboratorinei įrangai leidžiančiai matuoti konstrukcijų deformacijas, reikalingas 10 skilčių SAK.

5. Eksperimentinių bandymų rezultatai patvirtino tokias prielaidas:

- srovės pokytis yra tiesiogiai proporcingas įtempio jutiklio varžos pokyčiui;
- deformacijų matavimo rezultatai nepriklauso nuo atraminės įtampos nestabilumo;
- stiprūs elektromagnetiniai trukdžiai neturi įtakos deformacijų matavimui.

Literatūra

- Kulkarni, M. N.; Radhakrishnan, N.; Rai, D. 2004. GPS & structural monitoring: Deformation studies of Koyana Dam. *GPS World*, 14–19.
- Kvedaras, R.; Kvedaras, V.; Martavičius, R. 2003. Elektroninė sistema unikalių konstrukcijų būsenos pokyčiams įvertinti. *Elektronika ir elektrotechnika* 6(48): 28–32.
- Kvedaras, V.; Kvedaras, R. 2008. Strain measurements and monitoring of constructions. *Elektronika ir elektrotechnika* 1(81): 65–68.
- Masiulionis, R. 2008. Mažų varžos pokyčių nustatymo balansuojant sroves metodas, iš *Elektronika ir elektrotechnika: 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2008 m. kovo 14 d., pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 32–41.

INVESTIGATION OF STRAIN MEASUREMENT METHOD WITH BALANCING CURRENTS

R. Masiulionis

Abstract

It is shown that construction state identification systems are integral part of public and local warning and security systems. Structure of construction of state identification system is proposed and analysed. It is established that in order to ensure wide usage of such systems it is necessary to solve some scientific problems. A new method for measurement of construction strain is presented. It is based on evaluation of small changes of resistance with balancing currents. Measurements methods of these days are listed and their main advantages are discussed. Structure of strain gauge and formulas for calculating code of resistance changes is presented. Computerized and experimental models are made.

Keywords: strain measurement, balancing currents, strain gauge, changes of resistance.