

ELEKTRONINIŲ ĮTAISŲ TYRIMAS DEFORMACIJOMS MATUOTI

Ričardas Masiulionis

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

Santrauka. Apžvelgta deformacijų matavimų reikšmė statinių saugumui. Pabrėžiama, kad deformacijų stebėjimas turėtų būti viena iš statinių saugumo sistemų. Analizuojami šiuo metu dažnai naudojamas deformacijų matavimas nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodu, tobulesnis, balansuojamas Wheatstone'o tiltelio su grįžtamuju ryšiu metodas. Analizuojamas naujas konstrukcijų deformacijų įvertinimo metodas, kuris pagrįstas mažų varžų pokyčių nustatymu balansuojant sroves. Sudaryti kompiuterinis ir eksperimentiniai matavimo metodo modeliai. Gauti rezultatai ir priklausomybės, kurios pagrindžia teorines prielaidas.

Reikšminiai žodžiai: deformacijų matavimas, įtempio jutiklis, varžos pokytis, Wheatstone'o tiltelis, srovių balansavimas.

Įvadas

Projektuojant, statant ir eksploatuojant įvairių medžiagų konstrukcijas, dažnai tenka tirti šių konstrukcijų deformacijas. Tai taikytina ir naujai suprojektuotų konstrukcijų bandymams atlikti, kai reikia nustatyti tam tikros naujo tipo konstrukcijos patvarumą ir atsparumą veikiančioms jėgoms, nustatyti silpnąsias vietas, numatyti tobulinimo ar konstrukcijos sustiprinimo būdus. Taip pat tikslinga kontroliuoti statomų pastatų būklę, ypač statybos ir projektavimo darbų ekspertizės metu. Labai paranku yra stebėti įvairių jau pastatytų statinių statinę ir dinaminę būklę, nes tada galima laiku pastebėti, kai deformacijos pasiekia statinių konstruktorių užduotas kritines vertes, numatyti galima statinio avariją ir imtis atitinkamų priemonių jai išvengti. Stebint deformacijas, taip pat galima tirti konstrukcijos patvarumą ir išvengti avarijų įvairių stichinių nelaimių metu (Kvedaras *et al.* 2008).

Keleto nelaimingų įvykių metu, nutikusių Europos šalyse, kai sugriuvo dideli statiniai, arenos, prekybos centrai, buvo patirti nemenki materialiniai nuostoliai ir, deja, žuvo žmonių. Tokių nelaimių būtų galima išvengti, jei apie būsimą katastrofą, kol konstrukcijų deformacijos nepasiekė kritinės vertės, būtų pranešta bent prieš 20–30 minučių ir imtasi atitinkamų priemonių (pvz., evakuoti žmones, žiemos metu nuo stogo nuvalyti sniegą). Šie įvykiai parodo, kaip svarbu įdiegti tokias deformacijų stebėjimo sistemas, kurios iš anksto informuotų ir signalizuotų apie gresiantį pavojų, padėtų išvengti pastatų griūčių ir žmonių žūčių.

Deformacijų matavimo metodai

Praktiškai konstrukcijų būsenos dažniausiai nustatomos matuojant jų fizikinius parametrus: deformacijas, poslinkius 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 (pvz., nuovargį, irimą dėl rūdijimo, lūžius, įtrūkimus ir pan.) (Masiulionis *et al.* 2010).

Šiuo metu plačiai naudojami elektroniniai deformacijų matavimo metodai. Juose konstrukcijų deformacijos dydis verčiamas į jam proporcingą elektrinį signalą. Šiam tikslui plačiausiai naudojami įtempio jutikliai. Jie yra pigūs, mažų matmenų bei masės, turi labai mažą temperatūrinį varžos koeficientą. Įtempio jutikliai tvirtinami prie deformuojamos konstrukcijos ar jos elemento ir deformuojami (tempiami ar gniuždomi) taip pat, kaip ir tiriamoji konstrukcija.

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 (Masiulionis *et al.* 2008). Šie jutikliai taikomi ir pasvirimų nuo vertikalės bei veikiančių jėgų identifikavimui. Išorinis mechaninis poveikis keičiamas į jutiklio konstrukcijoje naudojamų įtempimo elementų deformaciją. Tokie jutikliai yra naudojami toliau aprašomose metoduose.

Jeigu įtempio jutiklis bus tempiamas ar gniuždomas, tai jo varža kīs taip:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = S \frac{\Delta l}{l_0} = S\varepsilon, \quad (1)$$

čia: R_0 – įtempio jutiklio varža, kai konstrukcija nedeformuota, Ω ; ΔR – įtempio jutiklio varžos pokytis dėl deformacijos, Ω ; l_0 – įtempio jutiklio ilgis, kai konstrukcija nedeformuota, m; Δl – įtempio jutiklio ilgio pokytis dėl deformacijos, m; S – įtempio jutiklio jautrumo koeficientas, priklausantis nuo jutiklio medžiagos; ε – santykinė deformacija.

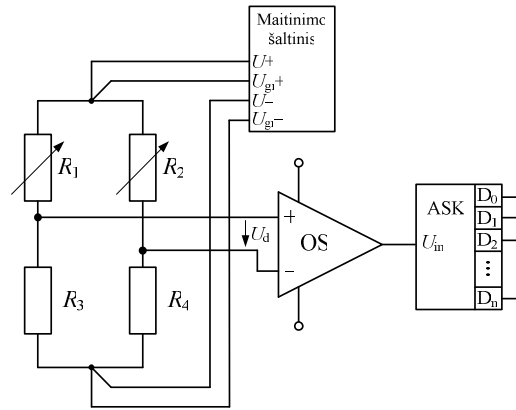
Jei metalinių konstrukcijų deformacija, kurią tenka matuoti praktiškai, yra $\varepsilon = 10^{-6} \div 10^{-3}$ ribose, jutiklio varža $R = 120 \Omega$, jutiklio įtempimo jautrumo koeficientas $S = 2$, tai varžos pokytis ΔR nuo pradinės vertės tokiu atveju bus:

$$\Delta R = RS\varepsilon_l = 0,00024 \div 0,24 \Omega. \quad (2)$$

Iš čia matyti, kad konstrukcijų deformacijų tyrimui, naudojant įtempio jutiklius, reikalingas didelis varžos matavimo tikslumas. Norint nustatyti tokius mažus varžų pokyčius, visuose matavimo įrenginio mazguose reikia siekti minimalių paklaidų ir trukdžių įtakos. Tam tikslui yra naudojami ir toliau aprašomi nebalansuojamo ir balansuojamo Wheatstone'o tiltelio bei deformacijų matavimo metodai balansuojant sroves.

Nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodas

Šiuo metu labiausiai paplitęs praktikoje nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodas, kuris sudaromas pagal schemą, pateiktą 1 pav. (Kvedaras *et al.* 2003). Šio metodo pagrindas – nebalansuojamas Wheatstone'o rezistyvus tiltelis. Jį sudaro rezistoriai R_1 – R_4 . Tiltelis prijungiamas prie nuolatinės įtampos šaltinio, kurio gnybtai pažymėti U^+ ir U^- . Tiltelyje deformacijų registravimui naudojamas įtempio jutiklis R_1 , kuris klijuojamas prie tiriamos konstrukcijos. Jis vadinamas aktyviuoju tiltelio elementu, nes jo varža kinta priklausomai nuo konstrukcijos deformacijos. Temperatūrinių ir kitų aplinkos veiksnių, sąlygotų jutiklio varžos pokyčių, eliminavimui priešingame tiltelio petyje įjungtas pasyvusis tokios pačios konstrukcijos įtempio jutiklis R_2 . Pakitus aktyviojo jutiklio varžai, tiltelis išsibalansuoja – tarp tiltelio pečių vidurinių taškų atsiranda įtampų skirtumas. Ši disbalanso įtampa U_d stiprinama operaciniu stiprintuvu OS ir siunčiama į analoginį-skaitmeninį keitiklį (ASK). ASK pakeičia sustiprintą analoginę tiltelio disbalanso įtampą skaitmeniu disbalanso signalu. Tokiu būdu skaitmeniniais metodais užregistruojamas tiltelio išbalansavimo dydis ir pagal jį nustatoma statinio konstrukcijos deformacijos dydis.



1 pav. Skaitmeninės deformacijų matavimo sistemos su nebalansuojamu Wheatstone'o tilteliu schema: OS – operacinis stiprintuvas; ASK – analoginis-skaitmeninis keitiklis

Fig. 1. Circuit of non-balanced Wheatstone bridge digital strain measurement system: OS – operational amplifier; ASK – analog to digital converter

Tokia sistema jautri tiltelio maitinimo įtampos ir operacinio stiprintuvo dreifams. Kintant maitinimo įtampai, keičiasi tiltelio disbalanso įtampa, o tai įtakoja deformacijos matavimo rezultatą. Norint išvengti maitinimo įtampos dreifų, naudojami preciziški įtampos šaltiniai su reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais (1 pav.). Grįžtamasis ryšys dažniausiai atskirais laidais prijungiamas tiesiai prie tiltelio tam, kad reikiamo dydžio įtampa maitintų tiltelį. Galima išskirti pagrindinius šio metodo trūkumus:

- sudėtinga prijungti daugiau nei vieną jutiklį prie schemos, nes tuomet sunku prijungti maitinimo šaltinio grįžtamojo ryšio laidus. Šiuo metu naudojami gana brangūs specialūs grandynai kiekvienam kanalui su savais stabiliais įtampos šaltiniais, stiprintuvais, dreifo ir korekcijos schemomis;
- sudėtinga surinkti skaitmeninius duomenis iš daugelio konstrukcijos ar statinio taškų, nes jutikliai ir matavimo grandinės turi būti kiek įmanoma arčiau matavimo vietos;
- grandinės klaidų šaltiniai (triukšmai, trukdžiai, maitinimo įtampos nustatymo klaidos ir nestabilumas, jungiamųjų laidų varžos, stiprinimo koeficiento nustatymo klaidos ir jo dreifai) tiesiogiai veikia deformacijos matavimo rezultatą;
- ypač sudėtinga ir preciziška, reikalaujanti tikslaus derinimo schema;
- didelė dalis naudojamų skaitmeninių-analoginių keitiklių skilčių naudojamos neefektyviai (registruoja triukšmus);
- sistema palyginti brangi ir nepatogi eksploatuoti.

Balansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodas

Suprojektuota ir rečiau naudojama uždara automatinė sistema, kurios pagrindas yra balansuojamas Wheatstone'o tiltelis. Šio metodo balansavimo funkciją atlieka R-2R tipo skaitmeniniai-analoginiai keitikliai (SAK) (Kvedaras *et al.* 2003). Tokios sistemos struktūrinė schema pateikta 2 pav.

Šiuo atveju tiltelio disbalanso įtampa lyginama su 0 V įtampa, o matavimo metu keičiama vieno iš tiltelio pečių varža ir pasiekama, kad tiltelio disbalanso įtampa galimai arčiau priartėtų prie 0.

Wheatstone'o tilteliu per aktyvųjį R_{j1} bei pasyvųjį R_{k1} jutiklį teka srovė, kurią sukuria tiltelio maitinimo šaltinis. Esanti disbalanso įtampa, sustiprinta operaciniu stiprintuvu OS, siunčiama į komparatoriaus K įėjimą. Komparatorius palygina įtampą įėjime su 0 V įtampa. Priklausomai nuo tiltelio būsenos, keičiasi komparatoriaus išėjimo signalas. Šis signalas patenka į mikroprocesorių MP, kuris valdo paskiltnio balansavimo registrą. Iš jo signalas siunčiamas į R-2R tipo SAK. Keičiasi jo varža, tuo metu keičiasi tiltelio peties, kuriame jis įjungtas, varža, taigi, ir tiltelio balansas. Jei tiltelis išlieka nesubalansuotas, tai keičiama naujesnė registro skiltis ir tikrinamas balansas. Taip tiltelis balansuojamas tol, kol pasiekama jauniausia skiltis. Parinkus jauniausią paskiltnio priartėjimo registro skiltį, ir, jei tiltelio disbalansas yra mažesnis, nei leistina prietaiso paklaida, registro išėjime nusistovėjęs kodas yra fiksuojamas. Šis kodas yra laikomas tiltelio subalansavimu prieš konstrukcijos apkrovą. Tokia pati veiksmų seka yra atliekama, kai konstrukcija yra apkrauta. Matavimo rezultatas yra šių dviejų matavimų metu gautų kodų skirtumas. Atlikus šias operacijas, visi procesai kartojami iš naujo, matuojant deformacijas kitų jutiklių, perjungiamų MOSFET raktais, patalpinimo vietoje.

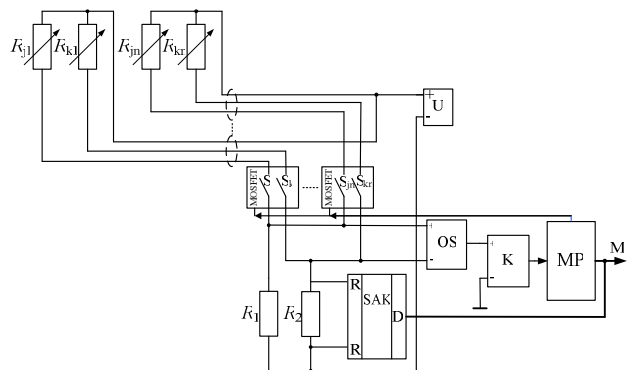
Balansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodo privalumai:

- grįžtamasis ryšys leidžia susireguliuoti sistemai ir taip sumažina išorinių trukdžių įtaką matavimo rezultatui;
- sistema nėra stipriai įtakojama jutiklių jungiamųjų laidų ir mažos varžos MOSFET raktų, nes perduodama tik informacija „balansas“ / „nėra balanso“, todėl galima naudoti daugiakanaliuose deformacijų matavimo įtaisuose;
- lyginant su nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodu, nereikalingi preciziški įtampos šaltiniai su reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais;

- vietoj jutiklių raktais prijungus etalonines varžas, galima eliminuoti stiprintuvo ir komparatoriaus dreifų įnešamas klaidas.

Išskiriami tokie šio metodo trūkumai:

- laidai, jungiantys matavimo įtaisą ir jutiklius, gali būti riboto ilgio dėl jų varžos, trukdžių ir triukšmų įtakos;
- dėl naudojamų R-2R tipo SAK vidinės varžos gali būti apribotas deformacijų nustatymo diapazonas.



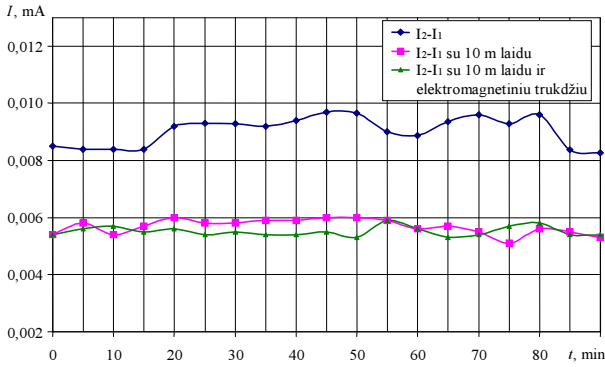
2 pav. Balansuojamo Wheatstone'o tiltelio deformacijoms matuoti su R-2R SAK struktūrinė schema: U – tiltelio maitinimo šaltinis; OS – operacinis stiprintuvas; K – komparatorius; MP – mikroprocesorius; SAK – skaitmeninis-analoginis keitiklis; S – raktai; R_{ji} – įtempio jutiklis; R_{ki} – kompensacinis jutiklis; M – išėjimo kodas

Fig. 2. Block diagram of the strain measurement by using digitally balanced Wheatstone bridge with R-2R DAC: U – bridge supply unit; OS – operational amplifier; K – comparator; MP – microprocessor; SAK – digital to analog converter; S – keys; R_{ji} – strain gauge; R_{ki} – compensation gauge; M – output code

Deformacijų matavimo balansuojant srovės metodus

Siekiant išplėsti deformacijų matavimo diapazoną ir galimybę naudoti bet kokio tipo SAK, buvo pasiūlytas naujas metodas, pagrįstas skaitmeniniu srovių balansavimu. Be to, kai matavimo jutikliai turi būti išdėstyti nutolusiose nuo matavimo įrenginio vietose, informacijos perdavimas naudojant srovę yra geresnis. Tai paaiškinama tuo, kad naudojant srovę informacijos perdavimui pašalinių triukšmų ir trikdžių įtaka yra daug mažesnė negu naudojant įtampą (Masiulionis *et al.* 2008).

Srovių balansavimo metodą įgyvendinančio įtaiso struktūrinė schema pateikta 3 pav. Matuojant deformacijas ir pakitus įtempio jutiklio R_{j1} varžai, atsiranda 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.



5 pav. Eksperimentinio modelio srovių skirtumų priklausomybės nuo laiko

Fig. 5. Dependence of currents difference to time in experimental model

Šio metodo galutinis matavimo rezultatas yra skirtumas tarp apkrautos konstrukcijos matavimo kodo vertės ir neapkrautos konstrukcijos korekcijos kodo vertės. Tada matuojamos varžos (deformacijos) pokyčio kodas bus lygus:

$$M = m_m - m = 2^n \frac{I_1}{I_{\max}} \cdot \frac{R_m}{R_A + R_{j2}}, \quad (3)$$

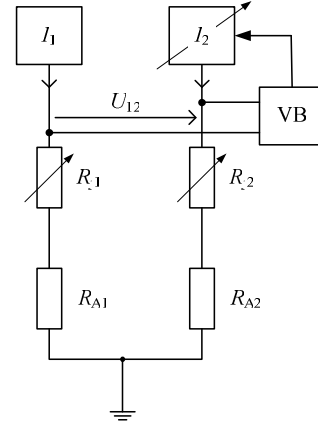
čia: m_m – matavimo kodo vertė; m – korekcijos kodo vertė; n – SAK skilčių skaičius; I_1 – pirmo srovės šaltinio srovė; I_{\max} – maksimali srovės vertė; R_m – jutiklio varžos pokyčio dydis matavimo metu; R_A – atraminių tikslų rezistorių varža; R_{j2} – įtempio jutiklio varža.

Srovių balansavimo metodui patvirtinti buvo sudaryti kompiuteriniai ir fizikiniai modeliai. Struktūrinėje schemoje (3 pav.) parodyti srovės šaltiniai, suprojektuoti iš operacinių stiprintuvų, kurių stiprinimo koeficientas viename modelyje buvo lygus 316 000, o kituose – 10 000 000. Srovės šaltiniai, kuriuose panaudoti operaciniai stiprintuvai su didesniu stiprinimo koeficientu yra stabilesni.

Buvo tiriamas grandinės darbo stabilumas bėgant laikui ir kintant atraminei įtampai. Dviejų valandų tyrimo metu grandinės balansas išliko nepakitęs. Keičiant atraminės įtampos U_{at} vertę 1,3 V riboje, grandinės balansas tai pat išliko nepakitęs.

Norint pasiekti mažesnius įtampos nestabilumus, buvo ištirtas kitas įtaisas, kuriame naudojami kitokie srovės šaltiniai, galintys matuoti mažus varžų pokyčius (4 pav.). Eksperimentų metu schemoje įtempio jutiklis R_{j1} buvo pakeistas potenciometru, kurį reguliuojant galima imituoti jutiklio varžos pokytį. Keičiant potenciometro varžą, atsiranda įtampų skirtumas tarp varžų R_{j1} ir R_{j2} (šį skirtumą rodo voltmetras V_{sk}), kurį galima keisti, kai keičiama antrojo srovės šaltinio srovė, perduodant loginio 1 ar loginio 0 signalus į SAK U2 atitinkamų skilčių įėjimus. Tyrimo metu buvo stebimas šis įtampos skirtumas tam tikru laiku. Rezultatai

parodė, kad jis kinta leidžiamoje 90 μ V ribose. Tai atitinka laboratorinės deformacijų matavimų įrangos skiriamąją gebą, kuri paprastai nustatoma 1000 kartų mažesnė už maksimalų deformacijos kitimo diapazoną.



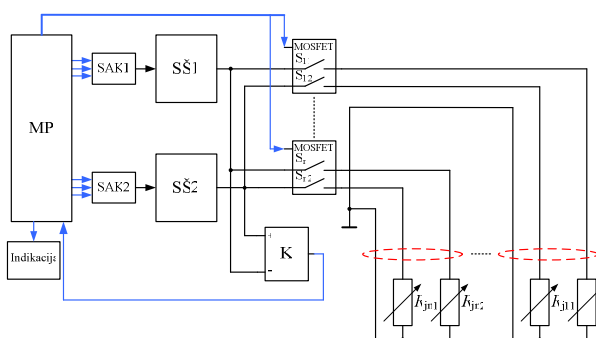
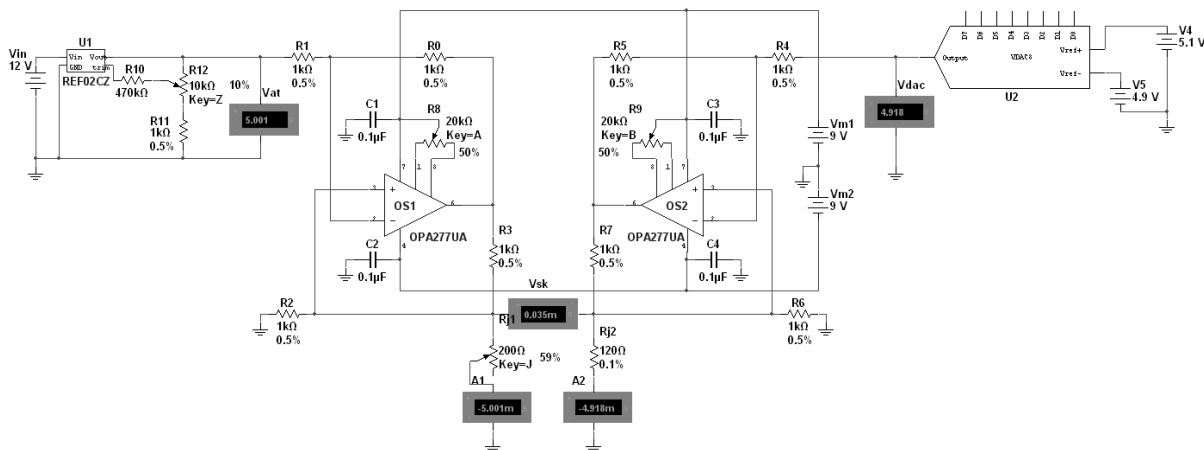
3 pav. Skaitmeninio srovių balansavimo įtaiso schema: I_1 – srovės šaltinis; I_2 – skaitmeniniu būdu reguliuojamas srovės šaltinis; VB – valdymo blokas

Fig. 3. Circuit of digital currents balancing device: I_1 – current source; I_2 – digitally adjustable current source; VB – control unit

Eksperimentiniai tyrimai, kuriuose buvo naudojami 10 m ilgio laidai, jungiantys matavimo įtaisą ir įtempio jutiklius, parodė, kad nėra skirtuminės srovės nestabilumo padidėjimo. Taip pat neužfiksuota nestabilumo padidėjimo šiuos laidus veikiant 50 Hz elektromagnetiniais trukdžiais (5 pav.).

Sukurto automatizuoto daugiakanalio deformacijų matavimo įtaiso struktūrinė schema pateikta 6 paveiksle. Prieš matavimų pradžią jutiklių poros yra tvirtinamos ant tiramosios konstrukcijos. Mikroprocesorius nuosekliai prijungia visas jutiklių poras prie komparatoriaus K.

Loginiai komparatoriaus signalai persiunčiami į mikroprocesorių MP. Pastarasis paskiltninio priartėjimo būdu keičia SAK2 įėjimo kodą, o tuo pačiu ir srovės šaltinio SŠ2 srovę taip, kad jutiklių pora būtų subalansuota. Jutiklių balansavimo ciklo pabaigoje nustatytas SAK2 kodas yra išimamas. Tuo būdu įvertinama visų jutiklių porų ir jungimo laidų varžų pradiniai skirtumai. Po to konstrukcija apkraunama. Nustatytais laiko momentais prie komparatoriaus K yra prijungiamos jutiklių poros ir esant deformacijai ir pakitus aktyviojo įtempių jutiklio R_{jk1} varžai, komparatoriaus K įėjimuose atsiranda įtampų skirtumas. Prijungta jutiklių pora balansuojama. Deformacijos vertė apskaičiuojama pagal išraišką (3) ir gautas matavimo rezultatas pateikiamas indikacijos blokui. Analogiškai matuojama kitose jutiklių porose, kurios įjungiamos komutuojant raktus.



6 pav. Deformacijų matavimo įtaiso balansuojant srovės struktūrinė schema: MP – mikroprocesorius; SAK1 ir SAK2 – skaitmeniniai-analoginiai keitikliai; SŠ1 ir SŠ2 – srovės šaltiniai; K – komparatorius; R_{j1} , R_{j2} – matavimo ir kompensacinis įtempio jutikliai

Fig. 6. Blok diagram of strain measurement device with currents balancing: MP – microprocessor, SAK1 ir SAK2 – digital to analog converters; SŠ1 ir SŠ2 – current sources; K – comparator; R_{j1} , R_{j2} – strain and compensation gauge

Išvados

1. Balansuojamo Wheatstone'o tiltelio su R-2R tipo SAK metodu mažų varžos pokyčių matavimas yra pranašesnis už nebalansuojamo tiltelio metodą, nes turi daugiau privalumų. Jame yra grįžtamasis ryšys, todėl matavimo rezultatams mažiau įtakoja išoriniai trukdžiai, matavimo schema yra paprastesnė.
2. Naudojant pasiūlytą srovių balansavimo metodą, galima vykdyti visiškai automatizuotą deformacijų nustatymą daug didesniame deformacijų diapazone daugelyje konstrukcijos ar statinio taškų.
3. Srovių balansavimo metodo eksperimentiniai bandymai patvirtino, kad ilgi jungiamieji laidai, elektromagnetiniai trukdžiai ir atraminės įtampos nestabilumas neturi įtakos deformacijų matavimui.

4. Laboratorinei įrangai, leidžiančiai matuoti konstrukcijų deformacijas didžiausiam diapazone, reikalingas 12 skilčių SAK.

Literatūra

- 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.
- Kvedaras, V.; Kvedaras, R.; Masiulionis, R. 2008. Methods of strain measurements in construction monitoring systems, in the *25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC-2008: Selected papers*, June 26–29, 2008, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 343–349. doi:10.3846/isarc.20080626.343
- Masiulionis, R. 2008. Mažų varžos pokyčių nustatymo balansuojant srovės metodus, 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.
- Masiulionis, R. 2010. Deformacijų matavimo balansuojant srovės metodo tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(1): 68–72. doi:10.3846/mla.2010.015

INVESTIGATION OF ELECTRONIC DEVICES FOR STRAIN MEASUREMENT

R. Masiulionis

Abstract

Importance of strain measuring for safety of buildings is shown. The strain monitoring should be one of the buildings security systems. Often used balanced and non-balanced Wheatstone bridge strain measurement methods are analyzed. The Wheatstone bridge method with feedback is improved. A new method based on small resistance changes by the digital balancing currents is presented. Computer and experimental models of measurement are investigated. The received results confirm theoretical assumptions.

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