

## Elektroninė sistema unikalių konstrukcijų būsenos pokyčiams įvertinti

**R. Kvedaras, R. Martavičius**

Radioelektronikos katedra, VGTU, Naugarduko g. 41, LT-2006 Vilnius, Lietuva  
tel. +370 5 2744766, faks. +370 5 2627730, el. paštas rokas.kvedaras@el.vtu.lt

**V. Kvedaras**

Elektrotechnikos katedra, VGTU, Saulėtekio al. 11, LT-2600 Vilnius, Lietuva  
tel. +370 5 2744761, faks. +370 5 2627730, el. paštas vygaudas.kvedaras@el.vtu.lt

### Įvadas

Labai svarbu kontroliuoti jau pastatytų unikalių statinių statinę ir dinaminę būseną ir iš anksto numatyti galimą avariją bei imtis priemonių jai išvengti. Išsami išankstinė informacija apie statinio konstrukcijos būseną įgalina tiksliai nustatyti būsimojo remonto vietas, tirti konstrukcijos patvarumą ir išvengti avarijų stichinių nelaimių metu.

Unikalių statinių konstrukcijos būsenos identifikavimo uždavinys yra labai sudėtingas, nes net nedideli statiniai gali turėti iki kelių šimtų kontrolinių taškų. Duomenis apie konstrukcijos būseną šiuose taškuose reikia surinkti, apdoroti ir pasiųsti į kontrolės centrą. Toks duomenų surinkimas kartojamas apibrėžtais laiko tarpais. Todėl konstrukcijos būsenos identifikavimo užduotis patogiausia spręsti kompiuterizuotomis elektroninėmis sistemomis, kurios surenka iš konstrukcijose esančių jutiklių duomenis, juos iš dalinės apdoroja ir esamais ar specialiai tam tikslui skirtais tinklais perduoda į kontrolės centrą. Kontrolės centre duomenys galutinai apdorojami ir pateikiami vykdymo programai ar sistemos operatoriui. Surinkus iš atskirų sistemų duomenis į pagrindinį valdymo centrą, galima kontroliuoti daugelio svarbių statinių būklę.

Kontroliuojant tilto būklę jutikliai vienas nuo kito gali būti nutolę nuo kelių šimtų iki kelių tūkstančių metrų. Laboratoriniuose konstrukcijų tyrimuose panaudojama per 200 jutiklių, kurių duomenis reikia registruoti didesniu tikslumu. Todėl čia susiduriama su ilgą laiką tam tikru periodu pasikartojančiais labai dideliais duomenų masyvais. Esamos statinių kontrolės sistemos [1, 2] nėra pakankamai tobulos. Vienos iš paminėtų sistemų leidžia surinkti labai mažai nepakankamo tikslumo duomenų ir yra visiškai nepritaikytos duomenims surinkti iš vienas nuo kito nutolusių jutiklių. Kitos neleidžia automatizuoti statinio konstrukcijos būsenos stebėjimo, duomenų surinkimo ir rezultatų apdorojimo procesų. Tai yra esminiai trūkumai, ribojantys šių sistemų taikymą statinių būklės stebėsenai arba laboratoriniuose konstrukcijų tyrimuose.

Darbe analizuojamos unikalių statinių konstrukcijos būsenai identifikuoti skirtos sistemos, kuriose naudojami tenzorezistoriniai jutikliai. Dažniausiai šiems tikslams naudojamos skaitmeninės tiesioginio keitimo statinių konstrukcijų deformacijų registravimo sistemos su nebalan-

suojamu Vinstono tiltelių jutiklių grandinės savybės lyginamos su autorių sukurtos uždarnosios automatinės monitoringo sistemos su balansuojamu Vinstono tilteliu vieno funkcinio mazgo savybėmis. Įrodomas siūlomos sistemos pranašumas, taikant ją statinių konstrukcijų deformacijų daugelyje taškų vienalaikiams stebėjimams.

### Pagrindiniai reikalavimai sistemos jutikliams

Konstrukcijų deformacijoms registruoti labai plačiai naudojami tenzorezistoriai. Jie yra nedidelių matmenų, labai mažos masės, nestandūs ir turi labai mažą temperatūrinį varžos koeficientą, o svarbiausia yra pigūs [1]. Jeigu tenzorezistorius statinio konstrukcijos deformacijos metu tempiamas arba gniuždomas, tai jo varžos santykinis pokytis bus lygus:

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

čia  $R_0$  – tenzorezistoriaus varža, kai konstrukcija nedeformuota;  $\Delta R$  – tenzorezistoriaus varžos pokytis dėl deformacijos;  $l_0$  – tenzorezistoriaus ilgis, kai konstrukcija nedeformuota;  $\Delta l$  – tenzorezistoriaus ilgio pokytis dėl deformacijos;  $k$  – tenzojautrumo koeficientas, priklausantis nuo tenzorezistoriaus medžiagos;  $\varepsilon$  – santykinė deformacija.

Daugumas statybinių konstrukcijų maksimalių deformacijų metu, kurioms esant konstrukcijos suyra, maksimalus santykinis tenzorezistoriaus varžos pokytis  $\delta R_{dmax}$  tempiant siekia iki +6 %, o gniuždant – iki –3 % tenzorezistoriaus varžos vertės. Konstrukcijų stebėsenos sistemose registruojamos deformacijos  $M_s = (2...5)$  kartų mažesnės už maksimalias vertes, kurioms esant konstrukcija suyra. Atliekant laboratorinius matavimus, būtina registruoti dar mažesnes deformacijas. Šiuo atveju jos mažesnės už maksimalias  $M_l = (50...100)$  kartų. Todėl santykiniai tenzorezistorių varžos pokyčiai stebėsenai  $\delta R_{ds}$  ir laboratoriniams bandymams skirtose sistemose  $\delta R_{dl}$  bus atitinkamai mažesni:

$$\delta R_{ds} = \frac{\delta R_d}{M_s} 100 = \frac{6}{(2...5)} = 3...1,2\%, \quad (2)$$

$$\delta R_{dl} = \frac{\delta R_d}{M_1} 100 = \frac{6}{(50 \dots 100)} = 0,12 \dots 0,06 \% \quad (3)$$

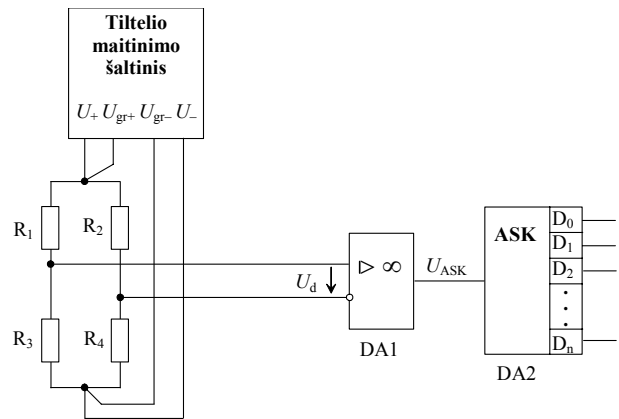
Kaip matyti iš (2) ir (3) išraiškų, konstrukcijų deformacijoms registruoti naudojant tenzorezistorius, tenka registruoti nedidelius santykinius varžų pokyčius. Todėl registravimo sistemose reikia naudoti didelės varžos  $R_0$  tenzorezistorius, o jutikliai į registravimo įtaisą turi būti įjunti taip, kad būtų galima registruoti nedidelius santykinius varžos pokyčius ir garantuoti apsaugą nuo trukdžių. Geriausiai šie reikalavimai tenkinami, kai tenzorezistoriai įjungiami į Vinstono tiltelius [1 – 5]. Vinstono tiltelis kartu su tolimesniu skaitmeniniu įtaisu gali būti balansuojamas [2] arba nebalansuojamas [3 – 5]. Panagrinėkime ir palyginkime tokių konstrukcijų deformacijų registravimo sistemų savybes.

### Tiesioginio keitimo skaitmeninė registravimo sistema su nebalansuojamu Vinstono tilteliu

Dažnai naudojamos tiesioginio keitimo skaitmeninės registravimo sistemos su nebalansuojamu Vinstono tilteliu jutiklių grandinės schema pateikta 1 paveiksle. Vinstono tiltelį sudaro rezistoriai  $R_1 - R_4$ . Tiltelis prijungiamas prie nuolatinės įtampos šaltinio, kurio gnybtai pažymėti  $U_+$  ir  $U_-$ . Tiltelyje deformacijoms registruoti naudojamas tenzorezistorinis jutiklis  $R_1$ , kuris klijuojamas prie tiriamosios konstrukcijos. Tai aktyvusis tiltelio elementas, nes jo varža kinta priklausomai nuo konstrukcijos deformacijos. Temperatūrinių ir kitų aplinkos veiksnių sąlygotų jutiklio varžos pokyčiams panaikinti priešingame tiltelio petyje įjungtas pasyvusis tokios pačios konstrukcijos tenzometriinis 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 ir siunčiama į analoginį skaitmeninį keitiklį (ASK). ASK pakeičia sustiprintą analoginę tiltelio disbalanso įtampą skaitmeniu disbalanso signalu. Taigi nebalansuojamame Vinstono tiltelyje skaitmeniniais metodais užregistruojamas tiltelio išbalansavimo dydis ir pagal jį iš (1) išraiškos nustatoma statinio konstrukcijos deformacijos dydis.

Nagrinėjamojoje sistemoje disbalanso įtampos dydis priklauso nuo tiltelio maitinimo įtampos dreifo. Kintant maitinimo įtampai, keičiasi tiltelio disbalanso įtampa ir kartu su ja registruojamas rezultatas. Todėl šiose registravimo sistemose naudojami preciziški įtampos šaltiniai su tiltelio maitinimo įtampos dydį reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais. Įtampos kritimui laiduose, kuriais teka tiltelį maitinanti srovė, panaikinti grįžtamasis ryšys dažniausiai sudaromas atskirais, tiesiogiai prie tiltelio jungiamaisiais laidais. Šiais laidais į maitinimo šaltinį grįžtančios įtampos pasiunčiamos į gnybtus, pažymėtus  $U_{gr+}$  ir  $U_{gr-}$ .

Kadangi statinio konstrukcijos deformaciją apibūdinančios disbalanso įtampos yra labai mažos, registravimo sistemoje naudojami preciziniai instrumentiniai operaciniai stiprintuvai arba stiprintuvai su programuojamuoju stiprinimo koeficientu, kurių nulio dreifas yra beveik pašalintas.



1 pav. Tiesioginio keitimo skaitmeninės statinių konstrukcijų deformacijų registravimo sistemos su nebalansuojamu Vinstono tilteliu jutiklių grandinės schema

Tiltelio disbalanso įtampą stiprinantis operacinis stiprintuvus slopina maitinimo šaltinio bei tiltelio sinfazinius triukšmus. Kad triukšmų slopinimo efektas būtų kaip galima didesnis, tiltelio pečiai turi būti kuo vienodesni, o aktyviojo bei pasyviojo jutiklių jungiamieji laidai – kiek galima arčiau vienas kito. Tam geriausiai tinka vytoji pora. Įvykdžius šias dvi sąlygas didžioji dalis triukšmų bus sinfaziniai. Operaciniame stiprintuve nenuslopintus triukšmus galima labai sumažinti integruojant sustiprintą disbalanso įtampą, nes registruojamas rezultatas kinta labai lėtai, o nenuslopintieji triukšmai yra baltojo triukšmo pobūdžio.

ASK keitimo klaidos, atsirandančios dėl kvantavimo triukšmo, tiesiogiai veikia registruojamą rezultatą. Norint jų išvengti, registravimo sistemose naudojami daugiaskilčiai preciziniai ASK.

Įvertinant visus anksčiau paminėtus veiksnius, registravimo sistemose tikslingiausia naudoti specializuotas integrines schemas (IS), į kurias 5jungti maitinimo šaltiniai, stiprintuvai ir ASK. Taigi tokių schemų išėjime iš karto gaunamas konstrukcijos deformaciją apibūdinantis skaitmeninis kodas.

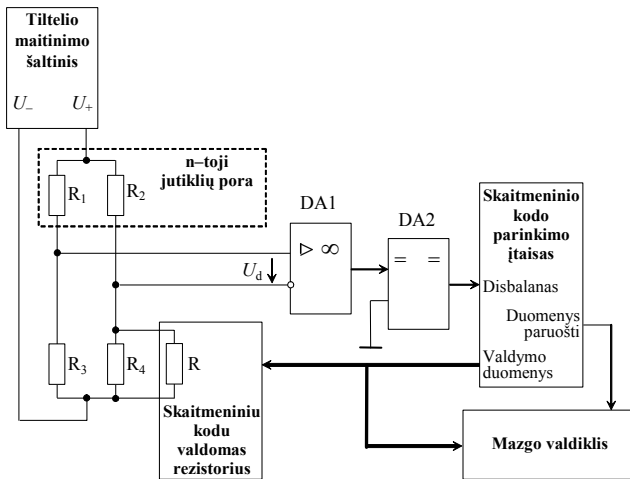
Didžiausi registravimo sistemos su nebalansuojamu Vinstono tilteliu trūkumai:

1. Prie sistemos negalima prijungti daugiau nei vieno jutiklio, nes tuomet sunku prijungti maitinimo šaltinio grįžtamojo ryšio laidus. Aktyvieji ir pasyvieji jutikliai gali būti komutuojami komutatoriais, tačiau grįžtamasis ryšys tokiu atveju neįvertina laidų į aktyvųjų ir pasyvųjų jutiklius ilgių.
2. Daug registruojamam rezultatui įtakos turinčių poveikių.
3. Labai sudėtinga, preciziška bei tikslaus derinimo reikalinga sistemos elektroninė grandinė.
4. Specializuotos IS yra labai brangios, be to, kiekvienam jutikliui reikalinga atskira elektroninė grandinė, kurią būtina preciziškai suderinti.
5. Sistema nepritaikyta skaitmeniniams duomenims surinkti iš daugelio konstrukcijos taškų, nes jutikliai ir IS turi būti kiek įmanoma arčiau.

Taigi tiesioginio keitimo skaitmeninė sistema su nebalansuojamu Vinstono tilteliu yra labai brangi ir nepatogi eksploatuoti.

## Uždaroji automatinė stebėsenos sistema su balansuojamu Vinstono tilteliu

Daugelio minėtų trūkumų neturi uždarnosios automatinės sistemos [2]. Mūsų sukurto uždarnosios automatinės unikalių statinių konstrukcijų būsenos stebėsenos sistemos vieno funkcinio mazgo struktūrinė schema pateikta 2 paveiksle. Sistemos veikimas pagrįstas nesubalansuoto Vinstono tiltelio automatinio subalansavimu.



2 pav. Automatinės unikalių statinių konstrukcijų būsenos stebėsenos sistemos vieno funkcinio mazgo struktūrinė schema

Nagrinėjamos stebėsenos sistemos vieną funkcinį mazgą sudaro: nuolatine įtampa maitinamas Vinstono tiltelis  $R_1 - R_4$ , kurio vienas rezistorius šuntuotas skaitmeniniu kodu valdomu rezistoriumi  $R$ , operacinis stiprintuvas DA1, komparatorius DA2, skaitmeninio kodo parinkimo įtaisas ir mazgo valdiklis. Tiltelyje rezistorius  $R_1$  yra statinio konstrukcijos kontroliniame taške įtvirtintas ir deformacijos metu tempiamas arba gniuždomas tenzorezistorinis aktyvusis jutiklis. Rezistorius  $R_2$  yra tokios pačios konstrukcijos tenzometrinis pasyvisis jutiklis.

Vinstono tilteliu per aktyvųjį bei pasyvųjį jutiklius teka srovės, kurias sukuria tiltelio maitinimo šaltinis. Tiltelio pradinė būsena parenkama taip, kad, esant vienodoms aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžoms  $R_1 = R_2$ , tiltelis būtų nesubalansuotas. Tiltelis išbalansuojamas rezistoriais  $R_3$  ir  $R_4$ . Šių rezistorių varžos parinktos taip, kad esant maksimaliam aktyviojo tenzometrinio jutiklio varžos pokyčiui, tiltelį būtų galima subalansuoti. Be to, atsižvelgiama į tai, kad jutiklio varža  $R_1$  tempimo arba gniuždymo metu gali didėti arba mažėti.

Esant vienodoms aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžoms, tiltelio pečių vidurio taškų įtampos skiriasi. Tiltelio pečių įtampų skirtumas – tiltelio disbalanso įtampa  $U_d$  stiprinama operaciniu stiprintuvu ir siunčiama į komparatorių. Tiltelio disbalanso įtampa sustiprinama tiek, kad, esant maksimaliam tiltelio išbalansavimui, ji neviršytų komparatoriaus dinaminio diapazono.

Sukurtoje monitoringo sistemoje Vinstono tiltelio disbalanso įtampa komparatoriaus palyginama su 0 V įtampa ir nustatomas skaitmeninis kodas, kuriuo reikia pakeisti tiltelio vieno peties varžą  $R_4$ , kad tiltelis būtų subalansuotas ir disbalanso įtampa priartėtų kaip galima arčiau prie 0 V. Tiltelis balansuojamas skaitmeniniu neigiamuoju grįžta-

muoju ryšiu. Grįžtamasis ryšys nagrinėjamame funkciname mazge sudaromas per skaitmeninio kodo parinkimo įtaisą. Skaitmeninio kodo parinkimo įtaisas paskilčiui keičia skaitmeniniu kodu valdomo rezistoriaus kodą tol, kol maksimaliai priartėjama prie tiltelio balanso. Pasiekus reikiamo tikslumo tiltelio balansą, funkcinio mazgo valdiklis gauna iš kodo parinkimo įtaiso komandą „Duomenys paruošti“ ir nuskaito rezistoriaus valdymo kodą. Šis kodas įsimenamas kaip statinio konstrukcijos būseną apibūdinantis parametras.

Kaip skaitmeninio kodo parinkimo įtaisas panaudotas paskilčio balansavimo registras. Šis skaitmeninio kodo parinkimo įtaisas veikia taip. Komparatorius palygina įtampą įėjime su 0 V įtampa. Komparatoriaus išėjimo signalas priklauso nuo tiltelio subalansavimo lygio. Kai tiltelis nesubalansuotas, komparatoriaus išėjime gaunamas loginis nulis, kai perbalansuotas, – loginis vienetas. Signalas iš komparatoriaus išėjimo siunčiamas į kodo parinkimo įtaisą (paskilčio balansavimo registrą). Jei tiltelis nesubalansuotas ir iš komparatoriaus išėjimo gaunamas loginis nulis, į aukščiausiąją paskilčio balansavimo registro skiltį įrašomas vienetas. Šis signalas siunčiamas į skaitmeniniu kodu valdomą rezistorių ir pakeičia jo varžą. Kartu pasikeičia tiltelio peties, kuriame įjungtas šis rezistorius, varža. Taigi pasikeičia ir tiltelio balansas. Jei tiltelis išlieka nesubalansuotas ir jo išėjime pasilieka loginis nulis, paskilčio balansavimo registro žemesnėje skiltyje įrašomas vienetas. Dabar į skaitmeniniu kodu valdomą rezistorių siunčiamas signalas pakeičia jo varžą dvigubai mažiau, nei tai buvo padaryta pirmuoju balansavimo žingsniu. Jei tiltelis perbalansuojamas, į registrą pasiunčiamas loginis vienetas ir paskilčio balansavimo registro aukščiausioje skiltyje loginis vienetas pakeičiamas loginiu nuliu, o kitu tiltelio balansavimo žingsniu parenkama žemesniosios skilties vertė. Taip tiltelis balansuojamas tol, kol pasiekama žemiausioji registro skiltis. Parinkus žemiausiąją paskilčio priartėjimo registro skiltį, tiltelio disbalansas yra mažesnis, nei leistina registravimo neapibrėžtis. Tiltelio balansavimo metu registro išėjime gautas skaitmeninis kodas yra statinio konstrukcijos būseną apibūdinantis parametras.

Subalansavus tiltelį, iš skaitmeninio kodo parinkimo įtaiso siunčiamas pranešimas apie duomenų paruošimą registruoti. Sistemos funkcinio mazgo valdiklis nuskaito dvejetainį kodą, esantį paskilčio priartėjimo registro išėjime.

Nuskaičius rezultata, paskilčio balansavimo registras nustatomas į pradinę būseną, prie funkcinio mazgo prijungiamas kitoje statinio konstrukcijos vietoje įtaisytus jutiklis, visi procesai kartojami iš naujo ir užregistruojamas naujas skaitmeninis kodas, apibūdinantis konstrukcijos būklę kitoje vietoje.

Sukurto stebėsenos sistemos funkcinio mazgo savybes lyginant su anksčiau aptartos tiesioginio keitimo registravimo sistemos su nebalansuojamu Vinstono tilteliu jutiklių grandinės savybėmis, išryškėja daug sukurtosios sistemos teigiamybių. Viena iš svarbesnių teigiamybių yra ta, kad tiltelio maitinimo įtampos dreifai neturi įtakos registruojamam rezultatui. Kintant maitinimo įtampai, keičiasi ir tiltelio disbalanso įtampa  $U_d$ . Tačiau tai neturi jokios įtakos tiltelio balansavimui. Tiltelio balanso vieta ir disbalanso įtampos poliarumas nepriklauso nuo maitinimo įtampos. Taigi analizuojamoje sistemoje nereikalingi

preciziški įtampos šaltiniai su reguliuojamais grįžtamaisiais ryšiais.

Jeigu uždarojoje sistemoje aktyviojo ir pasyviojo jutiklių jungiamieji laidai yra vytoji pora, o tiltelio pečiai padaryti kiek įmanoma vienodesni, tuomet didžioji dalis tiltelio maitinimo įtampos bei paties tiltelio triukšmų bus sinfaziniai. Šiuos triukšmus, kaip ir tiesioginio keitimo sistemoje, nuslopina tiltelio operacinis stiprintuvas. Uždarojoje sistemoje esantis valdiklis leidžia skaitmeniškai integruoti registruojamo rezultato kiekvienos skilties vertes ir pašalinti operaciniame stiprintuve nenuslopintus triukšmus. Skilčių verčių integravimo metu naudojamas statistinis jų verčių nustatymo metodas. Skaitmeninio integravimo metu daug kartų nustatomas, nekeičiant tiltelio balanso, komparatoriaus išėjimo signalas ir, apskaičiavus dažniau pasikartojančius rezultatus, priimamas sprendimas, ar analizuojamoje skiltyje yra nulis ar vienetas. Skaitmeninį registruojamo rezultato skilčių integravimą lengviausia įgyvendinti, kai paskilčio balansavimo registras programiškai sukuriama pačiame valdiklyje. Daugkartinis skilčių vertės nustatymas šiek tiek prailgina registravimo trukmę, nes pakartotinių vertinimų metu tiltelio balansas nesikeičia, o laiko tarpas tarp vertinimų nedidelis. Jį lemia komparatoriaus sparta. Taigi realiai laikas tarp vertinimų neviršija 1 μs.

Naudojant skaitmeniškai balansuojamo Vinstono tiltelį uždaroje registravimo sistemoje beveik panaikinama operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficiento nestabilumo ir amplitudinės charakteristikos netiesiškumo įtaka registruojamam rezultatui. Dėl pakitusio stiprintuvo stiprinimo koeficiento keičiasi tik į komparatorių siunčiama įtampa, tačiau jos poliarumas, taigi ir registruojamas rezultatas nesikeičia. Svarbu, kad, sumažėjus stiprinimo koeficientui, į komparatorių patektų įtampa, didesnė už jo slenksčio įtampą. Tai pasiekama uždaroje registravimo sistemoje naudojant didelio stiprinimo koeficiento operacinius stiprintuvus. Kadangi operacinis stiprintuvas registravimo sistemoje iš esmės yra poliarumo detektorius, tai jo amplitudinės charakteristikos netiesiškumas neturi įtakos registruojamam rezultatui.

Apskritai analizuojamoje uždarojoje stebėsenos sistemoje registruojamas rezultatas tiesiogiai priklauso nuo komparatoriaus klaidų. Norint išvengti komparatoriaus klaidos įtakos rezultatui, tiltelio disbalanso įtampa  $U_d$  stiprinama tiek, kad sustiprintas žemiausiosios skilties keitimo įtampos pokytis viršytų komparatoriaus jautrumo ribą. Taigi parinkus operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficientą taip, kad visame Vinstono tiltelio balansavimo procese jis išliktų poliarumo indikatoriumi, sukuriama uždaroji monitoringo sistema, kurios registruojamas rezultatas priklauso tik nuo skaitmeniniu kodu valdomo rezistoriaus.

Nagrinėjamoje stebėsenos sistemoje disbalanso įtampa  $U_d$  gana didelė. Kaip parodyta [6], maksimali jos vertė lygi 15 mV. Todėl naudojant sistemoje jautrų komparatorių, galima iš viso atsisakyti operacinio stiprintuvo. Pavyzdžiui, jei komparatoriaus nulio dreifas siekia  $0,6 \mu\text{V} / \text{K}$ , tai darbo temperatūrų diapazone nuo  $-30^\circ\text{C}$  iki  $+40^\circ\text{C}$  nulio dreifo įtampa neviršys  $42 \mu\text{V}$ . Taigi tiltelio balansavimo metu galima gauti  $15 \text{ mV} / 42 \mu\text{V} = 357$  įtampos kvantus, lygius dreifo įtampai, ir užregistruoti statinio konstrukcijos būseną, minimaliai veikiamą nulio dreifų 8

skilčių dvejetainiu skaičiumi (256 įtampos kvantai). Tokiu atveju registravimo neapibrėžtis dėl nulio dreifų neviršys  $\pm 1$  žemiausiosios skilties vertės.

Skaitmeniniu kodu valdomo rezistoriaus klaidos tiesiogiai veikia registruojamus rezultatus. Šio rezistoriaus skilčių skaičius  $n$  nusako registravimo sistemos tikslumą. Dažniausiai kaip kodu valdomas rezistorius naudojama ypač tiksli R2R matrica, kurios skilčių skaičius turi būti  $m \geq (n + 1)$ . Žemiausiosios skilties vertė visuomet turi būti lygi loginiam vienetui (turi būti nuolat įjungta), nes kitaip gaunamas didelis varžos šuolis tiltelio petyje. Priešingu atveju, jei šioje ir visose kitose skiltyse nustatomas loginis nulis, rezistoriaus varža artėja prie begalybės ir susilygina su nuotėkio varža. Autorių atlikti tyrimai parodė, kad patogiausia ir tikslingiausia kaip R2R matricą naudoti integrinį skaitmeninį analoginį keitiklį (SAK) be vidinių įtampos ir srovės stiprintuvų. Tuomet R2R matricos tikslumas yra didžiausias, nes naudojama integrinė matrica, kurioje varžų tikslumą kitų atžvilgiu lemia ypač tiksliai formuojami geometriniai matmenys integrinėje technologijoje. Vienintelis SAK naudojimo trūkumas – galimas varžos R variavimas tarp keleto to paties tipo SAK pavyzdžių. Pagal technologinius apribojimus šis variavimas gali siekti iki  $\pm 20\%$ . Tačiau toks SAK varžos kitimas turi įtakos tik absoliutinei registruojamo dydžio vertei ir, kaip jau minėta anksčiau, registravimo procese yra kompensuojamas. Be to, įtakos turi varžų matricos temperatūrinis nestabilumas, kuris yra gana mažas, tačiau atliekant tikslius matavimus, jo įtaka gali lemti paklaidas.

Kitas labai svarbus nagrinėjamos sistemos privalumas yra tas, kad labai paprasta prie funkcinio mazgo prijungti daugiau nei vieną jutiklį. Prijungiant prie funkcinio mazgo per mažos varžos identiškus komutatorius aktyviojo ir pasyviojo jutiklių porą, kompensuojamos komutatorių ir jungiamųjų laidų varžos ir šių varžų nestabilumai. Prie vieno funkcinio sistemos mazgo galima prijungti nuo 16 iki 32 aktyviųjų ir pasyviųjų jutiklių porų. Tai labai sumažina sistemos kainą ir supaprastina jos eksploatavimą.

Taigi pasiūlytoji stebėsenos sistema su balansuojamuoju Vinstono tilteliu žymiai geriau tinka daugelio taškų konstrukcijų deformacijų vienalaikiams stebėjimams. Pagrindiniai analizuojamos uždaros automatinės registravimo sistemos su nesubalansuotu Vinstono tilteliu privalumai:

1. Nesudėtinga elektroninė grandinė.
2. Nedaug registruojamam rezultatui įtaką darančių poveikių. Kiekviename sistemos funkciniam mazge esantis valdiklis leidžia atlikti pradinį registruojamų rezultatų apdorojimą, todėl registruojami rezultatai stabilesni ir patikimesni.
3. Prie registravimo sistemos gana paprasta prijungti daugiau jutiklių. Registruojamiems dydžiams nuostoliai laiduose įtakos neturi.
4. Registravimo sistema yra palyginti pigi, nes joje nenaudojami brangūs daugiaskilčiai ASK. Jie pakeisti daug pigesniais SAK. Viename funkciniam sistemos mazge, prie kurio prijungiama nuo 16 iki 32 jutiklių, naudojamas tik vienas SAK.

## Išvados

1. Konstrukcijų deformacijoms registruoti naudojant tenzorezistorinius jutiklius, reikia registruoti nedidelius

santykinius varžų pokyčius. Tam geriausiai tinka tenzorezistoriai, įjungti į Vinstono tiltelius.

2. Unikalių statinių konstrukcijos būsenai daugelyje jos taškų identifikuoti netinka skaitmeninės tiesioginio keitimo sistemos su nebalansuojamu Vinstono tilteliu. Šių sis temų elektroninė grandinė yra labai sudėtinga ir turi būti tiksliai derinama. Sistemoje daug registruojamam rezultatui įtaką darančių poveikių. Prie sistemos negalima prijungti daugiau nei vieno jutiklio.

3. Pasiūlytoji stebėsenos sistema su balansuojamuoju Vinstono tilteliu daug geriau tinka konstrukcijų daugelio taškų deformacijoms stebėti vienu metu. Joje prie vieno funkcinio mazgo prijungiama nuo 16 iki 32 jutiklių.

4. Sukurtosios sistemos elektroninė grandinė nesudėtinga. Nedaug registruojamam rezultatui įtakos turinčių poveikių. Prie registravimo sistemos gana paprasta prijungti daugiau jutiklių. Registruojamiems dydžiams nuostoliai laiduose įtakos neturi.

5. Registravimo sistema yra palyginti pigi, nes joje brangūs daugiaskilčiai ASK pakeisti daug pigesniais SAK.

6. Kiekviename sistemos funkciname mazge esantis valdiklis leidžia atlikti pradinį registruojamų rezultatų

apdorojimą, todėl registruojami rezultatai stabilesni ir patikimesni.

## Literatūra

1. **Измерения в промышленности.** Справочник: В 3-х книгах. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура. Под ред. Профоса П.Ю. – М.: Металлургия, 1990. 384 с.
2. **Измеритель деформации цифровой ИДЦ-1.** Инструкция по эксплуатации, альбом схем. 4Т2.373.007ТО.
3. **Малиновский В.Н.** Электрические измерения.- М.: Энергоиздат, 1983. 392 с.
4. **OP AMP Applications.** Analog Devices Inc. Printed in USA. 2002.
5. **Intelligent IC Conditions Pressure-Sensor Signals.** MAXIM Technical Article. [http://dbserv.maximic.com/tarticle/view\\_article.cfm?article\\_id=73](http://dbserv.maximic.com/tarticle/view_article.cfm?article_id=73)
6. **New ICs Revolutionize the Sensor Interface.** MAXIM Technical Article. [http://dbserv.maximic.com/tarticle/view\\_article.cfm?article\\_id=59](http://dbserv.maximic.com/tarticle/view_article.cfm?article_id=59)

Pateikta spaudai 2003 05 18

**R. Kvedaras, V. Kvedaras, R. Martavičius. Elektroninė sistema unikalių konstrukcijų būsenos pokyčiams įvertinti // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 6(48). – P.28-32.**

Darbe analizuojamos unikalių statinių konstrukcijos būsenų pokyčiams įvertinti skirtos sistemos, kuriose naudojami tenzorezistoriniai jutikliai. Dažniausiai šiems tikslams naudojamos skaitmeninės tiesioginio keitimo statinių konstrukcijų deformacijų registravimo sistemos su nebalansuojamu Vinstono tilteliu jutiklių grandinės savybės lyginamos su autorių sukurtos uždarnosios automatinės stebėsenos sistemos su balansuojamu Vinstono tilteliu vieno funkcinio mazgo savybėmis. Tokios sistemos veikimas pagrįstas nesubalansuoto Vinstono tiltelio automatinio balansavimu į vieną tiltelio petį įjungtu skaitmeniniu kodu valdomu rezistoriumi. Pasiūlytoje sistemoje prie vieno jos funkcinio mazgo prijungiama nuo 16 iki 32 jutiklių. Stebėsenos sistema yra palyginti pigi, nes joje brangūs daugiaskilčiai ASK pakeisti daug pigesniais SAK. Kiekviename sistemos funkciname mazge esantis valdiklis leidžia atlikti pradinį registruojamų rezultatų apdorojimą, todėl registruojami rezultatai stabilūs ir patikimi. Darbe pasiūlytoji sistema leidžia registruoti statinių konstrukcijos būsenų pokyčius 8 ... 12 bitų skiriamąja geba. Il. 2, bibl. 6 (lietuvių kalba, santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**R. Kvedaras, V. Kvedaras, R. Martavičius. Electronic System of Identification of Unique States of Constructions // Electronics and electrical engineering. – Kaunas: Technologija, 2003. – No. 6(48). – P.28-32.**

Systems of identification of unique states of constructions using strain gauges are analysed. Most popular digital strain gauge bridge implementations with non-balanced bridge and automatic bridge balancing system created by authors are compared. Basic idea of such system is to automatically balance unbalanced Wheatstone strain bridge using digital potentiometers. There is a possibility to connect from 16 up to 32 strain gauges to one unit. This system is relatively cheap as expensive ADC is substituted by DAC. Microcontroller used in each unit is programmed to analyse and process initial data and therefore data provided for system identification is stable and reliable. System proposed is capable to register various construction states with 8 to 12 bits accuracy. Ill. 2, bibl. 6 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English, Russian).

**P. Квядарас, В. Квядарас, Р. Мартавичюс. Электронная система для оценки изменений состояния уникальных конструкций // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2003. – № 6(48). – С.28-32.**

Анализируются системы с тензометрическими датчиками для идентификации изменений состояний уникальных конструкций. Сравниваются часто используемые для этих целей системы с небалансируемыми мостами Винстона с авторами разработанной системой с автоматически балансируемым мостом Винстона. Работа данной системы основана на автоматической балансировке неуровновешенного моста посредством цифровым кодом управляемого резистора, включенного в одно плечо моста. В предложенной схеме к одному функциональному узлу можно подключать от 16 до 32 датчиков. Система мониторинга сравнительно дешева из-за использования недорогих ЦАП вместо АЦП. Установленный в каждом узле микроконтроллер обеспечивает предварительную обработку результатов, обеспечивая стабильность и надежность регистрируемых результатов. В работе предложенная система позволяет регистрировать изменения состояния конструкции с разрешающей способностью 8 – 12 бит. Ил. 2, библи. 6 (на литовском языке, рефераты на литовском, английском и русском яз.).