



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rokas Kvedaras

**AUTOMATIZUOTŲ SKAITMENINIŲ SISTEMŲ
MAŽIEMS POKYČIAMS ĮVERTINTI TYRIMAS**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T

Vilnius 2005

Disertacija rengta 2001–2005 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete

Darbo mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T)

© R. Kvedaras, 2005

TURINYS

TURINYS	3
IVADAS	5
1. MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO SISTEMŲ ANALIZĖ IR TYRIMAS	10
1.1. BENDRIEJI MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO PROBLEMOS BRUOŽAI	10
1.2. BENDRIEJI REIKALAVIMAI KONSTRUKCIJŲ BŪSENŲ IDENTIFIKAVIMO SISTEMOMS	12
1.3. VARŽOS MAŽŲ POKYČIŲ NUSTATYMAS NAUDOJANT VARŽINIUS WHEATSTONE'Ų TILTĖLIUS	15
1.4. DEFORMACIJŲ IDENTIFIKAVIMO SISTEMŲ ANALIZĖ IR EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	18
1.4.1. Sistemų su nesubalansuotu Wheatstone'ų tiltelių privalumai ir trūkumai	18
1.4.2. Daugiakanalės sistemos su nesubalansuotu Wheatstone'ų tiltelių savybės	21
1.4.3. StrainStall kompanijos konstrukcijų ir tiltų parametrų registravimo sistema ir jos tyrimo rezultatai	22
1.5. BENDRIEJI SPARČIŲJŲ SKAITMENINIŲ GRANDYNŲ DINAMINIŲ PARAMETRŲ MAŽŲ POKYČIŲ NUSTATYMO PROBLEMOS BRUOŽAI	25
1.6. VĖLINIMO TRUKMĖS SPARČIUOSE SKAITMENINIuose GRANDYNUOSE REGISTRAVIMO SISTEMOS	26
1.7. NUSISTOVĖJIMO TRUKMĖS SPARČIUOSE SKAITMENINIuose-ANALOGINIuose KEITIKLIuose REGISTRAVIMO METODAI IR ĮTAISAI	30
1.7.1. Oscilografiniai stroboskopiniai metodai	31
1.7.2. Specializuoti neoscilografiniai stroboskopiniai įtaisai	33
1.8. DARBO TIKSLO IR UŽDAVINIŲ FORMULAVIMAS	37
2. METODAS VARŽŲ MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMUI IR JO TOBULINIMAS	39
2.1. WHEATSTONE'Ų VARŽŲ TILTĖLIO BALANSAVIMO METODAS VARŽŲ MAŽIEMS POKYČIAMS ĮVERTINTI	39
2.2. VARŽŲ MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO PATIKIMUMO DIDINIMAS	46
2.3. DREIFO MAŽINIMAS MAITINANT TILTĖLĮ KINTAMA ĮTAMPA	47
2.4. DREIFO MAŽINIMAS NAUDOJANT MODULIACINIS STIPRINTUVAS	50
2.5. DREIFŲ KOMPENSAVIMAS ANALOGIŠKU STIPRINTUVU	52
2.6. DREIFŲ KOMPENSAVIMAS ETALONAI	54
2.7. TRIUKŠMŲ FILTRAVIMAS SKAITMENINIAIS METODAIS	57
2.8. SSP ATLIKAMŲ FUNKCIJŲ APTARIMAS	60
2.8.1. Filtravimo mazgo paskirtis ir reikalavimai mazgui	60
2.8.2. Filtruojamo signalo ir galimų trukdžių analizė	62
2.8.3. Mazgo skaičiavimo metodas	65
2.8.4. Modeliavimo rezultatai	67
2.8.5. Filtrų programavimas	69
2.8.6. Fazinio detektoriaus įgyvendinimas	71
2.8.7. Paskiltinio balansavimo registro įgyvendinimas	73
2.9. SKAITMENINIS ĮVERTINIMO REZULTATŲ APDOROJIMAS	75
2.10. SUKURTOS TIPINĖS VARŽOS MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO SISTEMŲ STRUKTŪROS	77
2.11. IŠVADOS	79
3. GRANDYNŲ DINAMINIŲ PARAMETRŲ MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO METODAI	81
3.1. DAUGIAKANALIŲ STROBOSKOPINIŲ KEITIKLIŲ SUDARYMAS IR TYRIMAS	81
3.1.1. Daugiakanalių stroboskopinių keitiklių sudarymas	82
3.1.2. Daugiakanalių stroboskopinių keitiklių su komutatoriumi įėjime modelis ir jo tyrimas	86
3.2. SPARČIŲJŲ SKAITMENINIŲ IG SIGNALŲ VĖLINIMO TRUKMIŲ NUSTATYMO ĮRENGINIAI	89
3.2.1. Signalų vėlinimo trukmių įvertinimo įrenginio struktūra	90
3.2.2. Signalų vėlinimo įrenginio įvertinimo neapibrėžčių analizė	93
3.3. SAK NUSISTOVĖJIMO TRUKMIŲ ĮVERTINIMAS	96
3.3.1. Nusistovėjimo trukmių tyrimo įrenginio struktūra	97
3.3.2. Skaitmeninis signalo apdorojimas ir nusistovėjimo trukmės įvertinimas	102
3.4. IŠVADOS	104
4. EKSPERIMENTINIO TYRIMO REZULTATAI	106
4.1. VARŽOS MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO BALANSUOJAMU WHEATSTONE'Ų TILTĖLIU TYRIMAS	106
4.2. PARAZITINIŲ PARAMETRŲ ĮTAKOS WHEATSTONE'Ų TILTĖLIO BALANSO TAŠKO ĮVERTINIMUI TYRIMAS	109
4.3. KEITIKLIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	116

4.4. SIGNALŲ VĖLINIMO TRUKMĖS ĮRENGINIO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	117
4.5. SAK NUSISTOVĖJIMO TRUKMĖS ĮVERTINIMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	118
4.6. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ IŠVADOS	120
5. DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	122
LITERATŪRA	124
PRIEDAI	131
1 PRIEDAS. DEFORMACIJŲ KONSTRUKCIJOSE JUTIKLIAI	131
2 PRIEDAS. ĮTEMPIMO JUTIKLIAI IR JŲ TAIKYMAS	134
3 PRIEDAS. STRAINSTALL SISTEMOS TECHNINĖS CHARAKTERISTIKOS	136
4 PRIEDAS. AUTOMATINIAI STROBOSKOPINIAI KEITIKLIAI	137
5 PRIEDAS. SIGNALŲ MODELIAVIMAS MATLAB PAKETU	139
6 PRIEDAS. FILTRŲ MODELIAVIMO MATLAB PAKETU REZULTATAI	140
7 PRIEDAS. SAK NUSISTOVĖJIMO TRUKMĖS ĮVERTINIMO MODELIAVIMAS LABVIEW PROGRAMA	141
8 PRIEDAS. SAK NUSISTOVĖJIMO TRUKMĖS ĮVERTINIMO LABVIEW PROGRAMOS VIRTUALIEJI INSTRUMENTAI	148

IVADAS

Temos aktualumas. Mokslo ir technikos pažanga didina poreikį nustatyti vis mažesnius fizikinius dydžius ir jų pokyčius. Didėjantis analizuojamų ir perduodamų duomenų srautas, poreikis nustatyti naujus ar geriau suprasti žinomus dėsnius, realiuoju laiku stebėti įvairiose sistemose ir konstrukcijose daugelį jų taškų arba kanalų bei identifikuoti jų būsenas reikalauja patikimų stebėjimo ir įvertinimo duomenų, kurie su mokslo pažanga turi būti vis išsamesni. Visi vertinami fizikiniai dydžiai šiuolaikinėse elektroninėse sistemose dažniausiai keičiami elektriniais. Tai leidžia automatizuoti įvertinamų parametrų nustatymą, rezultatus skaitmeniškai apdoroti, vaizdžiai pateikti ir, svarbiausia, galima iš karto taikyti sukurtus matematinius modelius ir įvertinti tiriamosios sistemos ar objekto būseną.

Nepaisant naujausių technologijų laimėjimų ir galimybių ženkliai mažinti naujausių technologijų kūrimo ir diegimo kaštus, susiduriama su situacijomis, kai standartiniai, ilgą laiką naudoti sprendimai tampa per brangūs plačiam jų panaudojimui. Todėl tenka iš naujo analizuoti parametrų įvertinimo metodus ir atrasti galimybes juos keisti taip, kad būdami patikimais ir tiksliais, jie reikalautų mažesnių įdiegimo investicijų, jų panaudojimas būtų supaprastintas, garantuotų mažus nuosavybės kaštus ir laiduotų greitą įdiegtų technologijų atsiperkamumą.

Didėjant poreikiui identifikuoti bei nustatyti labai mažus parametrų pokyčius ir atsižvelgiant į tai, kad tam skirta įranga plinta iš mokslinių institutų į pramonės bei statybos kasdienybę, tenka kritiškai iš naujo įvertinti ilgą laiką naudotus metodus ir juos pritaikyti kasdieniam naudojimui, sumažinti jų kainą ir laiduoti neblogesnes nei buvo charakteristikas.

Darbe sprendžiamos mažų pokyčių patikimo įvertinimo daugelyje taškų (kanalų) problemos. Problemų sprendimo metu be pagrindinio uždavinio – patikimo mažų pokyčių įvertinimo, daug dėmesio skiriama sistemų kompleksiskumo ir kainos sumažinimui.

Tyrimams parinktos dvi sistemos skirtos identifikuoti objekto kokybę. Nors abiejose sistemose vertinami skirtingų parametrų maži pokyčiai, tačiau sprendžiami uždaviniai ir jų sprendimo strategija priklauso tai pačiai elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo problemai.

Pirmoji tirtoji sistema skirta konstrukcijų būsenų identifikavimui. Jos funkcionavimo esmė yra rezistorinių jutiklių varžos mažų pokyčių proporcingų poslinkiui ar deformacijai ir siekiančių tik tūkstantąsias procento dalis įvertinimas. 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 [1, 2, 10, 12 – 19] siekiama įvairiais būdais patobulinti nebalansuotą Wheatstone'o tiltelį, ko pasekoje sistema padaroma labai sudėtinga ir brangi. Kiti autoriai

šiems tikslams taiko nerezistorinius mažų pokyčių įvertinimo metodus [3 – 9]. Šios sistemos, dėl mažo jų paplitimo ir palyginti sudėtingų bei brangių lazerinių, vaizdo apdorojimo ir pan. technologijų panaudojimo yra dar sudėtingesnės ir brangesnės už rezistorines sistemas. Svarbiausia, nerezistorinių sistemų eksploatacija labai sudėtinga ir brangi.

Antrosios tirtosios sistemos paskirtis – automatinis sparčių integrinių grandynų (IG) ir skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK) dinaminių parametrų pokyčių įvertinimas. Ji skirta signalų vėlinimo ir nusistovėjimo laikams nustatyti. Sparčių IG vėlinimo trukmės siekia iki 200 ps. Sparčių SAK nusistovėjimo trukmės nustatymo metu tenka registruoti trumpus laiko intervalus signalui kintant labai mažose 1 MRS ribose. 12 skilčių SAK 1 MRS sudaro tik 0,025 % visos jo skalės, o 16 skilčių SAK – 0,0015 %. Šiuolaikinių sparčių SAK nusistovėjimo trukmės yra nuo vienetų iki kelių dešimčių nanosekundžių. Taigi IG ar SAK kokybė yra susieta su dviejų parametrų – trukmės ir lygio vertės, mažais pokyčiais. Akivaizdu, kad susiduriama su didelėmis labai trumpų vėlinimo trukmių įvertinimo apimtimis ir dideliais šių duomenų masyvais, kuriuos reikia kaupti, apdoroti ir nustatyti gaminio kokybės klasę. IG ir SAK parametrų nustatymą tyrė ir gerų rezultatų pasiekė Vilniaus Gedimino technikos universiteto (ankstesniojo VISI) mokslininkai [40, 49 – 57, 61 – 64, 67 – 75]. Tačiau laiko intervalų ir įtampų mažų pokyčių įvertinimo srityje liko neišspręsti panašūs varžos mažų pokyčių įvertinimui uždaviniai – žinomi metodai neleidžia kokybiškai, paprastai ir pigiai įvertinti daugiakanalių IG parametrus. Be to, reikalavimai kokybei nuolat didėja, nes integriniai grandynai gaminami vis spartesni ir nuolat didėja ypač sparčių SAK skilčių skaičius.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Pagrindinis darbo tikslas – sukurti varžų ir grandynų dinaminių parametrų mažų pokyčių įvertinimo daugelyje kanalų metodus, ištirti sukurtų metodų savybes ir atlikti šių metodų efektyvumo bei pritaikymo galimybių analizę. Tikslui pasiekti darbe išsprendžiami tokie uždaviniai:

1. Sukuriamas ir ištiriamas Wheatstone'o tiltelio automatinio skaitmeninio balansavimo metodas varžų mažų pokyčių įvertinimui.
2. Tiriamos priemonės didinančios parametrų mažų pokyčių įvertinimo patikimumą.
3. Tiriamos daugiakanalių sistemų su balansuojamu Wheatstone'o tilteliu galimybės.
4. Pasiūloma nauja konstrukcijų būsenos identifikavimo sistemos struktūra.
5. Sudaromi ir ištiriami daugiakanaliai stroboskopiniai keitikliai ir parenkami geriausi.
6. Ištiriami skaitmeniniai dinaminių parametrų įvertinimo kokybę didinantys būdai.
7. Panaudojant tyrimų rezultatus, rekomenduojama nauja daugiakanalio dinaminių parametrų įvertinimo įtaiso struktūra.
8. Pagrindiniai rezultatai patikrinami eksperimentiškai.

Darbo metodiniai principai. Darbe naudojami analitiniai, skaitmeniniai ir eksperimentinio tyrimo metodai. Varžos mažų pokyčių identifikavimo sistemos variantai analizuojami analitiniais metodais, kintamąja įtampa maitinamų identifikavimo sistemų analizė bei jų skaitmeninių filtrų įgyvendinimui naudojami skaitmeniniai modeliai „Matlab“ pakete, sistemos veikimo ir pagrindinių parametrų įvertinimui sukonstruotas laboratorinis maketas, valdomas iš asmeninio kompiuterio „LabView“ paketu. Daugiakanalių stroboskopinių keitiklių tyrimui panaudoti analitiniai ir skaitmeninių modelių „Electronics Workbench“ pakete metodai.

Mokslinis naujumas ir praktinė nauda. Darbe pasiūlyti ir ištirti nauji metodai, leidžiantys kurti daugiakanales konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemas, pagrįstas rezistyvinių poslinkio, deformacijos, akseleracijos ir jėgos jutiklių naudojimu. Disertacijos autorius pasiūlė Wheatstone'o tilteliui iš esmės naują, automatinį, skaitmeninį balansavimo metodą jutiklių varžos mažų pokyčių įvertinimui. Tiltelio balansavimui pasiūlyta naudoti skaitmeninius-analoginius keitiklius. Pasiūlytas metodas kartu su skaitmeninėmis rezultatų apdorojimo priemonėmis leidžia patikimai įvertinti varžų labai mažus pokyčius ir supaprastina daugiakanalę sistemą bei sumažina jos kainą.

Pasiūlyti ir ištirti nauji metodai, leidžiantys kurti automatizuotas daugiakanales grandynų dinaminių parametrų įvertinimo sistemas, pagrįstas autoriaus sukurtais ir ištirtais daugiakanaliais kompensaciniais stroboskopiniais keitikliais. Daugiaskilčių SAK dinaminių parametrų įvertinimui pasiūlytas ir sukurtas skaitmeninis signalų apdorojimo būdas leidžiantis įvertinti visus dinامينius parametrus.

Naujas automatizuotas daugiakanalių IG dinaminių parametrų įvertinimo būdas garantuoja paprastesnį ir pigesnį įvertinimo įrenginių ir sistemų įgyvendinimą, kartu laiduoja mažesnius sistemos gabaritus, didesnę patikimumą ir rezultatų kokybę.

Darbo rezultatai ir skirtingų sistemų įgyvendinimo metodų panašumas leidžia teigti, kad darbe sukurtų metodų pagrindiniai principai ir savybės gali būti panaudotos kitų mažų parametrų pokyčių įvertinimo sistemoms sukurti ir tobulinti.

Publikacijos ir darbo aprobavimas. Pagrindiniai disertacinio darbo rezultatai paskelbti 9 moksliniuose staipsniuose: 3 straipsniai žurnaluose, įrašuose į tarptautines duomenų bases, 3 straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, 2 straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose ir 1 straipsnis konferencijų medžiagoje.

Disertacinio darbo rezultatai pristatyti ir aptarti 12-oje mokslinių konferencijų:

1. Tarptautinėje konferencijoje „Measurement" 2005, Slovakijoje, Smolenicėje.
2. Tarptautinėje konferencijoje „VI th International Workshop for Candidates for a Doctors Degree OWD 2004“, Lenkijoje, Visloje.

3. 7-oje tarptautinėje aspirantų, magistrantų studentų vasaros mokykloje – seminare „Современные информационные технологии“, 2004, Baltarusijoje, Minske.

4. 4-oje – 9-oje tarptautinėse konferencijose „Elektronika‘2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005“ Lietuvoje, Kaune-Vilniuje.

5. 3-oje, 5-oje ir 6-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijose „Elektronika ir elektrotechnika“ 2000, 2002, 2003, Lietuvoje, Vilniuje.

Disertacijos struktūra ir turinys. Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, darbo rezultatų apibendrinimas, literatūros sąrašas ir 8 priedai.

Pirmame skyriuje aptariami bendrieji mažų, siekiančių tūkstantąsias procento dalis, pokyčių įvertinimo problemos bruožai, pasirinktų dviejų būdingiausių sistemų, kuriose susiduriama su šia problema, pavyzdžiu, analizuojami pagrindiniai varžų ir laiko intervalų mažų pokyčių nustatymui naudojami metodai, aptariami egzistuojančių metodų trūkumai ir jų tobulinimo galimybės. Skyrius pabaigiamas tikslo ir sprendžiamų uždavinių suformulavimu.

Antrame skyriuje aprašomas automatinio skaitmeniškai balansuojamo Wheatstone‘o varžų tiltelio metodas varžų mažiems, siekiantiems nuo kelių iki kelių dešimčių tūkstantųjų procento dalies, pokyčiams įvertinti, tiriamos priemonės padidinančios varžų mažų pokyčių įvertinimo patikimumą – įvairios dreifo mažinimo priemonės, skaitmeninis triukšmų filtravimas ir rezultatų skaitmeninis apdorojimas, analizuojamos daugiakanalių identifikavimo sistemų kūrimo galimybės, pasiūloma ir aprašoma tipinė varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemos struktūra. Tyrimų rezultatai paskelbti darbuose [A2, A4, A5, A7, A9, A10 – A12].

Trečiame darbo skyriuje sprendžiami dinaminiai parametrai – trumpų laiko intervalų, įvertinimo uždaviniai. Aptariami ir tiriami sukurti daugiakanaliai stroboskopiniai keitikliai, jų kompiuteriniai modeliai ir analizuojami rezultatai. Tyrimų išdavoje sudaroma nauja sparčiųjų skaitmeninių IG signalų vėlinimo įvertinimo įrenginio struktūrinė schema. Sprendžiami SAK nusistovėjimo trukmių įvertinimo uždaviniai, aptariama sudaryto SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo įrenginio struktūra bei skaitmeninio signalų apdorojimo priemonės, būtinos reikiamai įvertinimo kokybei garantuoti. Tyrimų rezultatai paskelbti darbuose [A1, A3, A6, A8].

Ketvirtame skyriuje pateikiami pagrindinių mokslinių išvadų eksperimentinės patikros rezultatai. Eksperimentiniuose maketuose ištirti Wheatstone‘o varžų tiltelio automatinis skaitmeninis balansavimas 8 skilčių SAK ir daugiakanalis kompensacinis stroboskopinis keitiklis. virtualių įtaisų ir sistemų modeliavimo pakete „LabView“ sukurtas ir ištirtas pasiūlytasis signalų apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės nustatymo metodas. Tyrimų rezultatai paskelbti darbuose [A1, A8, A9].

Disertacijoje yra 130 kompiuteriu sumaketuotų (tekstų redaktoriumi Microsoft Word 2003) teksto puslapių, 65 paveikslai, 1 lentelė, 93 bibliografinių šaltinių sąrašas. 8 priedų bendra apimtis 27 puslapiai.

Gynimui pateikiama:

1. Wheatstone'o tiltelio automatinis skaitmeninis balansavimo metodas varžų mažų pokyčių įvertinimui ir būdai įvertinimo patikimumui padidinti.
2. Automatinių skaitmeninių sistemų struktūros konstrukcijų būsenų tyrimui ir jų stebėsenai.
3. Daugiakanalis stroboskopinis keitiklis grandynų dinaminiams parametrams tirti.
4. Daugiakanalių stroboskopinių sistemų struktūros grandynų dinaminių parametrų įvertinimui ir skaitmeniniai metodai jų įvertinimo kokybei padidinti.

1. MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMO SISTEMŲ ANALIZĖ IR TYRIMAS

Šiame skyriuje aptariami bendrieji mažų, siekiančių tūkstantąsias procento dalis, pokyčių įvertinimo problemos bruožai, pasirinktų dviejų būdingiausių sistemų, kuriose susiduriama su šia problema, pavyzdžiu, analizuojami pagrindiniai varžų ir laiko intervalų mažų pokyčių nustatymui naudojami metodai, aptariami egzistuojančių metodų trūkumai ir jų tobulinimo galimybės. Skyrius pabaigiamas tikslo ir sprendžiamų uždavinių suformulavimu.

1.1. Bendrieji mažų pokyčių įvertinimo problemos bruožai

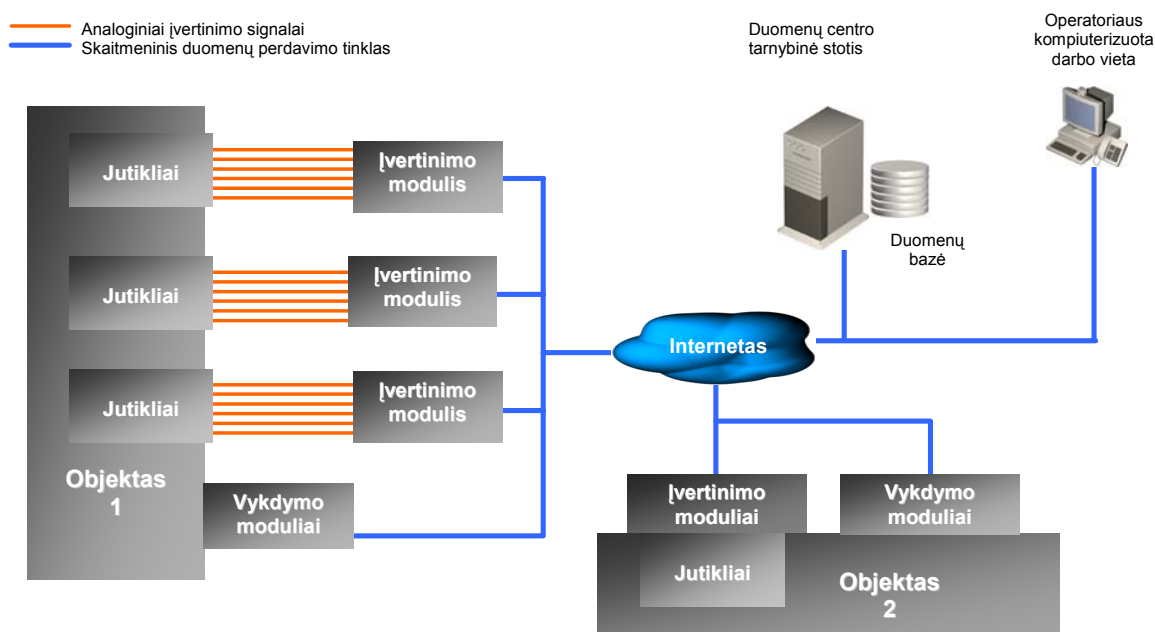
Pastaruoju metu mokslo ir technikos pažanga įvairiose srityse didina poreikį nustatyti vis mažesnius fizikinius dydžius ir jų pokyčius. Poreikis realiuoju laiku stebėti įvairias sistemas, konstrukcijas, įtaisus bei procesus, automatizuotai tirti ir nustatyti kokybinius parametrus gamybos proceso metu rūšiuojant ir klasifikuojant pagamintą produkciją, reikalauja automatizuoto stebimų parametrų įvertinimo ir apdorojimo, saugojimo ir pateikimo. Labai dažnai pagal įvertinimo rezultatus realiuoju laiku keičiami objekto matematinio modelio parametrai, perskaičiuojamas modelis ir įvertinamos bei pateikiamos objekto būsenos. Viso stebėjimo proceso rezultatai gali padėti sistemą valdantiems operatoriams priimti sprendimą, arba panaudoti automatizuotoje valdymo sistemoje, kurios vykdo šiais rezultatais paremtus korekcinius, prevencinius ir kitus veiksmus.

Realios sistemos, įvertinančios mažus parametrų pokyčius, gali būti tiek labai paprastos – indikuojančios parametrų ar jų pokyčių vertes bei viršijamas leistinas ribines vertes, arba ypač sudėtingos kompleksinės sistemos, sudarytos iš parametrus surenkančių modulių, centrinio duomenų apdorojimo ir kaupimo modulio bei vykdančiojo modulio, atliekančio korekcinius, prevencinius ir pan. veiksmus.

Kompleksinės sistemos pavyzdžiu galėtų būti statinių kontrolės sistema, kuri vertina mažus fizikinių parametrų (deformacijos, vibracijos, akseleracijos ir pan.) pokyčius daugelyje konstrukcijos taškų, perduoda įvertinimo rezultatus į duomenų apdorojimo centrą, kuriame rezultatai apdorojami, pritaikomas matematinis modelis ir nustatoma statinio būsena. Jei būsenos parametrai viršija tam tikras apibrėžtas ribines vertes, aktyvuojamos prevencinės priemonės, apsaugančios statinį nuo griuvimo – pvz. statinio ertmės užpildomos skysčiu, sumažinama statinio apkrova. Pvz., transportas nukreipiamas kitu maršrutu ar mažinamas transporto tankis naudojant automatizuotus kelio ženklus.

Svarbu pastebėti, kad nepriklausomai nuo vertinamų fizikinių dydžių ir galutinio rezultato bei sistemos panaudojimo srities visų sistemų sandara ir sprendžiami uždaviniai visais

atvejais praktiškai vienodi. Apibendrintoji stebėsenos sistemos struktūra pateikta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Apibendrintoji stebėsenos sistemos struktūra

Kitas problemos bruožas yra poreikis įvertinti, didėjant mokslo ir technikos pažangai, vis mažesnius dydžius ar vis mažesnius šių dydžių pokyčius. Mažų fizikinių dydžių bei mažų šių dydžių pokyčių įvertinimas yra atskiras uždavinys, kurio sprendimai jau praktikoje yra naudojami, tačiau jie yra labai brangūs ir dėl to dažniausiai naudojami tik moksliniuose tyrimuose. Didėjant poreikiui plačiai taikyti mažų pokyčių įvertinimo sistemas, atsiranda poreikis peržiūrėti žinomų sistemų efektyvumą, sumažinti kainą ir pagerinti kokybines savybes. Tam tenka kritiškai peržiūrėti ir patobulinti šiuo metu sistemose naudojamus įvertinimo metodus.

Tyrimams parinktos dvi sistemos skirtos identifikuoti tiriamo objekto savybes. Nors abiejose sistemose vertinami skirtingų parametrų maži pokyčiai, tačiau sprendžiami uždaviniai ir jų sprendimo strategija priklauso tai pačiai elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo problemai.

Pirmoji tirtoji sistema skirta konstrukcijų būsenų identifikavimui. Jos funkcionavimo esmė yra rezistorinių jutiklių varžos mažų pokyčių, proporcingų poslinkiui ar deformacijai, įvertinimas. Sprendžiant šį uždavinį tenka vertinti jutiklių varžų pokyčius, kurie sudaro 0,024...0,006 % jutiklio varžos. Be to, sistemą reikia pritaikyti laboratoriniams tyrimams ir stebėsenai.

Antrosios tirtosios sistemos paskirtis – automatiškai įvertinti integrinių grandynų (IG) dinaminių parametrų pokyčius. Sistema skirta sparčių ir ypač sparčių skaitmeninių integrinių grandynų bei skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK) dinaminiais parametrais – vėlinimo

bei nusistovėjimo laikams įvertinti. Uždaviniui išspręsti naudojami stroboskopiniai laiko mastelio keitikliai. Vertinant integrinių grandynų dinامينius parametrus, tenka vertinti keleto parametrų mažus pokyčius. Pirmiausia tenka vertinti laiko pokytį tarp signalo, praėjusio per tiriamąją IG ir nepraėjusio per tiriamąją IG. Šis pokytis skirtingiems IG sudaro 2...0,05 % tiriamojo signalo periodo.

Siekiant užtikrinti teisingą SAK nusistovėjimo trukmės pokyčio įvertinimą, be laiko pokyčio įvertinimo būtina užtikrinti ypač patikimą signalo nusistovėjimo amplitudės išėjimo iš ribinio intervalo momento įvertinimą. Taigi šiuo atveju tenka dideliu patikimumu įvertinti tiriamojo signalo amplitudės pokyčius, kurie skirtingiems SAK sudaro 0,2...0,012 % signalo amplitudės vertės.

Taigi parinktomis sistemoms įgyvendinti tenka spręsti panašius uždavinius – užtikrinti patikimą automatizuotą mažų pokyčių įvertinimą daugelyje kanalų.

1.2. Bendrieji reikalavimai konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemoms

Konstrukcijų kūrimo, statymo ir eksploatavimo procese labai dažnai tenka nustatyti unikalias konstrukcijų būsenas, siekiant užtikrinti tokių konstrukcijų patikimumą ir atsparumą išoriniams poveikiams, tokiems kaip temperatūra, drėgmė, mechaninės apkrovos, įtempimai ir pan. Unikalioms būsenoms, tokios kaip konstrukcijos perkrova, senėjimas, griuvimo riba, atsparumas dideliems temperatūros pokyčiams ar rezonansinių dažnių įtakai, nustatymas leidžia užtikrinti ilgą bei saugų konstrukcijų eksploatavimą [6, 22 – 25].

Kiekvienai konstrukcijai numatomos skirtingos unikalios būsenos. Šioms būsenoms identifikuoti sudaromi konstrukciją aprašantys matematiniai modeliai bei nustatomos įvairių fizikinių parametrų vertės, kurių visuma nustato konstrukcijos unikalią būseną [22 – 25]. Parametrai nusakantys konstrukcijos unikalią būseną yra įvairūs įtempimai (deformacijos), poslinkiai, akceleracijos, temperatūros, veikiančios jėgos ir daugelis kitų.

Konstrukcijos stebėsenai realiuoju laiku tenka visus konkrečios konstrukcijos būsenos identifikavimui reikalingus parametrus įvertinti bei perduoti į kontrolės centrą. Surinkus šiuos parametrus, pagal konstrukcijos matematinį modelį nustatoma konstrukcijos unikali būsena.

Dažniausiai konstrukcijų būsenos nustatymui naudojami deformacijos, poslinkio ir akceleracijos parametrai. Įvertinus įvairiuose konstrukcijos taškuose deformacijas ir poslinkius galima nustatyti konstrukcijos standinimo elementų trūkumą ar jų neefektyvumą, konstrukcijos elementų nuovargį, irimą dėl korozijos ar puvimo, lūžius ar įtrūkimus ir pan. Akceleracijų ir poslinkio parametrų žinojimas leidžia nustatyti konstrukcijos savuosius rezonansinius dažnius, kurie tiesiogiai susiję su konstrukcijos standumu – kuo aukštesnis rezonansinis dažnis, tuo standesnė konstrukcija.

Siekiant laiduoti konstrukcijos būsenos tikslų identifikavimą, tenka įvertinti parametrus daugelyje jos konstrukcijos taškų [22 – 25]. Didesniuose objektuose, pvz., tiltuose, identifikuojamų taškų skaičius gali siekti iki 200, o taškai išdėstyti iki keleto kilometrų atstumu vienas nuo kito. Vertinant daugiau taškų, galima sudaryti tikslesnius matematinius modelius ir atitinkamai galima tiksliau įvertinti konstrukcijos unikalią būseną. Laboratorinių tyrimų metu dažnai naudojami sumažinti konstrukcijų ar jų elementų modeliai arba tiriami tik atskiri konstrukcijos elementai. Šiuo atveju atstumai tarp vertinimo taškų yra mažesni ir siekia kelias dešimtis metrų. Tačiau analizuojamų taškų gali būti daug daugiau ir siekti 500.

Teisingam būsenos identifikavimui ir klaidos tikimybės minimizavimui, būtina galimai tiksliau išmatuoti kiekvieną parametą. Kartu būtina garantuoti mažą sistemos ir jos komponentų kainą bei mažus diegimo ir priežiūros kaštus. Taigi stebėsenos sistema turi būti įmanomai paprasta, patikima ir nereikalauti nuolatinės priežiūros.

Kitas reikalavimas – garantuoti vertinamų parametrų stabilumą, veikiant išoriniams faktoriams – atmosferos poveikiams, vibracijoms, drėgmei ir pan.

Taigi bendrieji reikalavimai konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemoms yra šie: 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; identifikavimo sistema turi būti palyginti pigi ir paprasta; identifikavimo sistema turi būti patikima; identifikavimo rezultatai turi būti neįtakojami išorinių faktorių.

Identifikuojant konstrukcijų būsenas dažniausiai tenka įvertinti jų deformacijas. Deformacijos ir jas charakterizuojančios išraiškos išsamiau aptartos 1-ame priede.

Apskritai metalinių konstrukcijų deformacijos, net veikiant didelėms jėgoms, yra labai mažos. Pavyzdžiui, $l = 10$ m ilgio ir $A = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ skerspjūvio ploto vielą veikiant $F = 1000$ N jėga deformacija yra [1]:

$$\varepsilon_l = \frac{F}{E \cdot A} = \frac{10^3}{(4 \cdot 10^{-4})(6,89 \cdot 10^{10})} = 3,63 \cdot 10^{-5}. \quad (1.1)$$

Iš rezultato (1.1) matome, kad daugelio medžiagų deformacijos, net veikiant didelėms išorinėms jėgoms, yra labai mažos lyginant su pačių objektų matmenimis.

Objektų matmenų santykinai mažų pokyčių įvertinimui naudojami:

- Mechaniniai metodai – pokyčiai matuojami mikrometrais ir objekto galai fiksuojami invarine viela.
- Optiniai – fotografiniai arba difrakciniai, metodai. Pirmuoju atveju analizuojamuose objekto taškuose klijuojamos specialios žymės, jos fotografuojamos stacionariai įtai-

syta didelės raiškos fotokamera prieš apkraunant objektą ir jį apkrovus, gauta informacija apdorojama specialia programine įranga ir nustatomos deformacijos [3 – 5]. Antruoju atveju difrakcinių Brago gardelių optinėse skaidulose nustatomas nuo gardelės deformacijos priklausantis lazerio spindulys slopinamas ir apskaičiuojama objekto deformacija [6 – 8].

- Globaliosios pozicionavimo sistemos (GPS) imtuvų ir antžeminių pozicionavimo bei klaidų korekcijos sistemų tinklas [9].

- Įtempimo jutikliai, verčiantys deformaciją į elektrinio parametro – (varžos, įtampos ar kito parametro) pokytį [1, 2].

Deformacijų identifikavime plačiausiai paplitęs, dažniausiai naudojamas ir 1.2 poskyryje paminėtus reikalavimus atitinkantis yra metodas pagrįstas įtempimo jutiklių panaudojimu. Įtempimo jutikliai taikomi akceleracijų, pasvirimų nuo vertikalės ir konstrukcijas veikiančių jėgų identifikavimui. Šiuose jutikliuose išorinis mechaninis poveikis keičiamas į jutiklio konstrukcijoje esamų įtempimo elementų deformaciją. Įtempimo jutikliai ir jų savybės išsamiau aptartos 2-ame priede.

Praktikoje deformacijų rezultatų vertės neviršija 10^{-3} eilės dydžio. Todėl įvertinant konstrukcijų elementų deformacijas tenka vertinti ypač mažus jutiklio varžos pokyčius. Pavyzdžiui, esant metalinės konstrukcijos deformacijai $\varepsilon = 10^{-6} \dots 10^{-3}$ ribose, jutiklio varžai $R = 120 \, \Omega$ ir jutiklio įtempimo jautrumo koeficientui $S = 2$, varžos pokytis nuo nominalinės vertės deformacijos metu bus toks:

$$\Delta R = R \cdot S \cdot \varepsilon_t = 120 \cdot 2,0 \cdot (10^{-6} \dots 10^{-3}) = (0,00024 \dots 0,24) \, \Omega. \quad (1.2)$$

Daugeliui konstrukcijų maksimali deformacija, kuriai esant konstrukcija peržengia tamprios deformacijos ribą, tesudaro $\delta R_d = (+6 \dots -3) \%$ jutiklio varžos pokyčio. Konstrukcijos būsenos identifikavimo metu reikia išmatuoti M kartų mažesnes deformacijas. Konstrukcijų laboratorinių tyrimų metu tenka vertinti deformacijas $M_l = 50 \dots 100$, o konstrukcijų stebėsenos metu $M_m = 20 \dots 50$ kartų mažesnes deformacijas, nei deformacijos, kurioms esant konstrukcija suyra. Priėmus, kad maksimali leistina deformacijos identifikavimo neapibrėžtis yra $\delta R_m = \pm 10 \%$, galima apskaičiuoti leistiną jutiklių varžos pokyčio įvertinimo neapibrėžtį konstrukcijų laboratorinių tyrimų bei stebėsenos metu:

$$\begin{aligned} \delta R_{ml} &= \frac{\delta R_d \cdot \delta R_m}{M_l \cdot 100} = \frac{6 \cdot 10}{(50 \dots 100) \cdot 100} = 0,012 \dots 0,006 \%, \\ \delta R_{mm} &= \frac{\delta R_d \cdot \delta R_m}{M_m \cdot 100} = \frac{6 \cdot 10}{(20 \dots 50) \cdot 100} = 0,03 \dots 0,012 \%. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Tokiu tikslumu išmatuoti varžos pokyčius pavyksta tik naudojant varžinius, nuolatine ar kintama įtampa maitinamus Wheatstone'o varžų tiltelius [10].

1.3. Varžos mažų pokyčių nustatymas naudojant varžinius Wheatstone'o tiltelius

Wheatstone'o tiltelį 1833 m. sukūrė S. H. Christie [10]. Tiltelio schema su vienu jutikliu – nežinomos varžos rezistoriumi R_4 , pateikta 1.2 paveiksle, a. Tiltelis sudarytas iš keturių rezistorių, įtampos ar srovės maitinimo šaltinio ir įtampos detektoriaus. Tiltelio varžos sudaro du lygiagrečiai sujungtus įtampų daliklius R_1 , R_2 , ir R_3 , R_4 . Maitinamo šaltinis gali būti nuolatinis ar kintamas. Tiltelio pečių įtampų skirtumą apibūdina (1.4) išraiška:

$$U_{0a} = U_B \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right), \quad (1.4)$$

čia: U_{0a} – tiltelio disbalanso įtampa; U_B – maitinimo įtampa; $R_1, \dots, R_3$ – nekintančios tiltelio pečių varžos; R_4 – jutiklis, kurio varža gali pakisti ΔR dydžiu. Išraiškoje priimta, kad $\Delta R = 0$

Žinomi du būdai varžos pokyčiams Wheatstone'o tiltelyje nustatyti. Vienas – nustatyti Wheatstone'o tiltelio disbalanso įtampos pokyčius ir apskaičiuoti varžos pokyčius. Kitas – naudoti tiltelį kaip nulio detektorį, kai tilteliu nustatomas varžos pokytis netiesiogiai, palyginant nežinomą varžą su panašaus standartinio rezistoriaus varža. Šis nustatymo būdas vadinamas subalansuoto Wheatstone'o tiltelio būdu.

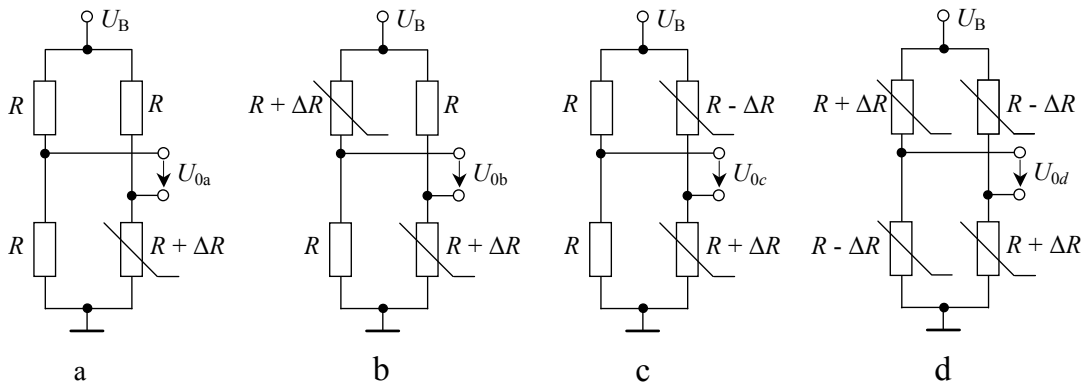
Subalansuotam Wheatstone'o tilteliui, kai $U_{0a} = 0$, galioja išraiška:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (1.5)$$

Iš (1.5) išraiškos išplaukia, kad rezultatas nepriklauso nuo tiltelio maitinimo stabilumo ar kitų faktorių ir yra įtakojamas tik tiltelio pečių varžų pokyčio (pvz. dėl aplinkos poveikio) ir tikslumo bei sugebėjimo tiltelį subalansuoti kuo arčiau jo balanso taško, tai yra $U_{0a} \rightarrow 0$. Subalansuoto tiltelio būdas turi nemažai privalumų. Tačiau naudojamas tik rankinio valdymo ir elektromechaninėse sistemose su grįžtamuju ryšiu. Čia pasikeitus tiltelio balansui, balanso detektorius parenka vieno iš tiltelio pečių varžą ir grąžina tiltelį į balanso būseną [10].

Daugiau paplitęs nesubalansuoto tiltelio identifikavimo metodas. Šiuo atveju vieno tiltelio peties varžos pokytis išbalansuoja tiltelį iš pradinės – subalansuotos padėties. Tokiu atveju tiltelio disbalanso įtampos pokytis nuo 0 V charakterizuoja varžos pokytį. Kadangi įtempimo jutiklių varžos pokyčiai labai maži, tiltelio disbalanso įtampos pokyčiai neviršija dešimtųjų milivolto dalių, net kai tiltelis maitinamas 10 V įtampa.

Siekiant padidinti tiltelio jautrumą dažniausiai naudojama keletas jutiklių ir tiltelio varžų nominalinės vertės parenkamos vienodos $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$. Galimi tokių grandinių variantai pateikti 1.2 paveiksle [10], o tiltelio disbalanso įtampos apskaičiavimo išraiškos kiekvienam tiltelio variantui aprašomos (1.6) formule.



1.2 pav. Tiltelio grandinių variantai

$$U_{0a} = \frac{U_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right], U_{0b} = \frac{U_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right], U_{0c} = \frac{U_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right], U_{0d} = U_B \left[\frac{\Delta R}{R} \right], \quad (1.6)$$

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

Tiltelio jautris apibrėžiamas maksimalaus išėjimo įtampos U_{0i} pokyčio santykiu su tiltelio maitinimo įtampa U_B . Pavyzdžiui, jei $U_B = 10$ V, o didžiausias įtampos pokytis sudaro 10 mV, tai tiltelio jautris yra 1 mV/V. Iš (1.6) išplaukia, kad panaudojus daugiau įtempimo varžą galima padidinti tiltelio jautrumą apie keturis kartus. Tačiau realiai tiek padidinti tiltelio jautrumą nepavyksta, nes labai sudėtinga pasiekti, kad priešingai kintantys jutikliai kistų visiškai vienodu dydžiu. Tai galima garantuoti tik tuo atveju, jei konstrukcija yra labai plona, tampri ir jos ilgio pokytis per jos storį yra labai mažas. Toks tiltelio sujungimo būdas dažnai naudojamas varžiniuose masės, spaudimo, akceleracijų ir panašiuose jutikliuose.

Tačiau konstrukcijų deformacijų įvertinimui dažniausiai tenka naudoti vieną aktyvųjį jutiklį. Jei tiltelio maitinimo įtampa 10 V, jutiklio varža 120 Ω , o maksimalus varžos nuokrypis nuo nominaliosios sudaro 6%, tokiu atveju maksimali tiltelio išėjimo įtampa lygi:

$$U_{0a} = \frac{U_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] = \frac{10}{4} \left[\frac{7,2}{120 + \frac{7,2}{2}} \right] = 0,1456 \text{ V}. \quad (1.7)$$

Kaip matoma iš (1.3) laboratoriniams tyrimams tenka vertinti gerokai mažesnius (pvz. 100 kartų mažesnius) įtampų pokyčius. Tokiu atveju įtampos pokyčiai, kuriuos tenka nustatyti tesudaro:

$$U_{0a} = \frac{U_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] = \frac{10}{4} \left[\frac{\frac{7,2}{100}}{120 + \frac{7,2}{2 \cdot 100}} \right] = 0,0015 \text{ V}. \quad (1.8)$$

Taigi įtampos pokyčiai, kuriuos būtina įvertinti yra labai maži. Tai sudaro papildomas problemas garantuojant patikimą jų įvertinimą, nes išoriniai triukšmai, trukdžiai bei elektroninių grandinių dreifai tampa ženklūs lyginant su šiais dydžiais.

Siekiant padidinti jautrumą galima būtų didinti tiltelio maitinimo įtampą, tačiau tokiu atveju pradeda didėti srovė tekanti per jutiklį ir pasireiškia jutiklio „pašildymo“ efektas. Šis efektas iššaukia temperatūrinės klaidas. Dėl to dažniausiai parenkama tiltelio maitinimo įtampa neviršijanti 10 V. Kitas būdas – didinti jutiklio nominaliąją varžą, taip mažinant jutiklio išsklaidomą galią ir kartu mažinant „pašildymo“ efektą. Daug sumažinti tiltelio maitinimo įtampą neracionalu, nes mažėja mažiausios vertinamos įtampos vertės ir didėja triukšmų bei trukdžių įtaka identifikavimo rezultatui.

Iš (1.6) matoma, kad nesubalansuoto tiltelio išėjimo įtampa U_{0i} yra visuomet proporcinga tiltelio maitinimo įtampai U_B . Taigi bendrasis įvertinimo tikslumas negali būti didesnis nei maitinimo įtampos tikslumas. Dėl šios priežasties būtina garantuoti ypač stabilų tiltelio maitinimą, nepriklausantį nuo išorės poveikių, kintančios apkrovos, išorės trukdžių ir kitų veiksnių. Tiltelis gali būti maitinamas ir srovės šaltiniu. Tokiu atveju esant labiau nutolusiems jutikliams pavyksta garantuoti didesnę įvertinimo stabilumą, eliminuoti jungiamųjų laidų įtaką rezultatui ir sumažinti jungiamųjų laidų kainą [10].

Esant labai mažiems deformuoto jutiklio varžos pokyčiams, tenka įvertinti varžos priklausomybę nuo temperatūros. Daugeliui metalų tiesinis temperatūrinis varžos koeficientas siekia $\alpha = 0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, o varža apskaičiuojama [11]:

$$R_T = R_{T0} (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (1.9)$$

čia: R_T – metalo bandinio varža esant temperatūrai T , α – bandinio metalo temperatūrinis varžos koeficientas, R_{T0} – nominalioji bandinio varža, esant 0°C temperatūrai.

Temperatūros pokyčiai, ypač atliekant ilgalaikius konstrukcijų būsenų stebėjimus, gali būti gana ženklūs ir siekti dešimtis laipsnių Celsijaus. Tačiau net temperatūros pokytis 1°C gali ženkliai pakeisti jutiklio varžą. Jei jutiklio varža esant 0°C temperatūrai yra 120Ω , $\alpha = 0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ ir temperatūros pokytis $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$, tuomet:

$$\Delta R_T = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 120 \cdot 0,004 \cdot 1 = 0,48 \Omega. \quad (1.10)$$

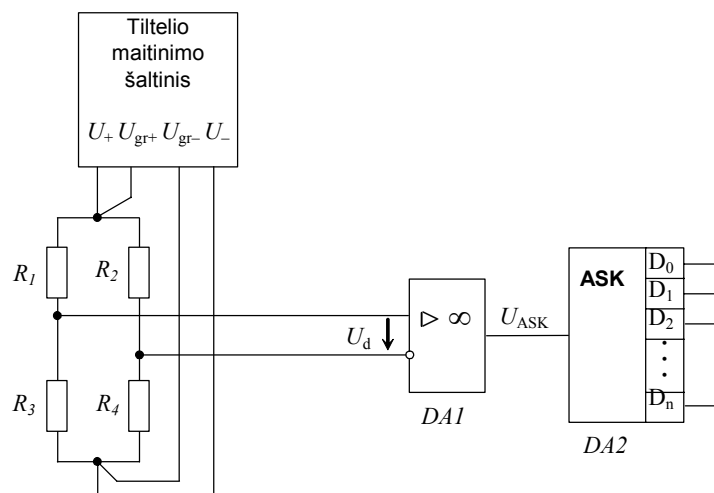
Palyginus (1.2) ir (1.10) rezultatus matoma, kad temperatūrinis varžos pokytis yra gerokai didesnis nei deformacijos sukeltas varžos pokytis. Todėl dauguma medžiagų, naudojamų jutiklių gamybai, yra parenkamos taip, kad galimai sumažinti temperatūros įtaką rezultatui, t.y. sumažinti šių medžiagų temperatūrinį varžos koeficientą. Tačiau visiškai pašalinti temperatūros įtaką jutiklio varžai nepavyksta. Naudojant du jutiklius, įjungtus į priešingus

tiltelio pečius ir patalpintus į vienodas temperatūrinės sąlygas, galima kompensuoti temperatūros įtaką rezultatui. Tokiu atveju vienas jutiklis naudojamas kaip aktyvusis – veikiamas deformacijos, o kitas kaip pasyvusis – neveikiamas deformacijos ir kompensuojantis temperatūrinį varžos kitimą. Jei bandinio deformacija vyksta viena kryptimi, pasyvus jutiklis klijuojamas skersai aktyviajam. Jei deformacijos vyksta keliomis kryptimis, pasyvusis jutiklis montuojamas galimai arčiau aktyviojo, garantuojant įmanomai artimesnes aplinkos sąlygas.

1.4. Deformacijų identifikavimo sistemų analizė ir eksperimentinis tyrimas

1.4.1. Sistemų su nesubalansuotu Wheatstone'o tilteliu privalumai ir trūkumai

Daugelis deformacijų įvertinimo sistemų projektuojama pagal vieningą standartinę schemą [10, 12 – 18], pateiktą 1.3 paveiksle. Šių sistemų branduolys – nesubalansuotas Wheatstone'o varžinis tiltelis, kurį sudaro varžos $R_1 - R_4$. Tiltelis prijungiamas prie nuolatinės įtampos šaltinio, kurio gnybtai pažymėti U_+ ir U_- . Tiltelyje deformacijų registravimui naudojamas varžinis įtempimo jutiklis R_1 , 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 varžinis įtempimo 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 pakeičia sustiprintą analoginę tiltelio disbalanso įtampą skaitmeniu disbalanso signalu. Taigi nebalansuojamame Wheatstone'o tiltelyje skaitmeniniais metodais užregistruojamas tiltelio išbalansavimo dydis ir pagal jį apskaičiuojamas proporcingas varžos pokyčiui konstrukcijos deformacijos dydis.



1.3 pav. Tiesioginio keitimo skaitmeninės statinių konstrukcijų deformacijų registravimo sistemos su nebalansuojamu Wheatstone'o tilteliu jutiklių grandinės schema

Nagrinėjamojoje sistemoje disbalanso įtampos dydis priklauso nuo tiltelio maitinimo įtampos dreifo. Tai aiškiai matoma išraiškoje (1.6). 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 kritimo laiduose, kuriais teka tiltelį maitinanti srovė, eliminavimui grįžtamasis ryšys dažniausiai sudaromas atskirais, tiesiogiai prie tiltelio jungiamais, 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 programuojamu stiprinimo koeficientu, kurių nulio dreifas yra praktiškai pašalintas.

Tiltelio disbalanso įtampą stiprinantis operacinis stiprintuvas slopina maitinimo šaltinio bei tiltelio sinfazinius triukšmus. Kad triukšmai būtų slopinami galimai stipriau, reikia, kad tiltelio petys būtų kiek įmanoma vienodesni ir aktyviojo bei pasyviojo jutiklių jungiamieji laidai būtų kiek galima arčiau vienas kito. Tam geriausiai tinka vytoji pora. Įvykdžius šias dvi sąlygas didžioji dalis trukdžių bus fazės sutapties trukdžiai. Operaciniame stiprintuve nenuslopintus triukšmus galima dar sumažinti integruojant disbalanso įtampą, nes registruojamas rezultatas kinta labai lėtai, o nenuslopintieji triukšmai yra baltojo triukšmo pobūdžio.

Kaip ASK dažniausiai naudojami didelio kvantavimo skiltiškumo (16 – 24 skilčių) Σ - Δ tipo ASK. Jų sparta nėra didelė, tačiau tai ir nereikalaujama tiriant konstrukcijas. Sparta tampa svarbesne, kai į vieną ASK prijungiamas didelis stiprintuvų skaičius.

Analizuojant šią struktūrą matoma, kad identifikavimo paklaidų šaltiniais gali būti:

1. Tiltelio maitinimo įtampos dreifai. Kintant maitinimo įtampai keičiasi ir tiltelio disbalanso įtampa, o tai kartu įtakoja identifikavimo rezultatą. Norint išvengti maitinimo įtampos dreifų, naudojami preciziški įtampos šaltiniai su reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais. Grįžtamasis ryšys dažniausiai prijungiamas atskirais laidais tiesiai prie tiltelio tam, kad eliminuoti įtampos kritimą laiduose, kuriais teka tiltelį maitinanti srovė.

2. Tiltelio maitinimo įtampos bei paties tiltelio triukšmai, kurie keičia momentinę identifikavimo 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), o tiltelio petys būtų kiek įmanoma vienodesni, tuomet didžioji dalis triukšmų bus sinfaziniai. Nenuslopintus triukšmus eliminuoti galima integruojant sustiprintą signalą.

3. Stiprintuvo stiprinimo koeficiento nestabilumai. Pasikeitus stiprinimo koeficientui keičiasi įtampa paduodama į ASK ir gaunama identifikavimo rezultato paklaida. Paklaidos mažinamos naudojant precizinius instrumentinius stiprintuvus bei stiprintuvus su programuojamu stiprinimo koeficientu.

4. Stiprintuvo nulinio dreifai. Jų įtaka identifikavimo rezultatui bei paklaidų mažinimo būdai analogiškai kaip ir 1-ajame punkte.

5. Stiprintuvo amplitudinės charakteristikos netiesiškumo paklaidos. Jų išvengti galima tik apribojant stiprintuvo darbo diapazoną tiesiškoje charakteristikos dalyje.

6. ASK keitimo klaidos tiesiogiai įtakojančios identifikavimo rezultatą. Norint jų išvengti naudojami daugiaskilčiai preciziniai ASK.

7. Tiltelio apkrovos – operacinio stiprintuvo su reikiama grįžtamaisiais ryšiais, įtaka tiltelio darbui. Šių paklaidų vengiama naudojant instrumentinius stiprintuvus su vienoda didele invertuojamo ir neinvertuojamo įėjimo varža.

Įvertinant visus anksčiau paminėtus veiksnius, registravimo sistemose tikslingiausia naudoti specializuotas integrinius grandynus, į kuriuos patalpinti maitinimo šaltiniai, stiprintuvai, ASK, tiltelio netiesiškumo bei temperatūrinių ir kitų faktorių eliminavimo grandinės [14, 15]. Tačiau precizinės grandinės garantuojančios didelį tikslumą ir rezultatų patikimumą dažnai yra labai sudėtingos [17, 18]. Tokių grandinių išėjime iš karto gaunamas konstrukcijos deformaciją apibūdinantis skaitmeninis kodas.

Pagrindiniai registravimo sistemos su nebalansuojamu Wheatstone'o tilteliu trūkumai:

1. Sudėtinga prie sistemos prijungti daugiau nei vieną jutiklį, 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 į registruojamą rezultatą įtakančių poveikių – tiltelio maitinimo įtampos trukdžiai ir svyravimai, stiprintuvo dreifai, ASK nustatymo klaidos.

3. Labai sudėtinga ir reikalaujanti tikslaus derinimo sistemos elektroninė grandinė.

4. Specializuoti IG labai brangūs, be to kiekvienam jutikliui reikalinga atskira elektroninė grandinė, kurią būtina labai tiksliai suderinti.

5. Sistema nepritaikyta surinkti skaitmeninius duomenis iš daugelio konstrukcijos taškų, nes jutikliai ir IG turi būti kiek įmanoma arčiau identifikavimo taško.

6. Sistema labai jautri tiltelio maitinimo įtampos pokyčiams bei triukšmams, tai riboja tokių sistemų taikymo galimybes lauko sąlygomis.

Taigi tiesioginio keitimo skaitmeninė sistema su nebalansuojamu Wheatstone'o tilteliu yra palyginti brangi, nepatogi eksploatuoti bei garantuoja ribotą įvertinimo tikslumą. Dideliu tokių sistemų trūkumu yra sudėtingumas įgyvendinti daugiakanalę sistemą.

1.4.2. Daugiakanalės sistemos su nesubalansuotu Wheatstone'o tilteliu savybės

Daugiakanalės sistemos dažniausiai kuriamos naudojant keletą skirtingų metodų:

1. Jutikliai jungiami ilgais laidais tiesiogiai į duomenų surinkimo centrą. Čia kiekvieno kanalo signalas stiprinamas atskiru jutikliui kalibruotu stiprintuvu. Stiprintuvų išėjimai komutuojami į analoginį-skaitmeninį keitiklį ir paeiliui keičiami į skaitmeninį kodą.

2. Kiekvienas jutiklis aprūpinamas savu kalibruotu stiprintuvu ir ASK, o duomenys perduodami skaitmenine magistrale.

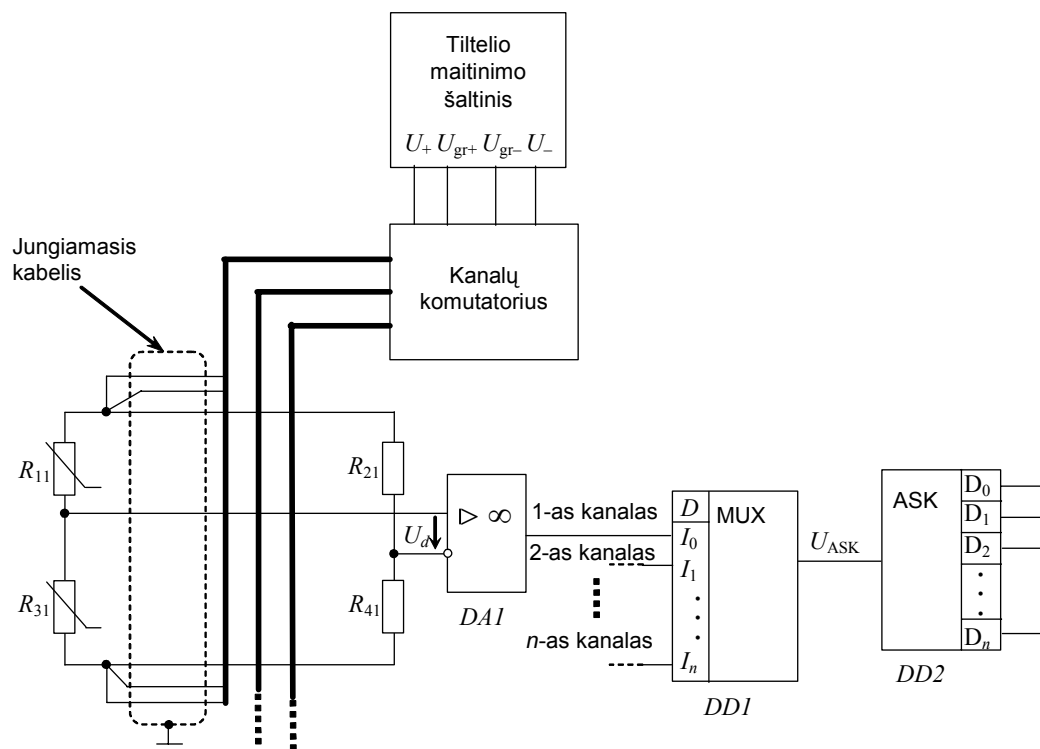
Pirmuoju atveju didesnėms konstrukcijoms naudojami ilgi specializuoti jungimo kabeliai, kurių kaina dėl sudėtingo triukšmų ekranavimo bei būtinos ypač mažos varžos yra labai didelė. Be to, kabeliai kalibruojami kartu su jutikliais ir gali būti jungiami tik prie atitinkamo sistemos kanalo. Tai apsunkina testavimo vietos parengimą. Be to, net specializuotų kabelių ilgis ribojamas ir retai siekia daugiau nei 25 metrus.

Sistemose dažniausiai naudojami specializuoti stiprintuvai, kurie kalibruojami pagal prie atitinkamo kanalo jungiamus kabelius ir jutiklius. Didelis stiprintuvų kiekis gerokai padidina sistemos kainą.

Tiltelio maitinimo šaltinis parenkamas labai stabilus ir jis turi su grįžtamuosius ryšius. Taip garantuojamas reikiamas įvertinimo rezultato stabilumas. Šaltinis komutuojamas prie kiekvieno kanalo jo vertinimo metu. Dažniausiai maitinimo šaltiniai gaminami kaip specializuoti blokai, maitinami 220 V įtampa. Tai sukelia tam tikrų nepatogumų dirbant lauko sąlygomis, kai arti nėra pramoninės įtampos tinklo.

ASK dažniausiai įgyvendinamas kaip atskiras funkcinis modulis su reikiamu įėjimo kanalų skaičiumi. Įėjimai komutuojami prie ASK, čia rezultatas keičiamas į skaitmeninį, atitinkantį Wheatstone'o tiltelio peties pokytį. Dažnai kaip ASK panaudojami funkciniai moduliai montuojami į asmeninį kompiuterį (AK) ar jungiami prie jo per atitinkamus prievadus. Apibendrinus analizuotas daugiakanales sistemas [12 – 18], sudaryta tipinė daugiakanalės sistemos struktūra pateikta 1.4 paveiksle.

Antruoju atveju taip pat naudojama bazinė, 1.3 paveiksle pateikta grandinė, tačiau kiekvienas kanalas aprūpinamas nuosavu maitinimo šaltiniu, stiprintuvu ir ASK. Tai padidina sistemos kainą, tačiau leidžia naudoti specializuotas IG ir išdėstyti jutiklius didesniais atstumais nei pirmuoju atveju, nes čia dideliais nuotoliais perduodami skaitmeniniai, o ne analoginiai signalai. Taip galima pasiekti ir keletą kilometrų nutolusius jutiklius.



1.4 pav. Standartinės daugiakanalės sistemos jutiklių grandinės schema

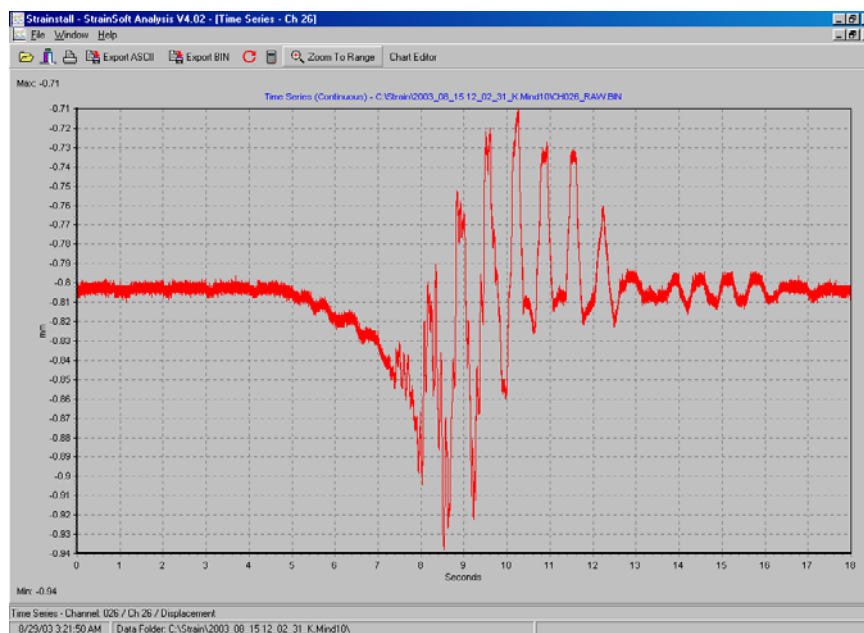
Daugelyje panašių sistemų atsisakoma ilgų kabelių ir su jais susijusių kaštų bei montavimo problemų ir taikomi bevieliai duomenų perdavimo sprendimai [19].

1.4.3. StrainStall kompanijos konstrukcijų ir tiltų parametrų registravimo sistema ir jos tyrimo rezultatai

StrainStall kompanijos konstrukcijų ir tiltų parametrų stebėjimo bei tyrimo sistema [18] skirta deformacijų dinaminiams bei kitokiems parametrams įvertinti. Sistema sumontuota specializuotame automobilyje, kuriame 19 colių standartinėje spintoje sumontuotos sistemos komponentės: „Fylde Modular Instrumentation“ firmos stiprintuvų blokas su stiprintuvų moduliais; kompiuteris su įmontuotu „National Instruments“ PCI-6033E ASK bloku; kompiuterio klaviatūra; LCD TFT monitorius; spalvotas rašalinis spausdintuvas; nepertraukiamo maitinimo šaltinis; kabelių jungčių blokas patogiam jutiklių prijungimui prie sistemos; 1,5 kW galios dyzelinis generatorius, garantuojantis sistemos maitinimą 220 V įtampa.

Sistema sudaryta pagal 1.4 paveiksle pateiktą standartinę schemą. Specializuotas maitinimo šaltinis bei specializuoti stiprintuvų blokai apjungti į vieną funkcinį modulinį mazgą su keitimo bei plėtimo galimybėmis. Naudojami standartiniai Fylde Modular Instrumentation firmos MicroAnalog2 serijos gaminiai. Pagrindinės StrainStall sistemos modulių charakteristikos pateiktos 3-ame priede. Iš charakteristikų matoma, kad teoriškai StrainStall sistema turi garantuoti 16 skilčių kvantavimo lygio varžos pokyčio įvertinimą, kas sudaro $2^{16} = 65536$

atskaitų elastingos deformacijos diapazone. Tačiau atliekant tyrimus lauko sąlygomis nustatyta, kad triukšmų įtaka šioje sistemoje nėra visiškai eliminuota.



1.5 pav. Tyrimo StrainStall sistema rezultatas

Dalyvaujant autoriui StrainStall sistema atlikti „Karaliaus Mindaugo“ tilto Vilniuje dinaminiai bandymai [21]. Gauta rezultato pavyzdys pateiktas 1.5 paveiksle. Dinaminiai bandymai vykdyti, sudarant dirbtinę kliūtį ir per ją įvairiais greičiais leidžiant 17 tonų sveriantį sunkvežimį. 1.5 paveiksle aiškiai galima išskirti deformacijos dėl didėjančios apkrovos (sunkvežimio užvažiavimo) sritį ties 5 – 8 sekundėmis, sunkvežimio sukeltų smūgių šokant per kliūtį deformacijas ties 8 – 9 sekundėmis bei tilto savųjų svyravimų sukeltas deformacijas – nuo 9 iki 17 sekundės. Iki 5 sekundės, kol nėra išorinio poveikio, matomas baltojo triukšmo pobūdžio signalas. Baltojo triukšmo pobūdžio signalo pikų lygis prijungus jutiklius, ir nesant išorinio poveikio siekia iki 64 kvantavimo vienetų. Tokiu atveju, esant 16 skilčių kvantavimo lygio, arba 65536 kvantavimo laiptelių skalei, signalo – triukšmo santykis sudaro:

$$S/T = 20 \log(N_t / N_{ASK}) = 20 \log(64 / 65536) = -60,2 \text{ dB}, \quad (1.11)$$

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

Pagal [20] efektyvų ASK skilčių skaičių N_{ef} , t.y. realiai nustatyme naudojamas nepaveiktas triukšmo skiltis, galima suskaičiuoti pagal šią išraišką:

$$N_{ef} = \frac{|S/T| - 1,76}{6,02} = \frac{60,2 - 1,76}{6,02} = 9,7. \quad (1.12)$$

Taigi iš 16 ASK skilčių efektyviai naudojama tik 9,7 skilties ir nepasiekiamas adekvatus įvertinimo rezultato neapibrėžčių lygis. Analizuojant aukščiau šiame skyriuje pateiktus analogiškų sistemų principus ir galimus paklaidų šaltinius galima daryti išvadą, kad praktiškai visos pagal šį principą suprojektuotos sistemos turėtų turėti panašų efektyvų bitų skaičių. Todėl brangių daugiaskilčių, turinčių iki 24 skilčių, ASK naudojimas yra nepagrįstas. Labiausiai tikėtina, kad jų naudojimas labiau susijęs su siekiu išsiskirti rinkoje ir marketingo tikslais, nei su realiai pagrįstu poreikiu.

Atliekant bandymus nustatyta ir daugiau sistemos trūkumų:

- Sistema sumontuota specializuotame automobilyje, nuo kurio iki kiekvieno jutiklio būtina nutiesti atskirą kabelį. Kabeliai išdėstomi abiejose tilto pusėse bei apačioje. Kad kabeliai nebūtų pažeisti bandymo metu, juos reikia pakelti virš važiuojamosios dalies. Tai daug laiko užimantis darbas, kuris kartais gali būti pavojingas.
- „Karaliaus Mindaugo“ tilto ilgis palyginti nedidelis, tačiau buvo jaučiamas standartinių kabelių ilgio stygius poslinkio jutiklių, montuojamų tilto apatinėje dalyje prijungimui.
- Sistema sudėtingai parengiama darbui. Kiekvienas jutiklis gali būti jungiamas tik prie jam sukalibruoto sistemos kanalo, naudojant konkrečiam jutikliui sukalibruotus kabelius.
- Sistema maitinama 220 V tinklo įtampa. Kai arti nėra galimybės prisijungti prie pramoninio tinklo, naudojamas autonominis dyzelinis generatorius. Dėl šios priežasties sistemos veikimo laikas yra ribotas.
- Sistemos jutiklių konstrukcija ir matmenys negarantuoja ilgalaikio konstrukcijų stebėjimo, jutikliai montuojami ne ant konstrukcijos, o ant tam skirtų atramų. Nėra jutiklių, skirtų montuoti į konstrukcijos vidų. Jutikliai neapsaugoti nuo atmosferos poveikio.
- Pačios sistemos konstrukcija ir koncepcija neleidžia jos naudoti ilgalaikiams stebėjimams dėl didelių gabaritų ir maitinimo bei aptarnavimo neautonomiškumo.
- Sistemą sudėtinga išplėsti. Esamoje sistemoje galima prijungti tik iki 40 skirtingų akceleravimo, poslinkio ir deformacijų jutiklių. Esant plėtimo poreikiui būtina įsigyti papildomą stiprintuvų modulį, duomenų įvedimo į AK modulį bei kabelių prijungimo modulį.

Apibendrinant galima teigti, kad vidutinio sudėtingumo ir kainos klasės sistemos, plačiai naudojamos pasaulyje, turi nemažai trūkumų. Siekiant pašalinti šiuos trūkumus ir pagerinti konstrukcijų stebėsenos sistemų eksploatacines savybes bei sumažinti jų diegimo bei priežiūros kaštus formuluojami šio darbo tikslai ir uždaviniai.

1.5. Bendrieji sparčiųjų skaitmeninių grandynų dinaminių parametrų mažų pokyčių nustatymo problemos bruožai

Elektronikos pramonė gamina daug įvairių sparčiųjų skaitmeninių grandynų: logikos grandines, trigerius, registrus, skaitiklius, skaitmeninius-analoginius keitiklius (SAK) ir pan. Grandynų gamybos metu nustatomi įvairūs gaminių parametrai. IG spartą nusako jų dinaminiai parametrai. Kontroliuojamų parametrų pokyčiai, apsprendžiantys gaminių kokybę, yra labai maži. Todėl juos būtina nustatyti tiksliai. Tikslios žinios apie dinامينius parametrus leidžia suklasifikuoti gaminius pagal kokybės lygmenis, o nepakankamai aukštų dinaminių parametrų gaminius pripažinti netinkamais. Grandynų dinaminių parametrų nustatymas yra problematiškas ir kompleksinis uždavinys, kurio metu labai svarbu garantuoti pakankamą parametrų nustatymo patikimumą.

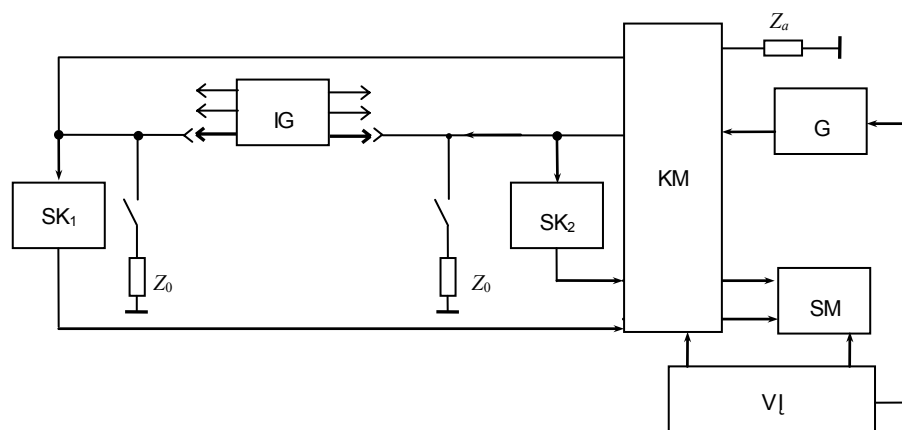
Gaminant sparčiuosius skaitmeninius grandynus dažniausiai yra kontroliuojamos juose sklindančių signalų vėlinimo trukmės [26]. Šiuolaikinių sparčiųjų skaitmeninių grandynų gamybos metu, kiekviename grandyne kontroliuojamos dešimtys vėlinimo trukmių, susidarančių skirtingu keliu ir per kitus loginius ar skaitmeninius elementus sklindant signalams. Vėlinimo trukmės gali siekti iki 200 ps. Akivaizdu, kad susiduriama su didelėmis labai trumpų vėlinimo trukmių įvertinimo apimtimis ir dideliais šių duomenų masyvais, kuriuos reikia kaupti, apdoroti ir nustatyti gaminio kokybės klasę. Grandynuose dar gali būti vertinamos jų išėjimo signalų frontų trukmės ir kiti parametrai, kurie kartu su vėlinimo trukmės įverčiu nusako tiriamo gaminio kokybę.

Vertinant sparčiųjų SAK grandynų kokybę, svarbiausiu jų dinaminio parametro yra išėjimo įtampų ar srovių nusistovėjimo ir signalų vėlinimo trukmės [27 – 34]. Šių parametrų nustatymas yra pakankamai sudėtingas, kadangi nustatomos SAK išėjimo įtampos ar srovės neapibrėžties ruožas paprastai sudaro 1 mažiausią reikšminę skiltį (MRS). 12 skilčių SAK 1 MRS sudaro 0,025 % pilnos keitiklio išėjimo įtampos ar srovės skalės, 16 skilčių – 0,0015 % ir t. t. Šių keitiklių nusistovėjimo trukmės siekia nuo vienos iki dešimties nanosekundžių. Sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmės nustatymo metu reikia identifikuoti ypač mažos trukmės pokyčius, kurie susieti su labai mažų įtampos ar srovės verčių pasikeitimu. Todėl įranga yra pakankamai sudėtinga. Gaminami ir daugiakanaliai spartūs SAK, kurių kiekvieno kanalo dinامينius parametrus taip pat tenka įvertinti. Daugiakanalių SAK dinaminių parametrų įvertinimas yra dar sudėtingesnis.

Taigi kita sritis, kurioje daugelyje kanalų tenka įvertinti mažus parametrų pokyčius yra skaitmeninių integrinių grandynų ir skaitmeninių-analoginių keitiklių dinaminių pokyčių įvertinimas. Be to, įvertinimo metu tenka nustatyti didelį kiekį parametrų ir susidaro dideli duomenų masyvai.

1.6. Vėlinimo trukmės sparčiuose skaitmeniniuose grandynuose registravimo sistemos

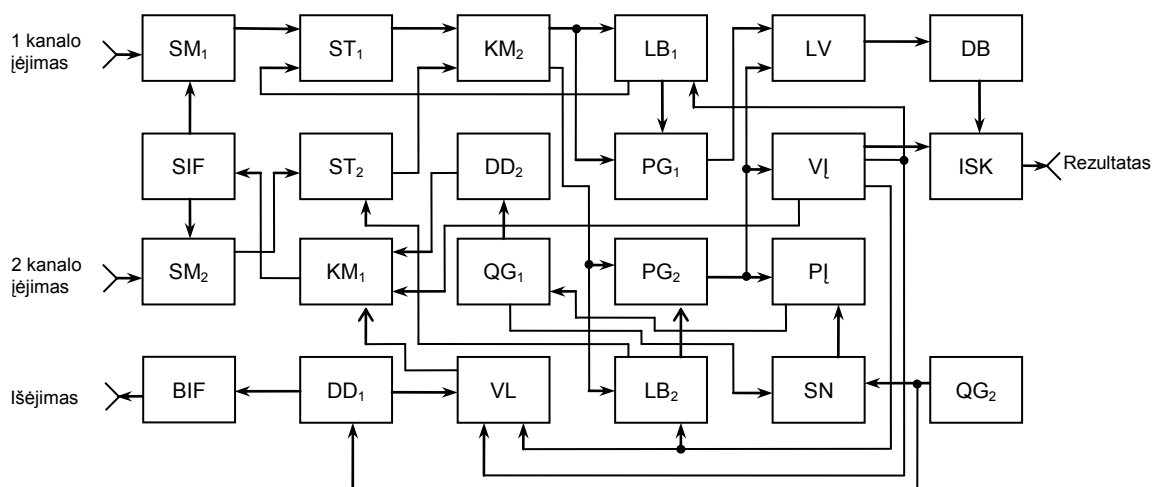
Šiuolaikiniuose sparčiuosiuose skaitmeniniuose grandynuose signalų vėlinimo trukmės pakankamai mažos ir siekia iki 200 ps [26]. Kiekviename grandyne tenka išmatuoti dešimtis skirtingų vėlinimo trukmių apibūdinančių signalo sklidimą per visus grandyne suformuotus loginius elementus ar grandyne esančius skaitmeninius įtaisus. Sparčiųjų grandynų dinaminių parametrų įvertinimui dažniausiai naudojami stroboskopiniai laiko mastelio keitikliai. Stroboskopinis elektrinių signalų laiko mastelio keitimo metodas buvo sukurtas ir pritaikytas plačiajuosčių pasikartojančių elektrinių signalų tyrimui [35 – 42]. Stroboskopinis sparčių elektronikos įtaisų dinaminių parametrų nustatymo metodas yra dažniausiai taikomas dėl plačių tokių prietaisų tiriamųjų signalų juostų, galimybių vizualiai kontroliuoti tiriamuosius signalus ir nustatyti atskaitos lygius santykinai žemadažniuose, pakeisto laiko mastelio signaluose [43 – 48]. [47] darbe aprašyto matuoklio supaprastintos grandinės schema parodyta 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Supaprastinta informacinės matavimo sistemos grandinės schema: IG – tiriamasis skaitmeninis integrinis grandynas; SK₁, SK₂ – stroboskopiniai keitikliai; SM – stroboskopinis matuoklis; KM – komutatorius; G – impulsų generatorius; Vl – valdymo įrenginys

Paveiksle pastorintomis rodyklėmis parodytas signalo sklidimas sistemos grandine, kai nustatoma vėlinimo trukmė viename tiriamojo IG kanale. Vėlinimo trukmės nustatymas vyksta taip. Valdymo įtaisas Vl nustato aukštadažnį komutatorių taip, kad impulsų generatoriaus G išėjimo signalai patektų vieną iš daugelio tiriamojo integrinio grandyno IG įėjimų ir į prie IG įėjimo prijungto stroboskopinio keitiklio SK₂ įėjimą. Šis keitiklis skirtas impulso patekimo į tiriamąjį IG momentui užfiksuoti. Pasiekę IG išėjimą impulsai patenka į kito stroboskopinio keitiklio SK₁ įėjimą. Šis keitiklis skirtas impulso išėjimo iš tiriamojo IG momentui užfiksuoti. SK_{1,2} išėjimai prijungti prie stroboskopinio matuoklio SM įėjimų. SK₁ ir SK₂ pakeičia į IG siunčiamų tiriamųjų impulsų mastelį. SM nustato pakeistame laiko mastelyje impulsų vėlinimo trukmę.

[41, 49 – 57] darbuose pasiūlyta naudoti stroboskopinį pikinio detektavimo keitiklį ir fazinį-dažninį stroboskopinių impulsų žingsnio formavimo metodą. Parodyta, kad pikinio detektavimo keitikliai lyginant juos su grįžtamojo ryšio keitikliais turi daug didesnę perdavimo koeficientą, paprastesnę grandinę ir mažesnius savuosius triukšmus bei trukdžius. Todėl jie lengviau įgyvendinami. Tokie keitikliai dėl detektoriaus pikinio režimo gali analizuoti tik santykinai aukštadažnius signalus, kurių pasikartojimo dažnis didesnis už (0,1...1) MHz. Todėl stroboskopiniai pikinio detektavimo keitikliai tinkami specializuotiems sparčiųjų integrinių grandynų dinaminių parametrų nustatymo matuokliams. 1.7 paveiksle pateikta [55, 56] darbuose aprašomo integrinių grandynų dinaminių parametrų matuoklio su stroboskopiniais pikinio detektavimo keitikliais ir dviem kvarciniais generatoriais grandinės schema.



1.7 pav. Stroboskopinis IG dinaminių parametrų matuoklis: $SM_{1,2}$ – stroboskopiniai maišikliai; SIF – stroboskopinių impulsų formuotuvai; BIF – bandomųjų impulsų formuotuvai; $ST_{1,2}$ – stiprintuvai; $KM_{1,2}$ – komutatoriai; $DD_{1,2}$ – dažnio dalikliai; $QG_{1,2}$ – kvarciniai generatoriai; VL – vėlinimų blokas; $LB_{1,2}$ – lygių nustatymo blokai; $PG_{1,2}$ – palyginimo grandinės; LV – laiko vartai; Vl – valdymo įtaisas; $P1$ – perderinimo įtaisas; SN – sinchronizatorius; DB – daliklių blokas; ISK – impulsų skaitiklis

Matuoklis veikia taip. Impulsai vėlinimo laikui nustatyti formuojami bandomųjų impulsų formuotuve BIF ir siunčiami į analizuojamą IG. Šių impulsų dažnis lygus kvarcinio generatoriaus QG_2 išėjimo impulsų dažniui padalytam dažnio daliklyje DD_1 . Bandomieji signalai iš analizuojamojo IG išėjimų grįžta į matuoklį per aukštadažnio komutatoriaus išėjimus, kaip tai buvo parodyta 1.6 paveiksle. Nagrinėjamame matuoklyje jie siunčiami į 1-ojo ir 2-ojo kanalų stroboskopinius pikinio detektavimo maišiklio $SM_{1,2}$ pirmuosius įėjimus. Į antruosius maišiklių įėjimus siunčiamas trumpas impulsas suformuotas stroboskopinių impulsų formuotuve SIF. Valdymo įtaisas Vl pagal analizuojamojo IG analizės programą valdo komutatorių KM_1 ir leidžia suformuoti stroboskopinius impulsus, kurių dažnis lygus kvarcinio generatoriaus QG_1 arba QG_2 išėjimo impulsų dažniui. Dinaminio parametro įvertinimo metu komutatorius KM_1 pirmiausia siunčia į formuotuvą SIF generatoriaus QG_2 išėjimo impulsus, kurių dažnis padalytas daliklyje DD_1 . Siunčiamų impulsų padėtį laiko ašyje nustato vėlinimų blokas

VL. SM_{1,2} mašikliai veikia strobavimo viename taške režimu ir jų išėjimuose gaunamos signalų vertės yra lygios bandomųjų signalų akimirkinėms vertėms, kurias nurodė vėlinimų blokas VL. Tinkamai parinkus keturis vėlinimo laikus galima nustatyti bandomųjų ir tiriamųjų signalų vertes atitinkančias loginio 0 U^0 ir loginio 1 U^1 lygius. Šios lygių vertės įsimenamos lygių blokuose LB₁ ir LB₂ ir suformuojami santykiniai atskaitos lygiai, tarp kurių nustatoma signalo vėlinimo trukmė. Atskaitos lygiai gali sudaryti nuo 0,05 iki 0,95 tiriamojo signalo amplitudės $U_A = U^1 - U^0$.

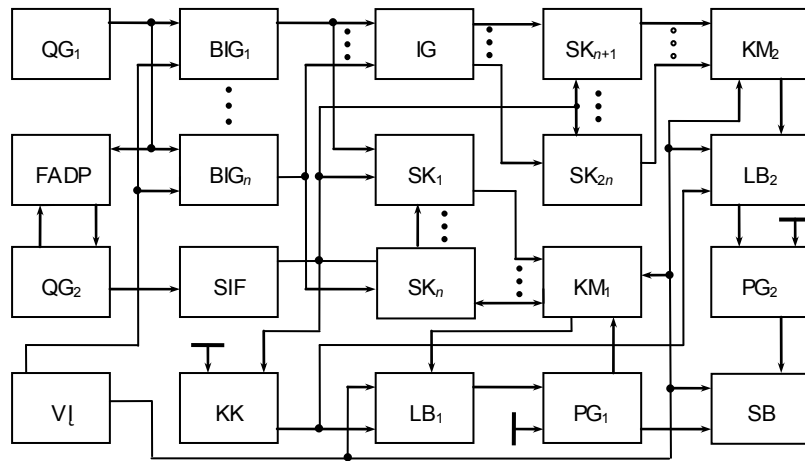
Po to komutatorius KM₁ siunčia į stroboskopinių impulsų formuotuvą SIF generatoriaus QG₁ išėjimo impulsus, kurių dažnis padalytas dažnio daliklyje DD₂. Šiuo atveju bandomųjų signalų ir stroboskopinių impulsų dažniai skiriasi. Stroboskopiniai pikinio detektavimo maišikliai SM₁ ir SM₂ veikia mastelio keitimo režimu. Keičiant dažnių daliklių DD₁ ir DD₂ dalijimo koeficientą, keičiamas bandomųjų signalų dažnis. Signalų dažniai daliklių DD₁ ir DD₂ išėjime pasidaro atitinkamai lygūs f_{1i} ir f_{2i} . Laiko mastelio keitimo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$q = \frac{f_{21}}{F_{S1}} = \frac{f_{22}}{F_{S2}} = \dots = \frac{f_{2n}}{F_{Sn}}; \quad (1.13)$$

čia $F_{Si} = f_{1i} - f_{2i}$ – bandomojo signalo su pakeistu laiko masteliu dažnis; $i = 1, 2, \dots, n$ – iteracijos numeris priderintas prie konkrečios IG serijos reikalavimų.

Parinkus dažnį F_{Si} nedidelį, gaunamas pakankamai didelis laiko mastelio keitimo koeficientas. Tada stiprintuvų ST₁ ir ST₂ išėjimus pasiekia pakankamai žemadažniai sustiprinti bandomieji signalai. Šie signalai palyginimo grandinėse PG₁ ir PG₂ lyginami su atskaitos lygiais ir skaitmeniniu būdu nustatomas laiko intervalas atitinkantis vėlinimą trukmę. Taigi šiame matuoklyje, panaudojus dviejų kanalų pikinio detektavimo keitiklį ir žingsnio formavimą dvejais kvarciniais generatoriais, pavyksta išspręsti daug problemų. Tačiau kaip ir ankstesnėse stroboskopinio metodo versijose išlieka trūkumas – naudojamas labai didelių gabaritų ir sudėtingas aukštadažnis komutatorius.

[57] darbe aprašomas IG signalo vėlinimo trukmių matuoklis su daugiakanaliais stroboskopinis pikinio detektavimo keitikliais (1.8 pav.). Šiame įrenginyje, lyginant su anksčiau nagrinėtu, vietoje aukštadažnio komutatoriaus naudojamas daugiakanalis kompensacinis stroboskopinis pikinio detektavimo keitiklis. Tai leido supaprastinti matuoklį ir sumažinti įvertinimo neapibrėžtis dėl signalų atspindžių ir iškraipymų aukštadažniame komutatoriuje. Kvarcinių generatorių QG₁ ir QG₂ dažnių skirtumas šiame įtaise palaikomas pastovus. Tam naudojama fazinė dažnio paderinimo grandinė FADP. Toks sprendimas sumažina vėlinimo nustatymo neapibrėžtį dėl mastelio keitimo koeficiento nepastovumo.



1.8 pav. IG signalo vėlinimo trukmių matuoklis su daugiakanaliu stroboskopiniu keitikliu: QG_{1,2} – kvarciniai generatoriai; BIG₁...BIG_n – bandomųjų impulsų generatoriai; SK₁...SK_n – stroboskopiniai keitikliai; KK – kompensacinis keitiklis; SIF – stroboskopinių impulsų formuotuvai; KM_{1,2} – komutatoriai; LB_{1,2} – lygio nustatymo blokas; PG_{1,2} – palyginimo grandinė; SB – skaitmeninis blokas; VI – valdymo įtaisas; FADP – fazinė automatinė dažnio paderinio grandinė

Vėlinimo trukmės nustatymo metu kvarcinio generatoriaus QG₁ impulsai siunčiami į visų bandomųjų impulsų generatorių BIG₁...BIG_n įėjimus. Valdymo VI perjungia komutatorius KM₁ ir KM₂ taip, kad prie jų išėjimų būtų prijungti stroboskopinių keitiklių SK₁...SK_{2n} ir kompensacinio keitiklio KK išėjimo signalai. Į kompensacinio KK ir stroboskopinių SK₁...SK_n, SK_{n+1}...SK_{2n} keitiklių antruosius įėjimus siunčiami stroboskopiniai impulsai. Stroboskopiniuose keitikliuose SK₁...SK_n yra keičiami generatorių BIG₁...BIG_n bandomieji impulsai, o keikliuose SK_{n+1}...SK_{2n} – tiriamojo IG išėjimo signalai. Kompensaciniame keitiklyje KK keičiamas ir į lygio nustatymo blokus LB₁ ir LB₂ siunčiamas stroboskopinių impulsų vidutinės vertės lygis.

Matuoklyje tuo pačiu metu vėlinimo trukmė nustatoma tik viename analizuojamo IG kanale. Todėl bandomuosius impulsus generuoja tik vienas j -tasis generatoriaus BIG _{j} . Jį įjungia valdymo įtaisas VI. Kitų generatorių BIG _{i} išėjimuose VI nustato pagal valdymo programą loginio 0 arba loginio 1 lygius. Komutatorius KM₁ ir KM₂ valdymo įtaisas VI nustato taip, kad į jų išėjimus būtų siunčiami tik tų stroboskopinių keitiklių signalai, tarp kurių pagal matavimo programą turi būti išmatuota signalo vėlinimo trukmė. Pakeisto mastelio bandomųjų signalų akimirkinės vertės lygios pusei amplitudės lygio nustatymo blokuose LB₁ prilyginamos nuliui. Signalai su taip nustatytais lygiais siunčiami į palyginimo grandinių PG₁ ir PG₂ pirmuosius įėjimus, o antrieji įėjimai prijungiami prie korpuso. Kai bandomųjų signalų akimirkinės vertės tampa lygios nuliui, PG generuoja impulsus, juos siunčia į skaitmeninį bloką SB ir čia nustatoma vėlinimo trukmė.

Pasiūlyto matuoklio esminis privalumas yra galimybė su nedidelėmis neapibrėžtimis analizuoti IG, kuriuose signalo vėlinimo trukmės neviršija 0,5 ns. Tai pasiekta panaudojus

daugiakanalį kompensacinį pikinio detektavimo keitiklį ir fazinę-dažninę stroboskopinio žingsnio formavimo grandinę su dviem kvarciniais generatoriais ir jų skirtuminio dažnio automatinio reguliavimu. Daugiakanalis kompensacinis pikinis detektavimo keitiklis turi didelį perdavimo koeficientą, mažus savuosius triukšmus, santykinai paprastą konstrukciją ir leido atsisakyti aukštadažnio bandomųjų signalų komutatoriaus. Panaudota fazinė-dažninė stroboskopinio žingsnio formavimo grandinė su dviem kvarciniais generatoriais leidžia visą laiką palaikyti pastovų ir stabilų strobavimo žingsnį.

Prie matuoklio trūkumų reiktų priskirti tai, kad visi stroboskopiniai keitikliai veikia tuo pačiu metu ir vartoja stroboskopinio impulso energiją. Todėl didinant keitiklių skaičių stroboskopinio impulso amplitudė mažėja ir keitiklių skaičiui viršijus 10 negarantuojamas normalus stroboskopinių keitiklių darbas [57]. Sukurti galingą labai trumpų stroboskopinių impulsų generatorių sudėtinga, nes jį sunku patalpinti ribotoje erdvėje ties tiriamojo IG kontaktoriumi ir išsklaidyti jo išskirtą šilumą. Be to, įrenginyje nėra galimybės perduoti rezultatus į asmeninį kompiuterį ar informacinę sistemą, sudėtinga keisti matavimų programą.

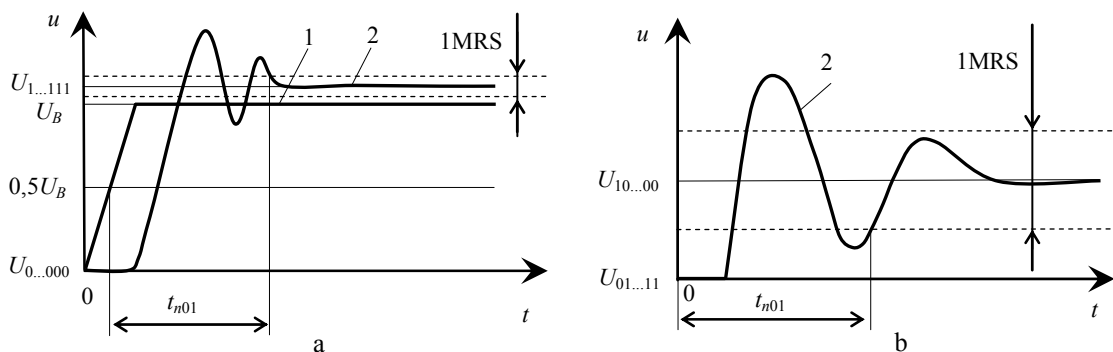
[58 – 64] darbuose pasiūlytos stroboskopinių keitiklių grandinės su automatine sinchronizacija. Vienomis iš jų [58 – 61] galima tyrinėti tik signalus, kurių forma artima sinusiinei ir nustatyti laiko parametrus tik žinomo pasikartojimo dažnio signalams. Kitos [62 – 64] vykdo periodinių impulsinių signalų automatinę sinchronizaciją, tiriamųjų impulsų mastelio nustatymą ir trukmės parametrų matavimą. Disertacijos autoriaus sukurta stroboskopinių keitiklių grandinės schema su automatine sinchronizacija pateikta 4 priede. Šių automatinių keitiklių įgyvendinimas yra pakankamai sudėtingas ir todėl kol kas jie retai naudojami.

1.7. Nusistovėjimo trukmės sparčiuose skaitmeniniuose-analoginiuose keitikliuose registravimo metodai ir įtaisai

Nustatant sparčių SAK nusistovėjimo trukmę, randamas laiko intervalas t_n , per kurį pasibaigia pereinamieji procesai visose keitiklio skiltyse. Tai galima atlikti visos arba pusės SAK skalės būdais [65, 66] (1.9 pav.). Visa SAK skalė gaunama tuo pačiu laiko momentu pasiuntus į visus jo įėjimus loginį 1. Tai lygiavertu kodu 0...000 pakeitimu kodu 1...111. Todėl SAK išėjime esanti skalės pradžios įtampa $U_{0...000}$ turi pasiekti lygį atitinkantį visos skalės kodą $U_{1...111}$. Šiuo atveju keitiklio išėjimo įtampa pasikeičia maksimaliai. Pereinamasis procesas laikomas pasibaigusiu, kai SAK išėjimo įtampa patenka į sritį $U_{1...111} \pm 0,5 \text{ MRS}$ (1.9 pav., a).

Nustatant nusistovėjimo trukmę SAK pusės skalės būdu, keitiklio įėjime esantis kodas 01...11 pakeičiamas pusės skalės kodu 10...00. SAK išėjime esanti $U_{01...11}$ įtampa turi pasiekti lygį atitinkantį pusės skalės kodą $U_{10...00}$. Šiuo atveju keitiklio išėjimo įtampa padidėja

minimaliai – tik 1 MRS. Pereinamasis procesas laikomas pasibaigusiu, kai SAK išėjimo įtampa patenka į sritį $U_{10...00} \pm 0,5 \text{ MRS}$ (1.9 pav., b).

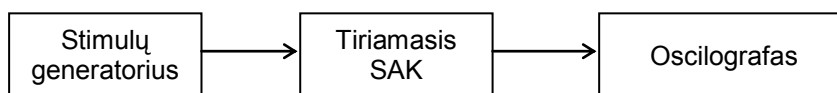


1.9 pav. SAK visos (a) ir pusės skalės(b) nusistovėjimo trukmių nustatymo iliustracija: 1 – stimulo generatoriaus signalas; 2 – SAK išėjimo įtampa; U_B – bandomojo signalo amplitudė; $U_{0...000}$ – SAK išėjimo įtampa atitinkanti skalės pradžios (0...000) kodą; $U_{1...111}$ – SAK išėjimo įtampa atitinkanti visos skalės (1...111) kodą; $U_{10...00}$ – SAK išėjimo įtampa atitinkanti pusės skalės (10...00) kodą; $U_{01...11}$ – SAK išėjimo įtampa atitinkanti vieno žingsnio iki pusės skalės (01...11) kodą; 1MRS – viena mažiausia reikšminė skiltis; t_{n01} – SAK nusistovėjimo trukmė, kai įėjimo kodas didėja

Iš 1.9 paveikslėlio matome, kad visos ar pusės SAK skalės nusistovėjimo trukmės nustatymo metu tenka registruoti trumpus laiko intervalus signalui kintant labai mažos 1 MRS ribose. 12 skilčių SAK 1 MRS sudaro tik 0,025 % visos skalės, o 16 skilčių SAK – 0,0015 %. Šiuolaikinių sparčių SAK nusistovėjimo trukmės yra nuo vienetų iki kelių dešimčių nanosekundžių. Taigi nustatoma tiriamo SAK kokybė yra susieta su dviejų parametrų – lygio vertės ir trukmės, mažais pokyčiais.

1.7.1. Oscilografiniai stroboskopiniai metodai

SAK nusistovėjimo trukmės identifikavimui pirmiausia buvo naudojami plačiajuosčiai oscilografai su trumpa nusistovėjimo trukme [66] (1.10 pav.).

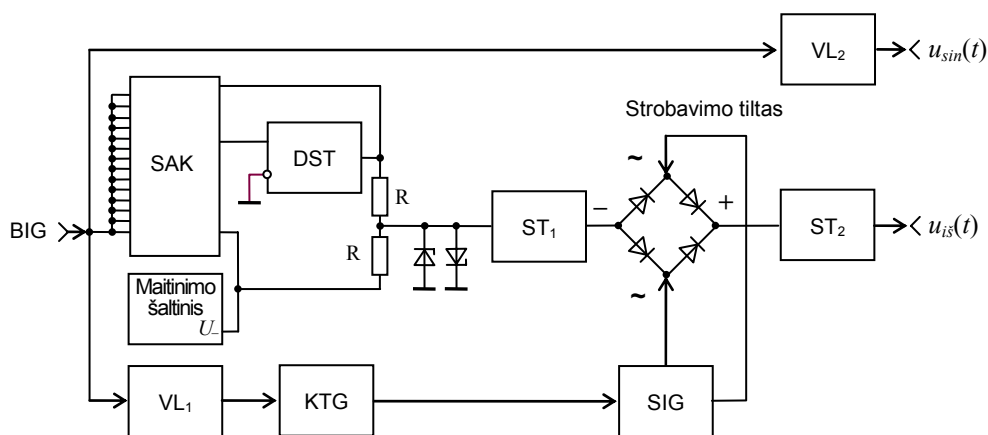


1.10 pav. SAK nusistovėjimo trukmės identifikavimas plačiajuosčio oscilografo pagalba

Toks nusistovėjimo trukmės identifikavimas yra paprastas, tačiau turi esminių trūkumų. Naudojant oscilografus, sudėtinga aukšto lygio signalė identifikuoti labai mažus signalo lygių pokyčius. Pvz., nustatant 12 skilčių SAK visos skalės nusistovėjimo trukmę, klaidos ruožas, esant 1 V išėjimo įtampai, lygus 2,5 mV. Šiuo atveju nustatyti nusistovėjimo trukmę galima jei oscilografo jautris bus didelis ir sieks (2 – 5) mV/pad. Tačiau SAK visos skalės 1 V persijungimo įtampa labai perkrauna oscilografo įėjimo kanalą. Daugumos oscilografų atsistatymo po perkrovos trukmė ženkliai iškreipia tiriamojo SAK nusistovėjimo

trukmę. Antra, matavimai vykdomi rankiniu būdu ir reikalauja aukštos kvalifikacijos darbuotojo. Todėl procesas nenašus ir yra didelė operatoriaus klaidų tikimybė.

Oscilografo įtaka sumažinama naudojant nejautrius perkrovoms oscilografus ir specialius matavimo keitiklius [27, 28], kompensuojančius SAK išėjimo įtampos šuolius. Tokia nusistovėjimo trukmės nustatymo metodika leidžia sumažinti oscilografo perkrovos įtaką rezultatui. Tačiau nustatymo procesas ir toliau vykdomas oscilografo ekrane rankiniu būdu ir lieka nenašus. Panaudojus stroboskopinius matavimo keitiklius [31 – 34] (1.11. pav.), pavyksta sukurti nusistovėjimo trukmės nustatymo įtaisus, leidžiančius analizuoti iki 16 skilčių turinčių SAK nusistovėjimo trukmes siekiančias 30 ns. Tačiau juose išlieka ankstesniųjų įtaisų trūkumai – matavimo rezultatas atskaitomas oscilografo ekrane.



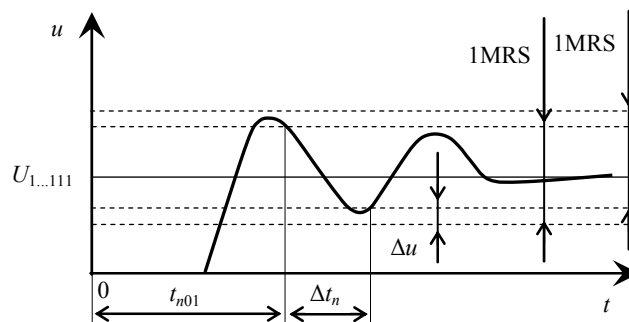
1.11 pav. 16 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės matuoklis: BIG, SIG – bandomųjų ir stroboskopinių impulsų generatoriai; SAK – tiriamasis skaitmeninis-analoginis keitiklis; DST – diferencinis stiprintuvas; $ST_{1,2}$ – stiprintuvai; KTG – keičiamos trukmės impulsų generatorius; $VL_{1,2}$ – vėlinimo grandinės; $u_{sin}(t)$ – sinchronizacijos impulsai; $u_{is}(t)$ – stroboskopinio keitiklio išėjimo įtampa

Siekiant išvengti rankinio darbo, padidinti efektyvumą ir sumažinti operatoriaus klaidos tikimybę, naudojami šiuolaikiniai skaitmeniniai atminties ir skaitmeniniai fosforo oscilografai [34, 66]. Jie leidžia sukaupti skaitmeninių tiriamųjų signalų masę. Todėl nusistovėjimo trukmę galima nustatyti oscilografo ekrane arba, šį masę persiuntus į AK, rezultatus apskaičiuoti pagal programą ir juos pateikti skaitmeniniame pavidale. Šiuolaikinių skaitmeninių oscilografų praleidžiamų dažnių juosta siekia gigahercus ir jų sparta yra pakankama SAK dinaminams parametrų nustatyti.

Nustatant SAK nusistovėjimo trukmes oscilografiniais metodais, labai svarbu naudoti oscilografus turinčius didelį vertikalų kanalų jautrį ir gerą skiriamąją gebą – oscilografus su dideliu ASK skilčių skaičiumi. Dėl labai mažo SAK klaidos ruožo, paminėti du parametrai iš esmės nulemia SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo galimybes. Daugumos skaitmeninių ir fosforo atminties oscilografų skiriamoji geba yra 8 skiltys. Yra oscilografų, kuriuose po įe-

jimo signalo atskaitų vidurkinimo pasiekama 11 skilčių skiriamoji geba. Tektronix firma gamina oscilografą TDS8000 [34] garantuojantį 14 skilčių skiriamąją gebą.

1.12 paveiksle parodyta, kad net mažas Δu apsirikimas nustatant klaidos zoną įtakoja dideles nusistovėjimo trukmės verčių nustatymo klaidas Δt_n . To priežastimi yra klaida randant signalo nusistovėjimo vertę, klaida arba įtampos dreifas, nustatant klaidos zonos ribas. Įvertinus, kad tiksliai nusistovėjimo trukmės nustatymui reikia labai tiksliai nustatyti SAK išėjimo srovės ar įtampos nusistovėjusią vertę, oscilografo skiriamoji geba turi būti 3 arba 4 skiltimis didesnė už tiriamojo SAK skiriamąją gebą. Taigi TDS8000 serijos skaitmeniniais oscilografais teoriškai galima nustatyti tik 10 arba 11 skilčių SAK nusistovėjimo trukmes.



1.12 pav. Nusistovėjimo trukmės nustatymo klaidos Δt_n atsiradimas dėl netikslumų Δu nustatant klaidos zoną

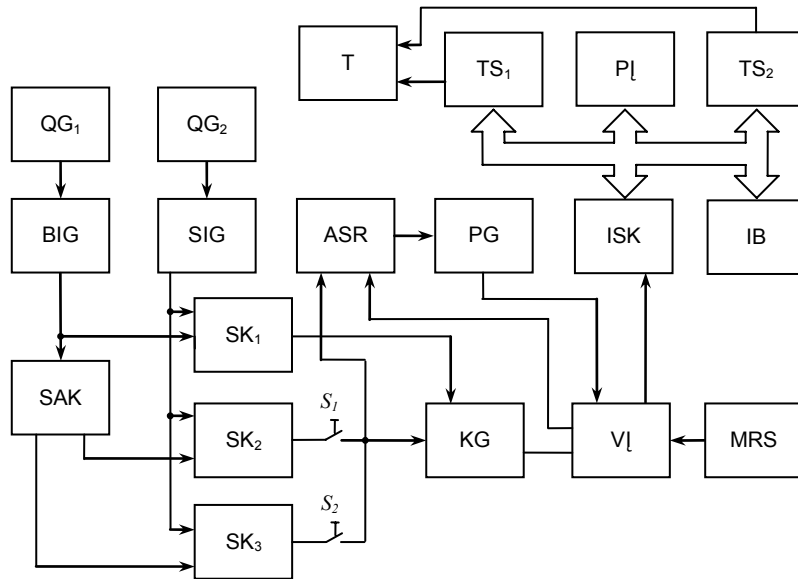
Kita vertus, oscilografo TDS8000 didžiausias jautris yra 10 mV/padalai, o 12 skilčių SAK klaidos zona lygi 1 MRS ($\pm 0,5$ MRS). Tai sudaro 244 μ V arba ± 122 μ V nuo SAK išėjime nusistovėjusios įtampos vertės. Taigi oscilografo, kurio jautris 10 mV/padalai, klaidos ruožas sudarys 0,04 padalos ($\pm 0,02$ padalos). Akivaizdu, kad turint tokias ribas, 12 skilčių SAK nusistovėjimo trukmę ekrane nustatyti praktiškai neįmanoma ir jos įvertinimas galimas tik naudojant skaitmenines signalo vertes.

1.7.2. Specializuoti neoscilografiniai stroboskopiniai įtaisai

[67 – 69] darbuose pristatomas automatizuotas sparčiųjų 8 skilčių SAK dinaminų parametrų matuoklis (1.13 pav.). Matuoklis veikia taip. Bandomųjų impulsų generatoriaus BIG išėjimo impulsai siunčiami į lygiagrečiai sujungtus tiriamojo SAK įėjimus ir į pirmojo stroboskopinio keitiklio SK₁ įėjimą. SAK išėjimo signalai siunčiami į stroboskopinius keitikius SK₂ ir SK₃. BIG išėjimo impulsų dažnį F_C nustato kvarcinis generatorius QG₁.

Į antruosius stroboskopinių keitiklių SK₁, SK₂ ir SK₃ įėjimus siunčiami stroboskopiniai impulsai. Stroboskopinių impulsų generatorių SIG išėjimo impulsų dažnį nustato antrasis kvarcinis generatorius QG₂. Išėjimo impulsų dažnis $F_T = F_C + \Delta F$, $F_T \approx F_C \gg \Delta F$. Kadangi stroboskopinių impulsų dažnis parinktas didesnis už bandomųjų impulsų dažnį, tiriamojo signalo laiko mastelis keičiamas apgėžiant laiko ašį. Toks sprendimas leidžia gerokai supa-

prastinti informacijos apdorojimo grandinę, nes nusistovėjimo trukmė šiuo atveju skaičiuojama nuo pirmojo laiko momento, kai viršijamas klaidos zonos lygis, iki laiko momento, kai signalo akimirkinė vertė pasiekia pusę nusistovėjusio išėjimo signalo amplitudės.



1.13 pav. Sparčiųjų 8 skilčių SAK dinaminių parametrų matuoklis: QG₁, QG₂ – kvarciniai generatoriai; BIG, SIG – bandomųjų ir stroboskopinių impulsų generatoriai; SAK – tiriamasis skaitmeninis-analoginis keitiklis; SK₁, SK₂, SK₃ – stroboskopiniai keitikliai; S₁, S₂ – analoginiai raktai; ASR – automatinio stiprinimo reguliavimo grandinė; KG – korekcijos grandinė; VĮ – valdymo įtaisas; PG – palyginimo grandinė; ISK – impulsų skaitiklis; MRS – matavimo režimo grandinė; IB – indikacijos blokas; TS₁, TS₂ – laiko momentų t_{sv} ir t_n testavimo grandinės; PĮ – programinis įrenginys, T – tablo „Tinkamas/Brokuotas“

Laiko mastelio transformacijos koeficientas pagal (1.13) lygus:

$$q = \frac{F_T}{\Delta F}. \quad (1.14)$$

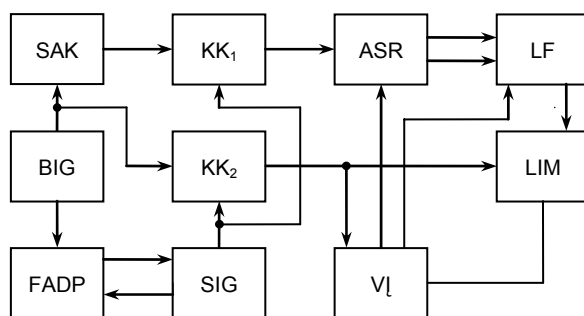
Sustiprinti pirmojo ir antrojo arba trečiojo stroboskopinių keitiklių išėjimo signalai siunčiami į korekcijos grandinę KG, kuri suformuoja paleidimo komandą signalo vėlinimo trukmės t_{sv} apskaičiavimui bei stabdymo komandą nusistovėjimo trukmės t_n apskaičiavimui. Šias komandas atitinkantys signalai siunčiami į valdymo įtaisą VĮ. Signalų vėlinimo trukmės t_{sv} skaitmeninis įvertis užfiksuojamas impulsų skaitiklyje ISK.

Nustatant SAK nusistovėjimo trukmę, signalas iš antrojo arba trečiojo stroboskopinio keitiklio siunčiamas į automatinio stiprinimo reguliavimo grandinę ASR, kuri stabilizuoja impulsų amplitudę. Šiuo atveju, nepriklausomai nuo SAK išėjimo impulso amplitudės, palyginimo grandinės PG įėjime signalo amplitudė bus visada vienoda, nesikeis ir komparatoriumi nustatomos amplitudės klaidos zonos dydis. Kai signalo akimirkinė vertė tampa didesnė už amplitudės klaidos zonos viršutinę ribą arba mažesnė už jos žemutinę ribą, palyginimo grandinė PG generuoja signalą leidžiantį pradėti nusistovėjimo trukmės t_n skaičiavimą. Šis signalas per valdymo įtaisą VĮ paleidžia impulsų skaitiklį ISK. Skaitiklyje suskaičiuotos t_{sv} ir

t_n vertės palyginamos su nominalinėmis. Rezultato skaitinė vertė parodoma indikacijos bloke ir indikuojama tablo „Tinkamas/Brokuotas“.

Taigi šiame matuoklyje panaudota nemažai naujovių: santykinai paprastas stroboskopinis pikinio detektavimo keitiklis turintis didelį ir plačiame signalų diapazone pastovų perdavimo koeficientą bei mažus savuosius triukšmus [70]; atgalinis laiko mastelio keitimo būdas; pakeisto laiko mastelio SAK išėjimo impulsų automatinis stiprinimo reguliavimas, pašalinantis skirtingų SAK pavyzdžių išėjimo impulso įtampų kitimo iki $\pm 20\%$ įtaką nusistovėjimo trukmei; daugkartinis nusistovėjimo trukmės matavimas, keičiant klaidos zonos nustatymo įtampą ir tikros nusistovėjimo trukmės išrinkimą iš gauto trukmių masyvo.

Šios priemonės leido sukurti automatizuotą sparčiųjų 8 skilčių SAK dinaminį parametrų matuoklį, tinkantį nustatyti nusistovėjimo trukmes (3 – 50) ns diapazone. Didesnio skilčių skaičiaus keitiklių nusistovėjimo trukmių nustatymas šiuo matuokliu yra apsunkintas dėl sąlyginai didelių, siekiančių (150 – 200) μV , pikinio detektavimo keitiklių savųjų triukšmų ir SAK išėjimo impulso daug didesnės švytavimo gesimo laiko pastoviosios.



1.14 pav. SAK nusistovėjimo trukmės matuoklis: KK_1 , KK_2 – kompensaciniai keitikliai; BIG, SIG – bandomųjų ir stroboskopinių impulsų generatoriai; FADP – fazinė automatinė dažnio paderinimo grandinė, ASR – automatinio stiprinimo reguliavimo grandinė; LF – lygio fiksavimo grandinė; LIM – laiko intervalų matavimo įtaisas; VĮ – valdymo įtaisas

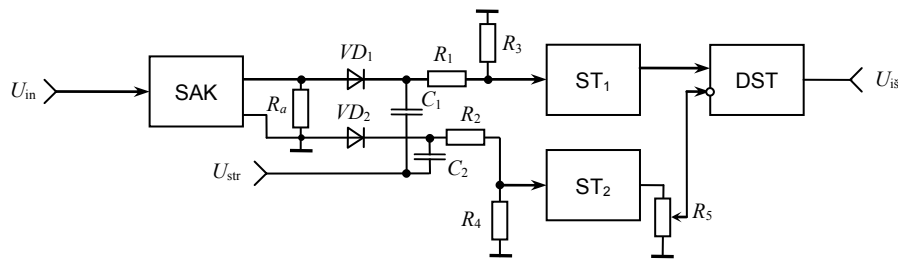
[71 – 73] darbuose analizuojami automatizuoti sparčiųjų 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių testeriai (1.14 pav.). Spartieji 10 skilčių SAK, pvz., TDC1016, turi didelę švytavimo gesimo pastoviąją ir jų išėjimo srovė arba įtampa po perjungimo švytuoja trumpai. Todėl taikyti spartiesiems 10 skilčių SAK nepakeistą prieš tai aprašytą matavimo metodą negalima. Sparčiųjų 10 skilčių SAK dinaminį parametrų matuokliams tinka tik dalis techninių sprendimų panaudotų 8 skilčių SAK dinaminį parametrų matuoklyje: pikinio detektavimo stroboskopiniai keitikliai su dviem kvarciniais generatoriais, atgalinis laiko mastelio keitimas ir SAK išėjimo impulso automatinis stiprinimo reguliavimas. Šiems matuokliams reikalingi stroboskopiniai keitikliai turintys mažesnę savųjų triukšmų lygį.

Darbuose [71 – 73] pasiūlytas naujas kompensacinis pikinio detektavimo stroboskopinis keitiklis (1.15 pav.), leidęs labai sumažinti stroboskopinių impulsų generatoriaus įnešamus trukdžius. Šie trukdžiai mažinami kompensavimo būdu taip. Antrojo, prijungto prie korpuso,

stroboskopinio keitiklio VD_2 išėjime yra gaunama tik stroboskopinių impulsų sukurta įtampa. Pirmojo keitiklio VD_1 išėjime yra gaunama SAK išėjimo įtampos ir stroboskopinių impulsų suma. Šios įtampos stiprinamos stroboskopinių keitiklių stiprintuvuose $ST_{1,2}$ ir siunčiamos į diferencinį stiprintuvą DST kompensavimui. Diferencinio stiprintuvo išėjimo įtampa $u_{is}(t)$ proporcinga pirmojo ir antrojo keitiklių sustiprintų signalų skirtumui:

$$u_{is}(t) = K_1[u_{SAK}(t) + u_{str}(t) + u_{i1}(t) + u_{k1}(t)] - K_2[u_{str}(t) + u_{i2}(t) - u_{k2}(t)], \quad (1.15)$$

čia $K_{1,2}$ – pirmojo ir antrojo stroboskopinių keitiklių perdavimo koeficientai; $u_{SAK}(t)$ – tiriamojo SAK išėjimo įtampa; $u_{str}(t)$ – stroboskopinių impulsų trukdžių įtampos; $u_{k1,2}(t)$ – maišiklio elementų – diodų, varžų, stiprintuvų, savieji triukšmai; $u_{i1,2}(t)$ – srovių, tekančių matuoklio korpusiniu laidininku, sukurtos įtampos keitiklio įėjime.



1.15 pav. Kompensacinis stroboskopinis keitiklis: SAK – analizuojamas skaitmeninis-analoginis keitiklis; $ST_{1,2}$ – pirmojo ir antrojo stroboskopinių keitiklių stiprintuvai; DST – diferencinis stiprintuvas; VD_1 , C_1 , R_1 , R_3 – pirmojo stroboskopinio keitiklio elementai; VD_2 , C_2 , R_2 , R_4 – antrojo stroboskopinio keitiklio elementai; R_a – SAK apkrovos rezistorius; R_5 – potenciometas trukdžių kanaluose suvienodinimui; $u_{in}(t)$ – bandomieji impulsai; $u_{str}(t)$ – stroboskopiniai impulsai; $u_{is}(t)$ – kompensacinio stroboskopinio keitiklio išėjimo įtampa

Potenciometas R_5 leidžia panaikinti keitiklio kanalų perdavimo koeficientų skirtumą diferencinio stiprintuvo įėjime. Tada, kaip matyti iš išraiškos (1.15), stroboskopinio impulso ir srovių korpuso laidininke generuoti trukdžiai bus visiškai ar iš dalies kompensuoti.

Sukurti nauji kompensaciniai stroboskopiniai pikinio detektavimo keitikliai leido sukurti automatizuotus sparčiųjų 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių matuoklius, kuriais galima nustatyti nusistovėjimo trukmes nuo 3 ns.

Sparčiųjų SAK dinaminių parametrų matuoklių trūkumai labai panašūs į sparčių skaitmeninių IG dinaminių parametrų matuoklių trūkumus: sudėtinga įgyvendinti daugiakanalių SAK dinaminių parametrų įvertinimą, nes komutuojuojant kiekvieną kanalą su jam skirtu stroboskopiniu keitikliu, tenka į mažą prie SAK kontaktoriaus esančią erdvę sutalpinti superaukšto dažnio komutatorius ir bendraašius jungiamuosius kabelius; dideli parametrų įvertinimo informacijos kiekiai neįsimenami ir neapdorojami skaitmeniniais algoritmais, kas leistų padidinti įvertinimo rezultatų patikimumą; didesnio skilčių skaičiaus SAK sunku tirti dėl keitiklių savųjų triukšmų įtakos, kurią būtų galima mažinti skaitmeniniu

būdu apdorojant įvertinimo rezultatus; neanalizuoti daugiakanalių stroboskopinių keitiklių parametrai ir neištirtos jų panaudojimo galimybės.

Apibendrinant galima teigti, kad IG ir SAK dinaminį parametrų, kaip mažų pokyčių, nustatymo problemos panašios varžos mažų pokyčių nustatymo problemoms ir susijusios dažniausiai su daugiakanalių sistemų paprastesniu įgyvendinimu, garantuojant mažą sistemos ir jos eksploatacijos kainą bei laiduojant pakankamą rezultatų patikimumą ir kokybę. Todėl šių uždavinių sprendimo strategija ir metodai yra panašūs.

1.8. Darbo tikslo ir uždavinių formulavimas

Sistemų skirtų konstrukcijų būsenų identifikavimui, kurių veikimas pagrįstas rezistorinių jutiklių varžos mažų pokyčių, proporcingų poslinkiui ar deformacijai, įvertinimu nebalansuotu Wheatstone'o varžų tilteliu, analizės metu nustatyti tokie jų trūkumai:

1. Prie sistemų sudėtinga prijungti daugiau nei vieną jutiklį. Žinomos daugiakanalės sistemos įgyvendintos pasirėmus įvairiomis technologijomis yra brangios ir sudėtingos eksploatuoti.

2. Į žinomų sistemų registruojamą rezultatą įtakoja tiltelio maitinimo įtampos svyravimai ir trukdžiai, stiprintuvo dreifai, ASK nustatymo klaidos. Šie ir kiti faktoriai negarantuoja pakankamo rezultato patikimumo.

3. Sudėtingos ir reikalaujančios tikslaus derinimo konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemų elektroninės grandinės yra brangios ir tai didina sistemų gamybos kaštus.

4. Sistemos nepritaiktos skaitmeninių duomenų surinkimui iš didelio kiekio jutiklių patalpintų kiek įmanoma arčiau identifikuojamojo konstrukcijos taško.

5. Sistemų jautrumas tiltelio maitinimo įtampos pokyčiams ir triukšmams riboja šių sistemų galimybes naudojant jas lauko sąlygomis arba ilgalaikiai stebėsenai.

Analizuojant sistemas skirtas automatiniam integrinių grandynų bei skaitmeninių analoginių keitiklių dinaminį parametrų pokyčių įvertinimui nustatyti tokie jų trūkumai:

1. Sudėtinga įgyvendinti daugiakanalės sparčių IG dinaminį parametrų įvertinimo sistemas, naudojančias įprastus metodus, nes superaukštojo dažnio komutatorius ir bendraašiai jungiamieji kabeliai iškraipo tiriamuosius signalus yra brangūs ir dideli.

2. Neištirtos daugiakanalių stroboskopinių keitiklių panaudojimo galimybės.

3. Nesugebama dinaminį parametrų nustatymo metu gautus didelius informacijos kiekius išiminti ir apdoroti specializuotais skaitmeninių signalų algoritmais, didinančiais parametrų įvertinimo kokybę.

4. Didelio skilčių skaičiaus SAK sunku tyrinėti dėl keitiklių savųjų triukšmų įtakos, kurią būtų galima mažinti skaitmeniniu būdu apdorojant įvertinimo rezultatus.

Apskritai sistemų skirtų konstrukcijų būsenų identifikavimui ir sistemų skirtų automatiniam integrinių grandynų bei skaitmeninių-analoginių keitiklių dinaminių parametrų pokyčių įvertinimui analizė parodė, kad šias sistemas galima priskirti mažų pokyčių įvertinimo sistemų klasei ir visoms joms būdingi panašūs trūkumai:

1. Sudėtingai įgyvendinami daugiakanalių sistemų variantai, nes gerokai padidėja įrenginių gabaritai, kaina, negarantuojamas pakankamas rezultatų patikimumas.
2. Mažų pokyčių įvertinimo rezultatai nepritaikyti skaitmeninių duomenų surinkimui ir jų skaitmeniniam apdorojimui.

Šio darbo tikslas – sukurti varžų ir grandynų dinaminių parametrų mažų pokyčių įvertinimo daugelyje kanalų metodus, ištirti sukurtų metodų savybes ir atlikti šių metodų efektyvumo bei pritaikymo galimybių analizę. Tikslui pasiekti darbe išsprendžiami tokie uždaviniai:

1. Sukuriamas ir ištiriamas Wheatstone'o tiltelio automatinio skaitmeninio balansavimo metodas varžų mažų pokyčių įvertinimui.
2. Tiriamos priemonės didinančios parametrų mažų pokyčių įvertinimo patikimumą.
3. Tiriamos daugiakanalių sistemų su balansuojamu Wheatstone'o tilteliu galimybės.
4. Pasiūloma tipinė konstrukcijų būsenos identifikavimo sistemos struktūra.
5. Sudaromos ir ištiriamos daugiakanalių stroboskopinių keitiklių įgyvendinimo schemas ir parenkama geriausia.
6. Ištiriami skaitmeniniais metodais pagrįsti dinaminių parametrų įvertinimo kokybę didinantys būdai.
7. Panaudojant tyrimų rezultatus, rekomenduojama tipinė daugiakanalio dinaminių parametrų įvertinimo įtaiso struktūra.
8. Pagrindiniai rezultatai patikrinami eksperimentiškai.

Kadangi analizės metu išryškėjo vienodi pagrindiniai trūkumai, tai uždavinių sprendimo darbe strategija iš esmės vienoda. Pirmiausia siekiama sukurti metodą, kuris leistų paprasčiausiu būdu įgyvendinti daugiakanales sistemas ir garantuotą patikimą parametro įvertinimą. Vėliau sukurtas metodas analizuojamas ir tobulinamas, siekiant padidinti įvertinimo ir identifikavimo rezultatų patikimumą įvairiais, tarp jų ir skaitmeniniais būdais. Kuriant metodus ir didinant rezultatų patikimumą, siekiama panaudoti vieno uždavinio, pvz., varžos mažų pokyčių, sprendimo rezultatus kito uždavinio – dinaminių parametrų įvertinimui, sprendimui.

2. METODAS VARŽŲ MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINIMUI IR JO TOBULINIMAS

Šiame skyriuje aprašomas automatinio skaitmeniškai balansuojamo Wheatstone'o varžų tiltelio metodas varžų mažiems, siekiantiems nuo kelių iki kelių dešimčių tūkstantųjų procento dalies, pokyčiams įvertinti, tiriamos priemonės padidinančios varžų mažų pokyčių įvertinimo patikimumą – įvairios dreifo mažinimo priemonės, skaitmeninis triukšmų filtravimas ir rezultatų skaitmeninis apdorojimas, analizuojamos daugiakanalių identifikavimo sistemų kūrimo galimybės, pasiūloma ir aprašoma tipinė varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemos struktūra. Tyrimų rezultatai paskelbti darbuose [A2, A4, A5, A7, A9, A10 – A12].

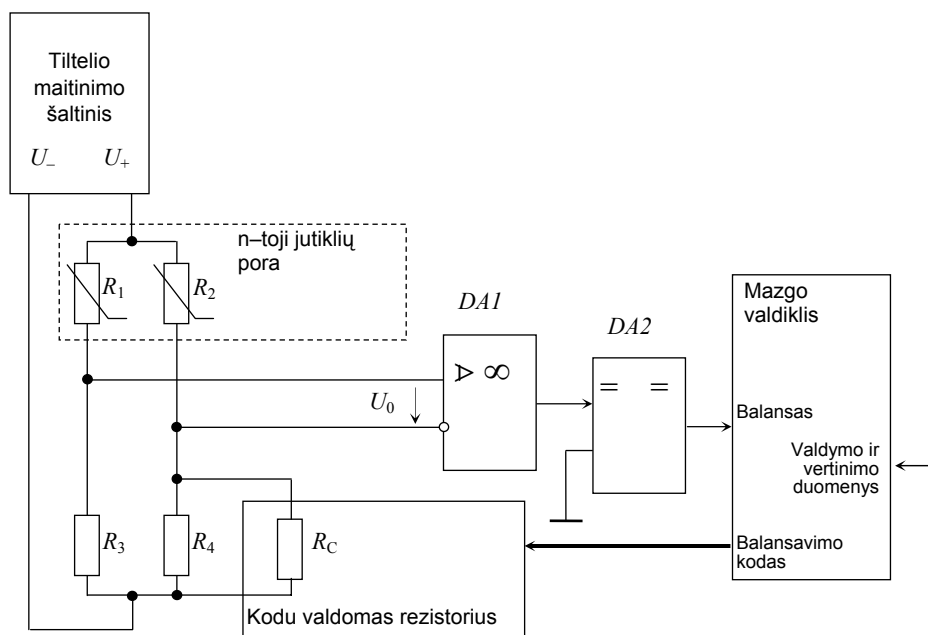
2.1. Wheatstone'o varžų tiltelio balansavimo metodas varžų mažiems pokyčiams įvertinti

Klasikinis nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio principas varžos ypač mažiems pokyčiams nustatyti turi nemažai trūkumų, neleidžiančių šį metodą efektyviai panaudoti daugiakanalėse sistemose ir taip supaprastinti sistemas. Norint pasiekti užsibrėžtus tikslus ir išvengti klasikinio nebalansuojamo Wheatstone'o tiltelio trūkumų, sukurtas Wheatstone'o tiltelio automatinis skaitmeninis balansavimo metodas.

Automatiškai skaitmeniniu būdu balansuojant Wheatstone'o tiltelį, kitaip nei naudojant klasikinį nebalansuojamo tiltelio metodą, tiltelio disbalanso įtampa tik lyginama su 0 V įtampa, o varžos pokytis įvertinimas keičiant vieno tiltelio peties varžą ir siekiant, kad tiltelio disbalanso įtampa priartėtų galimai arčiau prie 0 V. Tokio metodo įgyvendinimo funkcinė schema pateikta 2.1 paveiksle. Toks metodas ar sistema, dėl jo veikimo principo, kai įvertinimo rezultatas keičia sistemos būseną – t. y. save reguliuoja ir mėgina grąžinti į balansą, gali būti vadinamas uždaruoju metodu ar uždarąja sistema.

Analizuojamas atvejis, kai tiltelis maitinamas nuolatine įtampa. Tokiu atveju tiltelio balansas parenkamas taip, kad esant vienodoms aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžoms tiltelis yra nesubalansuotas. Jo disbalanso įtampa U_0 stiprinama operaciniu stiprintuvu DA1, o sustiprinta siunčiama į komparatorių DA2, lyginantį šią įtampą su 0 V įtampa. Skaitmeninė grandinė (šiuo atveju tai atlieka mazgo valdiklis, tačiau gali būti naudojamos ir įprastos skaitmeninės grandinės, pvz. paskiltinio balansavimo registrai) pakeičia išėjimo kodą, o kodu valdomas rezistorius, pagal nustatytą skaitmeninį kodą, keičia tiltelio balansą. Taip tęsiasi tol, kol maksimaliai priartėjama prie tiltelio balanso. Pasiekus šią sąlygą skaitmeninė grandinė generuoja signalą „Balansas“. Įvertinimo mazgo valdiklis nuskaityto rezistoriaus valdymo kodą

ir jį išimena kaip rezultatą. Siekiant padidinti įvertinimo spartą, tiltelio balanso kodas parenkamas ne nuosekliai, o paskilčiui.



2.1 pav. Wheatstone'o tiltelio automatinio skaitmeninio balansavimo metodo įgyvendinimo funkcinė schema

Tokiu atveju sistemos veikimo nuoseklumas yra toks:

1. Per Wheatstone'o varžų tiltelį teka srovė, kurią sukuria tiltelio maitinimo šaltinis. Ši srovė teka ir per aktyvųjį bei pasyvųjį jutiklį. Tiltelis specialiai išbalansuojamas rezistoriais R_3 ir R_4 . Šių rezistorių varžos skiriasi tiek, kad esant maksimaliam aktyviojo jutiklio varžos pokyčiui tiltelį galima būtų subalansuoti [A10 – A12]. Be to, tenka įvertinti, kad jutiklio varža gali tiek didėti, tiek ir mažėti, (pvz. deformacijos jutiklis gali būti ir tempiamas ir gniuždomas). Esant vienodoms aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžoms, tiltelio pečių (įtampos daliklių) įtampos žemės atžvilgiu yra skirtingos.

2. Tiltelio pečių įtampos siunčiamos į diferencinį stiprintuvą DA1. Įtampų skirtumas sustiprinamas tiek, kad esant bent kiek nesubalansuotam tilteliui, stiprintuvo išėjimo įtampa atitiktų visą komparatoriaus įėjimo įtampų dinaminį diapazoną. Kadangi po stiprintuvo veikia tik palyginimo grandinė, nereikalaujama, kad esant maksimaliai nesubalansuotam tilteliui stiprintuvas nebūtų perkraunamas, nes balansuojama ne pagal absoliutinę sustiprintos įtampos vertę, o pagal jos poliarumą.

3. Sustiprintas signalas siunčiamas į palyginimo grandinės DA2 įėjimą. Palyginimo grandinė palygina įtampą įėjime su 0 V įtampa. Priklausomai nuo tiltelio būsenos (nesubalansuotas/perbalansuotas), keičiasi palyginimo grandinės išėjimo signalas. Kai tiltelis nesubalansuotas gaunamas loginis 0, kai perbalansuotas – logoginis 1.

4. Signalas iš palyginimo grandinės išėjimo siunčiamas į skaitmeninę kodo parinkimo grandinę. Kaip skaitmeninė kodo parinkimo grandinė dažniausiai naudojamas paskiltinio balansavimo registras. Tačiau, siekiant užtikrinti įvertinimo mazgo lankstumą ir užtikrinti pradinį rezultato apdorojimą, vietoje atskiro registro naudojamas mazgo valdiklis, realizuojantis paskiltinio balansavimo registro funkcijas. Kadangi pradinėje būsenoje tiltelis yra nesubalansuotas ir iš palyginimo grandinės išėjimo atsiunčiamas loginio 0 signalas, į vyriausiąją šio registro skiltį įrašomas loginis 1. Šis signalas siunčiamas į kodu valdomą rezistorių. Keičiasi jo varža, tuo pačiu keičiasi tiltelio peties, kuriame įjungtas šis rezistorius, atstojamoji varža, taigi ir tiltelio balansas.

- Jei, prijungus šią skiltį, tiltelis išlieka nesubalansuotas, palyginimo grandinės išėjime lieka loginio 0 signalas ir registro aukščiausioje skiltyje paliekamas loginis 1.
- Jei tiltelis perbalansuojamas, palyginimo grandinės išėjime nustatomas loginio 1 signalas ir vyriausioje registro skiltyje ištrinamas loginis 1, įrašomas loginis 0.

Kitu žingsniu parenkama jaunesniosios skilties reikšmė. Taip tiltelis balansuojamas tol, kol pasiekama jauniausioji skiltis. Parinkus jauniausiąją paskiltinio balansavimo registro skiltį, tiltelio disbalansas yra mažesnis, nei leistina prietaiso paklaida, todėl registro išėjime nusistovėjęs kodas yra jutiklio varžą atitinkantis rezultatas.

5. Dvejetainis kodas, esantis paskiltinio balansavimo registro išėjime įsimenamas įvertinimo mazgo valdiklio atmintinėje. Nuskaičius įvertinimo rezultatą, suformuojamas registro nustatymo į pradinę būseną signalas. Atlikus šias operacijas, pradedamas kitas to paties ar kito prijungto jutiklio varžos įvertinimas ir visi procesai kartojami iš naujo.

Taigi apibendrinant galima teigti, kad analoginė grandinės dalis (operacinis stiprintuvas ir palyginimo grandinė) dirba tik kaip poliarumo detektorius, pagal kurį balansuojamas tiltelis. Balansuojamo Whatstone'o tiltelio rezultatas aprašomas (2.1) išraiška:

$$R_x = R_1 = \frac{R_2 R_4}{R_3}; \quad (2.1)$$

čia R_1, R_2, R_3, R_4 – tiltelio pečių varžos.

Iš šios išraiškos matoma, kad varžos įvertinimo rezultatas visiškai nepriklauso nuo tiltelio maitinimo įtampos. Įvertinimo paklaidas lemia tik tiltelio varžų ir jutiklių varžų tikslumai bei pokyčiai tarp įvertinimų.

Balansuojant tiltelį kodu valdoma varža R_C , (2.1) išraiška pertvarkoma ir gaunama:

$$R_x = R_1 = \frac{R_2 R_3 (R_4 + R_C)}{R_4 R_C}; \quad (2.2)$$

čia R_C – kodu valdomo varžo varža.

Pagal (1.8) išraišką, deformacijos įvertinimui būtina įmanomai tiksliau įvertinti deformacijos sukeltą jutiklio varžos pokytį, todėl absoliutiniai varžų dydžiai įtakos įvertinimo neapibrėžtims neturi. Įvertinimo rezultatų paklaidos apsprendžiamos varžų R_2 ; R_3 ; R_4 nekompensuoju tarp tiltelio pečių nestabilumu bei neteisingu balanso taško nustatymu. Analizuojant aptariamą grandinę matoma, kad įvertinimo paklaidos lyginant su 1.1.5 aptartu tiesioginio keitimo būdu yra:

1. Tiltelio maitinimo įtampos dreifai balansuojamo Wheatstone'o tiltelio atveju neturi įtakos įvertinimo 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 (2.1), (2.2). Taigi nereikalingi preciziški tiltelio maitinimo įtampos šaltiniai su reguliuojančiais grįžtamaisiais ryšiais. Tai leidžia prijungti jutiklius gerokai didesniu atstumu nei tiesioginio keitimo sistemose, bei užtikrinti jų komutaciją žemaomiais raktais. Kartu galima naudoti paprastesnius jungimo kabelius, didesnę dėmesį skiriant nesinfazinių trukdžių slopinimui, nei mažesnei laido varžai užtikrinti.

2. Tiltelio maitinimo įtampos bei paties tiltelio triukšmų, kurie gali įtakoti rezultato skilčių nustatymo momentinę vertę. Ši įtaka yra panaši kaip tiesioginio keitimo sistemos. 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), o tiltelio pečiai būtų kiek įmanoma vienesni, tuomet didžioji dalis triukšmų bus sinfaziniai. Nenuslopintų triukšmų įtaką mažinti galima integruojant sustiprintą signalą, nes įvertinimo rezultatas kinta lėtai, o triukšmų fonas yra baltojo triukšmo pobūdžio. Be to, galima atlikti skaitmeninį signalo integravimą įvertinimo skiltyse, vertinant jas po kelis kartus. Skilčių vertinimas kelis kartus tik nežymiai prailgintų įvertinimo trukmę, nes tiltelio balansas nesikeičia ir laiko tarpas tarp keleto vertinimų gali būti nedidelis. Minimalią trukmę tarp įvertinimų apsprendžia tik stiprintuvo DA1 ir palyginimo grandinės DA2 sparta. Todėl realiai laikas tarp kelių įvertinimų neviršija 1 μ s. Kelis kartus patikrinus palyginimo grandinės išėjimo signalą nekintant tiltelio balansui, ir apskaičiavus dažniau pasikartojančius rezultatus, galima priimti sprendimą, ar ši skiltis yra loginis 0 ar 1. Tokį mechanizmą lengviau įgyvendinti, kai paskiltinio balansavimo registras realizuojamas pačiame mazgo valdiklyje programiniu būdu. Detaliau šis būdas aptartas tolimesniuose poskyriuose.

3. Stiprintuvo DA1 stiprinimo koeficiento nestabilumai neturi įtakos įvertinimo rezultatui. Pasikeitus stiprinimo koeficientui, keičiasi įtampa siunčiama į palyginimo grandinę, tačiau jos poliarumas, taigi ir rezultatas, nesikeičia. Svarbu, kad stiprinimo koeficientui sumažėjus, į komparatorių patektų įtampa, didesnė už jo slenksčio įtampą. Dėl

šios priežasties stiprintuvo stiprinimo koeficientas parenkamas didelis, atsižvelgiant į tai, kad nebūtina vengti maksimalios disbalanso įtampos ribojimo, sukkelto stiprintuvo persikrovimu.

4. Stiprintuvo ir palyginimo grandinės amplitudinių charakteristikų netiesiškumai neturi įtakos įvertinimo tikslumui, nes tiek stiprintuvas, tiek palyginimo grandinė, balansuojant tiltelį, dirba kaip poliarumo detektoriai.

5. Stiprintuvo ir palyginimo grandinės nulio dreifai, kaip ir stiprintuvo dreifai naudojant klasikinį metodą, gali įtakoti įvertinimo rezultatą. Dreifų įtaka gana didelė, nes esant mažoms įėjimo įtampoms, pasikeitus nulio lygiui išėjimo įtampos poliarumas gali keistis. Tai įtakoja įvertinimo rezultatus. Kai įvertinimo rezultatas reikalingas 12 skilčių skyroas geba, jauniausios skilties keitimo įtampa būtų 2^{12} karto mažesnė nei maksimalus (pradinis) tiltelio disbalansas. Kaip parodyta 1.7 išraiškoje, maksimali disbalanso įtampa lygi 150 mV, kai tiltelis maitinamas 10 V įtampa. Vienos balansavimo skilties įtampos kitimo vertė tokiu atveju bus:

$$\Delta U_l = U_l / 2^d = 150 \cdot 10^{-3} / 2^{12} = 0,15 / 4096 = 36,6 \mu\text{V}. \quad (2.3)$$

Precizinių operacinių stiprintuvų nulio dreifų lygis siekia $\Delta U = \pm 0,6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Taigi darbo lauko ir laboratorinėmis sąlygomis temperatūrų diapazone $-30^\circ\text{C} \div +40^\circ\text{C}$ nulio dreifai gali sudaryti:

$$\Delta U = \pm 0,6 \mu\text{V/K} \cdot 70^\circ\text{C} = 42 \mu\text{V}. \quad (2.4)$$

Dėl šios priežasties, siekiant užtikrinti tikslų įvertinimą, tenka imtis priemonių išvengti nulio dreifų. Kitas būdas – maitinti tiltelį aukštesne įtampa. Tuomet disbalanso įtampa, kaip ir balansavimo laiptelio įtampa bus didesnės. Tačiau, kaip jau minėta 1.1.4 skyriuje, didinti šią įtampą galima ribotai, nes pradeda didėti srovės per jutiklius.

1. Palyginimo grandinės klaidos, tiesiogiai įtakojančios įvertinimo rezultatą. Norint jų išvengti tiltelio disbalanso signalas stiprinamas tiek, kad sustiprintas mažiausios skilties keitimo įtampos pokytis viršytų komparatoriaus jautrumo ribą ir nebūtų jai artimas. Taigi stiprintuvo stiprinimo koeficientas gali būti didelis, bet jo dydis ir persikrovimas, kaip jau aptarta, neįtakoja įvertinimo rezultato.

2. Kodu valdomo rezistoriaus varžos neapibrėžtis. Ši neapibrėžtis tiesiogiai įtakoja įvertinimo rezultatus. Šio rezistoriaus skiltiškumas nustato rezultato įvertinimo skyros gebą. Kaip kodu valdomas rezistorius naudojama ypač tiksli R2R matrica, kurios skilčių skaičius turi būti:

$$m \geq (n + 1); \quad (2.5)$$

čia n – reikiamas įvertinimo rezultato skiltiškumas, nes žemiausioji skiltis turi būti nuolat įjungta. Priešingu atveju gaunamas didelis varžos šuolis tiltelio petyje ją įjungiant. Jei šioje ir

visose kitose skiltyse nustatomas loginis 0, varža artėja į begalinę ir lygi nuotėkio varžai. Autoriaus darbuose [A10 – A12] nustatyta, kad patogiausia ir tikslingiausia kaip R-2R matricą naudoti SAK be įtampos ir srovės stiprintuvų. Tuomet R-2R matricos neapibrėžtys yra mažiausios, nes naudojama integrinė matrica, kurioje varžų tikslumą kitų atžvilgiu apsprendžia ypač tiksliai formuojami geometriniai matmenys integrinėje technologijoje. Vienintelis SAK panaudojimo trūkumas – galimi absoliutinės varžos R skirtumai tarp keleto SAK pavyzdžių. Pagal technologinius apribojimus šis parametras gali siekti iki $\pm 20\%$. Tačiau toks varžos pakeitimas įtakoja tik absoliutinę įvertinimo vertę ir, kaip jau minėta anksčiau, yra kompensuojamas. Norint įvertinti absoliutinius varžos dydžius, tektų kalibruoti tiltelio balansą parenkama ar paderinama varža kiekvienam SAK pavyzdžiui. Be to, įtakos rezultatui gali turėti SAK R2R matricos varžos temperatūrinis nestabilumas. Tačiau jis yra ypač nedidelis ir siekia $15 \cdot 10^{-6} \% / ^\circ\text{C}$. Kadangi siūlomo naudoti SAK pilnoji varža sudaro 3,5 k Ω , tai varžos temperatūrinis pokytis darbo temperatūrų diapazone siekia 36,75 m Ω . SAK į tiltelį įjungtas lygiagrečiai balansą keičiančiam rezistoriui, kurio varža yra apie 300 Ω . Tuomet varžos pokytis tiltelio petyje skaičiuojamas:

$$\Delta R = \frac{\left(\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) - \left(\frac{(R_1 + \Delta R_1) R_2}{(R_1 + \Delta R_1) + R_2} \right) \right)}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)} \cdot 100\%; \quad (2.6)$$

čia ΔR – varžos pokytis tiltelio petyje; R_1 – nominali SAK R-2R matricos varža kai įjungta jauniausioji skiltis; ΔR_1 – SAK varžos temperatūrinio nestabilumo sukeltas varžos pokytis; R_2 – tiltelio peties varžos, prie kurios lygiagrečiai prijungiamas SAK, varža.

Pagal (2.6), suskaičiavus varžos pokytį visam temperatūros diapazonui, gaunama 230 $\mu\Omega$. Balansavimo laiptelio varžos pokytis apskaičiuojamas visą jutiklio varžos kitimo diapazoną dalinant iš balansavimo laiptelių skaičiaus:

$$\Delta R_l = \frac{R_j D_j}{2^b}; \quad (2.7)$$

čia ΔR_l – jutiklio varžos pokytis atitinkantis vieną matavimo laiptelį; R_j – jutiklio nominalioji varža kai nėra deformacijų (300 Ω); D_j – jutiklio varžos kitimo diapazonas (6 %); b – matavimo skilčių skaičius (šiuo atveju 12). Įstačius šias vertes gaunama:

$$\Delta R_l = \frac{300 \cdot 0,06}{2^{12}} = 4,39 \text{ m}\Omega. \quad (2.8)$$

Taigi SAK varžos temperatūrinis nestabilumas neturi įtakos įvertinimo rezultatui.

Apibendrinant galima teigti, kad SAK užtikrina mažą varžos pokyčių įvertinimo neapibrėžtį, rezultatų stabilumą, mažus grandinės gabaritų bei paprastą valdymą, todėl tiltelių balansuoti SAK R-2R matrica ypač patogu.

Naudojant SAK, bendroji balansuojamo Wheatstone'o tiltelio varžos įvertinimo išraiška išvedama iš (2.2) išraiškos ir pritaikius SAK varžos išraišką per skilčių skaičių [22] bei SAK valdymo kodą:

$$R_x = R_1 = \frac{R_2 R_3 (R_4 + R_C)}{R_4 R_C} = \frac{R_2 R_3 \left(R_4 + \frac{2^n R_{IN}}{N} \right)}{R_4 \frac{2^n R_{IN}}{N}} = R_2 R_3 \frac{R_4 N + 2^n R_{IN}}{2^n R_4 R_{IN}}; \quad (2.9)$$

čia n – SAK skilčių skaičius, R_{IN} – SAK savitoji įėjimo varža (R-2R matricos elementų varža), N – dešimtainis SAK valdymo kodas.

Iš (2.9) išraiškos matoma, kad jutiklio varža R_x gali būti įvertinta teisingai parinkus SAK valdymo kodą N taip, kad tiltelis būtų galimai arčiau balanso taško.

Apibendrinant identifikuojami pagrindiniai siūlomo metodo privalumai lyginant jį su tiesioginio keitimo metodu yra:

1. Paprasta prijungti daugiau nei vieną jutiklį prie grandinės, nes nuostoliai laiduose neturi įtakos įvertinimo rezultatams. Prijungimui gali būti naudojami žemaomiai komutatoriai tiek aktyviajame, tiek ir pasyviajame tiltelio pečiuose, taip kompensuojant jų varžas ir varžų nestabilumus. Jutiklių prijungimo būdas ir žemaomių analoginių raktų naudojimas aptartas ankstesniuose autoriaus darbuose [A10 – A12]. Taip pavyksta ženkliai supaprastinti daugiakanalio varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemos struktūrą.

2. Mažiau neapibrėžčių šaltinių, daug didesnis įvertinimo rezultato stabilumas ir patikimumas, lyginant su klasikiniu metodu.

3. Tiltelio maitinimo įtampos trukdžiai ir dreifai neįtakoja įvertinimo rezultatų. Tai leidžia naudoti sistemą autonomiškai, lauko sąlygomis, maitinant sistemos elementus iš akumuliatorių baterijų. Tai ypač svarbu kuriant stebėsenos sistemas.

4. Palyginti nesudėtinga daugiakanalį įvertinimą užtikrinanti grandinė, leidžianti vienoje kompleksinėje būsenų vertinimo sistemoje naudoti didelį kiekį varžų pokyčių įvertinimo mazgų, nutolusių dideliu atstumu vienas nuo kito. Kadangi mazgo valdiklis iš karto kaupia skaitmeninio pavidalo rezultatus, jie gali būti perduodami įvairiais metodais dideliu atstumu be iškraipymų.

5. Užtikrinamas pigus sprendimas, nes nereikalingi brangūs ASK. Vietoje jų naudojami kur kas pigesni SAK, prie vieno matavimo mazgo galima prijungti didelį kiekį jutiklių nebrangiais kabeliais.

Taigi šis sprendimas žymiai geriau tinka daugiataškiams deformacijų įvertinimams lauko sąlygomis, kai būtinas daugelio nutolusių taškų jutiklių varžos mažų pokyčių įvertinimas. Prie vieno varžos įvertinimo mazgo gali būti prijungtas norimas jutiklių skaičius.

Vertinant varžos mažus pokyčius šiuo metodu, išvengiama daugelio paklaidų šaltinių, lyginant su tiesioginio keitimo metodu. Ypač gerai šis metodas tinka, kai nebūtini itin tikslūs įvertinimai (pvz. konstrukcijų būsenų stebėsenos sistemose, kai reikalaujama skyros geba pagal 1.3 išraišką). Tuomet operacinio stiprintuvo nulinio dreifų kitimo įtaka maža ir yra gerokai mažesnė už balansavimo laiptelio įtampą, todėl galima iš viso atsisakyti operacinio stiprintuvo ir naudoti jautresnę palyginimo grandinę, nes balansavimo laiptelio įtampa yra palyginti didelė. Taigi jei palyginimo grandinės nulinio dreifai siekia $6 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, o darbo temperatūrų diapazone (-30°C iki $+40^{\circ}\text{C}$) sudaro $420 \mu\text{V}$, tai varžos pokyčius įvertinti galima $150 \text{ mV}/420 \mu\text{V} = 357$ laipteliais, t.y. iki 8 skilčių (256 laiptelių) skiltiškumu.

Eksperimentinio tyrimo metu ištirtas šis varžų mažų pokyčių įvertinimo metodas ir nustatyta įvairių triukšmų įtaką bei rezultatų pastovumas atliekant varžų mažų pokyčio įvertinimą šiuo būdu.

2.2. Varžų mažų pokyčių įvertinimo patikimumo didinimas

Kaip jau aptarta, įvertinant konstrukcijų deformacijas (varžų mažus pokyčius), geriausi rezultatai gaunami naudojant uždarąją sistemą, paremtą automatinio skaitmeniniu Wheatstone'o tiltelio balansavimu. Tačiau ši sistema turi ir trūkumų:

1. Operacinio stiprintuvo nulinio dreifai įtakoja įvertinimo rezultato tikslumą. Jų įtaką galima mažinti keletu būdų, kurie analizuojami toliau šiame darbe.
2. Ilgesnis įvertinimo laikas dėl paskiltinio balansavimo, lyginant su tiesioginio keitimo metodu. Didinti balansavimo spartą galima tik tam tikrose ribose, nes reikia įvertinti operacinio stiprintuvo, komparatoriaus nusistovėjimo laikus bei tiltelio parazitinių parametrų įtaką, kuri tampa ženkliai sparčiau keičiant tiltelio balansą. Esant tiesioginiam keitimui, įvertinimo spartą apsprendžia tik ASK sparta. Tačiau įvertinant, kad tiriami varžos ypač maži pokyčiai dažnai yra lėtai kintantys, šis trūkumas nėra ženklus.
3. Gana problematiškas skiltiškumo (skyros gebos) didinimas dėl balansavimo laiptelio įtampos mažėjimo. Kuo mažesnė laiptelio įtampa, tuo didesnė triukšmų bei nulinio dreifų įtaka įvertinimo rezultatui.

Taigi norint sumažinti įvertinimo neapibrėžtis, iškyla nemaža spęstinių problemų.

Didinant įvertinimo patikimumą reikia įvertinti tai, kad operacinių stiprintuvų dreifų įtaka lemia įvertinimo rezultatų neapibrėžtis. Stiprintuvų nulinio dreifai yra ypač lėti procesai, nes juos lemia aplinkos veiksnių, dažniausiai temperatūros kitimas. Juos galima laikyti

kvizistacionariais. Išvengti dreifų įtakos gali būti naudojami įvairūs būdai, kuriuos galima skirstyti į grupes:

1. Kintamosios įtampos stiprintuvų naudojimas. Šiuo atveju stiprintuvo nulinio dreifai įtakos neturi, nes stiprinama kintama įtampa, o nuolatinė dedamoji filtruojama, taigi filtruojami ir kvazistacionarūs dreifai. Šie metodai dar gali būti skaidomi į:

1.1. metodai kai tiltelis maitinamas kintamąja įtampa, taigi ir į stiprintuvą ateinanti tiltelio disbalanso įtampa yra kintama;

1.2. metodai kai tiltelis maitinamas nuolatine įtampa, o į stiprintuvą patekusi nuolatinė įtampa moduluojama ir tik tuomet stiprinama.

2. Dreifus kompensuojantys būdai. Šių metodų esmė – kompensuoti stiprintuvų įnešamus dreifus. Šie metodai taip pat gali būti skaidomi į:

2.1. aparatūrinius dreifų kompensavimo metodus;

2.2. kompensavimo pagal etalonus metodus.

Kitas neapibrėžčių šaltinis – nesinfaziniai triukšmai tiltelio pečiuose. Naudojant vytąsias poras jutiklių prijungimui bei siekiant kiek įmanoma suvienodinti tiltelio pečius, galima sumažinti šią problemą, tačiau dalis triukšmų išlieka. Jų įtaka ypač pasireiškia didinant įvertinimo rezultato skiltiškumą, kai balansavimo laiptelio įtampa yra labai maža. Norint sumažinti nekompensuotų triukšmų įtaką rezultatui galimi keletas sprendimo kelių:

1. Filtravimas skaitmeniniais filtrais.

2. Aparatinis filtravimas.

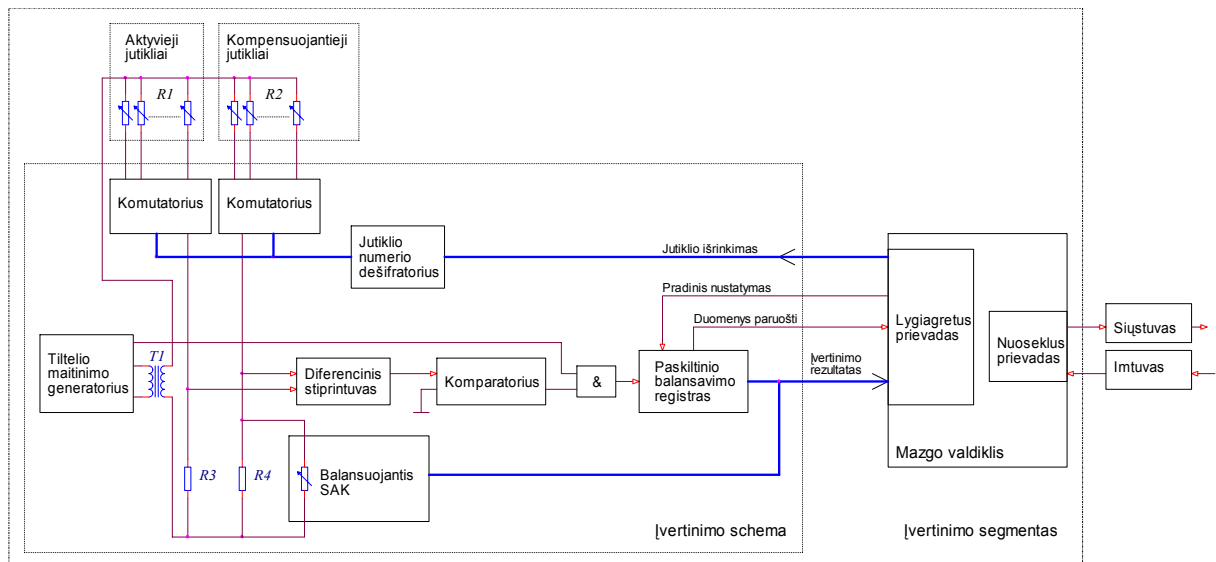
3. Įvertinimo rezultatų vidurkinimas.

Toliau siekiama aptarti įvairias šių būdų realizavimo galimybes, nustatyti jų privalumus ir trūkumus bei tinkamas naudojimo sritis.

2.3. Dreifo mažinimas maitinant tiltelį kintama įtampa

Šio metodo esmė – tiltelio maitinimas kintama įtampa. Tuomet į stiprintuvą taip pat patenka kintama įtampa. Ją stiprinant nufiltruojama nuolatinė dedamoji bei lėti kvazistacionarūs įtampos pokyčiai. Taigi išvengiama stiprintuvo nulinio dreifų įtakos. Sistemos struktūra ir veikimas pagrįstas uždarnosios sistemos veikimu, aptartu anksčiau. Tokios sistemos struktūra pateikta 2.2 paveiksle.

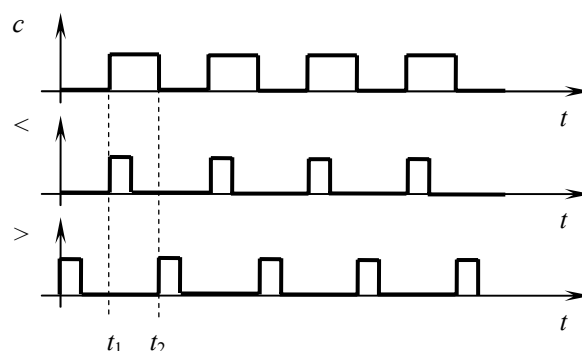
Įvertinimo grandinė. Iš principo ši grandinė nedaug skiriasi nuo 2.1 poskyryje aptartosios. Jutiklių varžos pokyčiui įvertinti taip pat naudojamas Wheatstone'o tiltelis. Į du šio tiltelio pečius jungiami jutikliai. Vienas jų aktyvus, t.y. jo varža keičiasi priklausomai nuo tiriamojo pokyčio (pvz. deformacijos). Kitas jutiklis kompensuojantis. Jo varža kinta tik keičiantis temperatūrai ir kitiems aplinkos veiksniams.



2.2 pav. Sistemos struktūra, kai tiltelis maitinamas kintamąja įtampa

Tiriamas ne vienas konstrukcijos taškas, todėl tenka numatyti jutiklių komutavimą. Komutavimas valdomas raktais, o šie – jutiklio numerio dešifраторiumi. Dešifраторiaus įėjimo signalas – dvejetainis jutiklio numeris, kurį generuoja įvertinimo sistemos valdiklis.

Wheatstone'o tiltelis šiuo atveju maitinamas kintama įtampa. Ji sukurama generatoriumi su diferenciniu išėjimu. Šio generatoriaus signalas naudojamas ir paskiltinio balansavimo registro taktinių impulsų kūrimui. Tam iš harmoninio generatoriaus išėjimo signalo formuojami stačiakampiai impulsai. Kintama įtampa maitinamo Wheatstone'o tiltelio balanso taške keičiasi tiltelio išėjimo įtampos fazė, todėl palyginimo grandinės rezultatas – loginiai impulsai, kurių fazės perstumtos taktinio generatoriaus impulsų atžvilgiu. Komparatoriaus išėjimo impulsai pavaizduoti 2.3 paveiksle. Čia "C" – taktiniai impulsai; "<" – signalas komparatoriaus išėjime, kai tiltelis nesubalansuotas; ">" – signalas išėjime, kai tiltelis perbalansuotas.



2.3 pav. Komparatoriaus išėjimo signalo priklausomybė nuo tiltelio balanso

Tiltelis balansuojamas prie jo vieno peties prijungto SAK varžomis. Į SAK įėjimą siunčiamas skaitmeninis kodas, kuris parenkamas taip, kad tiltelis būtų galimai labiau subalansuotas. Kodas parenkamas vartojant specialius paskiltinio balansavimo registrus arba

realizuojamas programiniu būdu mazgo valdiklyje. Taip galima gauti gana paprastą ir sparčią grandinę. Jei tiltelis nesubalansuotas, į registrą turi patekti loginis 1, o jei perbalansuotas - loginis 0. Taigi iš 2.3 paveiksle pateiktos laiko diagramos matoma, kad registro valdymo signalą galima gauti įjungus loginio IR grandinę tarp tiltelio išėjimo signalo C ir palyginimo grandinės išėjimo signalo.

Sistemos veikimas. Per Wheatstone'o tiltelį teka kintama srovė, kurią sukuria tiltelio maitinimo generatorius. Ši srovė teka ir per kompensuojantį bei komutatoriumi išrinktą jutiklį. Tiltelis specialiai išbalansuojamas rezistoriais R_3 , R_4 . Esant vienodoms aktyviojo ir pasyviojo jutiklių varžoms, tiltelio pečių įtampos skiriasi. Šis skirtumas siunčiamas į stiprintuvą ir sustiprinamas tiek, kad esant minimaliam tiltelio nesubalansuotumui viršytų palyginimo grandinės jautrumo ribą. Palyginimo grandinė lygina įtampą įėjime su 0 V įtampa. Priklausomai nuo tiltelio būsenos, keičiasi palyginimo grandinės išėjimo signalo fazė. Palyginimo grandinės darbą apibūdinančios laiko diagramos pateiktos 2.3 paveiksle.

Signalas iš palyginimo grandinės išėjimo siunčiamas į IR grandinę. Į šią grandinę taip pat siunčiami tiltelio maitinimo generatoriaus impulsai. Kadangi tiltelis maitinamas sinusine įtampa, tai prieš siunčiant ją į IR grandinę, reikia iš harmoninių impulsų suformuoti stačiakampius. Tai atlieka impulsų formotuvas.

Įsijungus jutikliui, valdymo programa perduoda paskiltinio balansavimo registrui įvertinimo leidimo signalą. IR grandinė suformuoja signalą, kuris valdo paskiltinio balansavimo registrą. Jei tiltelis nesubalansuotas ir iš loginio IR grandinės su registro sinchroimpulsu ateina loginio 0 signalas, į vyriausiąją šio registro skiltį įrašomas loginis 1. Šis signalas valdo SAK. Keičiasi SAK varža, tuo pačiu keičiasi tiltelio peties, kuriame įjungtas SAK varža, taigi ir tiltelio balansas. Jei tiltelis išlieka nesubalansuotas, tai naujas sinchroimpulsas bei signalas iš IR grandinės registro jaunesnėje skiltyje įrašys loginį 1. Jei tiltelis perbalansuojamas, su sinchroimpulsu į registrą ateina loginio 1 signalas ir vyriausioje skiltyje ištrinamas loginis 1, įrašomas 0. Kitu žingsniu parenkama jaunesnės skilties reikšmė. Taip tiltelis balansuojamas tol, kol pasiekama jauniausia skiltis. Parinkus jauniausią paskiltinio balansavimo registro skiltį, tiltelio disbalansas yra mažesnis, nei leistina prietaiso paklaida, todėl registro išėjime nusistovėjęs kodas yra varžos įvertinimo rezultatas.

Dvejtainis kodas, esantis paskiltinio balansavimo registro išėjime, siunčiamas į lygiagretųjį prievadą. Taip pat per lygiagretųjį prievadą programai perduodamas signalas, kad duomenys paruošti nuskaitymui. Programa išrenka adresą, atitinkantį prievado adresą, kuriame yra įvertinimo duomenys. Kai suformuojamas registro išėjimo leidimo signalas, duomenys iš registro perduodami į prievadą, o iš čia juos nuskaito sistemos valdymo programa. Nuskaičius rezultatus suformuojamas registro nustatymo į pradinę būseną signalas

bei išrenkamas antrasis jutiklis. Atlikus šias operacijas, visi procesai kartojami iš naujo, tik jau su antruoju jutikliu. Taip apklausiami visi jutikliai, o jų duomenys surašomi į masyvą. Tai nulinių reikšmių masyvas.

Suformavus nulinių reikšmių masyvą konstrukcija apkraunama reikiama apkrova ir atėjus įvertinimo laikui, kurį nustato programa, įvertinimas kartojamas. Iš gautų reikšmių masyvo elementų atimami atitinkami nulinių reikšmių masyvo elementai. Taip gaunamas jutiklių varžos pokytis lyginant su pradinėmis reikšmėmis. Šis pokytis proporcingas jutiklį veikiančiam dydžiui (pvz. konstrukcijos deformacijai).

Iš aptartos struktūros galima nustatyti ir pagrindinius įvertinimo rezultatų neapibrėžčių šaltinius:

1. Tiltelio parazitinių reaktyviųjų parametrų įtaka esant kintamai maitinimo įtampai.
2. Didelis plačiajuosčių triukšmų kiekis, kurie sustiprinti operaciniu stiprintuvu patenka į palyginimo grandinę.

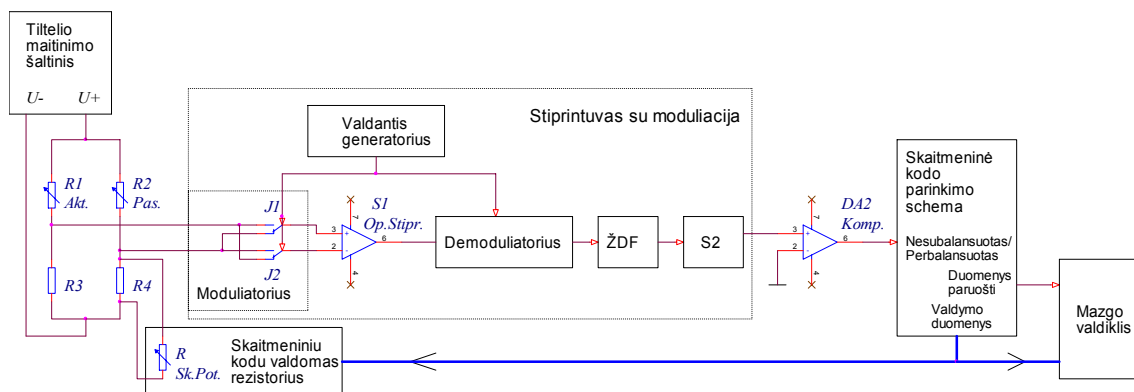
Taigi norint padidinti įvertinimo tikslumą reikia įvertinti reaktyviųjų parametrų įtaką įvertinimo rezultatui, o taip pat tenka užtikrinti gerą siaurajuostį įvertinimo signalo filtravimą minimaliai iškraipant įėjimo signalo fazę.

Parazitinių parametrų įtaka rezultatams. Maitinant tiltelį kintama įtampa, tiltelio balanso taškas gaunamas kai fazės posūkio kampas lygus 0. Tačiau kai tiltelį veikia parazitiniai reaktyvieji parametrai, reikia įvertinti jų sukliamą fazės posūkio kampą, kuris gali pakeisti balanso tašką. Tokio efekto galima išvengti derinant įvertinimo mazgą. Tačiau yra ir kitas efektas, atsirandantis dėl parazitinių parametrų įtakos. Šis efektas pasireiškia labai lėtu fazės kitimu arti balanso taško, taigi tiksliai nustatyti balanso tašką tampa gana sudėtinga. Įvertinti įvairių tiltelio parazitinių parametrų įtaką nėra lengva, nes norint gauti teisingą įvertinimą tenka analizuoti daugelį galimų parazitinių talpų bei induktyvumų tiltelyje, vertinti jų kompensavimą tiltelio pečiuose bei įtaką prie įvairių dažnių. Dėl šios priežasties tyrimas atliekamas kompiuteriniais analizės paketais. Parazitinių reaktyviųjų parametrų įtakos varžų mažų pokyčių įvertinimo kokybei, kai naudojamas tiltelio maitinimas kintama įtampa, tyrimo rezultatai pateikti šio darbo eksperimentinio tyrimo dalyje.

2.4. Dreifo mažinimas naudojant moduliacinis stiprintuvus

Kitas būdas stiprinti kintamos įtampos signalą ir taip išvengti nulinio dreifų, yra galimybė moduluoti į stiprintuvą pasiųstą nuolatinį signalą. Po moduliacijos signalas stiprinamas reikiamą skaičių kartų ir filtruojamas, taip išėjime gaunant sustiprintą nuolatinį signalą. Kaip moduliatorius dažniausiai naudojamas amplitudės impulsinis moduliatorius, kuris įgyvendinamas panaudojant nekontaktinius komutatorius. Kaip komutatoriai naudojami žemaomiai lauko tranzistoriai, o valdantis generatorius įgyvendinamas multivibratoriumi.

Varžos pokyčio įvertinimo įtaiso funkcinė schema naudojanti moduliacinį stiprintuvą iš esmės tokia pati kaip įprastos uždarnosios sistemos ir atvaizduota 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Uždara sistema naudojanti moduliacinį stiprintuvą

Stiprintuvo įėjime esantys raktai J1, J2 prie kintamos įtampos stiprintuvo įėjimo signalą prijungia pakaitomis priešingomis fazėmis. Stiprintuvo S1 įėjime įtampos poliarumas nuolat keičiasi. Taigi lėtai kintantis įėjimo signalas pakeičiamas į kintamą stačiakampį signalą, kurio dažnis užduodamas generatoriumi. Šis signalas stiprinamas kintamos įtampos diferenciniu stiprintuvu S1. Po stiprinimo signalas demoduliuojamas demoduliatoriumi į pulsuojančią įtampą, kurios vidurkis lygus sustiprintam įėjimo signalui. Demoduliatoriaus išėjimo impulsų poliarumas priklauso nuo valdančiojo generatoriaus ir demoduliatoriaus išėjime esančio signalo fazių skirtumo. Po demoduliatoriaus signalo pulsacijos filtruojamos žemųjų dažnių filtru (ŽDF). Filtruotas signalas dar stiprinamas nuolatinės įtampos stiprintuvu S2 norint gauti mažą išėjimo varžą, didesnės amplitudės išėjimo signalą ir dar padidinti stiprinimo koeficientą. Kadangi signalas sustiprinamas kintamosios įtampos stiprintuvu, tai šio stiprintuvo nulinis dreifas jau yra palyginti mažas su į jį pasiūstą sustiprintu įėjimo signalu, tačiau visiškai jį išvengti nepavyksta.

Temperatūrinis nulinis dreifas tokiaime stiprintuve apsprendžiamas neidealiais moduliatoriaus raktais ir termoelektrovaros poveikiu įėjimo grandinėje. Taigi moduliatoriui panaudojus žemaomius analoginius raktus, temperatūrinis nulinis dreifas turėtų dar sumažėti.

Pagrindinis metodo privalumas – paprasta grandinė garantuojanti gerus varžos pokyčių įvertinimo rezultatus. Šio metodo trūkumai:

1. Nesprendžiama nesinfazinių triukšmų stiprintuvo įėjime slopinimo problema.
2. Būtina įvertinti tai, kad stiprintuvo su moduliacija įėjime signalo kitimo sparta turi būti maža. Jei moduliacijos dažnis sudaro 2,5 kHz, tai aukščiausia galima harmonika, norint neiškraipyti signalo, yra tik 500 Hz. Dėl šios priežasties negalima sparčiai keisti tiltelio balansavimo kodo – tiltelio balanso. Dėl to kiek pailgėja parametro įvertinimo laikas.

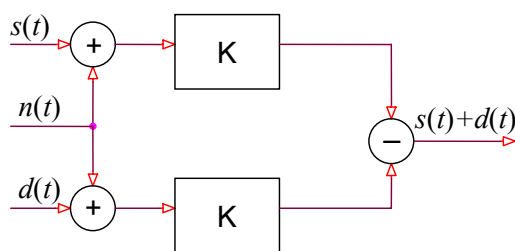
Galimi šie įvertinimo neapibrėžčių šaltiniai:

1. Neslopunami ir nefiltruojami įėjimo signalo nesinfaziniai triukšmai.
2. Nors temperatūriniai nulinio dreifai gerokai sumažinami, tačiau neeliminuojami, ir didinant įvertinimo skyros gebą jie gali įtakoti įvertinimo rezultatus.

Šis dreifų mažinimo metodas yra paprastesnis už metodą, kai tiltelis maitinamas kintamąja įtampa, nes išvengiama parazitinių parametrų įtakos įvertinimo rezultatui, nereikalingas tiltelio maitinimo generatorius. Šis būdas leidžia sumažinti varžos mažų pokyčių įvertinimo neapibrėžtis dėl sumažinto nulinio dreifų poveikio rezultatui. Galimas įvertinimo patikimumas priklauso nuo parinkto instrumentinio stiprintuvo parametrų.

2.5. Dreifų kompensavimas analogišku stiprintuvu

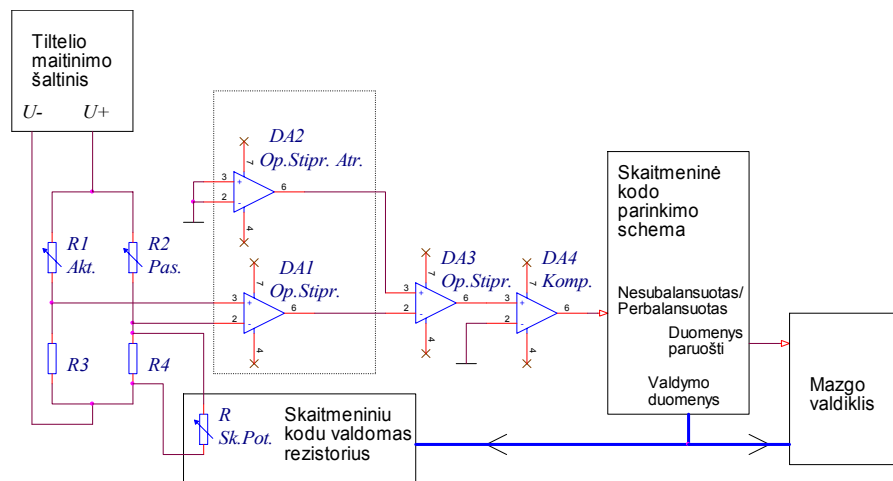
Šio metodo esmė – iš dalies kompensuoti stiprintuvo nulinio dreifus kitu, analogišku stiprintuvu. Įvertinimo signalui nulinio dreifo įtaka yra adityvinė. Taigi iš šio signalo atimant analogišką nulinio dreifo įtaką, gaunamas įvertinimo signalas su nedideliu, iš dalies kompensuotu nulinio dreifu. Tokio kompensavimo modelis pateiktas 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Kompensavimo modelis: $s(t)$ – įvertinimo signalas; $n(t)$ – aplinkos poveikio įtaka nulinio dreifui perskaičiuota į stiprintuvo įėjimą; $d(t)$ – stiprintuvų nesubalansuotumas nulinio dreifams perskaičiuotas į stiprintuvo įėjimą

Norint gauti geriausius rezultatus, būtina užtikrinti minimalų $d(t)$ kitimą. $d(t)$ absoliutinė vertė didelės įtakos neturi ir gali būti lengvai eliminuota įvertinimo metu tiek skaitmeniniais, tiek ir analoginiais metodais.

Sustiprintas signalas su nulinio dreifo įtampa siunčiamas į diferencinį laipsnį. Į kitą šio laipsnio įėjimą (priešinga fazė pirmojo atžvilgiu) siunčiamas kompensuojančiojo stiprintuvo išėjimas, t.y. nulinio dreifo įtampa. Kuo identiškesni pagrindinis ir kompensuojantysis stiprintuvai ir jų išorinės grandys, tuo geriau kompensuojami jų nulių dreifai. Taigi idealus atvejis kai šie stiprintuvai yra viename IG kristale, o jų stiprinimo koeficientas yra fiksuotas arba programuojamas, o ne užduodamas išoriniais elementais (instrumentiniai stiprintuvai). Tuomet jų nulinio dreifai yra identiški ir geriausiai kompensuojami. Šiuo atveju būtina užtikrinti gana didelį šių stiprintuvų stiprinimą, kad po jų esančio operacinio stiprintuvo nulinio dreifai neturėtų įtakos varžos pokyčio įvertinimo rezultatui. Tai įgyvendinančio įtaiso funkcinė schema pateikta 2.6 paveiksle.



Pagrindinis metodo privalumas – paprasta grandinė garantuojanti gerus varžos mažų pokyčių įvertinimo rezultatus dėl labai sumažintos nulio dreifų įtakos įvertinimo rezultatui. Tačiau metodas turi ir trūkumų:

1. Būtinias maksimalaus identiškumo tarp operacinių stiprintuvų nulio dreifų bei stiprinimo koeficientų užtikrinimas. Kaip jau minėta, idealiausias variantas kai operaciniai stiprintuvai yra viename IG kristale.

2. Nesprendžiama nesinfazinių triukšmų stiprintuvo įėjime slopinimo problema.

Dėl šių priežasčių galimi šie įvertinimo neapibrėžčių šaltiniai:

1. Neužtikrintas identiškumas tarp operacinių stiprintuvų neeliminuoja nulio dreifų. Tačiau kai stiprintuvai yra viename IG kristale, o stiprinimo koeficientą užduodantys elementai yra maksimaliai identiški bei įdėti į pasyvų termostatą, arba stiprinimo koeficientas fiksuotas, skirtumas tarp stiprintuvų nulio dreifų yra nykstamai mažas ir yra efektyviai kompensuojamas.

2. Neslopinami ir nefiltruojami nesinfaziniai triukšmai įėjimo signalė.

Šis būdas yra gerokai paprastesnis nei tiltelio maitinimo kintamąja įtampa būdas. Tačiau šio metodo įvertinimo rezultatų kokybė yra gerokai didesnė nei standartinio metodo, aptarto 2.1 skyriuje. Šį būdą patogiausia naudoti tais atvejais, kai reikia gana didelės įvertinimo skyros gebos ir nedidelės sistemos kainos. Užtikrinama skyros geba priklauso nuo konkrečių įgyvendinimo sąlygų, parinktų stiprintuvų, jų stiprinimo koeficientų bei daugelio kitų parametrų ir gali būti nustatytas tik eksperimentiškai, nes teoriškai neįmanoma įvertinti, kiek pavyksta užtikrinti dviejų stiprintuvų nulio dreifų vienodumą, esant skirtingoms įtaiso konstrukcijoms.

2.6. Dreifų kompensavimas etalonais

Šis metodas gali būti taikomas, nes stiprintuvų nulio dreifas yra lėtas procesas. Kadangi dreifai priklauso nuo aplinkos veiksnių, o daugiausiai nuo temperatūros, tai jie yra lėtai kintantys (kvazistacionarūs). Todėl tokius dreifus galima kompensuoti pirmiausiai atlikus etaloninį įvertinimą ir įvertinus reikiamą korekciją, o tik po to įvertinant reikiamą varžos pokytį. Galutinis įvertinimo rezultatas gaunamas koreguojant varžos pokyčio įvertinimo rezultatą etaloninio įvertinimo metu nustatyta korekcija.

Įvertinimo procesas šiuo atveju yra toks:

1. Prie tiltelio vietoje jutiklių prijungiami etaloniniai rezistoriai. Jų įvertinimo rezultatas n_a nustatomas idealiomis laboratorinėmis sąlygomis etaloniniu matuokliu kalibruojant įvertinimo mazgą. Etaloniniai rezistoriai parenkami ypač didelio tikslumo su mažu temperatūriniu varžos koeficientu ir apjungiami į pasyvų termostatą.

2. Atliekamas etaloninių rezistorių įvertinimas įprastu būdu, tyrimo vietoje esant išoriniams poveikiams. Gaunamas rezultatas n_m , nesutampantis su n_a dėl nulio dreifų ir kitų pasikeitusių sistemos parametrų. Galima teigti, kad:

$$n_m = n_a + d, \quad (2.10)$$

čia d – pasikeitusių sistemos parametrų įtaka.

3. Įvertinimo rezultatas palyginamas su žinomu (nustatytu laboratorinėmis sąlygomis) ir nustatoma įvertinimo korekcija $k = n_m - n_a$. Taigi

$$k = n_m - n_a = n_a + d - n_a = d. \quad (2.11)$$

4. Po to prie tiltelio prijungiami vertinami jutikliai ir atliekamas varžos pokyčio įvertinimas. Šio įvertinimo rezultatas (x) nėra tikslus dėl pasikeitusių grandinės parametrų įneštos klaidos. Galima teigti, kad:

$$x = x_t + d_1; \quad (2.12)$$

čia x_t – tikrasis įvertinimo rezultatas; d_1 – sistemos parametrų įtaka įvertinimo momentu.

5. Įvertinimo rezultatas koreguojamas atliekant korekciją k ; $x_m = x - k$. Taigi tokiu atveju neapibrėžtis:

$$\varepsilon = |x_m - x_t| = |x - k - x_t| = |x_t + d_1 - k - x_t| = |d_1 - k| = |d_1 - d|. \quad (2.13)$$

Įvertinimo neapibrėžtis lygi sistemos parametrų įtakos pokyčiui per laiką nuo etaloninio iki deformacijų įvertinimo. Norint gauti mažiausią įmanomą neapibrėžtį, reikia siekti, kad pokytis nuo etaloninio įvertinimo iki tikrojo būtų kiek įmanoma mažesnis. Priimant, kad sistemos parametrų kitimas labai lėtas normaliomis sąlygomis, galima daryti išvadą, kad etaloninį įvertinimą t.y. korekcijos nustatymą, galima atlikti kiekvieną kartą prieš

pat matuojant visus jutiklius, nes visų jutiklių įvertinimo serija viename segmente netrunka ilgiau kaip 10 s. Galima teigti, kad normaliomis sąlygomis per 10 s aplinkos temperatūra negali pakisti daugiau nei $0,5^{\circ}\text{C}$. Naudojant tikslius instrumentinius stiprintuvus nulio dreifai siekia $0,6 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, taigi įtaka įvertinimo rezultatui nežymi net esant 14 skilčių skiriamosios gebos įvertinimams. Mažiausios balansavimo skilties įtampa apskaičiuojama tiltelio maksimalaus išderinimo įtampą dalinant iš balansavimo laiptelių skaičiaus:

$$\Delta U_l = \frac{U_{\max}}{2^b}; \quad (2.14)$$

čia: ΔU_l – tiltelio disbalanso įtampos pokytis atitinkantis vieną įvertinimo laiptelį; $U_{\max}$ – tiltelio maksimalaus išderinimo įtampa (15 mV); b – įvertinimo skilčių skaičius (12). Įstačius šias vertes gaunama:

$$\Delta U_l = 15 \cdot 10^{-3} / 2^{14} = 15 \cdot 10^{-3} / 16384 = 0,916 \mu\text{V}.$$

Taigi neįvertinamas pokytis sudaro mažiau nei pusę jauniausios skilties vertės.

Šio metodo privalumai:

1. Ypač paprasta grandinė leidžianti užtikrinti gerus varžos pokyčio įvertinimo rezultatus. Įvertinimo grandinė tokia pat, kaip paprastos uždaros sistemos su skaitmeniniu būdu automatiškai balansuojamu Wheatstone'o tilteliu, aprašytos 2.1 poskyryje, tik vietoje vienos aktyviojo ir pasyviojo jutiklio poros prie komutatorių prijungti etaloniniai rezistoriai.

2. Mažinama ne tik stiprintuvo nulio dreifų įtaka, bet ir tiltelio pečių varžų bei SAK varžų pokyčių įtaka.

Šio metodo trūkumai:

1. Nesprendžiama nesinfazinių triukšmų stiprintuvo įėjime slopinimo problema.
2. Šiek tiek ilgesnis įvertinimo procesas (arba mažesnis jutiklių skaičius).

Galimi šie įvertinimo neapibrėžčių šaltiniai:

1. Neslopinami ir nefiltruojami nesinfaziniai triukšmai įėjimo signale.
2. Neįvertinami sistemos parametrų pokyčiai tarp etaloninio bei varžos pokyčio įvertinimo. Esant staigiems temperatūros pokyčiams reikia atlikti etaloninius įvertinimus prieš kiekvieno jutiklio įvertinimą, o tai ilgina bendrą įvertinimo laiką.

3. Neįvertinami etaloninių rezistorių varžų temperatūriniai pokyčiai. Atliekant įvertinimą 14 skilčių tikslumu vieno balansavimo laiptelio varžos pokytis pagal 2.4 lygus:

$$\Delta R = \frac{R_j D_j}{2^b} = \frac{300 \cdot 0,06}{2^{14}} = 1 \text{ m}\Omega.$$

Taigi etaloninių rezistorių varžų skirtumo pokytis negali viršyti $\Delta R = 0,5 \text{ m}\Omega$. Jei rezistoriai preciziniai, jų temperatūrinis varžos pokyčio koeficientas nedidelis, o rezistorius išdėsčius arti viena kito, jų temperatūrų skirtumas yra nežymus. Norint jį dar sumažinti reikia šiuos rezistorius apjungti į pasyvų termostatą. Jei rezistorių varžos skiriasi, tai jų varžų skirtumo pokytis kintant temperatūrai lygus:

$$\Delta R = (R_1 + \Delta T_1 t_{k1} R_1) - (R_2 + \Delta T_2 t_{k2} R_2); \quad (2.15)$$

čia: R_1, R_2 – etaloninių rezistorių varžos; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – etaloninių rezistorių temperatūrų pokytis; t_{k1}, t_{k2} – etaloninių rezistorių temperatūriniai varžos kitimo koeficientai.

Šis pokytis, kaip jau minėta neturi viršyti $0,5 \text{ m}\Omega$ visame darbo temperatūrų diapazone. Matoma, kad šį dydį gali įtakoti rezistorių nominalios varžos dydžių skirtumas bei temperatūrų skirtumo tarp rezistorių pokytis. Jei etaloninių rezistorių varžos lygios $R_1 = R_2 = 300 \Omega$, o temperatūrinis koeficientas $50 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ tai temperatūrų skirtumas tarp rezistorių gali būti:

$$\Delta R = \Delta T_1 t_{k1} R_1 - \Delta T_2 t_{k1} R_1 = t_{k1} R_1 (\Delta T_1 - \Delta T_2), \quad (2.16)$$

$$(\Delta T_1 - \Delta T_2) = \frac{\Delta R}{t_{k1} R_1}, \quad (2.17)$$

$$\Delta T = (\Delta T_1 - \Delta T_2) = 0,33^\circ\text{C}.$$

Tai nesunkiai įgyvendinama apjungus rezistorius į pasyvų termostatą. Jei priimamas toks temperatūrų skirtumas tarp rezistorių, o $R_2 = R_1 + \varepsilon R_1$, tai ε – leistinas rezistoriaus varžos nuokrypis nuo nominalios varžos yra:

$$\Delta R = R_1 - (R_2 + \Delta T t_{k1} R_2) = R_1 - (R_1 + \varepsilon R_1) - \Delta T t_{k1} (R_1 + \varepsilon R_1), \quad (2.18)$$

$$\Delta R = -\varepsilon R_1 - \Delta T t_{k1} R_1 - \Delta T t_{k1} \varepsilon R_1, \quad (2.19)$$

$$\frac{\Delta R}{R_1} + \Delta T t_{k1} = -\varepsilon - \Delta T t_{k1} \varepsilon, \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta R}{R_1} + \Delta T t_{k1} = \varepsilon(-1 - \Delta T t_{k1}), \quad (2.21)$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R_1} + \Delta T t_{k1}}{-1 - \Delta T t_{k1}} = 0,002\%. \quad (2.22)$$

Vieliniams žemaomiams rezistoriams šis parametras visiškai tenkinamas. Be to, žinoma, kad tenzometrinų jutiklių pagamintų iš nichrominės vielos temperatūrinis varžos

kitimas yra labai mažas ($2 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$), todėl kaip etaloninius rezistorius geriausia naudoti du pasyvius tenzometrinius jutiklius, apjungtus į pasyvų termostatą.

Šis būdas yra gana paprastas ir beveik nesiskiria nuo įprasto matavimo uždarojoje sistema. Tačiau šio metodo įvertinimo rezultatų patikimumas yra gerokai didesnis. Šį būdą patogiau naudoti tais atvejais, kai reikia didelio įvertinimo patikimumo ir nedidelės sistemos kainos. Užtikrinamo įvertinimo patikimumo užtenka net 14 skilčių skyros gebai gauti, jei pavyksta efektyviai sumažinti nesinfazinius triukšmus stiprintuvo įėjime.

Apskritai visi 2.4, 2.5 ir 2.6 poskyriuose analizuoti įvertinimo būdai gali būti naudojami vienoje varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemoje. Priklausomai nuo reikalaujamo patikimumo gali būti parenkamas įvertinimo metodas. Iš esmės jie visi yra suderinami tarpusavyje ir gali būti sujungti į bendrą įvertinimo tinklą. Atliekant varžos pokyčio įvertinimą šiais metodais sistemos struktūra nekinta. Naudojami varžos įvertinimo mazgai, nuo kurių jutikliai gali būti nutolę ne daugiau kaip 10 m. Jei jutiklis reikalingas toliau, naudojamas kitas mazgas. Įvertinimo mazgai verčia matavimo rezultatą į skaitmeninį ir skaitmeniniu būdu šį rezultatą perduoda į centrinį kompiuterį, valdantį įvertinimo procesus. Centrinis kompiuteris sujungiamas su valdymo centru, kur užduodama įvertinimo programa, apdorojami vaizduojami ir analizuojami gauti įvertinimo rezultatai.

2.7. Triukšmų filtravimas skaitmeniniais metodais

Kaip matoma iš visų ankstesniųjų įvertinimo patikimumo didinimo būdų aptarimų, visiems jiems būdingas trūkumas – nesinfazinių tiltelio triukšmų įtaka įvertinimo rezultatų patikimumui. Kadangi balansavimo laiptelio įtampos yra ypač mažos, tai šie triukšmai gali turėti didelę įtaką įvertinimo rezultatui, tiek tiltelį maitinant nuolatine, tiek ir kintamąja įtampa. Vienas iš galimų šios problemos sprendimo būdų – filtruoti sustiprintą tiltelio disbalanso signalą prieš siunčiant jį į palyginimo grandinę. Filtravimą galima atlikti analoginiais ir skaitmeniniais filtrais. Filtruojant skaitmeniniu būdu, galima gerokai išplėsti ir pagerinti sistemos charakteristikas į skaitmeninio signalo apdorojimo (SSA) priemones įtraukiant ir kitas sistemos dalis. Taip gaunama ypač lanksti sistema, kai nustačius neapibrėžčių šaltinius, jų išvengti daugeliu atvejų galima tiesiog keičiant signalo apdorojimo algoritmą. Be to, adaptuojant signalo apdorojimo algoritmus galima sumažinti parazitinių parametrų įtaką, kai tiltelis maitinamas kintamąja įtampa. Aptariant filtravimo būdus priimama, kad tiltelis maitinamas kintama įtampa, nes šis atvejis yra sudėtingesnis nei maitinant nuolatine įtampa. Maitinant nuolatine įtampa filtravimui praktiškai pakanka žemųjų dažnių filtro.

Kitas būdas išvengti nesinfazinių triukšmų – vidurkinti įvertinimo rezultatą arba signalą. Taip galima išvengti momentinės triukšmų įtakos rezultatui.

Kaip jau minėta, gana didelę įtaką įvertinimo rezultato patikimumui turi plačiajuosčiai triukšmai patenkantys į stiprintuvo įėjimą kartu su tiltelio disbalanso įtampa. Taigi tolimesnio tyrimo tikslas – pagerinti varžų mažų pokyčių įvertinimo būdo atsparumą trukdžiams, supaprastinti sistemos struktūrą ir grandinę bei sumažinti kainą. Šiuos patobulimus efektyviausiai galima atlikti atliekant skaitmeninį signalų apdorojimą. Keliamas uždavinys – efektyviausiai patobulinti sistemos darbą, išvengiant nereikalingų mazgų. Tam reikia tinkamai parinkti signalų apdorojimo priemones bei nustatyti, kokius uždavinius, būtinus įgyvendinti varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemą, be signalo filtravimo jos gali atlikti.

Parenkant signalo skaitmeninio apdorojimo priemonę tenka atsižvelgti į įvertinimo mazgo, kuriame jis bus montuojamas galimybes ir reikalavimus jam. Taip pat būtina užtikrinti, kad SSA priemonė atliktų reikiamą signalo filtravimą realiu laiku, o jos realizavimas būtų galimai pigesnis.

Dažniausiai naudojamos SSA priemonės yra įprasti asmeniniai kompiuteriai (AK) bei skaitmeniniai signalų procesoriai (SSP). Įvertinant tai, kad kuriama mažų gabaritų ir palyginti nedidelės kainos sistema, tinkamiausia šiuo atveju naudoti SSP. Siekiant geriau išnaudoti SSP galimybes, SSP naudojamas ne tik signalų filtravimui, bet ir kitoms funkcijoms atlikti. Taip galima apjungti dalį įvertinimo mazgo funkcijų į vieną SSP ir taip sumažinti mazgo kainą, padidinti patikimumą bei pasiekti naujų kokybinių savybių.

Įvertinimo mazge naudojant SSP, kaip jau minėta, siekiama perduoti SSP galimai daugiau mazgo funkcijų. Taip sumažinamas elementų skaičius bei padidinamas sistemos patikimumas. Kartu įvedant tiltelio disbalanso signalo filtravimą galima sumažinti atsitiktines įvertinimo paklaidas. Toliau aptariama, kokias mazgo funkcijas galima perduoti SSP.

Pirmiausia funkcija perduodama SSP yra tiltelio disbalanso signalo filtravimas. Kaip parodyta ankstesniuose skyriuose, nefiltruoti nesinfaziniai triukšmai gali įtakoti varžos pokyčio įvertinimo kokybę. Filtruojant disbalanso signalą, išvengiama dalies atsitiktinių paklaidų, įtakančių įvertinimo rezultatą. Filtravimo mazgas jungiamas iš karto po diferencinio disbalanso signalo stiprintuvo.

Stiprintuvo ikelti į SSP nepavyksta dėl ypač mažos signalo, ateinančio iš Wheatstone'o tiltelio, amplitudės. Be to, diferencinio stiprinimo laipsnis leidžia nuslopinti sinfazinius triukšmus, kurie yra palyginti dideli, nes jutikliai prie tiltelio prijungiami ilgais, iki 10 m ilgio laidais. Kaip diferencinio stiprinimo laipsnis galėtų būti ir vidinis SSP stiprintuvas, tačiau SSP su įėjimo stiprintuvais nėra plačiai paplitę, arba šie stiprintuvai parengti darbui su audio ar kitos paskirties plačiai naudojamais signalais.

Kitas mazgas, kuris numatytas po filtravimo mazgo – palyginimo grandinė, kartu su IR-NE grandinė atliekanti fazės detektoriaus funkcijas. Signalą po IR-NE grandinė (t.y.

skaitmeninį signalą) siunčiant į numatytą SSP informacinį įėjimą, palyginimo grandinės funkcijas galima perduoti SSP. Dar daugiau, esant nesubalansuojamam dėl parazitinių L ir C verčių tilteliui, kai jis maitinamas kintama įtampa, SSP gali atlikti ir signalo fazės detektoriaus funkciją. Taigi palyginimo grandinės įkėlimas į SSP ir realizavimas skaitmeniniu būdu dar pagerina varžos mažų pokyčių įvertinimo kokybę, nes tuomet galima mažesnę dėmesį kreipti į tiltelio (o kartu ir jutiklių bei jungiamųjų kabelių) parazitinius parametrus, maitinti tiltelį didesnio dažnio kintamąja įtampa. Didesnis maitinančios įtampos dažnis užtikrina spartesnę įvertinimo procesą (sparčiau galima parinkti skaitmenines skiltis), o taip pat efektyvesnę disbalanso signalo filtravimą. Taip pat išvengiama vienos analoginės grandinės dalies, keičiant ją skaitmenine. Taigi padidėja mazgo patikimumas, sumažėja išorinių diskretinių elementų bei IG korpusų.

Taip pat sėkmingai į SSP galima įkelti paskiltinio balansavimo registrą (PPR). Tai atlieka SSP programa, kuri veikia taip pat kaip PPR. Be to, šis sprendimas vėl kiek supaprastina grandinę, nes pavyksta išvengti papildomų loginių elementų, trigerių reikalingų PPR darbo režimų užtikrinimui bei paties PPR. Taigi supaprastėja grandinė, sumažėja IG korpusų skaičius, o tai kartu didina sistemos patikimumą.

SAK, veikiančio kaip kodu valdomo rezistoriaus, įkelti į SSP nepavyksta, nes jei SSP ir turi SAK, tai jis yra su srovės ar įtampos formuotuvu ir tiesiogiai prisijungti prie R-2R rezistorių matricos nepavyksta. Taigi šis elementas lieka atskiras.

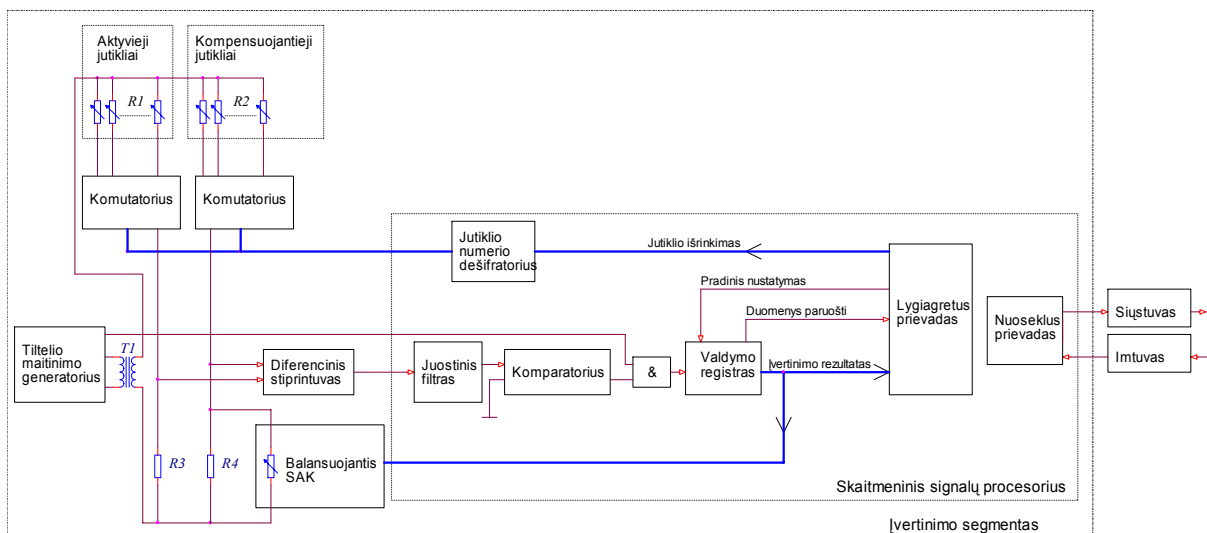
SSP gali atlikti ir mazgo valdiklio vaidmenį. Jis turi išorinius skaitmeninius prievadus, taigi gali kontroliuoti jutiklių prijungimą (komutatorių valdymo kodą), perduoti skaitmeninį kodą į SAK. Be to, SSP turintis nuoseklų prievadą gali būti paprastai įjungtas į matavimo mazgų kompiuterinį tinklą, kuris suprojektuotas ankstesniuose darbuose [A10 – A12].

Kaip matoma, į SSP galima perkelti didelę įvertinimo sistemos mazgo dalį. Tokiu atveju tektų naudoti spartų SSP, atliekantį užduotis realiaame laike, turintį pakankamo skiltiškumo įėjimo ASK sustiprinto disbalanso signalo įvedimui, reikiamą skaičių skaitmeninių prievadų mazgo valdymui, bei nuoseklųjį prievadą prijungimui prie matavimo mazgų tinklo. Tačiau reikalavimai įėjimo signalo diskretizavimo dažniui nėra labai griežti, nes tiltelio maitinimo dažnis nėra didelis. Mazgo struktūra tokiu atveju gerokai supaprastėtų ir ją sudarytų: Wheatstone'o tiltelis su jį maitinančiu generatoriumi; jutiklių komutatoriai; SAK, veikiantis kaip kodu valdomas rezistorius; SSP; kompiuterinio tinklo siųstuvas ir imtuvas.

SSP vykdytų šias funkcijas: įvertinimo mazgo kontrolė ir surišimas su valdymo pultu; tiltelio disbalanso signalo filtravimas; fazės detektavimas; paskiltinis tiltelio balansavimas.

Šiuo atveju mazgo grandinė tampa gerokai paprastesnė, ir kartu užtikrinamos geresnės kokybinės savybės. Sumažėja IS korpusų bei išorinių diskretinių elementų, o tai sumažina

vartojamą galią, gerokai padidina sistemos patikimumą. Tačiau pats svarbiausias privalumas šiuo atveju yra padidėjęs sistemos lankstumas. Norint dar pagerinti varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemos parametrus (pvz. po papildomų tyrimų keičiant signalo apdorojimo būdą, įvertinimo algoritmą, įvertinant netiesiškumus ir pan.) pakanka perprogramuoti SSP nekeičiant mazgo grandinės. Mazgo su SSP funkcinė schema pateikta 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Varžų mažų pokyčių įvertinimo mazgas su SSP

Toliau analizuojama kiekviena SSP atliekama funkcija ir parodoma, kaip ją galima įgyvendinti programuojant SSP. Neaptariamos mazgo kontrolės funkcijos, nes jos lieka tos pačios kaip aptartos ankstesniuose darbuose [A10 – A12] mikrovaldiklio funkcijos. Šiuose darbuose sukurti programų algoritmai ir matavimo mazgo valdymo bei surišimo su valdymo pultu metodai visiškai tinka programuojant SSP.

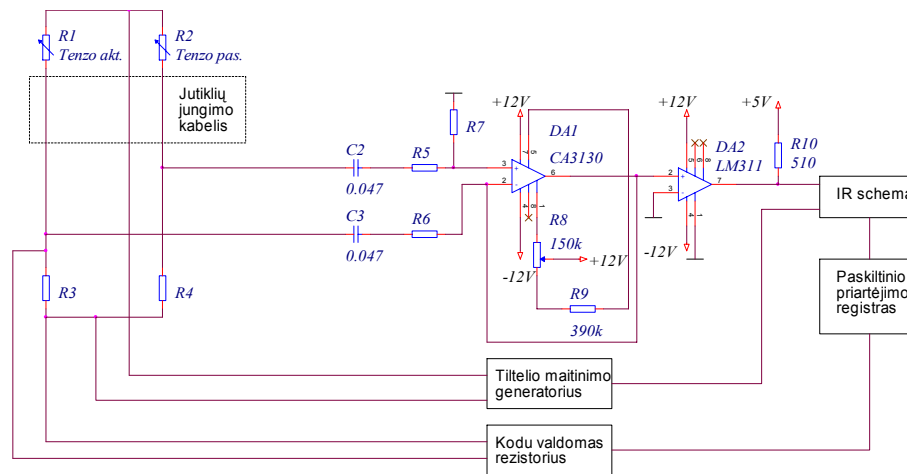
Be to, aptariant atskiras funkcijas siekiama išanalizuoti bendruosius principus ir neprisirišti prie konkrečių SSP norint palikti pasirinkimo galimybes bei sukurti bendrus principus tinkančius ir kitoms panašioms parametų įvertinimo sistemoms ir kitiems SSP.

2.8. SSP atliekamų funkcijų aptarimas

Šiame skyriuje detalai analizuojamos SSP atliekamos funkcijos. Vienas svarbiausių SSP uždavinių – atlikti Wheatstone'o tiltelio balanso signalo filtravimą. Taip pat svarbu užtikrinti įmanomai tikslesnį balanso taško nustatymą faziniu detektoriumi, kurio funkcijos taip pat perduodamos SSP. Nuo šių funkcijų įgyvendinimo kokybės priklauso viso įvertinimo mazgo gaunamų varžos mažų pokyčių įvertinimo kokybė.

2.8.1. Filtravimo mazgo paskirtis ir reikalavimai mazgui

Norint aptarti triukšmų atsiradimo tiltelio signale kelius, analizuojama supaprastinta segmento grandinė:



2.8 pav. Supaprastinta mazgo schema

Šioje grandinės schemoje: R1–R4 – Wheatstone‘o tiltelis su nutolusiais aktyviu ir pasyviu jutikliais. Toks jungimas leidžia eliminuoti nemažą dalį triukšmų, atsirandančių jungimo kabelyje, taip pat temperatūrinius ir kitus su aplinkos poveikiu susijusius pokyčius, nes R1 ir R2 įjungti taip, kad jų poveikis tilteliui priešingas. Tačiau ne visuomet trukdžiai vienodai paveikia abu jutiklius bei kabelio laidus. Tai nesinfaziniai triukšmai, kurie iš tiltelio patenka į diferencinį stiprintuvą DA1 ir jame ne slopinami, o stiprinami. Šiuos triukšmus tenka filtruoti, nes jie turi tiesioginę įtaką įvertinimo rezultatui.

Norint eliminuoti minėtus triukšmus tenka naudoti filtrą. Filtras gali būti panaudotas tik po diferencinio stiprintuvo laipsnio, nes prieš jį tektų jungti du filtrus, kurių parametrai išsibarstymas ir nestabilumas sukeltų dar didesnes neapibrėžtis, būtų labai sudėtinga suderinti įėjimo varžas taip, kad nevyktų tiltelio varžų šuntavimas, be to, nepavyktų išvengti maitinimo šaltinio įtampos nestabilumo įtakos matavimo rezultatams. Taigi filtras turi būti jungiamas tarp stiprintuvo DA1 ir komparatoriaus. Kadangi tiltelis maitinamas kintama sinusine įtampa, tai po stiprintuvo esančio signalo dažnių juosta gana siaura. Tai amplitudė moduluotas signalas, kurio gaubiančiosios dažnis neviršija dešimčių hercų dažnio. Tiltelį maitinančios įtampos dažnis taip pat nedidelis, nes aukštesniuose dažniuose pradeda reikštis parazitiniai L ir C parametrai, neleidžiantys efektyviai subalansuoti tiltelio. Maitinimo dažnis negali viršyti 1 kHz. Realiai, jis parenkamas tarpe tarp 10 Hz ir 1 kHz taip, kad būtų gaunami mažiausi parazitiniai parametrai, bet kartu ir ne ypač mažas įvertinimo laikas, kuris atvirkščiai proporcingas dažniui. Be to parenkant dažnį tenka atsižvelgti į efektyviausio trukdžių slopinimo galimybę. Taigi jei signalo spektre trukdžių komponentės yra aiškiai išreikštos tam tikrų dažnių komponentės, reikia, kad tiltelio maitinimo dažnis būtų galimai toliau nuo šių trukdžių dažnių, arba sutaptų tiek dažniu, tiek faze su tam tikru, labai pasireiškiančio determinuoto trukdžio dažniu (pvz. tinklo įtampos dažniu).

Efektyviam filtravimui tenka parinkti optimalų tiltelio maitinimo dažnį, atsižvelgiant į trukdžių signalo spektro maksimalias reikšmes. Filtras signalo filtravimui turi būti juostinis, kuo statesniais šlaitais, su centriniu dažniu, lygiu tiltelio maitinimo dažniui ir juosta neviršijančia iš balansuojamo tiltelio ateinančio signalo juostos. Pasyvus analoginis filtras žemuose dažniuose su siaura pralaidumo juosta ir stačiais šlaitais būtų labai sudėtingas (aukštos eilės) ir ypač sudėtingai skaičiuojamas, be to gremėzdiškas, nes centrinis tokio filtro dažnis mažesnis nei 1 kHz. Taip pat labai sunku išvengti parametrų išsibarstymo ir nestabilumo esant įvairiems aplinkos poveikiams.

Efektyviam filtravimui gali būti panaudotas aktyvus analoginis arba skaitmeninis filtras, dirbantis realiuoju laiko masteliu. Skaitmeninis filtras nėra labai sudėtingas, nes centrinis dažnis negali viršyti 1 kHz, taigi diskretizavimo dažnis nėra didesnis nei 2 kHz. Be to nekeliami reikalavimai mažiems harmoniniams iškreipymams ir diskretizacijos triukšmams. Aktyvieji analoginiai filurai taip pat gali būti naudojami, tačiau jų kokybė ir parametrų stabilumas nėra dideli. Todėl toliau remiamasi skaitmeniniais filtravimo metodais.

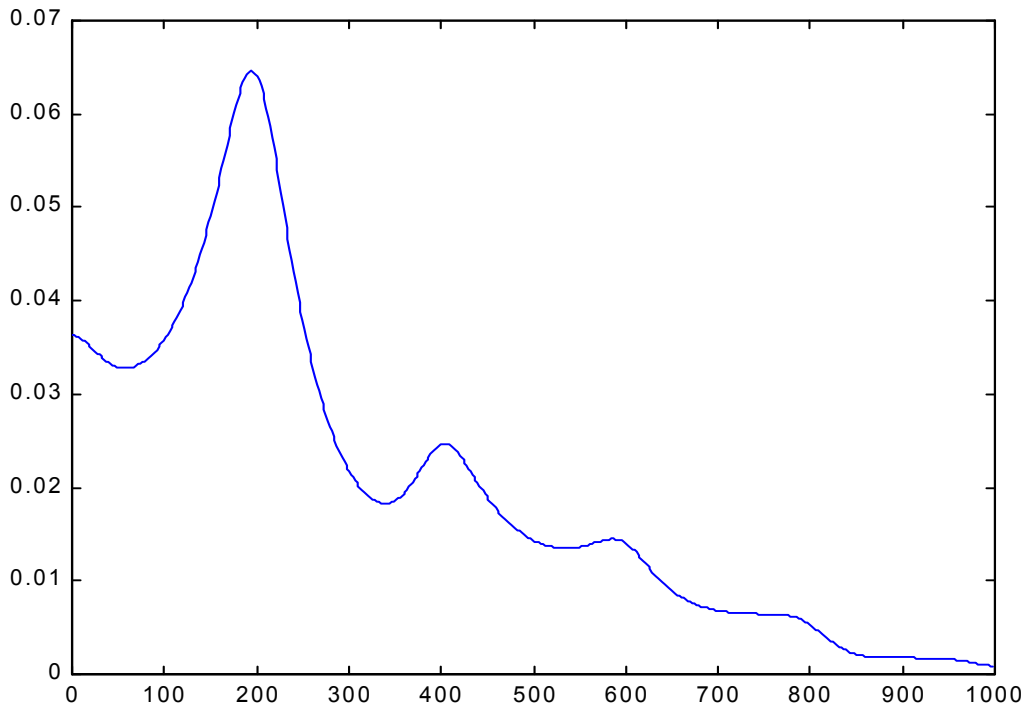
Norint suprojektuoti filtrą būtina ištirti realaus matuojamo signalo spektrą ir nustatyti veiksnis, labiausiai veikiančius įvertinimo rezultatus ir, atsižvelgiant į tai, parinkti geriausią filtrą, panaudojant juostinius, užtvarinius ar kitus filurus bei suskaičiuoti jų parametrus. Taip pat siekiama parinkti SSA priemonę, kuri galėtų būti įjungta po diferencinio stiprintuvo ir efektyviai filtruoti matavimo signalą.

Uždavinių sprendimui naudojamos kompiuterinio modeliavimo priemonės. Signalų spektro analizei, filtrų skaičiavimui ir filtravimo modeliavimui vartojamas MATLAB paketas su atitinkamais priedais (Toolbox). Nustačius filtrų parametrus bei filtravimo principus aprašomi filtro realizavimo būdai SSP procesoriuje.

2.8.2. Filtruojamo signalo ir galimų trukdžių analizė

Filtruojamas signalas, kaip jau buvo aptarta 2.8.1 dalyje, yra sinusinis signalas moduluotas amplitude. Moduliacija signale gaunama dėl paskiltinio balansavimo registro darbo, kurio metu keičiasi tiltelio balansas ir kartu išėjimo signalo amplitudė. Taigi filtravimui reiktų naudoti juostinį filtrą su tam tikra juosta, kuri priklauso nuo tiltelio balansavimo greičio – moduliacijos dažnio. Nustatyti filtro juostą galima modeliuojant signalą Matlab paketu. Modeliuojant priimama, kad filtras negali pradėti veikti iš karto, todėl signalas turi nesikeičiančią (nemoduluotą) dalį ir besikeičiančią dalį, kuria aprašomas tiltelio balansavimas. Signalų modeliavimo programa Matlab paketu pateikta 3-iaame priede.

Ši programa leidžia įvertinti signalo iškreipimus filtruojant įėjimo signalą. Analizuojant signalo spektrą (2.9 pav.), matoma, kad jis gana platus.



2.9 pav. Įėjimo signalo spektras, kai centrinis dažnis 200 Hz

Filtruojant šį signalą siekiama apriboti ir signalo spektrą iš aukštųjų dažnių pusės. Kuo mažiau aukšto dažnio (AD) dedamųjų paliekama, tuo lėčiau nusistovi signalas po eilinės skilties įjungimo, taigi tuo ilgiau tenka laukti, kol bus galima įvertinti tiltelio balansą. Dėl šios priežasties įvertinimo spartą mažėja. Kuo daugiau AD dedamųjų praleidžiama, tuo greičiau nusistovi pereinamieji procesai po skilties prijungimo, tuo greičiau galima vertinti tiltelio balansą ir greičiau atliekamas įvertinimas. Tačiau apriboti signalo spektrą iš aukštų dažnių pusės būtina, norint sumažinti plačiajuosčių triukšmų įtaką įvertinimo rezultatui.

Triukšmai veikiantys sistemą atsiranda įvertinimo mazgo aplinkoje esančiam elektromagnetiniam laukui veikiant jutiklius ir jungimo kabelius. Taip pat triukšmai atsiranda dėl šiluminių triukšmų jutiklių ir kabelių varžose bei maitinimo šaltinio triukšmų. Šiluminiai triukšmai modeliuojami kaip baltas triukšmas, kurio vidutinė įtampa lygi:

$$U_{trvid} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (2.23)$$

čia k – Bolcmano konstanta; T – aplinkos temperatūra; R – varža; Δf – dažnių juosta.

Taigi vidutinė trukdžių įtampa lygi:

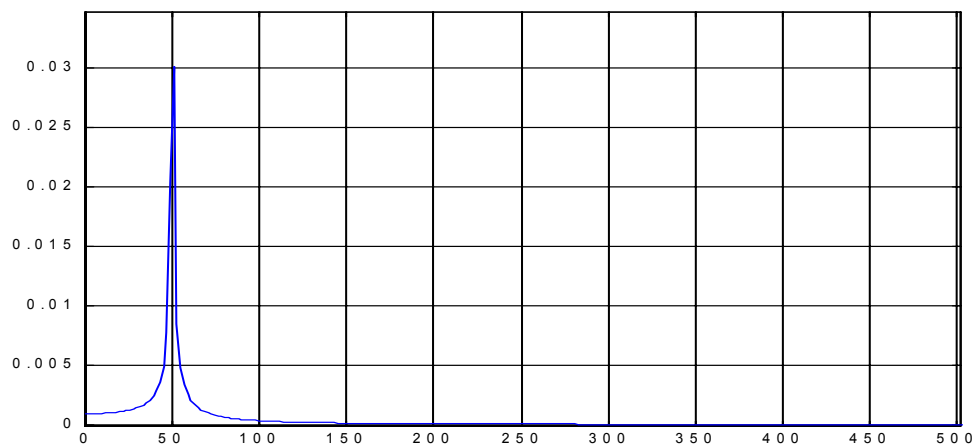
$$U_{trvid} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 70 \cdot 1000} = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ V.}$$

Triukšmai dėl išorinio elektromagnetinio lauko poveikio atsiranda tiek jutikliuose, tiek jungiančiuose kabeliuose. Jie yra sinfaziniai ir efektyviai slopinami diferenciniame stiprintuve.

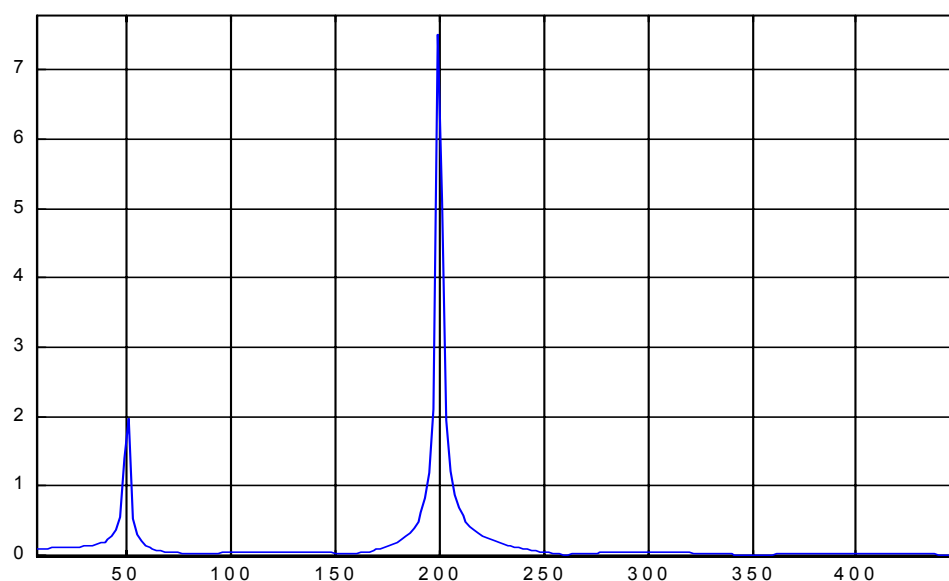
Tačiau išvengti tinklo dažnio triukšmų praktiškai neįmanoma, o jų amplitudę galima įvertinti tik eksperimentiškai, nes ji priklauso nuo konkrečios aplinkos ir joje esančių pramoninio dažnio tinklo infrastruktūros bei galingumo. Norint sukurti universalų prietaisą, siekiama kiek galima labiau nuslopinti tinklo dažnio triukšmus, kurie labai priklauso nuo aplink esančių įrengimų, patalpos elektros instaliacijos ir kitų veiksnių. Be to, tinklo dažnio triukšmai atsiranda dėl stiprintuvo maitinimo įtampos pulsacijų.

Triukšmų signalai sumodeliuoti Matlab paketu. Modeliavimo rezultatai pateikti 3-iame priede.

Gaunamas triukšmų spektro tankis su pikiniu dažniu prie 50 Hz ir mažo lygio plačiajuosčiais triukšmais (2.10 pav.). Nesinfazinių triukšmų signalai stiprintuve stiprinami ir kadangi yra sumuojami su įėjimo signalu, gaunamas 2.11 paveiksle pateiktas įvertinimo signalo spektras.



2.10 pav. Stiprintuvo įėjimo triukšmų spektrinis tankis



2.11 pav. Stiprintuvo išėjimo signalo spektrinis tankis

Dėl gana aukšto tinklo dažnio triukšmų lygio projektuojant filtrą gali tekti naudoti ne tik juostinį filtrą signalui, bet ir užtvarinį filtrą tinklo dažniui.

2.8.3. Mazgo skaičiavimo metodas

Filtravimo mazgas sudaromas iš skaitmeninių filtrų, kurie turi efektyviai nufiltruoti triukšmus ir minimaliai iškraipyti įvertinimo signalą ir ypač jo teigiamos maksimalios vertės amplitudę, nes pagal šią signalo dalį vykdomas matavimas. Realizuojant tokius filtrus ribotos impulsinės reakcijos filtrais (RIR, *angl.* FIR – Finite Impulse Response) gaunamos didelės filtrų eilės. Tai labai sulėtina skaičiavimus. Todėl naudojami neribotos impulsinės reakcijos (NIR, *angl.* IIR – Infinite Impulse Response) filtrai, nes reikia gana siaurų pralaidumo juostų ir stačių šlaitų, norint maksimaliai sumažinti atsitiktinių trukdžių įtampą.

Pirmiausia projektuojamas juostinis filtras, turintis sumažinti plačiajuosčių triukšmų įtaką vertinamam signalui. Šio filtro centrinis dažnis turi būti lygus tiltelio maitinimo dažniui, o juosta tokia, kad minimaliai iškraipytų amplitudę moduliuotą signalą. Reikalavimai perdavimo charakteristikos tolygumams nekeliami, kol jie neviršija 3dB lygio, nes signalas siunčiamas tik į nulio indikatorius. Taigi galima naudoti eliptinį filtrą, nes jo statusas esant mažiausiai eilei yra didžiausias. Analoginis eliptinis ŽD filtras aprašomas:

$$|H_c(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot U_N^2(\Omega)}; \quad (2.24)$$

čia $U_N(x)$ – Jakobiano eliptinė funkcija; Ω – analoginės sistemos dažnis; N – filtro eilė.

Gautas žemų dažnių vienetinis filtras. Tokį filtrą reikia transformuoti į juostinį filtrą:

$$s_j = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s(\omega_2 - \omega_1)}; \quad (2.25)$$

čia: s – vienetinio ŽD filtro spektras; s_j – projektuojamo juostinio filtro spektras; ω_0 – juostinio filtro centrinis dažnis; ω_1 – juostinio filtro pralaidumo juostos pradžios dažnis; ω_2 – juostinio filtro pralaidumo juostos pabaigos dažnis;

Gavus juostinį analoginį filtrą jis transformuojamas į skaitmeninį. Kadangi filtras turi ribotą pralaidumo juostą, transformacijai galima vartoti invariantinės impulsinės charakteristikos metodą, nes tokiu atveju nėra persidengimo klaidų, o skaitmeninio filtro charakteristika bus:

$$H(e^{j\omega}) = H_c\left(j \frac{\omega}{T_d}\right), |\omega| \leq \pi, \quad (2.26)$$

čia: H – skaitmeninio filtro perdavimo charakteristika; H_c – analoginio filtro perdavimo charakteristika; T_d – diskretizavimo periodas.

Gaunamas skaitmeninis filtras, kuris išskiria matavimo signalą iš plačiajuosčių triukšmų ir iš dalies nuslopina tinklo dažnio triukšmus. Geresniam tinklo dažnio triukšmų filtravimui naudojamas užtvarinis filtras tinklo dažniui.

Uztvarinis filtras tinklo dažniui turėtų būti antro tipo Čebyševio filtras, kurio pralaidumo juostos charakteristikoje nėra netolygumų. Antro tipo Čebyševio filtras aprašomas:

$$\left|H(j\Omega)^2\right| = \frac{1}{1 + \left[\varepsilon^2 \cdot V_N^2\left(\frac{\Omega_c}{\Omega}\right)\right]^{-1}}; \quad (2.27)$$

čia $V_N(x)$ – Čebyševio polinomas: $V_N(x) = \cos(N \cos^{-1} x)$; Ω – analoginės sistemos dažnis; Ω_c – analoginės sistemos filtro nukirtimo dažnis; N – filtro eilė.

Šis filtras iš ŽD vienetinio filtro transformuojamas į užtvarinį:

$$s_U = \frac{s(\omega_2 - \omega_1)}{s^2 + \omega_0^2}, \quad (2.28)$$

čia: s – vienetinio ŽD filtro spektras; s_U – projektuojamo užtvarinio filtro spektras; ω_0 – užtvarinio filtro centrinis dažnis; ω_1 – užtvarinio filtro slopinimo juostos pradžios dažnis; ω_2 – užtvarinio filtro slopinimo juostos pabaigos dažnis.

Gautas analoginis filtras transformuojamas į skaitmeninį panaudojant bitiesinę transformaciją, nes filtro pralaidumo juosta nėra baigtinė AD srityje, ir impulsinės invariantinės transformacijos atveju būtų gaunami persidengimo trukdžiai. Bitiesinė transformacija aprašoma:

$$H(z) = H_C \left[\frac{2}{T_d} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \right], \quad (2.29)$$

čia: H – skaitmeninio filtro perdavimo charakteristika; H_C – analoginio filtro perdavimo charakteristika; T_d – diskretizavimo periodas.

Transformuojant analoginį filtrą į skaitmeninį bitiesine transformacija, analoginės sistemos dažnių juosta į skaitmeninės sistemos dažnių juostą atvaizduojama netiesiškai. Dažnių perskaičiavimas atliekamas pagal šią formulę:

$$\omega = 2 \arctan \left(\Omega \frac{T_d}{2} \right), \quad (2.30)$$

čia ω – skaitmeninės sistemos dažnis; Ω – analoginės sistemos dažnis; T_d – diskretizavimo periodas.

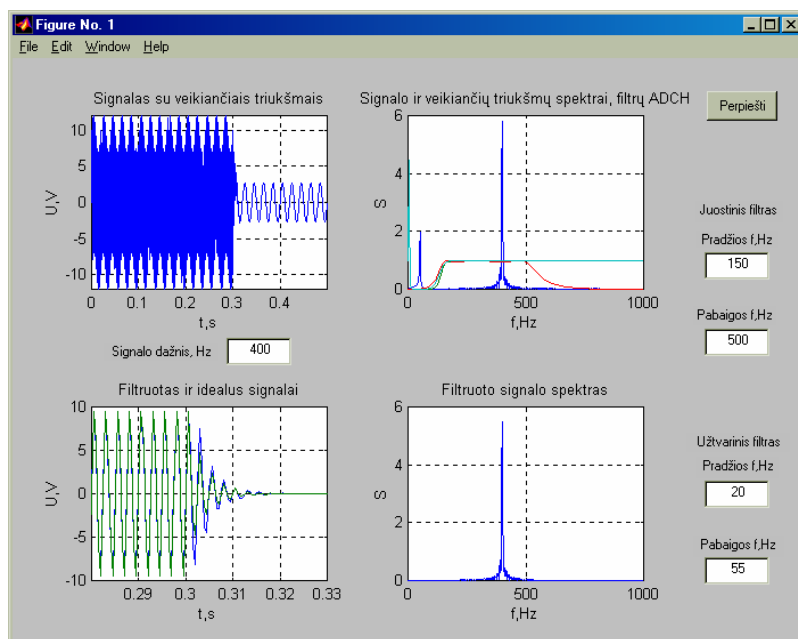
Gautų filtrų perdavimo charakteristikos sudauginamos ir atliekamas filtravimas. Filtravimas gali būti atliktas tiek dažnių, tiek ir laiko srityje. Dažnių srityje pakanka sudauginti signalo spektrinio tankio funkciją su filtrų perdavimo charakteristikomis. Laiko srityje tenka atlikti signalo ir filtrų kompoziciją.

2.8.4 Modeliavimo rezultatai

Sukurta programa atliekamas įvertinimo proceso modeliavimas. Įėjimo signalas su triukšmais patenka į skaitmeninį filtrą, kur filtruojamas. Po filtravimo signalas patenka į filtro išėjimą. Stebint idealų (be triukšmų) signalą ir filtruotą signalą siekiama gauti kuo mažesnius signalo iškraipymus. Modeliuojant priimta, kad tiltelio balansavimas vykdomas su kiekvienu signalo periodu. Modeliavimo rezultatas tinkamas, kai triukšmų fonas įvertinimo mazgo aplinkoje nėra didelis. Jei triukšmų fonas labai didelis, tenka mažinti filtrų pralaidumo juostą ir balansavimą atlikti ne kiekvienu įvertinimo signalo periodu, o leidžiant nusistovėti pereinamiesiems procesams filtre. Kuo siauresnė dažnių juosta, tuo daugiau laiko reikia signalui nusistovėti, tuo daugiau laiko trunka vieno jutiklio įvertinimas. Modeliuojant galima keisti filtrų juostas ir signalo dažnį.

Modeliuojant varžos mažo pokyčio įvertinimo procesą, kai signalo centrinis dažnis 400 Hz gauti šie rezultatai pateikti 2.12 paveiksle. Rezultatai gauti naudojant tokius filtrus: juostinį filtrą su pralaidumo juosta nuo 150 Hz iki 500 Hz ir užtvarinį filtrą su slopinimo juosta nuo 20 Hz iki 55 Hz.

Sumažinus pralaidumo juostą iš AD pusės iki 430 Hz ir padidinus pralaidumo juostos pradžios dažnį iki 300 Hz ir gavus simetrinį centriniam signalo dažniui filtrą gauti rezultatai pateikti 4-tame priede.



2.12 pav. Modeliavimo rezultatai

Modeliavimas parodė, kad suminio (juostinio ir užtvarinio) filtro praleidžiamų dažnių juosta įtakoja išėjimo signalo nusistovėjimo laiką. Siaurinant pralaidumo juostą dažniuose, žemesniuose nei centrinis signalo dažnis, iškraipomi teigiami signalo pusperiodžiai. Siaurinant filtro juostą aukštesniuose nei centrinis dažniuose iškraipymai gaunami neigiamame pusperiodyje. Tačiau pernelyg susiaurinus juostą iš AD pusės iškraipymai atsiranda ir teigiamame pusperiodyje. Tokia priklausomybė paaiškinama amplitudės moduliavimo signalo savybėmis. Teigiamus pusperiodžius šiame signale atitinka ŽD spektro dedamosios, o neigiamus pusperiodžius atitinka AD dedamosios. Taigi norint siaurinti filtro juostą, pagal šiuos dėsningumus reikia nustatyti teigiamo pusperiodžio nusistovėjimo laiką ir tik jam praėjus vertinti skilties pridėjimo rezultatą. Jei tas laikas sumažinamas, gaunami įvertinimo rezultato iškraipymai artėjant prie tiltelio balanso.

Matoma, kad filtro juosta į žemų dažnių pusę turi būti galimai platesnė. Tačiau čia ją apriboja tinklo dažnio spektro dedamosios. Taigi tiltelio maitinimo dažnis turėtų būti galimai didesnis už tinklo dažnį. Signalų dažnio padidėjimas taip pat leidžia greičiau išmatuoti jutiklių varžas ir sutrumpinti sistemos matavimo laiką. Signalų centrinį dažnį – tiltelio maitinimo signalo dažnį – iš AD pusės apriboja diskretizacijos dažnis. Be to, esant nedideliame diskretizacijos dažniui didesnio dažnio virpesių skaičiavimo patikimumas nėra didelis, nes didėjant dažniui mažėja atskaitų į periodą skaičius. Taigi maksimalus tiltelio maitinimo dažnis neturėtų viršyti 400 – 500 Hz esant 2 kHz diskretizacijos dažniui. Kita vertus didinti maitinimo dažnį negalima dėl ypač didėjančios parazitinių parametrų įtakos.

Modeliuoti kai signalo dažnis lygus 50 Hz ir visiškai sutampa su tinklo dažniu šiuo atveju nepavyksta, nes nėra metodų, kaip įvertinti tinklo dažnio triukšmų integravimą per

daugelį matavimų, taip pat nepavyksta įvertinti sinfazinio signalo slopinimo stiprintuve. Šiuo atveju tinklo dažnio spektro dedamosios turėtų būti kur kas mažesnės nei šiame modelyje nustatytos.

Taigi tiltelio maitinimo dažniui esant lygiam 400 Hz, modeliavimo metu nustatyti šie filtrų parametrai:

Juostinis filtras: eliptinis 3-ios eilės, pralaidumo juostos pradžios dažnis 150 Hz, pabaigos dažnis – 500 Hz, netolygumai pralaidumo juostoje 0,5 dB, slopinimas slopinimo juostoje 100 dB.

Užtvarinis filtras: 6-os eilės, antro tipo Čebyševio filtras, slopinimo juostos pradžios dažnis 20 Hz, pabaigos dažnis 55 Hz, slopinimas slopinimo juostoje 100 dB.

Tokių filtrų naudojimas nuslopina 50 Hz dažnio triukšmus ir sumažina plačiajuosčių triukšmų dedamąją įvertinimo signale. Tai leidžia tiksliau nustatyti tiltelio balanso tašką.

Kita vertus, naudojant SSP kaip fazės detektorių galima vykdyti fazės palyginimą kitais metodais, o ne komparatoriaus principu. Tokiu atveju tektų tirti fazinių signalo iškreipimų priklausomybę nuo filtro juostos. Galima numanyti, kad tokiu atveju pavyktų gauti geresnius rezultatus, nes skaitmeninių filtrų įtaka faziniams iškreipymams yra gerokai mažesnė nei amplitudiniams.

2.8.5. Filtrų programavimas

Šiuos filtrus reikia užprogramuoti SSP. Tam galimi keli būdai:

1. Įėjimo signalas filtruojamas atliekant jo ir filtro impulsinės reakcijos sąsuką. Čia iškyla greito sprendimo problema, nes sąsukos algoritmas yra gana sudėtingas ir imlus laikui.

2. Tiek filtro impulsinės reakcijos, tiek ir signalo imtys panaudojant Greitąją Furjė Transformaciją (GFT, *angl.* FFT – Fast Fourier Transformation) transformuojamos atitinkamai į spektrą ir filtro dažnines charakteristikas, ir filtravimas atliekamas dažnių ašyje sudauginant atitinkamo dažnio imtis. Norint gauti rezultatą laiko ašyje jis transformuojamas atvirkštinės greitosios Furjė transformacijos algoritmu. Čia pagrindinis darbo greičio padidėjimas gaunamas dėl labai spartaus ir efektyvaus GFT algoritmo bei to, kad daugumos SSP procesorių matematinio apdorojimo dalis yra paruošta ir optimizuota darbui su GFT (pvz. ADSP 21XX procesorių šeimoje aparatinis daugintuvas – kaupiklis bei dvigubas duomenų adresavimo generatorius optimizuoja procesoriaus darbą atliekant GFT).

3. Panaudoti specialią filtro modelio struktūrą, kurioje naudojantis tik sumavimo, dauginimo ir signalo vėlinimo vienu taktu procedūromis iš įėjimo signalo gaunamas išėjimo signalas.

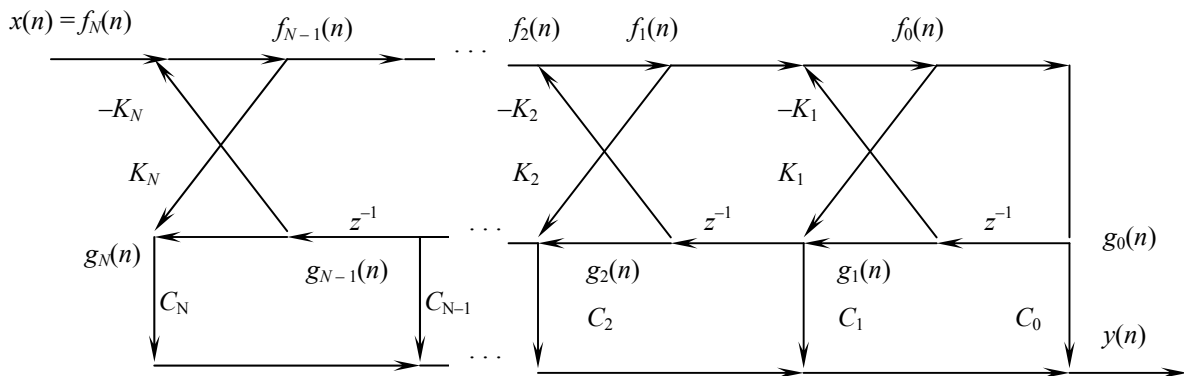
Praktiškai realiuose SSP jei kitiems poreikiams nėra būtinas signalo spektras ar filtro amplitudės dažninė charakteristika, naudojamas trečiasis variantas kaip sparčiausias ir

reikalaujantis mažiausiai procesoriaus resursų. Kaip jau minėta, tam naudojami NIR filtrai. Tokie filtrai impulsinės reakcijos lygtyje turi tiek polius, tiek ir nulių, taigi jie turi neribotą (begalinę) impulsinę reakciją. Tokį filtrą galima įgyvendinti vieninteliu būdu – taikant rekursinį algoritmą. Baigtinės impulsinės reakcijos filtrai realizuojami paprastais algoritmais.

Viena populiariausių struktūrų realizuojant NIR filtrus yra *lattice-ladder* (liet. Lattice – pinučiai, ladder – kopėčios). Bet koks NIR filtras, turintis tiek polius tiek ir nulių gali būti realizuojamas panaudojant visų polių „pakopą“ kaip pagrindinį struktūros elementą. Bendru atveju NIR filtro sistemos funkcija užrašoma:

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_M(k)z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_N(k)z^{-k}} = \frac{B_M(z)}{A_N(z)}; \quad (2.31)$$

čia, neprarandant bendrumo priimama, kad $N \geq M$; b_M – filtro nulių reikšmės z erdvėje; a_N – filtro polių reikšmės. Lattice tipo struktūra gali būti įgyvendinama pirmiausia realizuojant visų polių „pakopą“ – *lattice* su koeficientais K_m , $1 \leq m \leq N$ (2.31) funkcijos vardikliui, ir pridėdant „kopėčių“ – *ladder* dalį ir išėjimą skaičiuojant kaip pasvertą tiesinę $\{g_m(n)\}$ (filtro impulsinės reakcijos) kombinaciją. Variantas kai $M = N$ pateiktas 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Lattice – ladder NIR filtro struktūra

Rezultatas yra polius ir nulių atitinkantis NIR filtras turintis *lattice – ladder* struktūrą. Šio filtro išėjimo signalas gali būti skaičiuojamas:

$$y(n) = \sum_{m=0}^M C_m g_m(n); \quad (2.32)$$

čia $\{C_m\}$ vadinami „pakopos“ – *ladder* koeficientais, kurie nurodo sistemos funkcijos $H(z)$ nulių. Naudojant $A_m(z)$ ir $B_m(z)$ apibrėžtis galima įrodyti, kad C_m išreiškiamas rekursiškai tokia išraiška:

$$C_m = b_m + \sum_{i=m+1}^M C_i \alpha_i(i-m); \quad m = M, M-1, \dots, 0. \quad (2.33)$$

Norint gauti filtro koeficientus pirmiausia skaičiuojami „pakopų“ – *lattice* koeficientai $\{K_m\}$ iš $A_n(z)$ naudojant rekursijos algoritmą:

$$K_0 = b_0,$$

$$K_{M-1} = \alpha_{M-1}(M-1),$$

$$J_m(z) = z^{-m} A_m(z^{-1}), \quad \text{kai } m = M-1, \dots, 1,$$

$$A_{m-1}(z) = \frac{A_m(z) - K_m J_m(z)}{1 - K_m^2}, \quad \text{kai } m = M-1, \dots, 1,$$

$$K_m = \alpha_m(m), \quad \text{kai } m = M-2, \dots, 1.$$

Tuomet jau galima rekursiškai spręsti (2.33) ir gauti *ladder* koeficientus $\{C_m\}$ realizuojančius skaitiklį $B_m(z)$. Šie skaičiavimai atliekami projektuojant filtrą ir gana paprastai realizuojami Matlab funkcijomis. Taigi žinant šiuos koeficientus SSP tenka skaičiuoti išėjimo signalo imtis tik pagal (2.32) ir filtro struktūrą.

Filtrų koeficientų skaičiavimas atliekamas parinkus tiltelio maitinimo dažnį.

Filtruotas matavimo signalas patenka į fazinį detektorių, kur toliau apdorojamas.

2.8.6. Fazinio detektoriaus įgyvendinimas

Filtro išėjime gautas signalas siunčiamas į vieną iš fazinio detektoriaus įėjimų. Realizuojant fazinį detektorių SSP pradžioje atkartojama analoginio detektoriaus struktūra ir veikimo principas, o po to siekiama supaprastinti jo veikimą. Analoginis fazinis detektorius sudarytas iš analoginio komparatoriaus ir IR grandinės.

Realizuojant komparatorių SSP tikrinamos visos diskretinės signalo imtys ir kai tik jos pereina 0 ribą (keičia ženklą) į registrą, kuris sąlyginai gali būti pavadintas „Signalas teigiamas“ įrašomas 1, reiškiantis, kad signalas didesnis už 0. Kai tik signalo imties vertė tampa mažesnė už 0 (vėl keičia ženklą), į registrą įrašomas 0, reiškiantis kad signalo vertė mažesnė už 0.

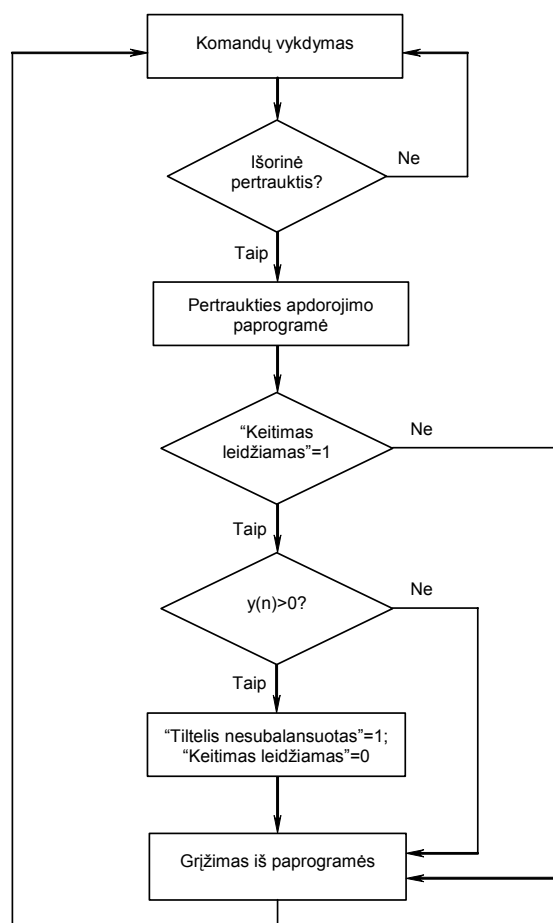
Tiltelio maitinimo generatoriaus generuojamas signalas naudojamas kaip atraminis lyginant signalų fazes. Iš sinusinio tiltelio maitinimo signalo Šmito trigeriu formuojami stačiakampiai impulsai kurie siunčiami į IR grandinę. Į kitą IR grandinės įėjimą siunčiamas komparatoriaus išėjimo signalas. Įgyvendinant SSP galima būtų tiltelio maitinimo signalą siūsti į SSP kaip analoginį. Tačiau tokiu atveju reikalingas atskiras ASK arba dvikanalis ASK kas padidintų SSP kainą, o blogiausiu atveju tektų naudoti išorinį ASK. Be to įvedinėti tiltelio

maitinimo signalą analogine forma nėra prasmės, nes IR grandinė ir analoginiame variante yra skaitmeninė, taigi ir operuojama skaitmeniniais signalais. Analoginių signalų fazių palyginimas jokių kokybinių rodiklių nepagerina, nes sistemos veikimui reikia vienintelio atsakymo – ar fazės yra tame pačiame pusperiodyje, ar ne. Kita vertus, net jei būtų reikalingas tikslus fazių palyginimas, Šmito trigeriu suformuoti impulsai startuoja tuo pačiu laiko momentu kiekviename periode ir galimybė įvertinti fazę išlieka.

Taigi Šmito trigeriu suformuoti impulsai siunčiami į skaitmeninį SSP įėjimą. Toliau atliekama IR operacija. T.y. jei registras „Signalas teigiamas“ lygus 1 ir į įėjimą iš Šmito trigerio tuo pat metu siunčiamas loginio 1 signalas, registras, kuris sąlyginai gali būti pavadintas „Tiltelis nesubalansuotas“ nustatomas į 1. Jei signalas lygus 1 o registras „Signalas teigiamas“ lygus 0, tai registras „Tiltelis nesubalansuotas“ nustatomas į 0. Tačiau registras „Tiltelis nesubalansuotas“ gali būti keičiamas tik vieną kartą po tokio keitimo leidimo. Taigi reikalingas dar vienas registras „Keitimas leidžiamas“. Jei jis lygus 1, tik tuomet tikrinama sąlyga: („Signalas Teigiamas“ = 1) IR (Skaitmeninis įėjimas = 1). Kita vertus reakcija į skaitmeninį įėjimą turi būti labai sparti. Tačiau jei procesorius vykdo komandos ciklus, šio signalo pagavimas gali užtrukti keletą taktų. Tuomet jei procesoriaus taktinis dažnis žemas, atsiranda įvertinimo klaidos. Kad to išvengti ypač naudojant žemesnio taktinio dažnio SSP, reikia šį signalą traktuoti kaip išorinę pertrauktį, t.y. jį suformuoti pagal konkretaus SSP reikalavimus pertraukčių signalams ir siūsti į išorinių pertraukčių įėjimą. Tokiu atveju, jei ateina išorinis skaitmeninis signalas, baigiama vykdyti eilinę komanda, iššaukiama pertraukties apdorojimo procedūra – procesorius adresuoja tą pertrauktį atitinkančią paprogramę, kuri ir tikrina aukščiau minėtas sąlygas: „Keitimas leidžiamas“ = 1, jei taip tai kai „Signalas Teigiamas“ = 1, keičiamas registro „Tiltelis nesubalansuotas“ turinys į 1. Po to registro „Keitimas leidžiamas“ turinys keičiamas į 0 ir grįžtama iš pertraukties apdorojimo procedūros.

Registro „Keitimas leidžiamas“ turinį nustatyti į 1 gali tik Paskiltinio Balansavimo programos dalis, kai po eilinio kodo parinkimo reikia nustatyti ar tiltelis neperbalansuotas.

Visa aptarta procedūra sukurta remiantis analogija su egzistuojančiais paskiltinio balansavimo registras. Tačiau gana nesudėtinga šį procesą supaprastinti. Atėjus pertraukties pareikalavimui ir esant leidimui keisti registro „Tiltelis nesubalansuotas“ turinį reikia tikrinti ne registrą „Signalas teigiamas“ o tuo metu esančią signalo imtį. Taip išvengiama keletų komandų, įrašinėjančių reikšmes į registrą. Taigi apibendrinant galima sudaryti fazinio detektoriaus programavimo SSP algoritmą. Jis pateiktas 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Fazinio detektoriaus veikimo algoritmas

2.8.7. Paskiltinio balansavimo registro įgyvendinimas

Paskiltinio balansavimo registras keičia SAK valdymo kodą, o kartu ir tiltelio balansą. Šis registras parenka tokį kodą, kad tiltelio disbalansas, pabaigus balansavimą, būtų mažiausias. Taigi į jo įėjimą siunčiamas signalas apie tiltelio balansavimo rezultatus, o išėjime gaunamas balansavimo rezultatas ir SAK valdymo kodas. PPR darbas realizuojant jį SSP modeliuojamas kaip atitinkamo skaitmeninio įrenginio darbas.

Realizuojant PPR jo įėjimo signalu yra registras „Tiltelis nesubalansuotas“. PPR darbo algoritmas gali būti užrašomas taip:

1. Nustatomas skilčių skaitiklis $n = 0$.
2. Jei $n > 12$ nukreipiama į 10.
3. Registro „Rezultatas“ ($12 - n$) skiltis nustatoma į 1.
4. Registro „Rezultatas“ turinys išvedamas į išorinį prievadą (keičiamas tiltelio balansas)
5. Laukimo ciklai skirti nusistovėti tiltelio būsenai.
6. Registras „Keitimas leidžiamas“ nustatomas į 1.
7. Laukimo ciklai skirti nustatyti tiltelio būseną.
8. Registras „Keitimas leidžiamas“ nustatomas į 0.

9. Tikrinamas registro „Tiltelis nesubalansuotas“ turinys:

a. Jei „Tiltelis nesubalansuotas“ = 1:

i. $n = n + 1$

ii. grįžtama į 2.

b. Jei „Tiltelis nesubalansuotas“ = 0:

i. Registro „Rezultatas“ ($12 - n$) skiltis nustatoma į 0.

ii. $n = n + 1$;

iii. Grįžtama į 2.

10. Signalas „Rezultatas paruoštas“ generavimas (atitinkamo registro nustatymas)

11. Pabaiga.

Toks PPR darbas visiškai atitinka analogiško skaitmeninio įrenginio darbą. Praktiškai visi paminėtieji registrai, išskyrus registrą „Rezultatas“, gali būti skirtingos vieno realaus registro skiltys.

Rezultatą nuskaito ir kitą matavimą pradėti leidžia valdymo programa. Valdymo programos algoritmai naudojant SSP ir mikrovaldiklį yra identiški ir čia plačiau nenagrinėjami.

Tyrimai ir šio uždavinio sprendimas parodė, kad pavyksta didelę sistemos funkcijų dalį perkelti į SSP atsisakant atskirų funkcinių mazgų. Taip gerokai sumažinami sistemos gabaritai, sumažėja išorinių elementų (IS korpusų ir diskretinių elementų) skaičius, padidėja sistemos patikimumas. Kaip vienas didžiausių privalumų tampa sistemos lankstaus keitimo galimybė keičiant tik SSP programą.

Aptarti principai ir algoritmai nėra galutiniai, nes daugelis sistemų keičiama analogiškai veikiančiais algoritmais. Esant procesoriaus perprogramavimo galimybei jie gali būti pakeisti efektyvesniais, suteikiančiais naujų kokybinių savybių ar spartesniais. Medžiaga šiems pakeitimams turėtų būti tolimesni įvertinimo tiltelio parazitinių parametrų tyrimai. Kita tobulinimo kryptis – fazinis detektorius, nuo kurio tikslumo priklauso įvertinimo rezultatai. Įvertinimo rezultatuose esant didelei neapibrėžčių įtakai į SSP galima įvesti ir statistinį rezultatų apdorojimą.

Taigi apibendrinant galima teigti, kad konstrukcijų deformacijų įvertinimo sistemos įvertinimo mazgo pagrindą, kai naudojama uždara sistema su tiltelio maitinimu kintama įtampa, turėtų sudaryti skaitmeninis signalų procesorius atliekantis didelę dalį visų mazgo operacijų.

Tokiu atveju sistemoje įvertinimo neapibrėžtys gali būti efektyviai eliminuojamos pasiekiant aukštą varžų mažų pokyčių įvertinimo kokybę. Iš esmės įvertinimo rezultato kokybę lemia apdorojimo algoritmų efektyvumas bei tiltelio varžų nekompensuoti

temperatūriniai nestabilumai. Norint jų išvengti tiltelio rezistoriai talpinami į pasyvų termostatą, be to, jų dydžiai, konstrukcija ir serija turi būti galimai panašesni. Tuomet jų temperatūriniai pokyčiai bus artimi ir kompensuojami tiltelio pečiuose. Taigi tokios sistemos privalumai yra šie: didelis patikimumas dėl nedidelio IS korpusų skaičiaus; ypač lanksti sistema, leidžianti naudoti net netiesinius ir reaktyvinius jutiklius. Visas sistemos keitimas apsiriboja SSP programos keitimu; ypač didelis tikslumas dėl optimalaus signalo apdorojimo galimybių; galimybė statistiniais metodais išskirti matavimo signalą triukšmų fone net tuomet, kai signalo amplitudė mažesnė už triukšmų amplitudę.

Tokio įvertinimo būdo trūkumas – kaina, kurią sudaro didelės SSP kainos bei sudėtingų apdorojimo algoritmų bei ilgo ir brangaus pradinio algoritmų derinimo.

Taigi šis būdas užtikrina tiksliausius įmanomus įvertinimo rezultatus, tačiau yra palyginti brangus. Jis labiausiai tinka naudojimui laboratorijos sąlygomis, kur reikalingas ypač didelė rezultatų kokybė.

2.9. Skaitmeninis įvertinimo rezultatų apdorojimas

Pagrindinis skaitmeninio tiltelio signalo apdorojimo trūkumas – jo kaina. Ji yra ypač didelė įvertinant tyrimų ir projektavimo darbų kainą. Taigi siekiama rasti efektyvesnį triukšmų mažinimo metodą, leidžiantį įvertinti varžos mažus pokyčius patikimai, tačiau pigesni ir paprastesni nei naudojant SSP.

Kadangi veikiantys sistemą nesinfaziniai triukšmai iš esmės yra baltojo triukšmo pobūdžio, jei neskaityti tinklo dažnio sukeltų triukšmų, tai jų įtaka įvertinimo rezultatui yra tiek teigiama, tiek ir neigiama (vienu įvertinimu gaunamas rezultatas didesnis nei realus, kitu gali būti mažesnis). Taigi jei imti be galo daug įvertinimo rezultatų ir juos suvidurkinti, gautas rezultatas turi būti labai artimas realiam. Tačiau vidurkinti daug rezultatų nepavyksta, nes toks įvertinimo procesas labai ilgai užtruktų. Be to, per ilgą laiką gali keistis ir jutiklio varža dėl įtempimo (pvz. pasikeitė konstrukcijos apkrova). Tačiau deformacijos procesai dažniausiai nėra spartūs, išskyrus tuos atvejus, kai deformacijos yra arti konstrukcijos lūžimo taško. Taigi norint sumažinti atsitiktines paklaidas, kurias sukelia nesinfaziniai triukšmai įėjime, reikia baigtinį kiekį įvertinimo rezultatų vidurkinti. Vidurkinant signalą N kartų galima gauti [80]

$$M = \sqrt{N} \quad (2.34)$$

kartų mažesnes atsitiktines paklaidas. Taigi vidurkinant 100 įvertinimo rezultatų, atsitiktinių paklaidų dydis sumažėtų 10 kartų. Tačiau vertinanat varžos mažus pokyčius uždaroja sistema, atliekant vidurkinimą ypač pailgėja rezultato įvertinimo laikas, nes reikia atlikti daug įvertinimų, o uždarosios sistemos vienas iš trūkumų – gana lėtas įvertinimo procesas.

Tačiau pats įvertinimo principas leidžia kiek sušvelninti šį trūkumą. Jei paskiltinio balansavimo registras realizuojamas mazgo valdikliu, tai vidurkinimą galima atlikti balansuojant kiekvieną skiltį. Rezultato įvertinimas tuomet būtų vykdomas taip:

1. Prie tiltelio prijungiamas tiriamas jutiklis.
2. Įjungiamo k -oji SAK skiltis ir leidžiama nusistovėti pereinamiesiems procesams tiltelyje.
3. Nuskaitomas komparatoriaus išėjimas ir įsimenama vertė r_i .
4. Laukimo intervalas paskaičiuotas pagal komparatoriaus dinaminio nusistovėjimo laiką. Šis intervalas labai trumpas ir skirtas tik komparatoriaus persijungimui į kitą būseną. Todėl šį laiką riboja tik komparatoriaus sparta.
5. 3 ir 4 punktai kartojami tiek kartų, kiek kartų vidurkinamas įvertinimo rezultatas.
6. r_i vertės suvidurkinamos ir priimamas sprendimas r , ar prijungus šią skiltį tiltelis nesubalansuotas, ar perbalansuotas.
7. Pagal rezultatą r atitinkama SAK skiltis atjungiamo arba paliekama prijungta.
8. Balansuojama $k + 1$ SAK skiltis. 2 – 7 punktai kartojami, kol pasiekama jauniausioji SAK skiltis.
9. Iš visų skilčių balansavimo rezultato gaunamas galutinis rezultatas.

Taigi kaip matoma, įvertinimo sparta šiuo atveju praktiškai nesumažėja, nes vidurkinimo laikas yra labai trumpas ir žymiai trumpesnis už viso įvertinimo proceso laiką. Taigi vidurkinti įvertinimo rezultatą galima beveik nepailginant įvertinimo proceso.

Pagrindiniai šio metodo trūkumai

1. Kiek sudėtingesnis valdiklio darbo algoritmas.
2. Neįmanoma ypač daug padidinti įvertinimo patikimumo dėl ilgėjančio laiko.
3. Ypač ilgas matavimo laikas kai taikomi standartiniai paskiltinio balansavimo registrai.
4. Nemažinamos sisteminės neapibrėžtys. Šių neapibrėžčių šaltiniu gali būti tinklo dažnio trukdžių įtakos rezultatui kitimas. Norint jos išvengti, tinklo dažnio triukšmus reikia filtruoti žemų dažnių filtrais, kai naudojamas nuolatinė įtampa maitinamas tiltelis ir aukštų dažnių filtrais kai tiltelis maitinamas kintamąja įtampa.

Pagrindiniai metodo privalumai:

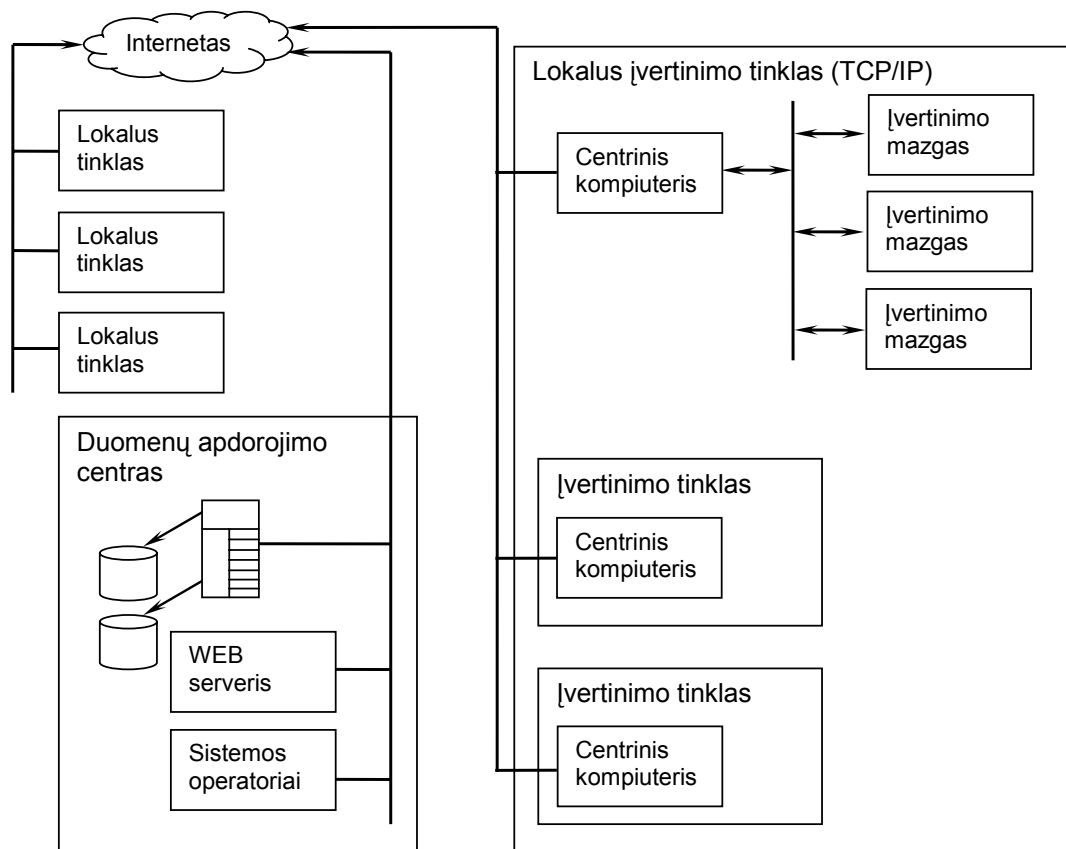
1. Didesnė įvertinimo kokybė dėl sumažėjusio atsitiktinių neapibrėžčių poveikio.
2. Sinfazinių triukšmų įtakos įvertinimo rezultatui sumažėjimas
3. Šis metodas gali būti taikomas su visais anksčiau aptartais metodais.

Taigi apibendrinant visus metodus, matoma, kad norint pasiekti 12 – 14 skilčių įvertinimo skiltiškumą, kas atitiktų (0,024 – 0,006) % varžos įvertinimo neapibrėžtį, galima

naudoti metodus su stiprintuvo nulinio dreifų kompensavimu etalonais arba analogišku stiprintuvu. Norint dar padidinti įvertinimo kokybę galima naudoti SSA priemonės signalų apdorojimui arba signalo vidurkinimą. Be to SSP ir vidurkinimas gali būti naudojamas kartu. Mažesnio tikslumo įvertinimui galima naudoti ir paprasčiausią uždaros sistemos metodą. Tam tikrose ribose šio metodo įvertinimo kokybę galima padidinti naudojant rezultato vidurkinimą.

2.10. Sukurtos tipinės varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemų struktūros

Ankstesniuose autoriaus darbuose [A12] nustatyta apibendrinta siekiama statinių ir konstrukcijų tyrimo sistemos struktūra, pateikta 2.15 paveiksle. Ši struktūra suprojektuota siekiant užtikrinti lankstų ir galimai paprastesnį įvairių statinių ir konstrukcijų būklės tyrimą, atsižvelgiant į galimybę sistemą plėsti, prijungiant naujus tiriamus ar stebimus pastatus ir konstrukcijas.



2. 15 pav. Apibendrinta varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemos struktūra

Sistemos pagrindas – įvertinimo mazgas, gebantis įvertinti ir kaupti iki 32, ne daugiau 10 m nutolusių, aktyviųjų varžinių jutiklių varžos mažus pokyčius. Įvertinimo mazgo išėjimas – skaitmeninis jutiklių varžų mažų pokyčių įvertinimo rezultatų masyvas. Įvertinimo mazgai per skaitmeninį įvertinimo tinklą, kuris gali būti realizuojamas įvairiais vieliniais ir bevieliais

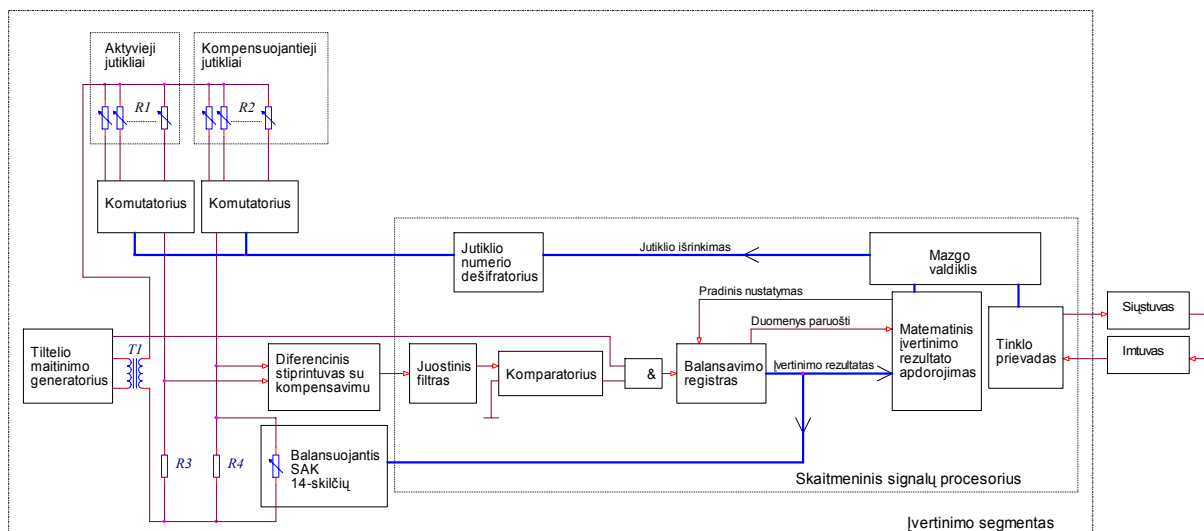
duomenų perdavimo būdais, perduoda rezultatų masyvą į centrinį kompiuterį, kur jie kaupiami ir standartiniais TCP/IP sprendimais (tiek vieliniais, tiek ir bevieliais, priklausomai nuo poreikio) perduodami į duomenų apdorojimo centrą. Čia rezultatai interpretuojami ir saugomi duomenų bazėse tolesnei analizei.

Tokia struktūra garantuoja didžiausią sistemos lankstumą ir leidžia, esant poreikiui, sistemą bet kada išplėsti, prijungiant naujus jutiklius, įvertinimo mazgus ir įvertinimo tinklus.

Pagrindinė tokios sistemos dalis yra įvertinimo mazgas. Analizės rezultatai parodė, kad tiksliausia įvertinimo mazgą įgyvendinti naudojant balansuojamo Wheatstone'o tiltelio metodą. Naudojant šį metodą pavyksta užtikrinti mazgo autonomiškumą, maitinant jį akumuliatorių baterija, prijungti didelį kiekį iki 10 m atstumu nutolusių jutiklių, užtikrinti įvertinimo rezultatų stabilumą esant aplinkos poveikiui.

Taip pat analizės metu nustatyta, kad skirtingiems poreikiams galima naudoti skirtingo sudėtingumo įvertinimo mazgus. Kaip jau minėta, konstrukcijų stebėsenos ir tyrimo sistemų įvertinimo tikslumui keliami skirtingi poreikiai (1.10). Toliau pateikiamos tipinės įvertinimo mazgo struktūros laboratorinių tyrimų poreikiams tenkinti bei stebėsenos uždaviniams spręsti.

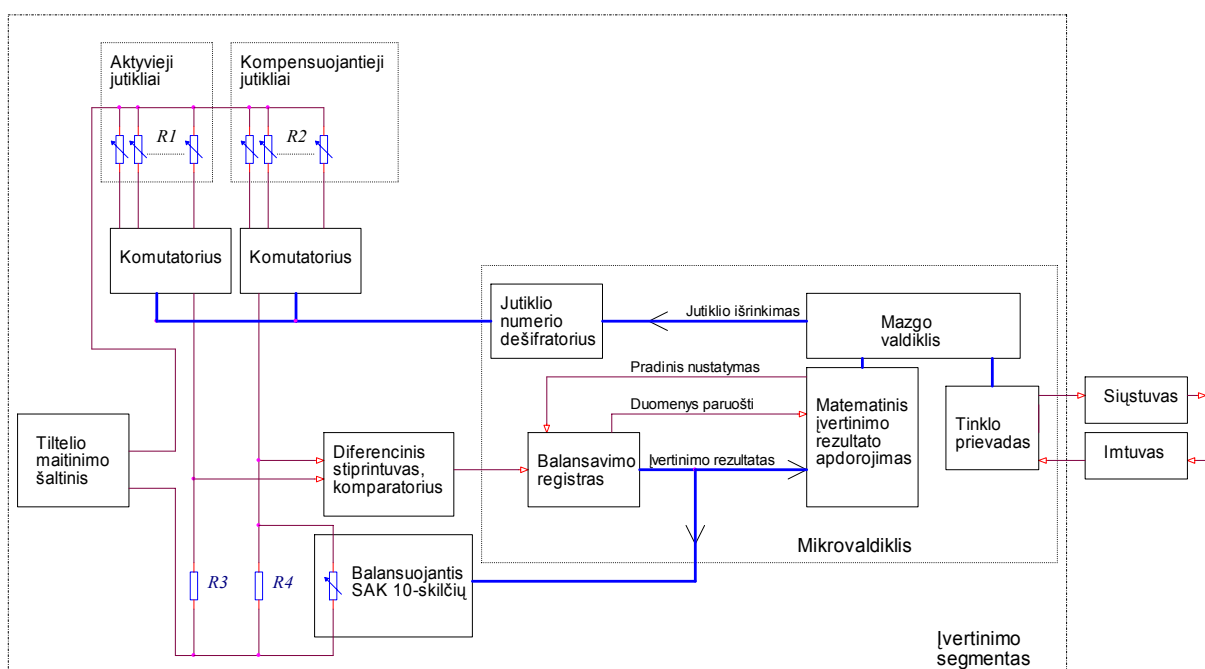
Tipinė įvertinimo mazgo, naudojamo laboratoriniams tyrimams atlikti schema pateikta 2.16 paveiksle.



2. 16 pav. Laboratoriniams tyrimams skirtos 2^{12} skiriamosios gebos įvertinimo mazgo funkcinė schema

Ši grandinė paremta SSP, kuris įgyvendina didelę dalį mazgo funkcijų. Kaip jau minėta, pagal tokią grandinės schemą įgyvendintas įvertinimo mazgas yra pakankamai brangus, dėl palyginti didelės SSP kainos ir didelių mazgo programinės įrangos parengimo kaštų. Įvertinimo mazgas užtikrina iki 2^{12} balansavimo laiptelių skiriamąją gebą, kas tenkina laboratoriniams tyrimams keliamus reikalavimus.

Konstrukcijų stebėsenos uždaviniams spręsti galima naudoti paprastesnę ir atitinkamai pigesnę įvertinimo mazgos struktūrą (2.17 pav.), garantuojančią 2^8 skiriamąją gebą. Šiuo atveju Wheatstone'o tiltelis gali būti maitinamas nuolatine įtampa, nereikalingas skaitmeninis signalo apdorojimas ir atitinkamai vietoje SSP gali būti panaudotas standartinis mikrovaldiklis (pvz. iš Atmel ar Microchip gaminamų mažos kainos mikrovaldiklių serijų). Šiai įvertinimo mazgos grandinei taip pat numatytas matematinis įvertinimo rezultato apdorojimas, kuris atliekamas 2.9 skyriuje aprašytu būdu ir užtikrina didesnę įvertinimo rezultato kokybę.



2. 17 pav. Stebėsenos uždaviniams spręsti skirto įvertinimo mazgos funkcinė schema, garantuojanti 2^8 skiriamąją gebą

2.11. Išvados

1. Sukurtas Wheatstone'o tiltelio automatinis skaitmeninis balansavimo metodas varžų mažų pokyčių įvertinimui, kuriame tiltelio balansavimui panaudotas R–2R tipo SAK. Taikant tiltelyje 12 – 14 skilčių SAK, pakitus valdymo kodui vienu žingsniu, SAK varža pakinta atitinkamai 0,024 – 0,006 %.

2. Pasiūlytas metodas leidžia išvengti daugelio būdingų klasikiniame varžų mažų pokyčių įvertinimo metodui su nebalansuojamu Wheatstone'o tilteliu trūkumų – pasiūlytame varžų mažų pokyčių įvertinimo metode rezultatai nepriklauso nuo tiltelio maitinimo šaltinio įtampos stabilumo ir uždara save reguliuojanti sistema leidžia sumažinti išorinių atsitiktinių poveikių įtaką įvertinimo rezultatui.

3. Sukurta sistema leidžia nesudėtingai, mažais kaštais įgyvendinti daugiakanalę varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemą, nes įvertinimo rezultatai neįtakojami jungiamųjų laidų bei jutiklių komutatorių parazitinių parametrų.

4. Ištirti įvertinimo kokybės padidinimo būdai naudojant klasikinius ir skaitmeninius metodus, taip pat ir panaudojant SSP. Numatytos galimybės supaprastinti įvertinimo mazgo grandinę panaudojant SSP daugeliui šiame mazge atliekamų uždavinių. Nustatyta, kad kombinuojant įvairius rezultatų patikimumo didinimo metodus galima pasiekti reikiamą laboratoriniams tyrimams įvertinimo kokybę. Apibendrinant šiuos metodus, parodoma, kad norint pasiekti 12 – 14 skilčių įvertinimo skiriamąją gebą, kas atitiktų (0,024 – 0,006) % varžos įvertinimo neapibrėžtį, galima naudoti metodus su stiprintuvo nulinio dreifų kompensavimu etalonais arba analogišku stiprintuvu. Norint dar padidinti įvertinimo kokybę reikia naudoti SSA priemones signalų apdorojimui arba signalo vidurkinimą. Be to, SSP ir vidurkinimas gali būti naudojami kartu. Mažesnio tikslumo įvertinimui tinkama ir paprasčiausia uždara sistema.

5. Parodyta, kad, įgyvendinant varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemas mikrovaldiklių pagrindu ir/ar taikant SSP, pavyksta iš esmės supaprastinti sistemą. Be to, minėtomis priemonėmis pavyksta efektyviai sumažinti atsitiktinių išorinių poveikių įtaką įvertinimo rezultatui.

6. Pasiūlytos dvi naujos varžų mažų pokyčių įvertinimo mazgo struktūrinės schemos. Viena turi 2^{12} skiriamąją gebą ir skirta laboratoriniams tyrimams. Kitos skiriamoji geba 2^8 ir ji skirta stebėsenos uždaviniams spręsti.

3. GRANDYNŲ DINAMINIŲ PARAMETRŲ MAŽŲ POKYČIŲ ĮVERTINTINIMO METODAI

Šiandieniniai spartieji grandynai, – loginių elementai, trigeriai, skaitikliai, registrai ir jų rinkiniai, bei skaitmeniniai-analoginiai keitikliai turi 100 ir daugiau informacijos įėjimų ir išėjimų. IG gamybos procese ir priėmimo kokybės kontrolės metu tarp įvairių jų įėjimų ir išėjimų yra kontroliuojami dinaminiai parametrai: signalų vėlinimo trukmės, išėjimo impulsų frontų trukmės įjungiant ir išjungiant grandynus, išėjimo įtampų nusistovėjimo trukmės įjungiant ir išjungiant SAK ir pan. Šiame skyriuje sprendžiami dinaminių parametrų – trumpų laiko intervalų, įvertinimo uždaviniai. Aptariami ir tiriama sukurti daugiakanaliai stroboskopiniai keitikliai, jų kompiuteriniai modeliai ir analizuojami rezultatai. Tyrimų išdavoje sudaroma nauja sparčiųjų skaitmeninių IG signalų vėlinimo įvertinimo įrenginio struktūrinė schema. Sprendžiami SAK nusistovėjimo trukmių įvertinimo uždaviniai, aptariama sudaryto SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo įrenginio struktūra bei skaitmeninio signalų apdorojimo priemonės, būtinos reikiamai įvertinimo kokybei garantuoti. Tyrimų rezultatai paskelbti darbuose [A1, A3, A6, A8].

3.1. Daugiakanalių stroboskopinių keitiklių sudarymas ir tyrimas

Stroboskopiniuose įtaisuose šiuo metu plačiai naudojami universalūs stroboskopiniai keitikliai, turintys 2 – 4 informacijos įėjimo kanalus. Tam, kad būtų galima įvertinti didelį kiekį IG dinaminių parametrų, tarp IG informacijos išėjimų ir SK įėjimų paprastai montuojami aukštadažniai signalų komutatoriai. Komutatoriai paprastai įgyvendinami naudojant aukštadažnes herkonines arba gyvsidabrinės relės ir bendraašius signalų perdavimo kabelius. Du vertinamus IG išėjimus komutatoriai sujungia su SK įėjimais. Nors naudojamos relės yra suderintos su bendraašių kabelių bangine varža, tačiau dėl kanalo netolygumų atsiranda tiriamųjų signalų atspindžiai ir kanale susikuria tiriamojo signalo trukdžiai. Dinaminių parametrų įvertinimo metu būtina galimai tiksliau nustatyti tiriamojo signalo vertes. Dėl susidarančių atspindžių nustatyti tikrąją signalo vertę yra sudėtinga. Atspindžių sukelti trukdžiai gali sukelti dideles amplitudės, o kartu ir dinaminių parametrų įvertinimo neapibrėžtis. Komutatoriuose naudojamos kokybiškos su bendraašiu kanalu suderintos relės, kokybiški bendraašiai kabeliai. Dėl to sistemos kaina didėja. Relės naudoja palyginti didelę maitinimo šaltinio galią. Apskritai daugiakanaliai parametrų įvertinimo įrenginiai yra didelių matmenų, vartojantys daug elektros energijos ir reikalauja didelių pradinių investicijų, didelių aptarnavimo, priežiūros ir eksploatacijos kaštų.

Taigi daugiakanalių sparčiųjų integrinių grandynų ir SAK dinaminių parametų įvertinimo įtaisams būtina sukurti stroboskopinius keitiklius padidinčius dinaminių parametų įvertinimo kokybę, supaprastinančius įrenginius, sumažinančius jų kainą bei matmenis. Paminėti uždaviniai analogiškai uždaviniams sprendžiami daugiakanalėje varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemoje. Įgyvendinti daugiakanalę varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemą pavyko sukūrus iš principo kitokį metodą, kuriame kanalų komutatoriai ir ilgi jutiklių jungimo kabeliai neįtakoja įvertinimo rezultato. Be to, įrenginio įgyvendinimas nesudėtingas ir palyginti nebrangus. Kuriant stroboskopinius keitiklius daugiakanaliams įtaisams pasinaudota tokia pačia strategija. Naujuose įrenginiuose siekiama panaudoti ne geresnės kokybės bendraašius kabelius bei rėles, o iš principo keisti daugiakanalio dinaminių parametų įvertinimo įrenginio struktūrą taip, kad komutavimo įranga – kabeliai ir relės, neiškraipytų tiriamojo signalo ir neįtakotų dinaminių parametų įvertinimo rezultatų.

3.1.1. Daugiakanalių stroboskopinių keitiklių sudarymas

Atsisakyti tiriamojo signalo perdavimo ilgais bendraašiais kabeliais bei aukštadažnių komutavimo grandinių, sukuriančių signalo atspindžius ir didinančių įrenginio kainą galima panaudojus daugiakanalius SK. Jeigu daugiakanalio SK kanalų skaičius yra toks pat, kaip ir vertinamos IG informacijos išvadų (įėjimų ir išėjimų, tarp kurių turi būti įvertinami IG dinaminiai parametrai), belieka komutuoti sąlyginai žemo dažnio – pakeisto laiko mastelio, tiriamuosius signalus. Juos galima komutuoti mažų matmenų integriniais raktais, garantuojant nedidelius energijos poreikius, išvengiant aukštadažnio tiriamojo signalo atspindžių ir jų sukeltų amplitudės įvertinimo neapibrėžčių. Panaudotas daugiakanalis SK turi būti galimai mažesnių matmenų. Tada jo įėjimus galima prijungti kuo arčiau prie tiriamo IG išvadų. Įtaisuose su daugiakanaliais SK tiriamojo signalo atspindžiai gali atsirasti tik perdavimo linijose esančiose tarp IG kontaktoriaus ir atitinkamo SK įėjimo. Todėl reikalavimai SK matmenims, ypač tiriant šiuolaikinius SOIC, μ SOIC tipo IG mažuose korpusuose, yra labai griežti, nes tai garantuoja labai trumpas signalo perdavimo linijas nuo kontaktoriaus iki SK įėjimo. Kartu pavyksta labai sumažinti įrenginio gabaritų, masę, kainą ir, kas svarbiausia, garantuojamas didesnis įvertinimo rezultato patikimumas.

Kaip konstatuota pirmoje dalyje, daugiakanaliams labai mažų matmenų keitikliams geriausiai tinka pikinio detektavimo SK. Jie ne tik paprasti, nesudėtingai įgyvendinami, mažų matmenų, bet ir turi palyginti didelį signalo perdavimo koeficientą ir mažą savųjų triukšmų lygį. Todėl, didėjant tokių SK kanalų skaičiui, įrenginio grandinė lieka pakankamai paprasta, o viso daugiakanalio SK matmenys bei kaina nedideli.

Remiantis tokiomis nuostatomis buvo sukurtas daugiakanalis SK su komutatoriumi išėjime (3.1 pav.). SK turi tiek informacijos įėjimų (kanalų), kiek yra informacijos išvadų tiri-

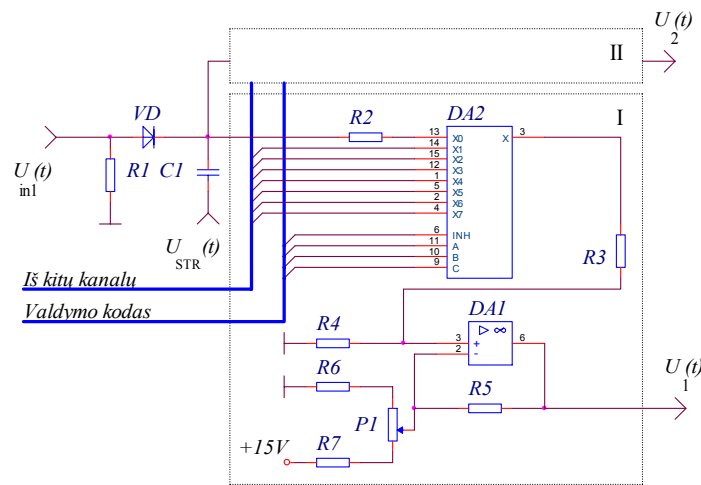
The diagram shows a 3-bit DAC circuit. It consists of three operational amplifiers (DA1, DA2, DA3) and a summing junction. The input signal $U(t)_{in1}$ is connected to a network of resistors ($R1, R3, R4, R5, R6, R7$), a diode (VD), and capacitors ($C1, C2$). The output of the circuit is $U(t)_1$. The circuit is labeled "Iš kitų kanalų" and "Valdymo kodas".

Pasiūlytas metodas turi trūkumų. Įrenginio SK kanaluose, nepriklausomai ar jie naudojami konkrečiam dinaminiam parametrai įvertinti, ar ne, keičiamas visų įėjimų signalų laiko mastelis. Todėl darbo metu visi kanalai naudoja stroboskopinio impulso energiją. Dėl šios priežasties stroboskopinio impulso amplitudė didėjant prijungtų kanalų skaičiui mažėja, ir, kai kanalų skaičius $n \geq 10$, tampa nebepakankama normaliam keitiklių darbui.

Kitas metodo trūkumas – kiekvienas SK kanalas turi po nuosavą integrinį stiprintuvą DA1 ir dėl to mažame tūryje šalia tiriamojo IG kontaktoriaus gana sudėtinga patalpinti daugiakanalio keitiklio elementus. Tai riboja maksimalų SK kanalų skaičių.

Įvertinus minėtus trūkumus nustatyta, kad tokį daugiakanalį SK tikslingiausia naudoti, kol kanalų skaičius $n < 10$.

Siekiant išvengti daugiakanalio SK su komutatoriumi išėjime trūkumų, sukurtas daugiakanalis SK su komutatoriumi įėjime (3.2 pav.). Čia panaudotas pikinio detektavimo SK [70] turi palyginti didelį perdavimo koeficientą. Todėl jo atmintinės talpoje C_1 esančio pakeisto laiko mastelio tiriamojo signalo amplitudė yra gana didelė. Tai leidžia šį signalą komutuoti nesustiprintą. Taigi integrinį komutatorių galima įjungti tarp atmintinės talpos C_1 ir pakeisto laiko mastelio signalų stiprintuvų. Toks sprendimas supaprastina daugiakanalio SK grandinę. Dabar daugiakanalis SK turi tik du tiriamojo signalo stiprintuvus, o keitiklis, turintis mažiau elementų, lengviau telpa ribotoje erdvėje šalia tiriamosios IG.



3.2 pav. Daugiakanalio stroboskopinio keitiklio su komutatoriais įėjime schema

Taip sudarant stroboskopinį keitiklį pavyksta išvengti dar jų vieno trūkumo. SK kanalų, kurių elektroninio komutatoriaus raktai išjungti, – išjungtos varžos R_3 ir R_4 , atmintinės talpų C_1 išsikrovimo varža lygi

$$R_{i\bar{s}} = \frac{R_{ad} \cdot R_{nk}}{R_{ad} + R_{nk}}; \quad (3.1)$$

čia R_{ad} ir R_{nk} – uždarytų diodo VD ir elektroninio komutatoriaus kanalo nuotėkių varžos.

Keitiklių su išjungtu raktu $R_{i\bar{s}} > 100 \text{ M}\Omega$, laiko pastovioji $\tau = C_1 R_{i\bar{s}} \geq 1 \text{ ms}$ ir yra daug didesnė už stroboskopinių impulsų pasikartojimo periodą, kuris yra $\leq 1 \text{ }\mu\text{s}$. Todėl kanaluose su išjungtais elektroniniais raktais maišikliai dirba idealaus pikinio detektavimo režimu ir jų išėjimo talpose C_1 įtampa pasiekia tiriamųjų signalų U^1 vertes. Diodai VD visiškai užsidaro ir šie kanalai praktiškai nenaudoja stroboskopinio impulso energijos. Tik dviejuose kanaluose, kuriuose komutatoriaus raktai yra įjungti, $R_{i\bar{s}} = (100 \dots 300) \text{ k}\Omega$, keičiamas signalo laiko mastelis ir SK išėjimuose gaunami du sustiprinti pakeisto laiko mastelio tiriamieji signalai $u_1(t)$, $u_2(t)$. Dinaminių parametrų įvertinimo metu tik du įprastu laiko mastelio keitimo režimu vei-

kiantys keitiklio maišikliai stroboskopinių impulsų generatorius neperkrauna. Generatorius gali būti mažesnės galios, išsklaidantis mažiau šilumos ir atitinkamai mažesnių matmenų.

Išnagrinėjame daugiakanaliuose SK įjungtų komutatorių įtaką dinaminių parametru įvertinimui. Nustatykime ar daugiakanalis SK su komutatoriais įėjime ar išėjime neiškraipo pakeisto laiko mastelio tiriamojo signalo ir kokia jo įtaka dinaminių parametru įvertinimui.

SK išėjimo signalus iškraipo dėl keitiklių pereinamosios charakteristikos fronto baigtinės trukmės. Jo išėjimo signalus keičia keitiklio netiesiškumas, savieji triukšmai, dreifai ir laiko mastelio keitimo netolygumas. Sukurtuose dinaminių parametru įvertinimo įtaisuose [72, 73] eliminuojama iš įvertinimo rezultato neapibrėžtis atsiradusi dėl SK savųjų dreifų. Juose panaudotas strobavimo žingsnio formavimo dvejais kvarciniais generatoriais būdas panaikina laiko mastelio keitimo netolygumą ir jo sukeltas neapibrėžtis [70]. Taigi į įvertinimo rezultatą įtakoja tik keitiklio pereinamosios charakteristikos fronto trukmė, keitiklio elementų savieji triukšmai ir jų netiesiškumas. Paminėti parametrai priklauso ir nuo daugiakanaliame SK panaudotų elektroninių raktų. Taigi būtina ištirti šių raktų poveikį tiriamojo signalo amplitudės bei laiko parametru mažų pokyčių įvertinimui.

Daugiakanaliuose SK su komutatoriumi išėjime naudojamų integrinių žemadažnių elektroninių raktų pereinamųjų charakteristikų frontų trukmės yra visa eile ar dar daugiau mažesnės už pakeisto laiko mastelio tiriamojo signalo frontų trukmes. Todėl raktai pastebimai nepakeičia keitiklio pereinamosios charakteristikos fronto trukmės ir nedidina dinaminių parametru įvertinimo neapibrėžties.

Daugiakanalio SK su komutatoriumi įėjime elektroninio rakto trukdžiai, triukšmai, dreifai ir netiesiškumas SK stiprintuve sustiprinami K_S kartų ir todėl jie turi daug didesnę įtaką įvertinimo rezultatui, negu daugiakanaliuose SK su komutatoriumi išėjime. Turint omenyje, kad stiprinimo koeficientas parenkamas $K_S = (4...20)$, tai elektroninio rakto trukdžių, triukšmų, dreifų ir netiesiškumo įtaka SK su komutatoriumi įėjime bus atitinkamai didesnė.

Daugiakanalis SK su komutatoriumi įėjime yra pakankamai tiesiškas. Tiriamojo signalo amplitudė SK su komutatoriumi įėjime yra ≤ 1 V. Daugumos integrinių komutatorių darbo įtampų diapazonas siekia ± 15 V, todėl jo netiesiškumas ± 1 V įtampų ribose yra labai nedidelis ir jo įtaka dinaminių parametru nustatymui nereikšminga.

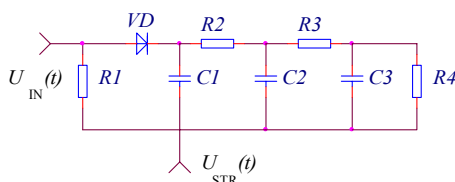
Taigi įvertinimo rezultato neapibrėžtis daugiakanalyje SK su komutatoriumi įėjime priklauso nuo elektroninio komutatoriaus raktų savųjų triukšmų ir dreifų.

Daugiakanaliuose SK su komutatoriumi įėjime elektroninio komutatoriaus raktas jungiamas į SK maišiklio grandinę ir jo parametrai gali pakeisti SK maišiklio darbo režimą. Elektroninio rakto atstojamosios grandinės elementai gali iškreipti maišiklyje vykstančius procesus.

3.1.2. Daugiakanalių stroboskopinių keitiklių su komutatoriumi įėjimo modelis ir jo tyrimas

Analyziškai aprašyti keitiklyje vykstančius procesus ir juos analizuoti yra sudėtinga. Todėl keitiklio grandinės modelis buvo sukurtas elektroninių grandinių modeliavimo paketo „Electronic Workbench“ terpėje. Modelis leido įvertinti maišiklio elementų įtaką keičiamojo signalo frontų trukmei SK išėjime.

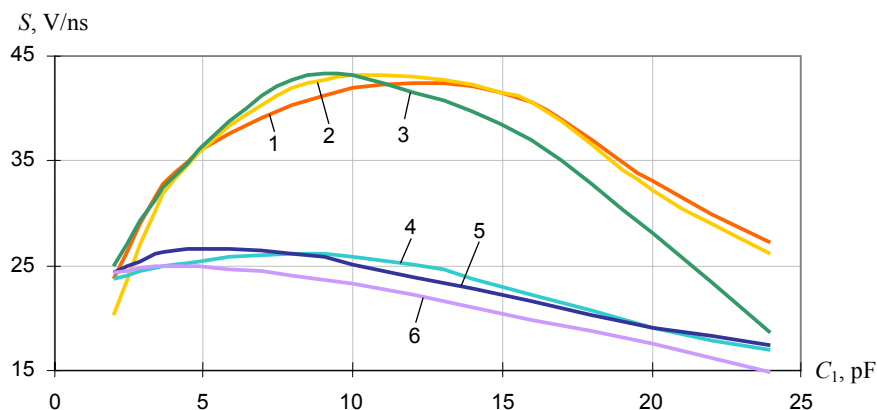
Maišiklio su komutatoriumi įėjime atstojamosios grandinės schema pateikta 3.3 paveiksle. Šioje grandinėje elektroninis raktas yra pakeistas atstojamąja R_2C_2 grandinėle. Modelyje pikinio detektavimo SK atmintinės talpa C_1 parinkta (4...20) pF intervale, jos išsikrovimo varža R_3 – (100...300) kΩ. Pasirėmus [72] darbe atlikta analize, varža R_1 parinkta – (1...10) kΩ ribose. Operacinių stiprintuvų įėjimo talpa primta $C_3 < 10$ pF. Atviro integrinio komutatoriaus varža R_2 visuomet buvo apie 100 Ω.



3.3 pav. Daugiakanalio SK su komutatoriumi įėjime maišiklio atstojamosios grandinės schema

Nuo keitiklio atmintinės kondensatoriaus C_1 talpos priklauso jo išėjimo impulso kylančiojo fronto trukmė. Keitiklio išėjimo impulso krintančiojo fronto trukmė priklauso nuo C_1 ir R_4 . Daugiakanaliame keitiklyje šis parametras taip pat priklauso nuo C_2 , C_3 , R_2 , R_3 . Modelyje keičiant keitiklio elementų parametrus, buvo ištirta jų įtaka keitiklio išėjimo impulsų kilimo ir kritimo frontų trukmėms. Taip pat tyrimo metu buvo parinkti SK elementų nominalai, garantuojantys didžiausią frontų statumą.

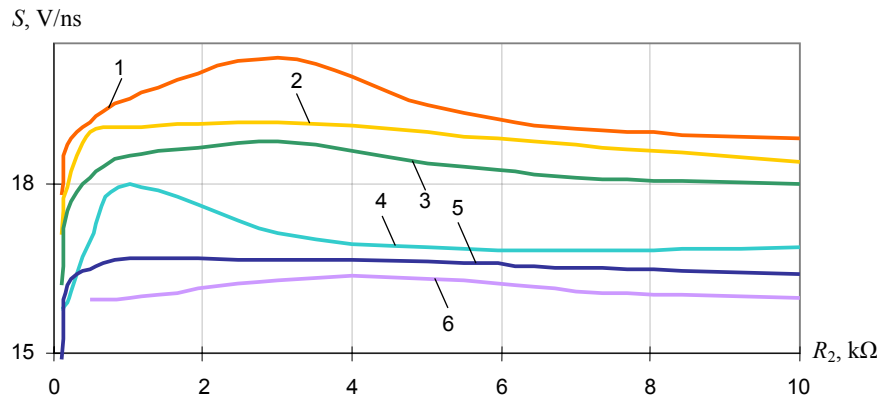
Keitiklio impulso kylančiojo ir krintančiojo frontų statumo priklausomybės nuo talpos C_1 dydžio pateiktos 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Daugiakanalio keitiklio išėjimo impulso kylančiojo (1 – 3) ir krintančiojo (4 – 6) frontų statumų priklausomybė nuo talpos C_1 o, kai $R_3 = 3$ kΩ, $C_2 = C_3 = 5$ pF ir esant įvairioms varžos R_2 vertėms: 1, 4 – $R_2 = 7$ kΩ; 2, 5 – $R_2 = 3$ kΩ; 3 – $R_2 = 500$ Ω; 6 – $R_2 = 100$ Ω

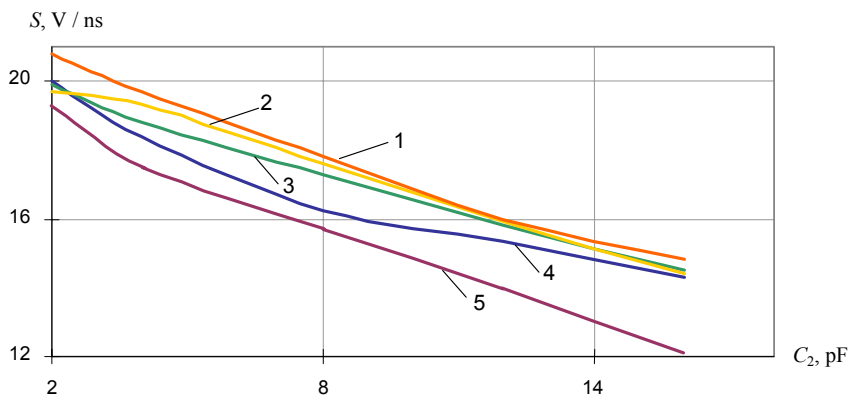
Iš grafikų matyti, kad keitiklis turi optimalią C_1 talpos vertę, kuri garantuoja didžiausią impulso kylančiojo fronto statumą. Priklausomai nuo varžos R_2 dydžio ši vertė yra tarp 7 ir 15 pF. Parinkti labai mažas C_1 vertes nerekomenduojama, nes eksperimentais įrodyta, kad tuomet pradeda didėti keitiklio savųjų triukšmų lygis. Esant varžos R_2 vertėms tarp 100 Ω ir 7 k Ω , keitiklio išėjimo impulsų frontų statumai kinta nedaug. Impulso krintančiojo fronto didžiausias statumas taip pat priklauso nuo R_2 ir C_1 verčių. Optimalios C_1 vertės yra tarp 4 ir 12 pF, o R_2 vertės – tarp 100 Ω ir 3 k Ω .

Daugiakanalio keitiklio išėjimo impulsų krintančiojo fronto statumo priklausomybės nuo varžos R_2 dydžio pateiktos 3.5 paveiksle. Šie grafikai rodo, kad optimali R_2 vertė priklauso nuo talpos C_2 vertės. Didėjant C_2 , ji mažėja. Esant $C_2 = 5$ pF, optimali R_2 vertė yra 3 k Ω , o esant $C_2 = 9$ pF – optimali $R_2 = 1$ k Ω .



3.5 pav. Daugiakanalio keitiklio išėjimo impulso krintančiojo fronto statumo priklausomybė nuo varžos R_2 , kai $C_1 = 17$ pF, $C_3 = 10$ pF, esant tokioms C_2 ir R_2 vertėms: 1 – $C_2 = 4$ pF, $R_2 = 500$ Ω ; 2 – $C_2 = 4$ pF, $R_2 = 3$ k Ω ; 3 – $C_2 = 4$ pF, $R_2 = 7$ k Ω ; 4 – $C_2 = 9$ pF, $R_2 = 500$ Ω ; 5 – $C_2 = 9$ pF, $R_2 = 3$ k Ω ; 6 – $C_2 = 9$ pF, $R_2 = 7$ k Ω

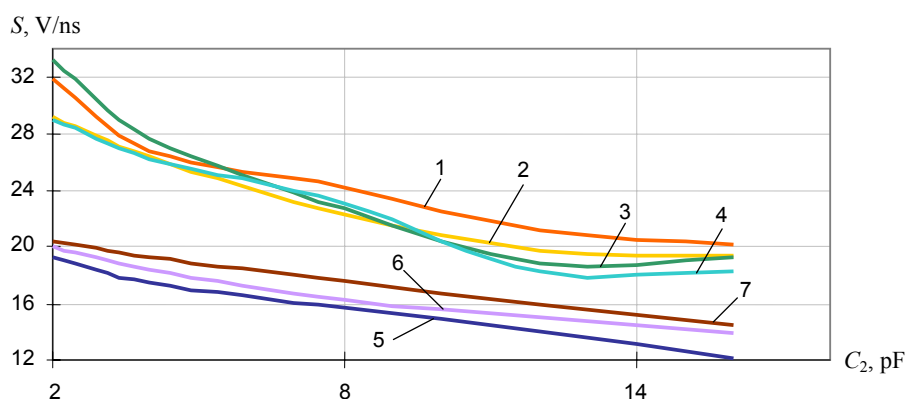
Daugiakanalio keitiklio išėjimo impulsų krintančiojo fronto statumo priklausomybės nuo rakinio talpos C_2 dydžio pateiktos 3.6 ir 3.7 paveiksluose.



3.6 pav. Daugiakanalio keitiklio išėjimo impulso krintančiojo fronto statumo priklausomybės nuo rakinio talpos C_2 dydžio, esant $C_1 = 17$ pF, $C_3 = 10$ pF ir tokioms R_3 vertėms: 1 – $R_3 = 3$ k Ω ; 2 – $R_3 = 500$ Ω ; 3 – $R_3 = 7$ k Ω ; 4 – $R_3 = 3$ k Ω ; 5 – $R_3 = 100$ Ω

Iš šių grafikų galima parinkti analoginį raktą, turintį mažiausią savąją talpą. Kiti rakto parametrai praktiškai nekeičia SK charakteristikų. Didžiausias išėjimo impulso krintančiojo fronto statumas gaunamas esant minimaliai C_2 vertei. Taip pat matome, kad didžiausias išėjimo impulso krintančiojo fronto statumas gaunamas ir kai C_1 talpa yra minimali (2...4) pF. Varžos R_3 optimali vertė yra apie 3 k Ω .

Iš pateiktų priklausomybių išplaukia išvada, kad esti optimalios keitiklio elementų parametrų vertės, leidžiančios gauti didžiausią keitiklio išėjimo įtampų kitimo spartą ir pagaminti keitiklius, turinčius plačiausią praleidžiamųjų dažnių juostą. Analoginiam raktui, kurio talpa $C_2 = 5$ pF, optimalios maišiklio elementų parametrų vertės yra $C_1 = 10$ pF, $R_2 = R_3 = 3$ k Ω , $C_3 = 5$ pF.



3.7 pav. Daugiakanalio keitiklio išėjimo impulso krintančiojo fronto statumo priklausomybė nuo rakto talpos C_2 , kai $R_3 = 3$ k Ω , $C_3 = 5$ pF, esant tokioms C_1 ir R_2 vertėms: 1 – $C_1 = 5$ pF, $R_2 = 3$ k Ω ; 2 – $C_1 = 5$ pF, $R_2 = 7$ k Ω ; 3 – $C_1 = 5$ pF, $R_2 = 500$ Ω ; 4 – $C_1 = 10$ pF, $R_2 = 7$ k Ω ; 5 – $C_1 = 17$ pF, $R_2 = 500$ Ω ; 6 – $C_1 = 17$ pF, $R_2 = 3$ k Ω ; 7 – $C_1 = 17$ pF, $R_2 = 100$ Ω

Tyrimo metu taip pat nustatyta, kad stroboskopiniuose pikinio detektavimo keitikliuose, mažesnę išėjimo įtampos kitimo spartą (statumą) turi krintantysis impulso frontas. Impulso kylančiojo fronto statumas gali viršyti 40 V/ns, o impulso krintančiojo fronto – visuomet mažesnė už 32 V/ns. Todėl komutatoriai ir stiprintuvai parenkami su galimai mažesne įėjimo talpa. Tai leidžia sumažinti keitiklių įnešamą trumpų laiko intervalų nustatymo neapibrėžtį.

Daugiakanalio keitiklio įgyvendinimui buvo parinktas K590KN5 serijos elektroninis komutatorius, kurio atstojamieji parametrai yra $R_2 = 100$ Ω ir $C_2 = 4$ pF. Kaip parodė analizė, įjungus tokį komutatorių išėjimo impulsų fronto trukmė pailgėja < 30 ps. Esant atstojamajai talpai $C_2 = 10$ pF, fronto trukmė pailgėja daugiau ~ 100 ps.

Kaip matoma 3.5 – 3.7 paveiksluose, geriausia R_2 vertė gali būti didesnė už atviro komutatoriaus ~ 100 Ω varžą. Todėl siūloma naudoti 3.8 paveiksle pateiktą daugiakanalį SK. Joje papildoma varža R_2 įjungta prieš komutatorių ir atskiria atmintinės talpą nuo rakto bei

stiprintuvo talpų ir sumažina jų įtaką keitiklio išėjimo impulso krintančiojo fronto trukmei. Šiuo atveju kiekvienas SK kanalas turi savo papildomą varžą R_2 .

Buvo pagaminti ir ištirti daugiakanalių keitiklių su komutatoriais įėjime ir išėjime maketai. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad daugiakanalių keitiklių su komutatoriumi išėjime kanalų skaičiui pasiekus 6...12 kanalų (priklausomai nuo naudojamo stroboskopinių impulsų generatoriaus galios), stroboskopinių impulsų amplitudė tampa nepakankama normaliam keitiklio darbui. Kaip ir tikėtasi, didinant kanalų skaičių stroboskopinių keitiklių dinaminiai parametrai nesikeitė.

Buvo ištirtas daugiakanalio SK maketas su komutatoriumi įėjime ir patikrinta stroboskopinio impulso amplitudės priklausomybė nuo prijungtų SK kanalų kiekio. Nuosekliai didinant kanalų skaičių iki 20, stroboskopinio impulso amplitudės sumažėjimo nepastebėta. Tagi eksperimento rezultatai patvirtino teorines išvadas, kad keitiklių su komutatoriumi įėjime kanalų skaičius gali būti didelis, nes tuo pat metu veikia tik du keitiklio kanalai, o kiti tuo metu dirba idealaus pikinio detektavimo režimu.

Gaminant daugiakanalio SK su komutatoriumi įėjime maketą buvo panaudoti integriniai komutatoriai K590KN5. Į SK įėjimą pasiuntus signalą su 1 ns trukmės frontais, SK išėjime signalo frontų trukmės liko nepakitusios.

Kompensacinius keitiklius galima taip pat padaryti daugiakanaliais. Šie keitikliai turės daugiakanalių ir kompensacinių keitiklių pranašumus, t.y. didelį kanalų skaičių ir mažą išėjimo įtampos triukšmų bei dreifų lygį.

Apskritai atlikti tyrimai parodė, kad, naudojant daugiakanalius stroboskopinius keitiklius su komutatoriumi įėjime, galima sukurti paprastus ir efektyvius daugiakanalius sparčių IG dinaminų parametrų įvertinimo įrenginius – trumpų laiko intervalų įvertinimo įrenginius, kuriuose kanalų skaičius gali viršyti 20. Skaitmeninio modeliavimo būdu gauti analizės rezultatai leido parinkti daugiakanalių stroboskopinių keitiklių elementų parametrus, užtikrinančius geriausius šių keitiklių dinaminis parametrus, įtakojančius mažų laiko intervalų įvertinimo neapibrėžtis. Be to, tyrimais įrodyta, kad daugiakanalius SK su komutatoriumi išėjime tikslinga naudoti ypač tiksliuose įrenginiuose, skirtuose SAK dinaminų parametrų įvertinimui, kai kanalų skaičius yra $n \leq 10$. Daugiakanalius SK su komutatoriumi įėjime rekomenduojama naudoti įrenginiuose, skirtuose loginių elementų, trigerių, registrų, skaitiklių ir kitų įrenginių dinaminiams parametrų matuoti, kai kanalų skaičius yra $n > 10$.

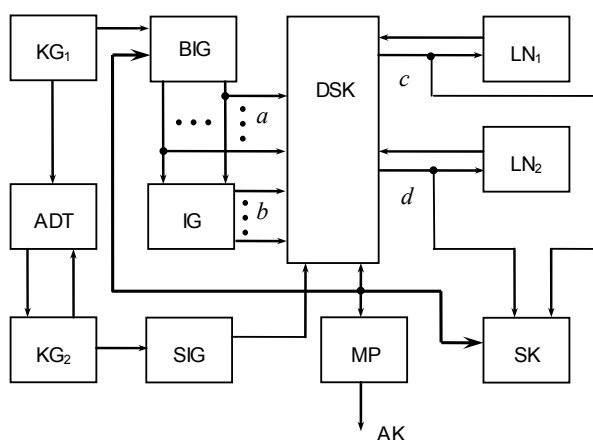
3.2. Sparčiųjų skaitmeninių IG signalų vėlinimo trukmių nustatymo įrenginiai

Sparčiuosiuose skaitmeniniuose integriniuose grandynuose – loginiuose elementuose, trigeriuose, registruose, skaitikliuose ir t. t. – signalo vėlinimo trukmės yra dalys nanosekun-

džių ir kartais gali siekti vienetus nanosekundžių. 3.1 poskyryje tirti nauji daugiakanaliai piki-
nio detektavimo stroboskopiniai keitikliai skirti sparčiųjų skaitmeninių IG signalo vėlinimo
trukmių nustatymo įrenginiams. Šiame poskyryje pateiksime naujo signalų vėlinimo trukmių
įvertinimo įrenginio struktūrą ir analizuosime signalo vėlinimo trukmių įvertinimo
neapibrėžtis.

3.2.1. Signalų vėlinimo trukmių įvertinimo įrenginio struktūra

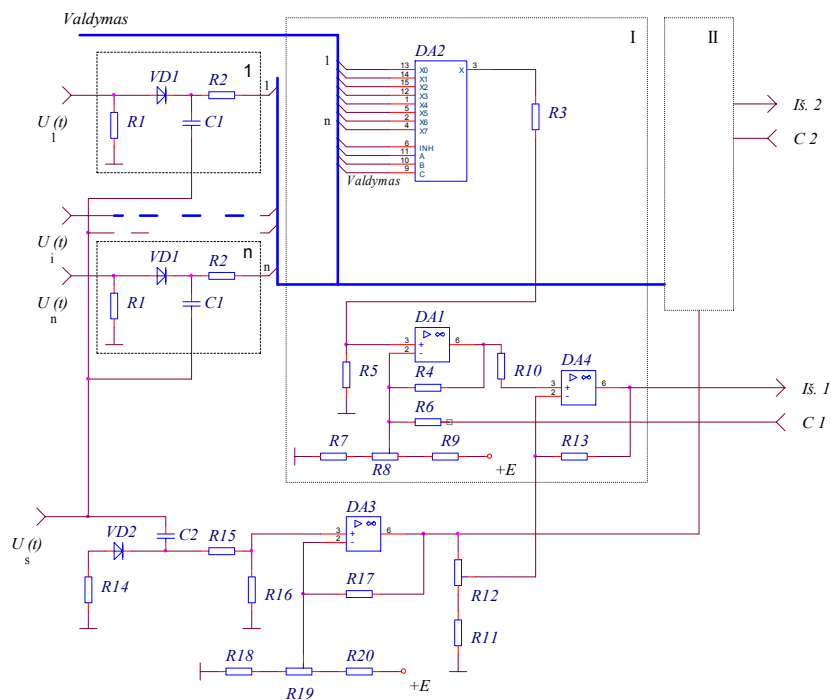
Sukurto sparčiųjų skaitmeninių IG signalų vėlinimo trukmių testerio struktūrinė
schema pateikta 3.8 paveiksle. Įrenginyje panaudotas daugiakanalis kompensacinis
stroboskopinis keitiklis (3.9 pav.) gautas modernizavus jau išsamiai ištirtą daugiakanalį SK su
komutatoriumi įėjime (3.2 pav.). Naujasis kompensacinis keitiklis turi n kanalų skirtų signalo
vėlinimo trukmės kiekviename IG išėjime įvertinimui. Kanalų įėjimų ir išėjimų vietos
3.8 paveiksle pažymėtos raidėmis a ir b . Bandomųjų impulsų formuotuvas BIG taip pat turi n
išėjimų skirtų kiekvienam tiriamojo IG kanalo įėjimui. Toks sprendimas leido atsisakyti
aukštadažnio komutatoriaus ir signalo vėlinimo trukmės visuose IG kanaluose įvertinti be
jokių komutacijos elementų. Taip išvengta didelių signalo atspindžių. Be to, padidintas
įrenginio našumas, sumažintos energijos sąnaudos, gabaritai ir kaina.



3.8 pav. Daugiakanalio signalo vėlinimo trukmių testerio struktūrinė schema. KG_1 , KG_2 – kvarciniai generatoriai; ADT – dažnio automatinio paderinimo grandinė; BIG – daugiakanalis bandomųjų impulsų generatorius; SIG – stroboskopinių impulsų generatorius; DSK – daugiakanalis stroboskopinis kompensacinis keitiklis; LN_1 , LN_2 – lygio nustatymo blokai; SK – impulsų skaitiklis; MP – mikroprocesorius; IG – tiriamasis integrinis grandynas

Sukurtame įrenginyje kvarcinio generatoriaus KG_1 dažnio f_1 išėjimo impulsai
paleidžia daugiakanalį bandomųjų impulsų generatorių BIG (3.8 pav.). BIG išėjimų skaičius
lygus maksimaliam tiriamojo IG kanalų, kuriuose įvertinama signalo vėlinimo trukmė,
skaičiui. Jeigu IG signalo vėlinimo trukmių nustatymui reikalingi bandomieji impulsai turi
turėti r kartų mažesnę dažnį už f_1 , BIG turi dar dažnio daliklius. Be to, BIG numatyta
galimybė valdančiojo mikroprocesoriaus MP komandomis kiekviename jo išėjime keisti

išėjimo impulsų trukmės t_i , frontų trukmės t_f ir loginio 0 bei loginio 1 įtampų lygius U^0 , U^1 . BIG išėjimai per tiriamojo IG prijungimo kontaktorių sujungti su vėlinimo trukmių nustatymui reikalingais IG ir daugiakanalio stroboskopinio keitiklio DSK a grupės įėjimais. Pavyzdžiui, kažkokios i -tosios vėlinimo trukmės įvertinimui, MP pagal darbo algoritmą, nustato reikiamuose BIG išėjimuose įtampos lygį U^0 ar U^1 , arba bandomųjų impulsų sekas. Visi tiriamosios IG išėjimai, būtini vėlinimo trukmių įvertinimui, yra prijungti prie likusių DSK b grupės įėjimų. Taigi DSK įėjimų skaičius lygus tiriamo IG informacijos įėjimų ir išėjimų, kuriuose įvertinamos signalo vėlinimo trukmės, sumai.



3.9 pav. Daugiakanalio kompensacinio pikinio detektavimo stroboskopinio keitiklio su komutatorium įėjime schema

Sukurtame įrenginyje kaip DSK panaudotas daugiakanalis kompensacinis pikinio detektavimo keitiklis su komutatoriumi įėjime (3.9 pav), nes jis turėdamas mažus savuosius triukšmus geriausiai tinka sparčiųjų IG signalo vėlinimo trukmėms įvertinti. Tokių keitiklių perdavimo koeficientas yra didelis (0,4 – 0,7). Tiriamasis signalas ant keiklio išėjimo C_1 talpos visuomet gaunamas pakeisto laiko mastelio. Kai DSK n -asis kanalas keičia jo įėjime esančio tiriamojo signalo laiko mastelį, DA2 n -asis įėjimas įjungtas – komutatoriaus varža tarp įėjimo ir išėjimo nedidelė. Kituose kanaluose komutatoriaus varža tarp įėjimo ir išėjimo didelė ir kiti DA2 įėjimai išjungti. Išjungtuose kanaluose talpos C_1 išsikrovimo varža yra labai didelė ir jie veikia praktiškai idealaus pikinio detektavimo režimu. Įtampa ant talpos C_1 yra didelė, diodas VD_i uždarytas ir stroboskopinių impulsų energija praktiškai nenaudojama.

Signalų vėlinimo trukmių įvertinimo metu, vienu metu yra keičiamas tik dviejų tiriamųjų signalų laiko mastelis, o kituose DSK kanaluose yra nustatomas idealaus pikinio detek-

tavimo režimas. Todėl vėlinimo trukmės įvertinimo metu stroboskopinių impulsų generatorių visada apkrauna tik du DSK kanalai.

Trumpi stroboskopiniai impulsai iš stroboskopinių impulsų generatoriaus SIG persiunčiami į DSK. Stroboskopinių impulsų dažnį f_2 nustato KG_2 impulsai. Taigi esant bandomųjų impulsų dažniui f_1 , laiko mastelio transformacijos koeficientas lygus:

$$q = \frac{f_1}{f_1 - f_2}; \quad (3.2)$$

Valdymo komanda iš MP nustato keitiklio multiplekserius DA2 (3.9 pav.) taip, kad į DSK išėjimus $I\check{s}1$ ir $I\check{s}2$ patektų tik du pakeisto laiko mastelio tiriamieji signalai reikalingi signalo vėlinimo trukmės įvertinimui.

DSK išėjimo signalai siunčiami į du lygių nustatymo blokus LN_1 ir LN_2 ir impulsų skaitiklį SK. LN_1 ir LN_2 blokuose nustatomi DSK išėjime esančių tiriamųjų signalų loginiai $U_{I\check{s}}^0$ ir $U_{I\check{s}}^1$ lygiai ir gautos reguliavimo įtampos yra siunčiamos atgal į DSK. Šios reguliavimo įtampos keičia DSK išėjimo įtampos lygį taip, kad tiriamųjų išėjimo signalų 0,5 amplitudės lygis būtų lygus nuliui. Signalų trukmės įvertinimas impulsų skaitiklyje SK pradedamas, kai DSK išėjimo c signalo lygis tampa lygus nuliui ir stabdomas, kai DSK išėjimo d signalo lygis tampa lygus nuliui. Atsitiktinių trukdžių įtaka sumažinama kartojant signalo vėlinimo trukmės įvertinimą 100 kartų. Įvertintas signalo vėlinimo trukmės rezultatas yra įsimenamas MP atmintinėje, lyginamas su užduotomis normomis ir siunčiamas į AK. Kai įvertintas parametras neatitinka užduotos normos, MP stabdo tolimesnius signalo vėlinimo trukmių įvertinimus ir į įtaiso indikatorius bei į AK pasiunčia informaciją apie netinkamų parametrų IG. Kai įvertintas parametras atitinka užduotą normą, MP pagal programą pradeda kito kanalo signalo vėlinimo trukmės įvertinimą. Įvertinus visuose kanaluose signalo vėlinimo trukmes, į įtaiso indikatorius bei AK pasiunčiama informacija apie kokybišką IG.

Paprastai signalo vėlinimo trukmių įrenginyje ir ypač jo IG kontaktoriuje, nepasiseka pasiekti vienodų vėlinimo trukmių tarp skirtingų IG įėjimų / išėjimų ir DSK skirtingų įėjimų. Vėlinimo trukmių skirtumai surandami, įvertinant etaloninių bendraašių kabelio atkarpų vėlinimą, įrašomos į įrenginio atmintinę ir eliminuojami iš įvertinimo rezultato.

Keičiant IG skirtą kontaktoriaus galvutę kartu pasikeičia jos kodinė kombinacija, kuri pakeičia vėlinimo trukmių įvertinimo programą. Taip pereinama nuo vieno prie kito tipo IG įvertinimo. Keičiant įvertinimo bloką pereinama nuo loginių grandinių prie trigerių, registrų, skaitiklių ar pan. signalo vėlinimo trukmių įvertinimo. Keičiant įvertinimo bloką galima pereiti ir prie kitų serijų IG matavimų.

Sukurtas įrenginys tinka ir kitokių dinaminių parametų įvertinimui. Tam turi būti pakeisti LN₁ ir LN₂ blokai ir parengtas kitas MP valdymo algoritmas.

3.2.2. Signalų vėlinimo trukmių įrenginio įvertinimo neapibrėžčių analizė

Pagrindiniai signalo vėlinimo trukmių įvertinimo neapibrėžčių šaltiniai yra:

1. Laiko mastelio transformacijos koeficiento nustatymo klaidos ir jo stabilumas;
2. Baigtinė stroboskopinių keitiklių pereinamosios charakteristikos užaugimo trukmė;
3. Tiriamųjų signalų atskaitos lygių nustatymo klaidos;
4. Stroboskopinių keitiklių išėjimo įtampų dreifai;
5. Atspindžiai ir trukdžiai įtaiso grandinėse;
6. Keitiklių savieji triukšmai;
7. Skaitmeninių įtaisų klaidos.

Kiekvieno paminėto neapibrėžčių šaltinių įtaka signalo vėlinimo trukmės įvertinimui analizuokime atskirai.

1. Stroboskopiniuose keitikliuose su dviem kvarciniais generatoriais laiko mastelio transformacijos koeficiento vertės nustatymo ir jos stabilumo neapibrėžtys priklauso nuo kvarcinių generatorių signalų dažnio stabilumo ir ypač nuo šių dviejų generatorių dažnio skirtumo stabilumo. Vėlinimo trukmių įvertinimo neapibrėžtis δt_T lygi:

$$\delta t_T = \sqrt{\left(\frac{K_V \cdot f_1 \cdot \delta f_1}{(f_1 - f_2)} \right)^2 + \delta f_1^2 + \delta f_{1ina}^2}, \quad (3.3)$$

čia δf_1 , δf_{1ina} – santykiniai generatoriaus KG₁ generuojamo signalo dažnio ir jo dažnio nustatymo netikslumai; K_V – įtakos koeficientas tarp generatorių KG₁ ir KG₂ signalų dažnių nestabilumų.

Įrenginyje naudojama automatinė dažnio paderinimo grandinė, kuri kvarcinių generatorių KG₁ ir KG₂ dažnių skirtumą palaiko maksimaliai pastovų. Ši neapibrėžtis neviršija $\pm 0,1$ %.

2. Priėmę, kad sparčiųjų skaitmeninių IG išėjimo signalo frontas atskaitos pradžios lygio, esančio ties 0,5 amplitudės, aplinkoje kinta tiesiniu dėsniu, o keitiklio perdavimo charakteristikos kitimo dėsnis – eksponentinis, bandomąjį $u_B(t)$ ir IG išėjimo $u_{IG}(t)$ signalus galima išreikšti taip:

$$u_B(t) = S_B t; \quad u_{IG}(t) = S_{IG} t, \quad (3.4)$$

čia $S_B = U_{B(01-09)} / t_{Bf}$, $S_{IG} = U_{IG(01-09)} / t_{IGf}$ – bandomųjų ir IG išėjimo signalų statumai; $U_{B(01-09)}$, $U_{IG(01-09)}$ – bandomųjų ir IG išėjimo signalų įtampų skirtumai tarp lygių atitinkančių 0,1 ir

0,9 jų amplitudės, t_{Bf} , t_{IGf} – bandomųjų ir IG išėjimų tiriamųjų signalų frontų trukmės tarp 0,1 ir 0,9 jų amplitudės.

Tiriamųjų signalų frontų trukmė įrenginio išėjimuose, kai jo pereinamoji charakteristika yra eksponentinio būdžio, apskaičiuojama taip:

$$t_{Bfiš} = \sqrt{t_{Bf}^2 + t_{Pf1}^2}; \quad t_{IGfiš} = \sqrt{t_{IGf}^2 + t_{Pf2}^2}; \quad (3.5)$$

čia $t_{Bfiš}$, $t_{IGfiš}$ – pirmojo ir antrojo tiriamųjų signalų frontų trukmės keitiklio išėjimuose; t_{Pf1} , t_{Pf2} – pirmojo ir antrojo keitiklių laiko pastoviosios. Apskritai $t_{Pf1} \approx t_{Pf2} \approx t_{Pf}$.

Vėlinimo įvertinimo idealiam ir realiame įrenginiuose pradžios laiko momentai apskaičiuojami taip:

$$t_{Bi} = \frac{U_{B05}}{S_{Bi}}; \quad t_{Br} = \frac{U_{B05}}{S_{Br}}; \quad (3.6)$$

čia $S_{Bi} = U_{B(01-09)} / t_{Bf}$, $S_{Br} = U_{B(01-09)} / t_{Bfiš}$ – tiriamojo signalo statumai keitiklio įėjime ir išėjime, kai laiko mastelio transformacijos koeficientas $q = 1$; U_{B05} – atskaitos lygis.

Vėlinimo trukmės nustatymo pabaigos analogiški laiko momentai tokie:

$$t_{IGi} = \frac{U_{IG05}}{S_{IGi}}; \quad t_{IGr} = \frac{U_{IG05}}{S_{IGr}}; \quad (3.7)$$

čia $S_{IGi} = U_{IG(01-09)} / t_{IGf}$, $S_{IGr} = U_{IG(01-09)} / t_{IGfiš}$ – tiriamojo signalo statumai keitiklio įėjime ir išėjime, kai $q = 1$; U_{IG05} – atskaitos lygis.

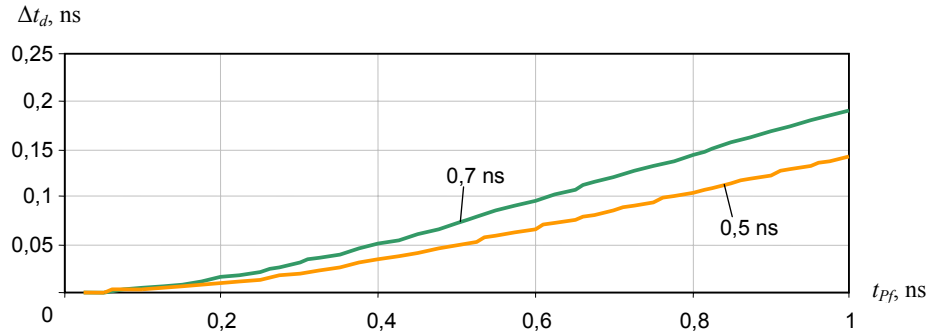
Signalų vėlinimo neapibrėžtis lygi vėlinimo trukmių įvertinimo neapibrėžčių pradžioje ir pabaigoje skirtumui:

$$\begin{aligned} \Delta t_d &= \Delta t_{dpa} - \Delta t_{dpr} = t_{IGr} - t_{IGi} - t_{Br} + t_{Bi} = \frac{U_{IG05}}{S_{IGr}} - \frac{U_{IG05}}{S_{IGi}} - \frac{U_{B05}}{S_{Br}} + \frac{U_{B05}}{S_{Bi}} = \\ &= \frac{U_{IG05}}{U_{IG(01-09)}} (t_{IGfiš} - t_{IGf}) - \frac{U_{B05}}{U_{B(01-09)}} (t_{Bfiš} - t_{Bf}) = \\ &= \frac{U_{IG05}}{U_{IG(01-09)}} \left(\sqrt{t_{IGf}^2 + t_{Pf}^2} - t_{IGf} \right) - \frac{U_{B05}}{U_{B(01-09)}} \left(\sqrt{t_{Bf}^2 + t_{Pf}^2} - t_{Bf} \right). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Kaip matyti iš (3.8) išraiškos, tik esant skirtingoms tiriamųjų signalų atskaitos lygių, jų amplitudžių, frontų trukmių vertėms bei nevienodoms prietaiso kanalų pereinamosioms charakteristikoms, atsiranda signalo vėlinimo trukmių įvertinimo neapibrėžtis.

Signalų vėlinimo įvertinimo neapibrėžties priklausomybė nuo keitiklio pereinamosios charakteristikos fronto trukmės, esant skirtingoms IG išėjimo signalų trukmėms, parodyta 3.10 paveiksle. Paveiksle parodytas 1590 serijos signalo vėlinimo trukmių įvertinimo atvejis,

kai pagal technines sąlygas bandomųjų impulsų frontas lygus 2 ns, o IG išėjimo impulsų frontai yra apie (0,5...0,7) ns. Matyti, kad 1 ns trukmės signalo vėlinimo trukmėms ir keitikliams su pereinamųjų charakteristikų fronto trukmėmis apie 0,2 ns, vėlinimo trukmės įvertinimo neapibrėžtis sudaro apie +2 %. Reikia turėti uomenyje, kad ši neapibrėžtis yra sisteminė ir ją galima visiškai arba dalinai eliminuota iš rezultato.



3.10 pav. Signalų vėlinimo trukmės nuokrypio priklausomybė nuo keitiklio pereinamosios charakteristikos fronto trukmės, esant 2 ns įėjimo signalo trukmei, esant skirtingoms IG išėjimo signalų trukmėms

3 ir 4. Tiriamame įrenginyje naudojami automatinio lygio nustatymo blokai LN₁ ir LN₂, nustatantys keitiklių išėjimo signalų lygį. Todėl, signalo vėlinimo neapibrėžtys dėl lygių nustatymo netikslumo ir keitiklių dreifų priklauso nuo kiekvieno šių blokų įnešamų neapibrėžčių ir blokų suderinimo. Šiems blokams keliami tokie reikalavimai:

Signalų vėlinimo trukmės įvertinimo neapibrėžtis atsiradusi dėl atskaitos lygio įvertinimo absoliučios neapibrėžties ΔU_l lygi [57]:

$$\Delta t_{vl} = \frac{\Delta U_l}{S_{IG}}. \quad (3.9)$$

Tada būtina LN₁ ir LN₂ blokų skiriamoji geba turi būti:

$$n_{LN} = \frac{\Delta U_{lr}}{U_{IG}} = \frac{K_{at} \Delta t_{vlr} S_{IG}}{U_{IG}}; \quad (3.10)$$

čia K_{at} – atsargos koeficientas, Δt_{vlr} – reikalaujama minimali neapibrėžtis dėl lygių nustatymo netikslumo. Koeficientas K_{at} panaudotas, nes visa neapibrėžtis dėl lygių nustatymo netikslumo dar priklauso ir nuo grįžtamojo ryšio grandinės perdavimo koeficiento suderinimo tikslumo.

Realiams 1590 serijos loginiams elementams $t_{fC} \approx 0,5$ ns, $t_{fB} \approx 2$ ns, $U_{IG} = U_B \approx 0,8$ V, priėmus $\delta t_{vlr} = \pm 1$ % ($\Delta t_{vlr} = \pm 10$ ps) ir $K_{at} = 0,5$ gauname $n_{LN} = 100$. Tai rodo, kad automatinio lygio nustatymo blokus LN₁ ir LN₂ gali sudaryti 8 skilčių ASK ir SAK. Signalų vėlinimo trukmių įvertinimo neapibrėžtis dėl lygio nustatymo netikslumo neviršys (0,5...1) %, kas tokiems įrenginiams yra priimtina.

5. Daugiakanalių keitiklių panaudojimas ženkliai sutrumpina tiriamųjų signalų perdavimo aukštadažnes grandines, pašalina aukštadažnį bendraašių kabelių atkarpų ir suderintų su kabelio bangine varža sandariųjų kontaktų ar gyvsidabrio relių komutatorių ir sumažina šių mazgų įtaką signalo vėlinimo trukmės įvertinimo neapibrėžtims. Jų dydis sukurtame įrenginyje priklauso nuo konkrečios konstrukcijos (naudojamų medžiagų, spausdintinės plokštės takelių ilgių, kontaktoriaus tipo ir konstrukcijos ir pan.).

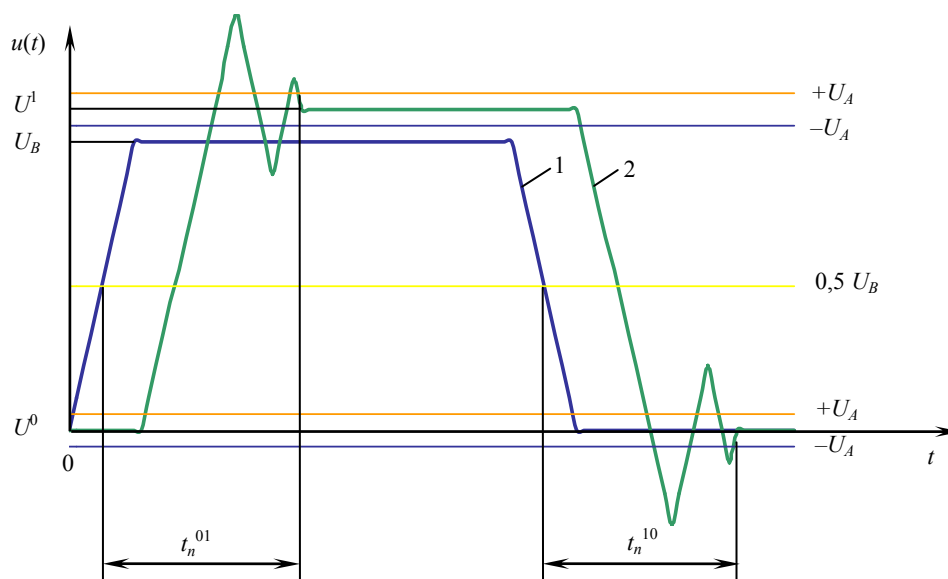
6. Įrenginyje naudojamo kompensacinio daugiakanalio stroboskopinio keitiklio savųjų triukšmų įtampą lygi (60...100) μV [57]. Todėl vėlinimo trukmės įvertinimo neapibrėžtis dėl keitiklio savųjų triukšmų yra paneigtinai maža.

7. Skaitmeninių įtaisų neapibrėžtis paprastai sudaro 0,5 MRS ir, teisingai ją parinkus, neturi įtakos įvertinimo rezultatui.

3.3. SAK nusistovėjimo trukmių įvertinimas

SAK analizei ir priėmimo kontrolei būtina speciali elektroninė įranga. Didėjant SAK skilčių skaičiui ir jų spartai, įvertinti SAK dinaminius parametrus ir ypač nusistovėjimo trukmę gana sudėtinga.

Nusistovėjimo trukmė įvertinama kaip dviejų laiko momentų skirtumas. Vienas laiko momentas randamas, kai bandomojo impulso, siunčiamo į visus tiriamojo SAK informacijos įėjimus, vertė pasiekia 0,5 jo amplitudės vertės. Kitas laiko momentas randamas, kai išėjimo signalo vertė skiriasi nuo nusistovėjusių šio signalo verčių U^1 arba U^0 tam tikra apibrėžta $\pm U_A$ verte (3.11 pav.). Kaip $\pm U_A$ dažnai primama $\pm(0,5; 1; 2; \dots)$ SAK mažiausio reikšminio skaičiaus ar $\pm(1, 2, 4, \dots)$ % nuo U^1 ar U^0 .



3. 11 pav. SAK nusistovėjimo trukmės nustatymo proceso iliustracija: 1 – bandomasis impulsas; 2 – SAK išėjimo impulsas; t_{n01} , t_{n10} – nusistovėjimo trukmės įjungiant ir išjungiant SAK; U_B – bandomojo impulso amplitudė; U^1 , U^0 – nusistovėjusios SAK išėjimo įtampos vertės; U_A – atskaitos lygis

Nusistovėjimo trukmės pradžios momento nustymas ypatingų problemų nekelia. Jis randamas taip, kaip tai daroma įvertinant signalo vėlinimo trukmę. Nusistovėjimo trukmės pabaigos momento nustatymo įtampa yra didesnė arba mažesnė už nusistovėjusią vertę atskaitos lygiu

$$U_A = \frac{U_{SAK} \cdot k}{2^m}; \quad (3.11)$$

čia U_{SAK} – SAK išėjimo įtampos amplitudė; k – atskaitos lygio koeficientas MRS vienetais; m – SAK skilčių skaičius.

Kai 12 skilčių SAK išėjimo įtampos amplitudė $U_{SAK} = 1$ V, atskaitos lygiai sudarys $U_A = 122 \mu\text{V}$. Akivaizdu, kad nanosekundiniame diapazone įvertinti nusistovėjusią SAK išėjimo signalo vertę ir tokius atskaitos lygius yra pakankamai sudėtinga. Tenka įvertinti ypač mažus signalo amplitudės pokyčius. Tokio kompleksinio uždavinio – mažų laiko pokyčių bei ypač mažų tiriamo signalo amplitudės pokyčių įvertinimas, sprendimui tenka pasinaudoti metodais, anksčiau darbe pritaikytais signalo vėlinimo trukmių bei varžų mažų pokyčių įvertinimo uždaviniams spręsti.

Svarbu pabrėžti, kad mažų pokyčių įvertinimui keliami uždaviniai dažniausiai sąlygoja nuoseklų visų įvertinimą sąlygojančių funkcinų mazgų kokybinių parametrų gerinimą bei tolesnį rezultatų skaitmeninį apdorojimą. Tik taip pavyksta pasiekti įvertinimo kokybės reikalavimus ir garantuoti patikimą įrenginių darbą.

3.3.1. Nusistovėjimo trukmių tyrimo įrenginio struktūra

Vienas iš įprastų spartaus ASK nusistovėjimo trukmių įvertinimo būdų – SAK išėjimo įtampos (srovės) akimirkinių verčių skaitmeniniams ir nusistovėjimo trukmės suradimas apdorojant skaitmenų masyvą. Kadangi signalo nusistovėjusią tiriamo vertę, būtina įvertinti labai tiksliai, įrenginiams tinka tik ASK, kurio skilčių skaičius lygus n , diskretizavimo dažnis f_T ir analoginio kanalo praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF yra lygūs:

$$n \geq \frac{1}{\log 2} \log \frac{U_{ASK} \cdot 2^m \cdot p}{U_{SAK} \cdot k}, \quad (3.12)$$

$$f_T = \frac{100}{t_n \cdot \delta t_n}, \quad (3.13)$$

$$\Delta F = \frac{0,35 \cdot k_p}{t_f}; \quad (3.14)$$

čia U_{ASK} – ASK įėjimo įtampos kitimo diapazonas; p – ASK MRS, tenkančių SAK atskaitos lygiui, skaičius; t_n – mažiausia nustatoma SAK nusistovėjimo trukmė; δt_n – SAK

nusistovėjimo trukmės įvertinimo neapibrėžtis dėl baigtinio ASK diskretizavimo dažnio, %; t_f – SAK išėjimo impulsų frontų trukmės; k_P – koeficientas, įvertinantis ASK įvertinimo kanalo baigtinės praleidžiamų dažnių juostos sukeltą SAK nusistovėjimo trukmės neapibrėžtį, pvz., kai $k_P = 3$, $\delta t_n = 3\%$, o kai $k_P = 10$, $\delta t_n = 1\%$.

Iš (3.12) – (3.14) reikalavimų išplaukia, kad sparčiųjų 12 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės analizei reikėtų panaudoti 18 ir didesnio skilčių skaičiaus ASK ar skaitmeninį oscilografą, dirbantį didesniu už 5 GHz taktiniu dažniu ir turintį (320...1140) MHz analoginio kanalo praleidžiamųjų dažnių juostos plotį. Šiuo metu nė vienas gaminamas įrenginys neturi tokių parametrų.

Stroboskopinis ASK darbo režimas leidžia pasiekti reikalaujamą taktinį dažnį, nes jis sumažina ASK darbo taktinį dažnį q kartų, čia q – transformacijos koeficientas. Tačiau reikalavimai skilčių skaičiui ir ASK analoginio kanalo praleidžiamų dažnių juostos pločiui lieka nepasiekiami.

Žinomuose sparčių 8 ir 10 skilčių SAK dinaminių parametrų įvertinimo įrenginiuose, naudojant kompensacinius stroboskopinius pikinio detektavimo keitiklius, pavyksta patikimumai įvertinti ypač mažas amplitudes. Šie keitikliai yra palyginti paprasti, jų laiko mastelio keitimo netolygumas nedidelis, maži savieji triukšmai ir nedidelis trukdžių lygis. Be to, jie gali būti jungiami tiesiog prie tiriamojo SAK kontaktoriaus išvado, taip praktiškai panaikinamas tiriamojo signalo aukštadažnis kanalas ir iškraipymai jame. Siekiant supaprastinti įrenginio grandinę naudojama atvirkščioji laiko mastelio transformacijos kryptis.

Tačiau šių keitiklių savųjų triukšmų ir trukdžių lygis, siekiantis 40...60 μV [A1], yra per didelis, nes yra tik du ar tris kartus mažesnis už tiriamojo 12 skilčių SAK atskaitos lygius. Dėl to nepavyksta reikiamu patikimumu identifikuoti SAK išėjimo amplitudės pokyčių. Taigi kaip buvo parodyta 2-ame skyriuje, nepavyksta reikiamu patikimumu įvertinti tiriamojo SAK nusistovėjimo trukmės. Be to, keitiklio savieji triukšmai ir trukdžiai veikia nusistovėjimo trukmės įvertinimo rezultatą du kartus – nustatant SAK išėjimo signalo nusistovėjusią vertę ir nustatant pačią nusistovėjimo trukmę. Dėl to jų įtaka įvertinimo kokybei dar labiau padidėja.

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad keitiklio triukšmus ir trukdžius sukelia grandinėje naudojamų elektroninių elementų savieji triukšmai, o naudojant elementus su mažais savaisiais triukšmais, keitiklio savieji triukšmai praktiškai nesumažėja.

Norint garantuoti reikiamą mažų tiriamo signalo amplitudės pokyčių įvertinimą, tenka imtis metodų šių triukšmų įtakos rezultatui ir jo neapibrėžtims mažinti. Kadangi varžos mažų pokyčių įvertinimo kokybei gerinti sėkmingai panaudoti skaitmeniniai metodai, nuspręsta savųjų triukšmų ir trukdžių mažinimui taip pat panaudoti skaitmenines signalų apdorojimo priemones. Pakeitus tiriamojo signalo laiko mastelį, jį galima keisti į skaitmeninį signalą

palyginti nesparčiais ASK ir tolimesnį apdorojimą bei reikiamų parametrų įvertinimą atlikti tik skaitmeniniame pavidale. Tam iš pakeisto laiko mastelio tiriamjo signalo ASK sudaromas jo akimirkinių verčių skaitmeninis masyvas, kuris vėliau apdorojamas skaitmeninėmis priemonėmis.

Kadangi kuriamame sparčių daugiaskilčių SAK dinaminį parametrų tyrimo įtaise panaudotas kompensacinis stroboskopinis pikinio detektavimo keitiklis, tiriamasis signalas jo išėjime bus pakeisto laiko mastelio. Jis pateks į ASK įėjimą kaip žemadažnis signalas. Šiuo atveju reikalavimai ASK parametrų sumažės. Dabar analoginio kanalo praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF ir diskretizavimo dažnis f_T , esant keitiklio laiko mastelio transformacijos koeficientui q turi būti lygūs:

$$\Delta F = \frac{0,35 k_p}{t_f q}; \quad (3.15)$$

$$f_T = \frac{100}{t_n \delta t_n q}. \quad (3.16)$$

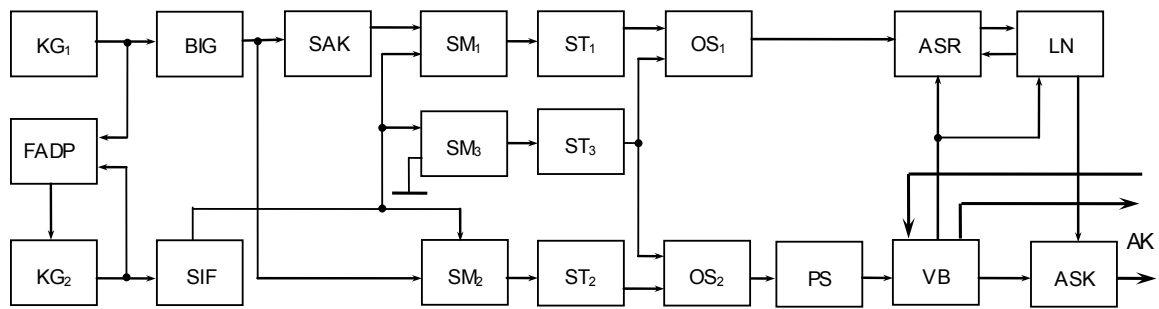
Taigi kuriant 12 skilčių SAK dinaminį parametrų įvertinimo įrenginį, kai $q = 10^4$, ASK parametrai turi būti tokie: $\Delta F_r = \Delta F_{SAK} / q = (314 \dots 1140) \cdot 10^6 / 10^4 = (31,4 \dots 114) \text{ kHz}$; $f_{Tr} = f_T / q = 5 \cdot 10^9 / 10^4 = 500 \text{ kHz}$. Išvardintų dažnių parametrų ASK gana plačiai naudojami, tačiau lieka nepakitęs anksčiau reikalautas ASK skilčių skaičius – 18, nes būtina ypač tiksliai įvertinti mažus tiriamo signalo amplitudės pokyčius.

Literatūros analizėje parodyta, kad šis ribojimas gali būti apeinamas, kai yra stiprinama tik ta tiriamojo pakeisto laiko mastelio signalo dalis, kurioje yra vertinama nusistovėjimo trukmė. Taigi mažas amplitudės pokytis yra pakeičiamas palyginti dideliu, kurį įvertinti paprasčiau ir nebūtina naudoti didelio skilčių skaičiaus ASK. Tačiau būtina garantuoti ASK viso dinaminio diapazono panaudojimą. Pagal reikalaujamą spartą ir dažninius parametrus parinkus tinkamą n -skiltį ASK, keitiklio perdavimo koeficientas turi būti toks:

$$K_K \geq \frac{2^{n-m} U_{ASK}}{U_{SAK} \cdot k \cdot \delta k}; \quad (3.17)$$

čia δk – santykinė atskaitos koeficiento įvertinimo neapibrėžtis.

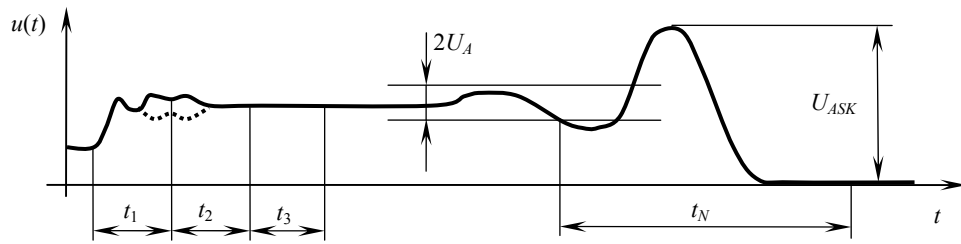
12 skilčių SAK dinaminį parametrų tyrimo įrenginiui parinkus 10 skilčių ASK, gaunama $K_K \geq 80$, o parinkus 8 skilčių ASK – $K_K \geq 320$. Tokios keitiklio perdavimo koeficiento vertės yra palyginti lengvai pasiekiamos. Tuo remiantis sukurta dinaminį parametrų tyrimo įrenginio struktūrinė schema (3.12 pav.).



3.12 pav. Stroboskopinio keitiklio, keičiančio akimirkinės įtampos vertes į kodą, struktūrinė schema: KG_1 , KG_2 – kvarciniai generatoriai; BIG – bandomųjų impulsų generatorius; SIF – stroboskopinių impulsų formuotuvas; SAK – tiriamasis skaitmeninis-analoginis keitiklis; SM_1 – SM_3 – stroboskopiniai maišikliai; ST_1 – ST_3 – stiprintuvai; OS_1 , OS_2 – operaciniai stiprintuvai; ASR – automatiškai reguliuojamo stiprinimo stiprintuvas; PS – palyginimo grandinė; VB – valdymo blokas; LN – lygio nustatymo blokas; ASK – analoginis-skaitmeninis keitiklis; AK – asmeninis kompiuteris

Sukurtas įrenginys veikia taip. Stroboskopinių impulsų siunčiamų iš SIF į stroboskopinius maišiklius $SM_{1,2,3}$ dažnį nustato kvarcinio generatoriaus KG_2 f_2 dažnio išėjimo impulsai. Bandomųjų impulsų generuojamų BIG dažnį f_1 nustato kvarcinio generatoriaus KG_1 išėjimo impulsai. Dažnis f_2 parenkamas aukštesnis už dažnį f_1 . Todėl keitiklis vienu metu pakeičia tiriamųjų signalų laiko mastelį ir jų laiko ašies kryptį, – keitiklio išėjimo signalai skleidžiami nuo galinių impulsų frontų link priekinių. Fazinio automatinio dažnio paderinimo grandinė FADP paderina KG_2 dažnį taip, kad dažnių skirtumas $(f_2 - f_1)$ visą laiką išliktų pastovus. Tai garantuoja laiko mastelio transformacijos koeficiento q pastovumą. BIG išėjime gaunami pagal SAK bandymų sąlygas reikalaujamo dažnio, frontų trukmių, loginio vieneto ir loginio nulinio įtampų impulsai. Šie bandomieji impulsai siunčiami į stroboskopinį maišiklį SM_2 ir į visus tiriamojo SAK informacijos įėjimus. SAK išėjime pakaitomis nustatoma minimali ir maksimali išėjimo įtampa (srovė). Tiriamojo SAK išėjimo impulsai patenka į pirmąjį stroboskopinį maišiklį SM_1 . Į antruosius maišiklių SM_1 – SM_3 įėjimus siunčiami trumpi stroboskopiniai impulsai iš SIF. Maišiklių SM_1 ir SM_2 išėjimų žemadažniai signalai stiprinami stiprintuvuose ST_1 bei ST_2 , o ST_3 išėjime gaunamas sustiprintas SM_3 „nulinio“ signalas. Šis signalas operaciniuose stiprintuvuose OS_1 ir OS_2 atimamas iš tiriamųjų signalų stiprintuvų ST_1 ir ST_2 išėjimuose ir labai sumažina keitiklių savųjų triukšmų ir trukdžių lygį. OS_1 išėjimo signalas siunčiamas į impulsinę automatinio stiprinimo reguliavimo grandinę ASR.

Stroboskopiniame keitiklyje kaip ASR panaudota VGTU sukurta 10 skilčių schema [72]. Ji lygina impulsinio signalo nusistovėjusias vertes su nustatytais lygiais ir keičia signalo perdavimo koeficientą taip, kad nepriklausomai nuo tiriamojo SAK signalo amplitudės, jo vertė ASR išėjime būtų pastovi. ASR išėjimo signalas perduodamas į lygio nustatymo bloką LN. Šioje grandinėje tiriamasis signalas stiprinamas, ribojamas ir jo nusistovėjusi vertė fiksuojama taip, kad LN išėjime būtų lygi nuliui (ASK diapazono vidurinei vertei). 3.13 paveiksle parodyta į ASK perduodamo tiriamojo signalo dalis.



3.13 pav. Tiriomojo signalo ASK įėjime diagrama: t_1 , t_2 , – ASR, LN darbo trukmės, t_3 – tiriomojo signalo dalis, kurioje yra nustatoma nusistovėjusioji vertė, t_N – įvertinamoji ASK nusistovėjimo trukmė; U_A – AK nustatomos atskaitos lygių vertės, U_{ASK} – ASK įėjimo įtampų diapazonas

ASK darbą kontroliuoja valdymo blokas VB. Į VB yra persiunčiami palyginimo grandinėje PS generuojami impulsai, kurie yra sinchroniški su įvertinamosios nusistovėjimo trukmės pabaiga. Šie impulsai yra padaromi iš BIG išėjimo bandomųjų impulsų sekos, pakeistus jų laiko mastelį stroboskopiniame maišiklyje SM₂ ir juos sustiprinus stiprintuvuose ST₂ ir OS₂. Persiūstieji į valdymo bloką VB impulsai stabdo ASK ir valdo ASR bei LN darbą. Pasibaigus LN darbo trukmei t_2 , VB įjungia ASK ir persiunčia sinchronizacijos signalą asmeniniam kompiuteriui AK. Pradedamas tiriomojo signalo diskretizavimas. ASK tiriomojo signalo akimirkinėms vertėms proporcingas skaitmeninis kodas siunčiamas į AK darbinę atmintinę, čia signalo akimirkinės vertės įsimenamos. Pasibaigus laiko intervalui t_N , ASK darbas stabdomas.

Jei įrašymo į AK sparta yra per didelė, pvz., per maža AK sąsajos sparta, vyksta kiti lygiagrečiai procesai ir pan., naudojama tarpinė (buferinė) atmintinė, kurios informacinė talpa (žodžiais) turi būti pakankama priimti tiriomojo signalo dalį nuo laiko intervalo t_3 pabaigos iki laiko intervalo t_N pabaigos:

$$S = \frac{q \cdot f_T}{2 \cdot f_1}. \quad (3.18)$$

Įsiminta vieno signalo keitimo ciklo informacija yra įvedama į AK, todėl tarpinės atmintinės talpa nėra didelė. Realiems keitikliui ir signalui reikalaujama tik $S \approx 4096$ žodžių.

Įvertinant nusistovėjimo trukmę AK, reikia žinoti SAK tiriomojo signalo mažiausio reikšminio skaičiaus skaitmeninę vertę ir diskretizavimo periodą. SAK MRS skaitmeninis kodas ASK išėjime apskaičiuojamas taip:

$$n_{MRS} = 2^{(n-m)} \frac{U_S \cdot K_{SK}}{U_{ASK}}, \quad (3.19)$$

čia n – naudojamo ASK skilčių skaičius; m – tiriomojo SAK skilčių skaičius; U_S – vardinė tiriomojo SAK išėjimo signalo amplitudė; K_{SK} – keitiklio perdavimo koeficientas, kai SAK išėjimo signalo amplitudė lygi vardinei.

Jei kito tiriamojo SAK išėjimo signalo amplitudė kitokia, keitikliu nustatomos kitos vertės K_{SK} taip, kad MRS vertė ASK įėjime liktų ta pati. Automatinio reguliavimo grandinė taip pat eliminuoja keitiklio savuosius išėjimo signalo dreifus bei keitiklio perdavimo koeficiento nestabilumą. Taigi nepriklausomai nuo tiriamo SAK ir jo išėjimo signalo amplitudės išsibarstymo (leidžiami išsibarstymai siekia 20%) iš ASK gaunamas tas pats skaitmeninis nusistovėjęsios vertės skaitmeninis kodas.

Laiko trukmė tarp dviejų akimirkinių tiriamųjų signalų verčių skaitmeninių kodų ASK išėjime:

$$t_A = \frac{t_T}{q} = \frac{(f_1 - f_2)}{f_T \cdot f_1}; \quad (3.20)$$

čia $t_T = 1 / f_T$ – ASK diskretizavimo periodas, $q = f_1 / (f_1 - f_2)$ – laiko mastelio transformacijos koeficientas.

Taigi nusistovėjimo trukmę galima įvertinti apdorojant ASK kvantuotą ir diskretizuotą signalą. Tačiau svarbu užtikrinti, kad ASK diskretizavimo dažnis būtų stabilus, nes jo nestabilumas, kaip matoma iš (3.20) sukelia įvertinimo rezultato neapibrėžtis.

3.3.2. Skaitmeninis signalo apdorojimas ir nusistovėjimo trukmės įvertinimas

Stroboskopinių keitiklių triukšmų lygis yra didelis, lyginant su tiriamojo SAK išėjimo signalo lygiu. Todėl norint patikimai įvertinti nusistovėjimo trukmes, tenka atlikti gautų rezultatų skaitmeninį apdorojimą. Analogiškai varžų mažų pokyčių įvertinimui, čia galimi keli skirtingi tiriamojo skaitmeninio signalo apdorojimo būdai. Pirmiausia tiriamasis signalas filtruojamas skaitmeniniais filtrais, po to vidurkinamas.

Pakeisto laiko mastelio tiriamasis analoginis signalas skaitmeninamas ir į AK atmintinę įrašoma p skirtingų tiriamojo signalo realizacijų. Tolesnės nusistovėjimo trukmės įvertinimo operacijos atliekamos AK pagal tam skirtą programą. Įvertinimas AK vykdomas tokiu nuoseklumu: a) pradinis signalo filtravimas; b) signalo realizacijų sutapdinimas laike; c) signalo realizacijų sutapdinimas pagal nusistovėjęsias vertes; d) signalo vidurkinimas; e) nusistovėjęsios signalo vertės nustatymas; f) atskaitos lygių nustatymas; g) nusistovėjimo trukmės pradžios diskrečiosios vertės eilės numerio nustatymas; h) nusistovėjimo trukmės pabaigos diskrečiosios vertės eilės numerio nustatymas; i) nusistovėjimo trukmės skaičiavimas, lyginimas su nustatytais normomis ir tiriamojo SAK tinkamumo įvertinimas.

Toliau detaliau aptarkime kiekvieną įvertinimo algoritmo dalį:

a) dėl stroboskopiniame keitiklyje vykstančių keitimo procesų ir ASK neapibrėžčių bei keitiklio savųjų triukšmų gautas skaitmeninis signalas turi tam tikrą neapibrėžtį – ASK išėjime gauti akimirkinių verčių skaitmeniniai kodai (imtyys) turi tam tikrą sklaidą. Sklaidą ga-

lima sumažinti signalo vertes skaitmeniškai filtruojant žemųjų dažnių (ŽDF) ir juostiniu (JF) filtrais. Filtrų parametrus lemia keitiklio išėjime esantis tiriamasis signalas, kurio spektras užima dažnių ruožą nuo 0 iki f_A . ŽDF filtras slopina aukštadažnes trukdžių ir triukšmų dedamąsias, o JF – žemadažnio triukšmo bei triukšmo dedamųjų tarp tiriamojo signalo harmonikų dedamąsias. Skaitmeniniai filtrai įgyvendinami analogiškai, kaip tai aprašyta 2-jame skyriuje, aptariant Wheatstone'o varžų tiltelio disbalanso signalo filtravimą ŽDF bei JF.

b) stroboskopiniame keitiklyje laiko mastelio keitimo metu dėl VB valdymo signalo formavimo nestabilumo tiriamojo signalo atskirų realizacijų pradžių momentai skirtingi, o tai sukelia vidurkinimo neapibrėžtis ir papildomas nusistovėjimo trukmės įvertinimo neapibrėžtis. Siekiant jų išvengti, visos tiriamojo signalo realizacijos sutapdinamos laike. Tam skaitmeninto tiriamojo signalo akimirkinių verčių (imčių) masyvuose identifikuojami impulsų frontai ir staigiausio jų kitimo metu (esant didžiausiam fronto statumui) jie yra sutapdinami, perstumiant imčių masyvų numerius;

c) stroboskopiniame keitiklyje laiko mastelio keitimo metu dėl lygio nustatymo bloko LN dreifų ir neapibrėžčių, ASK keitimo klaidų iškraipomos signalų imčių vertės. Iškraipymų įtaka sumažinama apskaičiuojant realizacijų nusistovėjusių verčių vidutinės vertės (nustatomos kelių signalo imčių vidutinės vertės) ir jas sutapdinant (perskaičiuojami signalo realizacijos imčių akimirkinių verčių kodai). Kadangi signalo nusistovėjusios vertės automatiškai reguliuojamo stiprinimo stiprintuvo išėjime ASR turi nepriklausyti nuo tiriamo SAK egzemplioriaus parametrų išsibarstymo ar tiriamojo signalo realizacijos, į ASK signalai turi patekti vienodos amplitudės. Taigi ASK kvantuoto skaitmeninio signalo kodas, esant nusistovėjusiai vertei turi nepriklausyti nuo tiriamojo SAK egzemplioriaus ir tiriamojo signalo realizacijos. Į AK atmintinę įrašomi laike ir pagal vertes sutapdinti tiriamojo signalo kodų masyvai;

d) randamos visų AK atmintinėje esančių tiriamojo signalo to paties eilės numerio imčių vidutinės vertės; tai leidžia labai sumažinti keitiklio savųjų triukšmų įtaką rezultatui. Triukšmų įtampos kodo vidutinė kvadratinė vertė po vidurkinimo lygi:

$$n_{trv}^2 = \frac{n_{tr}^2}{\sqrt{\nu}}; \quad (3.21)$$

čia n_{tr}^2 – keitiklio išėjimo signalo savųjų triukšmų įtampos skaitmeninio kodo vidutinis kvadratinis nestabilumas, ν – vidurkinimų signalų skaičius. Suvidurkintas signalas įrašomas į AK atmintinę;

e) kaip ir punkte c, surandamas suvidurkinto tiriamojo signalo nusistovėjusios vertės kodas $n^{1(0)}$, būtinas nusistovėjimo trukmės įvertinimui;

f) nustatomi nusistovėjimo trukmės įvertinimui būtinai atskaitos lygių skaitmeniniai kodai:

$$n_A = \pm 2^{(n-m)} \cdot k \frac{U_S \cdot K_{SK}}{U_{ASK}} + n^{l(0)}; \quad (3.22)$$

g) suvidurkinto tiriamojo signalo imčių skaitmeniniai kodai palyginami su pagal (3.22) nustatytais atskaitos lygiais; kai imties kodas viršija didesnį atskaitos skaitmeninį kodą arba tampa mažesnis už mažesnį, užfiksuojamas nusistovėjimo trukmės įvertinimo pradžios diskrečiosios vertės eilės numeris d_p ;

h) užfiksuojamas nusistovėjimo trukmės paskutinės diskrečiosios vertės eilės numeris d_g . Dėl tiriamojo signalo skaitmeninių kodų sutapdinimo laike (žr. punktą c) ir kitų keitiklio neapibrėžčių, paskutinės nustatomos trukmės diskrečiosios vertės eilės numeris gali skirtis skirtingoms tiriamojo signalo realizacijoms. Randamas vidutinis paskutinės diskrečiosios vertės eilės numeris;

i) apskaičiuojamas nusistovėjimo trukmės diskrečiųjų verčių skaičius $d_{NT} = d_g - d_p$ ir apskaičiuojama SAK nusistovėjimo trukmė:

$$t_{NT} = d_{NT} \frac{(f_1 - f_2)}{f_{ASK} f_1}. \quad (3.23)$$

Gautoji t_{NT} vertė lyginama su tiriamojo tipo SAK normomis. Jei t_{NT} vertė yra mažesnė už priėmimo normą, SAK yra geras, o kai didesnė – SAK yra blogas ir įvertinimas stabdomas. Indikatoriuje indikuojama įvertinta nusistovėjimo trukmės t_{NT} vertė bei informacija apie tai, kaip SAK parametras atitinka nustatytas normas.

Atlikus nusistovėjimo trukmės įvertinimą pagal įvertinimo programos algoritmą pereinama prie kito SAK parametro, pvz., nusistovėjimo trukmės jį išjungiant, įvertinimo.

3.4. Išvados

1. Įrodyta, kad efektyviai įvertinti signalo vėlinimo trukmės daugelyje kanalų, analogiškai kaip daugiakanalyje varžų mažų pokyčių įvertinime, būtina iš principo keisti klasikinę įtaiso grandinę ir sukurti tam tikslui daugiakanalį stroboskopinį keitiklį.

2. Rekomenduojama įrenginiuose, skirtuose loginių elementų, trigerių, registų, skaitiklių ir kt. dinaminiam parametrų įvertinti, kai kanalų skaičius didesnis už 10, naudoti sukurtus daugiakanalius SK su komutatoriumi įėjime. Nustatyta, kad daugiakanaliai SK su komutatoriumi išėjime tinka naudoti ypač tiksluose įrenginiuose, skirtuose SAK ir pan. dinaminio parametrų įvertinimui, kai kanalų skaičius mažesnis už 10.

3. Kompensacinio daugiakanalio keitiklio panaudojimas leidžia sukurti palyginti paprastą įrenginį sparčiųjų loginių elementų, trigerių, registų, skaitiklių ir pan. signalo vėlinimo

trukmių įvertinimui, nenaudojant aukštadažnių komutatorių. Sudaryta nauja daugiakanalio signalo vėlinimo trukmės tyrimo įrenginio struktūrinė schema.

4. Parodyta, kad naudojant kompensacinius pikinio detektavimo stroboskopinius keitiklius ir taikant skaitmeninį signalų apdorojimą galima sukurti sparčiųjų daugelio skilčių SAK dinaminį parametrų tyrimo įrenginius. Sudaryta nauja nusistovėjimo trukmės tyrimo įrenginio struktūrinė schema.

5. Nustatyta, kad mažų amplitudės pokyčių bei mažų laiko intervalų pokyčių įvertinimo tikslumui padidinti reikia naudoti analogiškus skaitmeninio signalų apdorojimo metodus, kokie naudojami ir varžų mažų pokyčių įvertinimui. Skaitmeninių metodų taikymas kartu išsprendžia įvertinimo rezultatų kaupimo skaitmenine forma problemą.

K572ΠA1. Ši grandinė per sukurtą specializuotą lygiagretųjį prievadą prijungta prie asmeninio kompiuterio AK. Valdymo programa sudaryta naudojant LabView 5.1 paketą.

Įtaiso darbo algoritmas išlieka nepakitęs. Per tiltelio rezistorius teka nuolatinė srovė, o įtampos kritimai rezistoriuose sukuria tiltelio disbalanso įtampą, kuri siunčiamas į komparatoriaus įėjimą. Sukurta AK valdymo programa į aukščiausią SAK skiltį paduoda loginio 1 signalą. Pasikeičia SAK varža, o kartu ir tiltelio balansas bei disbalanso įtampa. Jei tiltelis dėl to perbalansuojamas, įtampos poliarumas tarp tiltelio pečių pasikeičia ir komparatoriaus išėjime nusistovi loginio 1 signalas. Jei nesubalansuojamas, komparatoriaus išėjime nusistovi loginio 0. Šis signalas siunčiamas į AK, ir jei šis signalas loginis 1, programa aukščiausiąją skiltį perjungia į loginį 0, jei signalas loginis 0, programa aukščiausioje skiltyje palieka loginį 1. Procedūra kartojama su visomis žemesnėmis skiltimis, kol pasiekiamas jaučiausioji 8-oji skiltis. Kai subalansuota paskutinioji skiltis, balansavimo rezultatas įrašomas į rezultatų masyvą.

Programa sudaryta įvertinti absoliutinei varžos vertei. Realus matavimo rezultatas stebėsenos įrenginiuose nustatomas kaip skirtumas tarp pradinio matavimo ir matavimo gauto pakeitus R_{akt} varžos dydį. Toks sprendimas leidžia geriau sekti realias neapibrėžtis ir jų atsiradimo priežastis, nes nesudėtinga pastebėti kada įvertis išeina už diapazono ribų

Sudarytoje įvertinimo programoje numatyta galimybė atlikti įvertinimą kas užduotą laiko tarpą, galimybė vidurkinti keleto įvertinimų rezultatus, įgyvendintas grafinis ir skaitinis rezultatų atvaizdavimas bei rašymas į tekstinį failą.

Atlikus eksperimentus nustatyta:

1. Įvertinimo rezultatai, kaip ir buvo tikėtasi, įtakojami komparatoriaus (stiprintuvo) nulio dreifų. Tačiau temperatūriniai nulio dreifai ($20 - 90$) $^{\circ}\text{C}$ temperatūrų diapazone, atliekant 8 skilčių kvantavimo lygių įvertinimą nepasireiškė ir rezultatų pokyčio dėl temperatūros pokyčio nustatyti nepavyko.

2. Tiltelio maitinimo įtampos kitimas iki 20 % užtikrina įvertinimo rezultatų stabilumą. Toks stabilumas nėra tenkinantis ir neatitinka teorinių metodo galimybių. Grandinės dalių analizė ir tyrimas parodė, kad to priežastis – komparatoriaus (stiprintuvo) nulio (gal balanso) taško pasislinkimas nuo 0 V įtampos. Subalansavus komparatorių tiltelio maitinimo įtampai kintant iki 90 % įvertinimo rezultatai lieka stabilūs. Taigi kaip ir laukta, varžos mažų pokyčių įvertinimo rezultatai nepriklauso nuo tiltelio maitinimo įtampos dreifų.

3. Sinfaziniai tiltelio pečių trukdžiai efektyviai slopinami ir nekeičia rezultato.

4. Nesinfaziniai triukšmai sukelia įvertinimo rezultatų išsibarstymą.

5. Įvertinimo rezultato vidurkinimas pagal (3.11) išraišką atitinkamai sumažina nesinfazinių triukšmų įtaką varžų mažų pokyčių įvertinimo rezultatui.

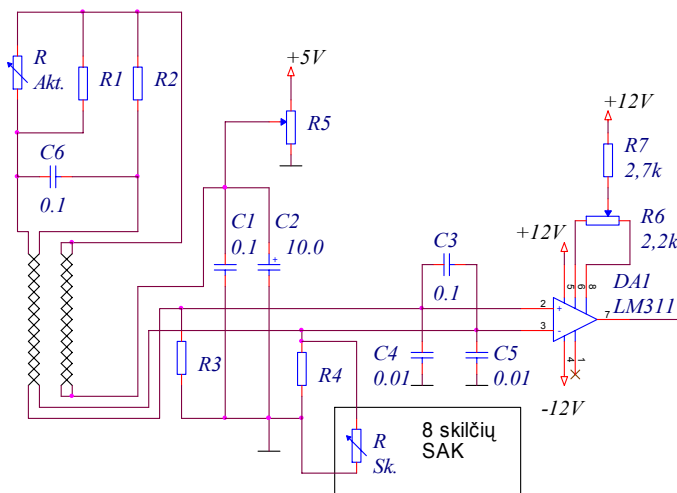
6. Nustatyta, kad komparatorius arti balanso taško linkės susižadinti. Susižadinimą sukelia aukštadažniai nesinfaziniai triukšmai komparatoriaus įėjime. Aukštadažnes dedamąsias blokuojančiomis bei sinfazinę AD signalą komparatoriaus įėjimų atžvilgiu sudarančiomis talpomis galima panaikinti komparatoriaus susižadinimą arti balanso taško.

7. Jutiklių prijungimas ilgu vytytos poros (5 CAT UTP) kabeliu (modeliuojant realias darbo sąlygas) nepakeičia įvertinimo rezultato. Signalų tyrimas parodė, kad komparatorius dirba stabiliai, triukšmai daugiausiai sinfaziniai ir efektyviai filtruojami diferencinio stiprinimo laipsniu.

8. Įvertinimo rezultato stabilumo tyrimas atliktas atliekant įvertinimus kas vieną minutę ir nekeičiant R_1 vertės. Tyrimo trukmė – 12 valandų. Atlikus 720 matavimų gauti, rezultatai yra stabilūs, jų vertės nei karto nepakito.

Kaip ir laukta, atliekant 8-ių skilčių kvantavimo lygio varžos mažų pokyčių įvertinimus, rezultato stabilumas labai didelis.

Eksperimentiškai ištirta grandinė su ilgu kabeliu ir talpomis pateikta 4.2 paveiksle. Laidai į skirtingus tiltelio pečius jungiami į vieną vytytą porą tam, kad kiek įmanoma labiau suvienodinti šiuos laidus veikiančius triukšmus (t.y. padaryti juos sinfaziniais), be to kabelio gale tarp šių laidų įjungiamas kondensatorius suvienodinantis aukštadažnių triukšmų fazes. Tuomet triukšmai efektyviai slopinami diferenciniame komparatoriaus įėjimo laipsnyje ir nustatymo rezultatai dėl prijungtų ilgų kabelių nepablogėjo.



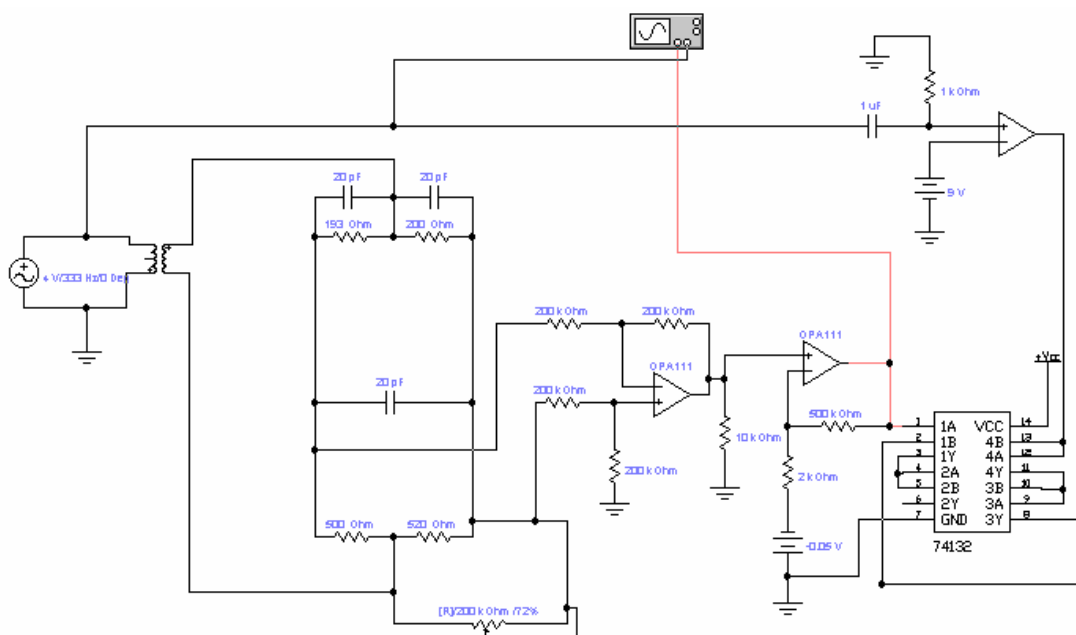
4.2 pav. Tiltelio maketo su ilgu kabeliu schema

Apibendrinus tyrimo rezultatus matoma, kad įvertinimo rezultato stabilumas yra labai didelis ir nepriklauso nuo tiltelio maitinimo įtampos. Kuo komparatoriaus nulinio perstūmimo (balanso) įtampa artimesnė 0 V, tuo mažesnę įtaką tiltelio maitinimo įtampa turi matavimo rezultatui. Be to, esant 8 skilčių kvantavimo lygio įvertinimui, triukšmai bei temperatūriniai parametrų nestabilumai įtakos rezultatui neturi. Nustatyta, kad tiltelio pečių nesinfazinius

aukštadažnius triukšmus būtina filtruoti talpomis siekiant išvengti komparatoriaus susižadinimo, kai tiltelis yra arti balanso. Jutiklių prijungimui naudojant ilgą kabelį (> 10 m), įvertinimo rezultatas nekinta, o stabilumas išlieka. Į grandinę dirbtinai įvedus nesinfazinius triukšmus, jų įtaką įvertinimo rezultatui efektyviai nuslopinama vidurkinant įvertinimo rezultatus. Galima daryti išvadą, kad toks įrenginys pilnai tinka naudoti konstrukcijų stebėsenai.

4.2. Parazitinių parametru įtakos Wheatstone'o tiltelio balanso taško įvertinimui tyrimas

Tam kad patikrinti galimybes sukurti laboratorinį konstrukcijų tyrimo įtaisą, naudo-
jantį Wheatstoun'o tiltelį maitinamą kintamąja srove eksperimentiškai buvo tiriama
parazitinių reaktyviųjų parametrų įtaka. Šiuo eksperimentiniu tyrimu siekiama sumodeliuoti
tiltelio ekvivalentinę schemą, kai įvertinami jo ir jungiamųjų laidų reaktyvieji parametrai. Be
to, siekiama iširti, kokią įtaką šie parametrai turi įvertinimo kokybei esant įvairiems tiltelių
maitinančios įtampos dažniams. Modeliavimui naudojamas EWB 5.0 paketas, skirtas analogi-
nių ir skaitmeninių grandinių modeliavimui ir tyrimui. Tyriama grandinė pateikta
4.3 paveiksle.

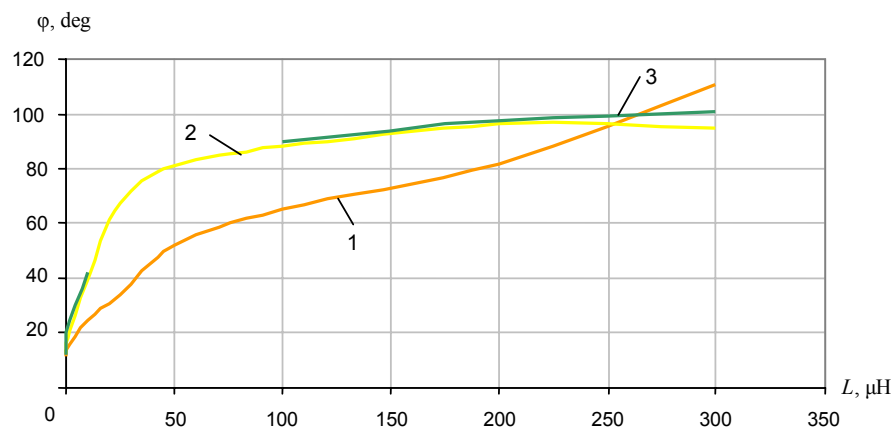


4.3 pav. Balansuojamo Wheatstone'o tiltelio modelis sudarytas EWB 5.0 programų paketu

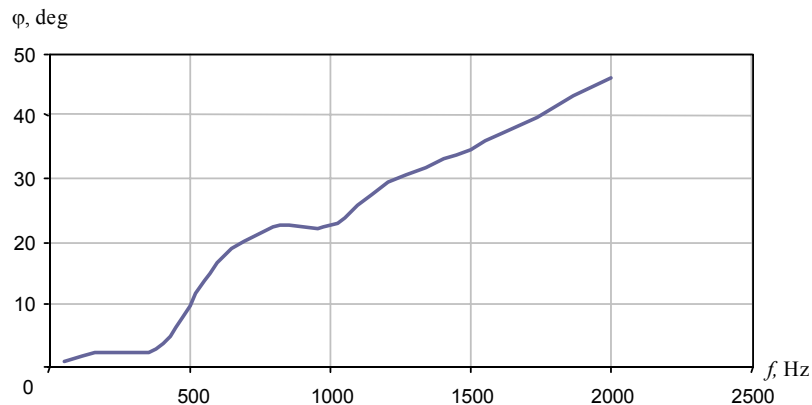
Aktyvusis ir pasyvusis (kompensuojantysis) jutikliai yra nutolę nuo įvertinimo mazgo, todėl jie prijungiami laidais, kurių ilgis gali siekti iki 10 m. Prijungus tokį kabelį, dėl kabelio parametrų – aktyvinės varžos, parazitinių induktyvumų ir talpų, gali atsirasti varžų mažų pokyčių įvertinimo paklaidos. Parametrų dydžiai įvairiems kabeliams pateikti 4.1 lentelėje.

Talpa tarp dviejų šalia esančių vytų porų sudaro 40...150 pF 10 m ilgio laidams. Ekranuotam telefoniniam kabeliui, talpa tarp vieno iš laidų ir ekrano sudaro $\sim 3100 \text{ pF} / 10 \text{ m}$ ($\sim 2917 \text{ pF} / 10 \text{ m}$ skaičiuota iš ilgo kabelio) kabelio.

nedidelė. Elementų vertėms pateiktoms 4.4 paveiksle, fazių posūkis lygus $51,8^\circ$. Fazės kampo priklausomybė nuo induktyvumo L pateikta 4.5 pavaveiksle, o nuo maitinimo įtampos dažnio 4.6 paveiksle.

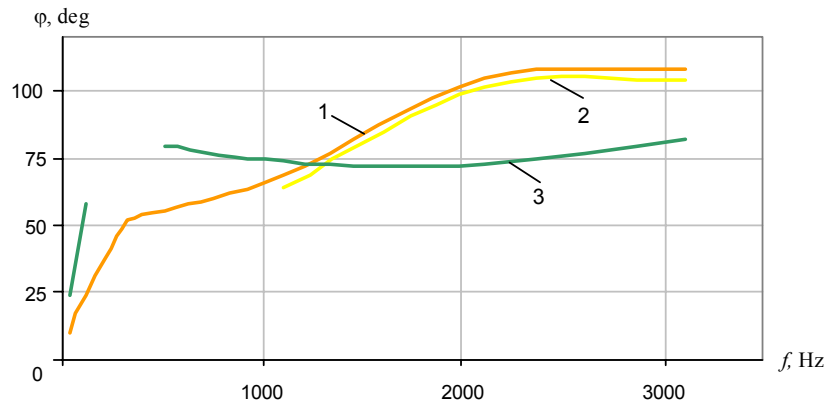


4.5 pav. Fazės posūkio kampo priklausomybė nuo laidininkų parazitinio induktyvumo L dydžio, kai talpa tarp laidininkų: 1 – 100 pF; 2 – 20 pF; 3 – 500 pF

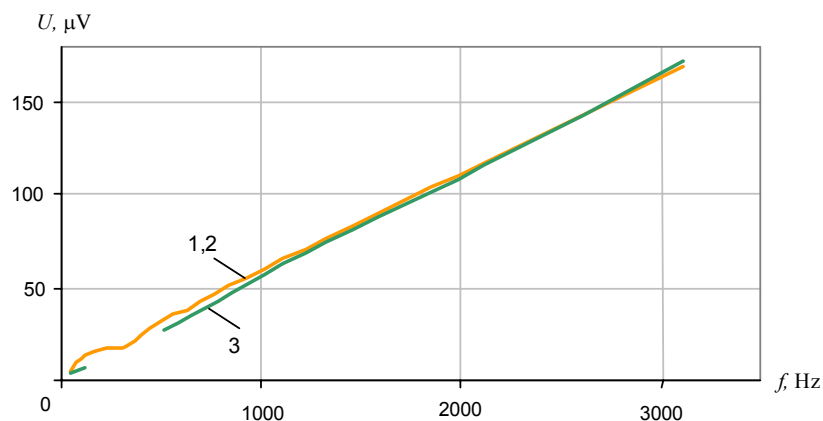


4.6 pav. Fazės kampo priklausomybė nuo generatoriaus dažnio, kai talpų vertės tarp laidininkų C lygios 500 pF, kitų – 20 pF ir L vertės – $0,5 \mu\text{H}$

Iš 4.7 ir 4.8 paveiksluose matoma, kad augant dažniui didėja fazės kampas tarp tiltelio įėjimo ir išėjimo įtampų bei tiltelio liekamojo nesuderinimo įtampa. Fazių kampų skirtumai esant dideliems dažniams yra surišti su liekamosios tiltelio nesuderinimo įtampos augimu didėjant dažniui ir balanso ekstremumo aštrumo mažėjimu. Augant dažniui didėja liekamoji nesuderinimo įtampa tiltelio išėjime. Didinant dažnį vis sunkiau nustatyti tiltelio balanso momentą (minimali įtampa didėja, keičiant balanso varžas vis mažesnis įtampos pokytis, sunku nustatyti momentą, kada tiltelis yra perbalansuojamas).

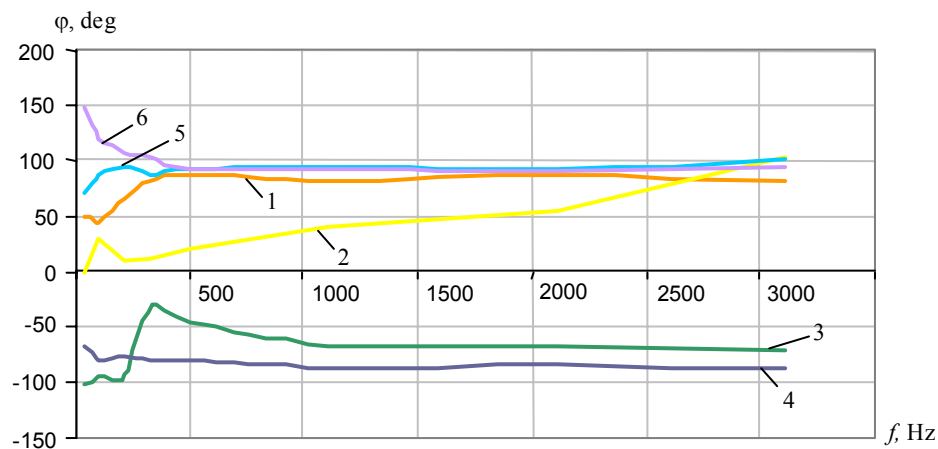


4.7 pav. Fazės posūkio kampo tiltelio išėjime priklausomybė nuo maitinimo įtampos dažnio, kai $L = 20 \mu\text{H}$, $C_1 = 500 \text{ pF}$, $C_g = 20 \text{ pF}$ ir esant skirtingoms C_k vertėms: 1 – $C_k = 20 \text{ pF}$; 2 – $C_k = 50 \text{ pF}$; 3 – $C_k = 200 \text{ pF}$

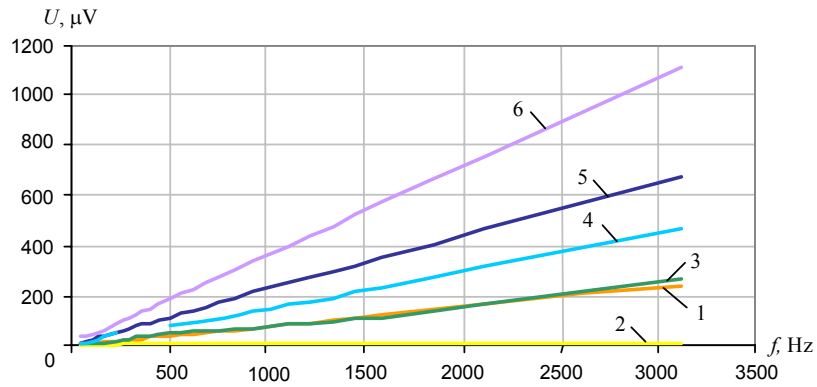


4.8 pav. Tiltelio liekamojo nesuderinimo įtampos amplitudės priklausomybė nuo maitimo įtampos dažnio, kai $L = 20 \mu\text{H}$, $C_1 = 500 \text{ pF}$, $C_g = 20 \text{ pF}$ ir esant skirtingoms C_k vertėms: 1 – $C_k = 20 \text{ pF}$; 2 – $C_k = 50 \text{ pF}$; 3 – $C_k = 200 \text{ pF}$

Kaip matoma iš grafikų 4.9 ir 4.10 paveiksluose, didėjant dažniui tiltelio liekamoji įtampa auga, išskyrus vieną išderinimo dydį, t.y. kai $L_1 < L_2$ 5%. Fazės posūkio kampai, esant mažiems dažniams, labai priklauso nuo dažnio ir nedaug kinta, esant didesniems dažniams. Kai $L_1 < L_2$ ir šis išderinimas sudaro 5%, fazė tolygiai didėja visame dažnių diapazone.



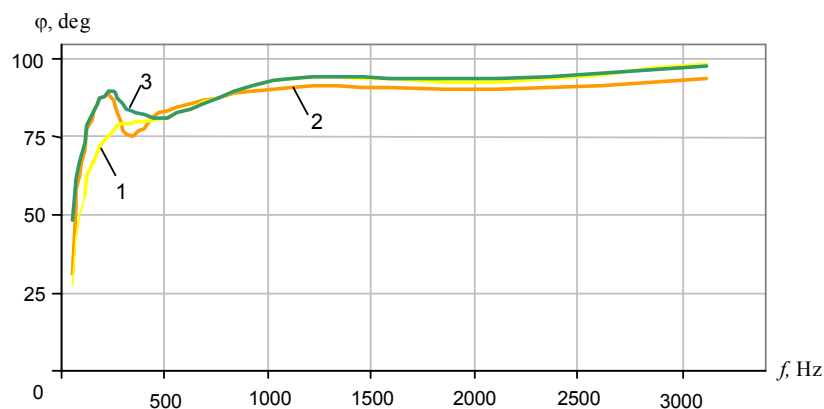
4.9 pav. Tiltelio išėjimo signalo fazės kampo priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingoms laidų induktyvumų L_1 ir L_2 vertėms: 1 – $L_1 = L_2$, 2 – $L_1 < L_2 = 5 \%$, 3 – $L_1 < L_2 = 10 \%$, 4 – $L_1 < L_2 = 20 \%$, 5 – $L_1 > L_2 = 5 \%$, 6 – $L_1 > L_2 = 20 \%$



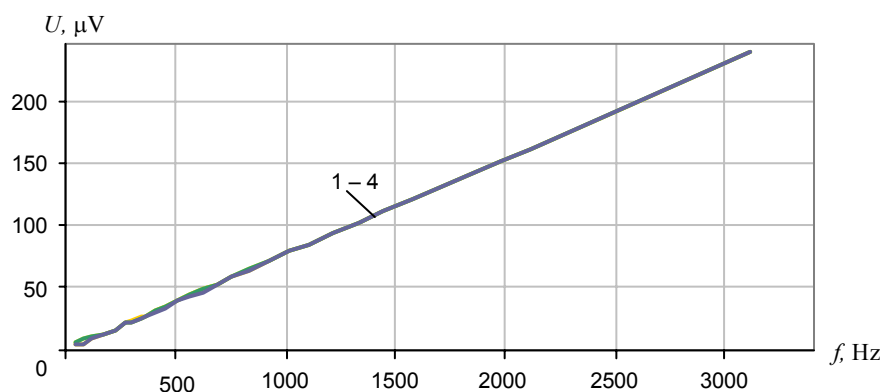
4.10 pav. Tiltelio suderinimo liekamosios įtampos dydžio priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingoms laidų induktyvumų L_1 ir L_2 vertėms: 1 – $L_1 = L_2$, 2 – $L_1 < L_2 = 5\%$, 3 – $L_1 < L_2 = 10\%$, 4 – $L_1 < L_2 = 20\%$, 5 – $L_1 > L_2 = 5\%$, 6 – $L_1 > L_2 = 20\%$

Reikia pastebėti, kad augant dažniui kinta fazės kampas, kinta likutinė nesuderinimo įtampa. Tačiau tiltelio balansavimo varžos R dydis nekinta (t.y. kintant dažniui balanso sąlygos nekinta). Taigi balanso sąlygos lieka tos pačios, tačiau tiltelio išėjimo signalas balanso momentu yra skirtingas, nei idealiu atveju (kai neveikia parazitiniai parametrai). Taigi įgyvendinant sistemas su kintama įtampa balansuojamu tilteliu, būtina imtis priemonių teisingam balanso taško nustatymui įvertinus parazitinių parametrų įtaką. Kai fazinio detektoriaus (tiltelio balanso sąlygos nustatymo) funkcija įgyvendinama SSP algoritmu, tai padaryti nėra sudėtinga, nes gali būti analizuojama keletas skirtingų įėjimo signalo parametrų įvairiai keičiant tiltelį balansuojančio rezistoriaus varžą. Geriausia tokiu atveju tiltelio balanso sąlygą tikrinti varijuojant balansavimo rezistorių apie numanomą balanso tašką ir siekiant nustatyti, kokiam valdymo kodui esant tiltelio disbalanso signalo nesuderinimo įtampa esti minimali.

Fazės posūkio kampas tokiu atveju įvertinimo rezultatui didelės įtakos neturi.

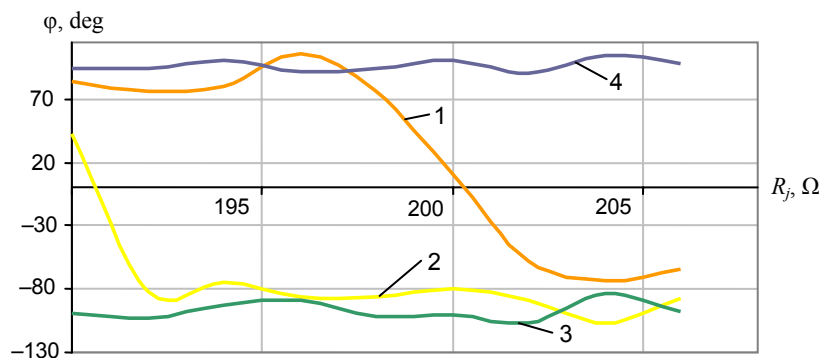


4.11 pav. Tiltelio išėjimo signalo fazės kampo priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingoms laidų nuotėkio talpos C_1 vertėms: 1 – $C_1 = C_2$, 2 – $C_1 < 20\%$, 3 – $C_1 > 20\%$, 4 – $C_1 < 5\%$

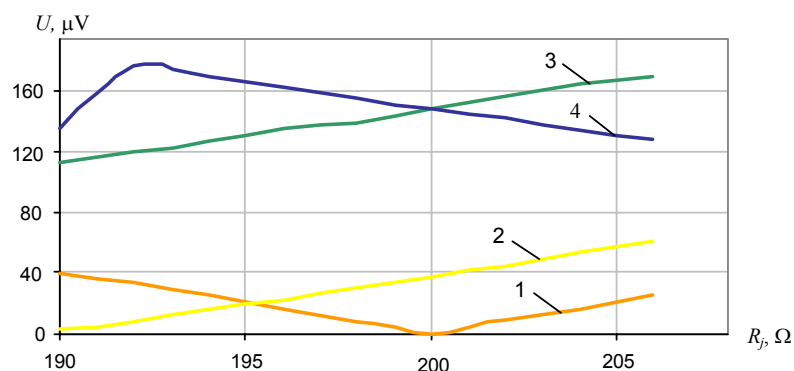


4.12 pav. Tiltelio suderinimo liekamosios įtampos dydžio priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingoms laidų nuotėkio talpos C_1 vertėms: 1 – $C_1 = C_2$, 2 – $C_1 < 5\%$, 3 – $C_1 < 20\%$, 4 – $C_1 > 20\%$

Iš 4.11 ir 4.12 paveikslų matyti, kad laidininkų parazitinės talpos dydis nedaro didelės įtakos tiltelio darbui.

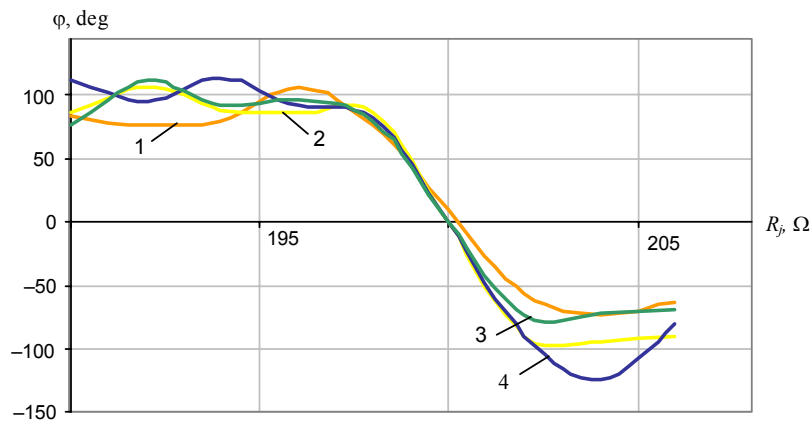


4.13 pav. Tiltelio išėjimo signalo fazės kampo priklausomybė nuo jutiklio varžos, esant skirtingoms laidų induktyvumo L vertėms: 1 – $L_1 = L_2$, 2 – $L_1 < 5\%$, 3 – $L_1 < 20\%$, 4 – $L_1 > 20\%$

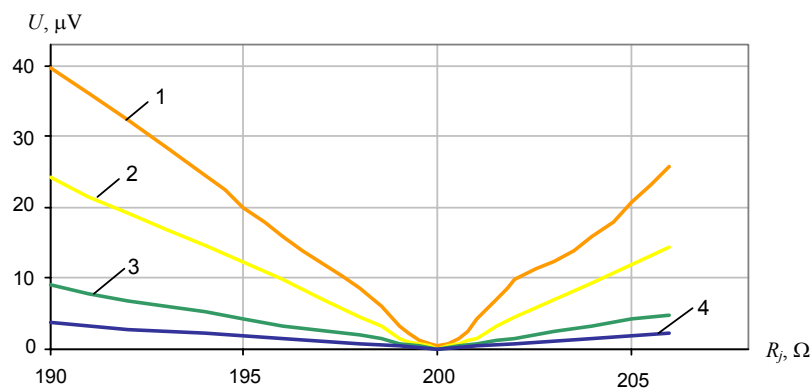


4.14 pav. Tiltelio suderinimo liekamosios įtampos dydžio priklausomybė nuo jutiklio varžos vertės, esant skirtingoms laidų induktyvumo L vertėms: 1 – $L_1 = L_2$, 2 – $L_1 < 5\%$, 3 – $L_1 < 20\%$, 4 – $L_1 > 20\%$

Iš 4.13 ir 4.14 paveikslų matoma, kad tiltelio balanso taškas išlieka nepakitęs tik tuomet, kai parazitiniai L parametrai abiejuose tiltelio pečiuose yra lygūs. Išlaikant šią sąlygą galima gauti net tiltelio balansavimo liekamąją įtampą artimą 0 V , o fazės kampas keičia ženklą esant tiltelio balansui.



4.15 pav. Tiltelio išėjimo signalo fazės kampo priklausomybė nuo jutiklio varžos, esant skirtingiems tiltelio maitinimo įtampos dažniams: 1 – 511 Hz, 2 – 311 Hz, 3 – 111 Hz, 4 – 44 Hz



4.16 pav. Tiltelio suderinimo liekamosios įtampos dydžio priklausomybė nuo jutiklio varžos vertės, esant skirtingiems tiltelio maitinimo įtampos dažniams: 1 – 511 Hz, 2 – 311 Hz, 3 – 111 Hz, 4 – 44 Hz

Kai parazitinių parametrų balansas išlaikomas, iš 4.15 ir 4.16 paveikslų matoma, kad kintant dažniui balanso taškas iš esmės nekinta ir yra kai $R_j = 200 \Omega$. Tačiau tiltelio išėjimo signalo amplitudės balansavimo metu skiriasi. Kuo staigiau kinta liekamoji įtampa, tuo paprasčiau užfiksuoti tiltelio balanso tašką.

Taigi tiltelį maitinant kintama įtampa, tampa gana sudėtinga įvertinti parazitinių parametrų pakeičiamą tiltelio balanso momentą. Kadangi atliekami varžų mažų pokyčių įvertinimai, tai didelės įtakos neturi, nes parazitiniai parametrai išlieka stabilūs įvertinimo metu (absoliutinės vertės postūmis pokyčio nustatymui įtakos neturi). Tačiau atsiranda pavojus, kad pasikeitus balanso taškui pasislinks įvertinimo diapazonas. Be to, tampa sudėtinga tiksliai nustatyti balanso tašką dėl mažėjančios liekamosios įtampos. Tuomet žymiai didesnę įtaką įvertinimo rezultatams turi nesinfaziniai triukšmai tiltelyje. Taigi norint išlaikyti pakankamą įvertinimo kokybę, galima naudoti SSA priemonės signalų apdorojimui. Įvertinus parazitinių parametrų įtaką ir pakoregavus fazinio detektoriaus algoritmą galima ženkliai sumažinti įvertinimo neapibrėžtis. Tačiau, kaip jau minėta, šis būdas gana brangus ir

gali būti naudojamas kai reikia ypač didelės varžų mažų pokyčių įvertinimo skiriamosios gebos.

4.3. Keitiklių eksperimentinis tyrimas

Eksperimentinių tyrimų tikslas – išsiaiškinti pasiūlytų keitiklių, įrenginių ir skaitmeninio signalų apdorojimo realias galimybes praktiniam IG dinaminių parametrų nustatymui. Buvo pagaminti ir ištirti pasiūlytų daugiakanalių keitiklių su komutatoriais įėjime ir išėjime maketai pagal 3.1, 3.2 ir 3.9 paveiksluose pateiktas schemas. Daugiakanalių SK su komutatoriumi įėjime maketui įgyvendinti buvo panaudoti integriniai komutatoriai K590KN5. Buvo tirama, kiek kanalų keitiklį galima gauti naudojant vieną ir kitą daugiakanalių keitiklių schemą.

Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad daugiakanalių kompensacinių keitiklių su komutatoriumi išėjime kanalų skaičiui pasiekus 6 – 12 kanalų (priklausomai nuo naudojamo stroboskopinių impulsų generatoriaus galios, kuri buvo keičiama, keičiant generatoriaus maitinimo įtampą), stroboskopinių impulsų amplitudė tampa nepakankama normaliam keitiklio darbui. Kaip ir nustatyta analizės metu, didinant kanalų skaičių stroboskopinių keitiklių dinaminiai parametrai nesikeičia. Buvo matuojama šių keitiklių savųjų triukšmų lygis. Priklausomai nuo naudojamo stroboskopinių impulsų formuotuvo (SIF) tipo, triukšmų įtampos lygis sudarė nuo (40 – 60) μV (hibridinės mikroschemos SIF) iki (60 – 100) μV (SIF surinktam ant spausdintinės plokštės).

Buvo tirtas daugiakanalio SK maketas su komutatoriumi įėjime (surinktas pagal 3.2 pav. pateiktą schemą) ir tikrinta stroboskopinio impulso amplitudės priklausomybė nuo prijungtų SK kanalų skaičiaus. Nuosekliai didinant kanalų skaičių iki 20, net ir nustačius minimalią stroboskopinių impulsų generatoriaus galią, stroboskopinio impulso amplitudės mažėjimo nustatyti nepavyko. Todėl galima daryti išvadą, kad eksperimento rezultatai patvirtino teorines prielaidas ir keitiklių su komutatoriumi įėjime kanalų skaičius gali būti gana didelis, nes vienu metu veikia ir stroboskopinių impulsų generatoriaus energiją naudoja tik du keitiklio kanalai.

Keitiklio elementų nominalai parinkti lygūs skaitmeninio modeliavimo metu nustatytoms vertėms. Prie SK įėjimo prijungus generatoriaus išėjimo signalą su 1 ns trukmės frontais, SK išėjime signalo frontų pailgėjimo nustatyti nepavyko. Taigi integrinių komutatorių poveikis stroboskopinio keitiklio, kurio elementų parametrai parinkti pagal modeliavimo rezultatus, darbui yra nežymus. Tokiu būdu daugiakanaliai kompensaciniai SK su komutatoriumi įėjime tinka naudoti daugiakanaliuose IG dinaminių parametrų nustatymo įtaisuose.

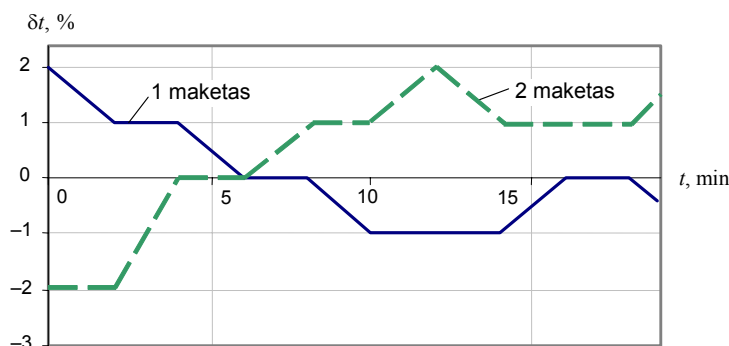
4.4. Signalų vėlinimo trukmės įrenginio eksperimentinis tyrimas

Siekiant ištirti daugiakanalių keitiklių galimybes pagaminti bandomieji signalų vėlinimo trukmės mažų pokyčių įvertinimo įrenginių maketai pagal 3.8 paveiksle pateiktą schemą. Testinių impulsų dažnis – 10 MHz, įvertinama signalo vėlinimo trukmė nuo 0,5 ns iki 50 ns, daugiakanalis keitiklis turėjo 12 kanalų.

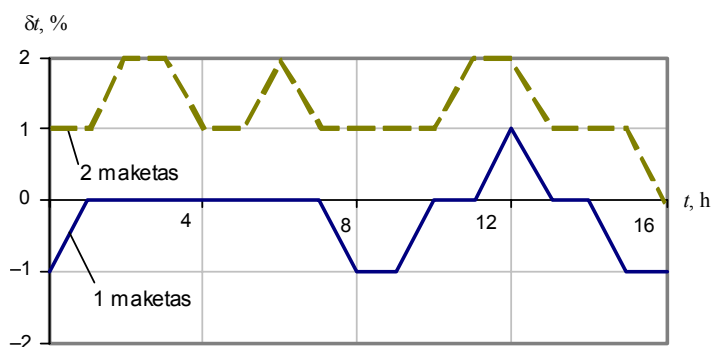
Vėlinimo trukmės įvertinimas kalibruotais bendraašiais kabeliais, kuriuose signalo vėlinimo trukmė nuo 0,56 ns iki 18,3 ns, parodė, kad vėlinimo trukmės neapibrėžtys neviršijo $\pm 3\%$. Neapibrėžtys tarp dviejų maketų taip pat neviršijo 3%.

Trumpalaikiai ir ilgalaikiai įrenginių maketų stebėjimai parodė, kad atsitiktinės neapibrėžtys neviršija $\pm 2\%$ (4.17 pav.). Vieno parametro įvertinimo trukmė be IG įstatymo į kontaktorių sudaro apie 50 ms. Visų vieno IG parametrų įvertinimas (nuo 4 iki 32 skirtingų parametrų) trunka nuo 0,2 s iki 1,5 s.

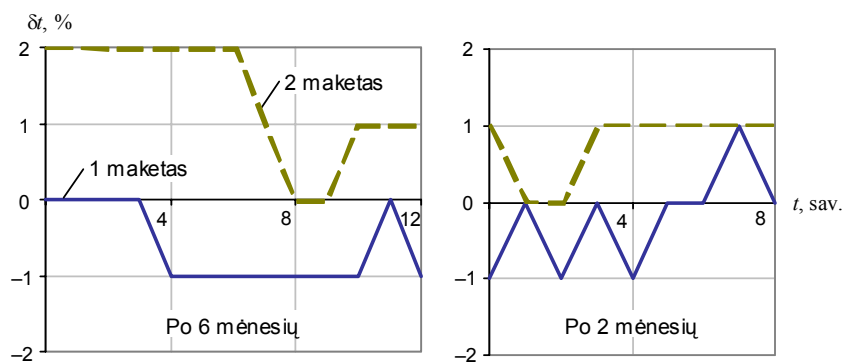
Iš 4.17 paveiklo pateikto signalo vėlinimo trukmės trumpalaikio įvertinimo tyrimo matoma, kad maketų įšilimo laikas po įjungimo neviršija 5 min. Įdiegtos kvarcinių generatorių skirtuminio dažnio automatinio reguliavimo ir SK išėjimo signalų lygio automatinio derinimo priemonės leidžia užtikrinti aukštą ilgalaikį rezultatų stabilumą ilgą laiką (4.18 pav.) bei rezultatų atkartojamumą ir stabilumą po ilgo maketų saugojimo (4.19 pav.).



4.17 pav. Signalo vėlinimo trukmės įvertinimo trumpalaikis stabilumas



4.18 pav. Signalo vėlinimo trukmės įvertinimo ilgalaikis stabilumas



4.19 pav. Sklidimo vėlinimo trukmės įvertinimas po ilgalaikio saugojimo

Matyti, kad sukurtų daugiakanaalių kompensacinių stroboskopinių pikinio detektavimo keitiklių panaudojimas pasiūlytoje IG dinaminių parametrų nustatymo testerius, turinčius santykinai paprastą struktūrą ir gerus parametrus.

4.5. SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo eksperimentinis tyrimas

Eksperimento pagrindinis tikslas tai galimybių skaitmeniniu būdu apdoroti tiriamąjį SAK išėjimo signalą pakeistu laiko masteliu taip, kad taptų įmanoma patikimai nustatyti 12 ir daugiau skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmę, naudojant anksčiau ištirtą daugiakanaalį kompensacinį stroboskopinį keitiklį.

Šiam tikslui buvo priimti tiriant daugiakanaalį kompensacinį stroboskopinį keitiklį su komutatorium išėjime gauti rezultatai įvertinant signalo stiprinimo ir apdorojimo keitiklyje ypatybes.

Siekiant ištirti skaitmeninius nusistovėjimo trukmės algoritmus LabView paketu buvo sumodeliuotas idealus tiriamojo SAK išėjimo signalas po pakeitimo. Sudarytas signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo algoritmas ir įvertinta šio signalo nusistovėjimo trukmė. Toliau LabView paketu sumodeliuoti signalo iškraipymai. Signalų iškraipymai sumodeliuoti kaip signalo laikinių verčių nestabilumai, amplitudinių verčių nestabilumai bei kanalo generuojami triukšmai.

LabView priemonėmis sudaryta galimybė keisti signalo iškraipymų vertes ir tirti jų įtaką įvertinimo rezultatui. Nustatyta, kad neapdorojus tiriamojo signalo gaunamos pakankamai didelės paklaidos, kurios labiausiai įtakojamos keitiklio savųjų triukšmų ir tiriamojo signalo amplitudės nestabilumo. Eksperimento metu nustatyta, kad nesant amplitudės nestabilumo, o triukšmų lygiui keitiklio išėjime neviršijant 15 mV galima gauti apie 10 % įvertinimo neapibrėžtis. Įvedus amplitudės nestabilumą arba bent kiek padidinus (iki 25 mV) triukšmų amplitudę, neapibrėžtys ženkliai išauga (7 priede, bandymai Nr. 8, 12, 32).

Siekiant ištirti 3.3.2 skyrelyje numatytų skaitmeninių signalo apdorojimo priemonių efektyvumą, jos buvo pritaikytos kanalo trukdžių paveiktam signalui apdoroti. Algoritmų

įgyvendinimo priemonės LabView paketu pateiktos 8-ame priede. Taip pat pateikti naudotojo langai ir valdymo priemonės ir rezultatų pateikimo pavyzdžiai (4.20 pav.).

Nustatyta, kad pritaikius 3.3.2 skyrelyje suprojektuotas signalo apdorojimo priemones galima pasiekti ženklus įvertinimo rezultato pagerėjimo, kuris didėjant vidurkinamų realizacijų skaičiui dar gerėja. Taip pavyko pasiekti apie 1 % įvertinimo neapibrėžčių lygį net tais atvejais, kai nevidurkinto signalo neapibrėžtys viršijo 144 % ir daugiau (priedas Nr. 7, bandymas Nr. 32).

Esant 0,2 V signalo amplitudės nestabilumui, 50 signalo imčių atsitiktiniam laiko nestabilumui, 60 mV triukšmų lygiui keitiklio išėjime (apie 360 μ V keitiklio įėjime), kuris yra 3 kartus didesnis už 20 mV atskaitos lygius, vidurkinant 100 signalų pavyksta pasiekti ne didesnę kaip 1 % nusistovėjimo trukmės įvertinimo neapibrėžtį per 50 įvertinimų (priedas Nr. 7, bandymas Nr.1).



4.20 pav. SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo LabView programa rezultatų pavyzdys

Šie rezultatai rodo, kad net supaprastinus įrenginio schemą ir tuo būdu padidinus įvertinimo trakto (SK, LN ir kt. elementų) įnešamus trukdžius galima pasiekti pakankamai gerus įvertinimo rezultatus, pasiekiant ne didesnę kaip 1 % neapibrėžčių lygį, kai iš ASK gauti

signalai apdorojami skaitmeniniu būdu. Taigi kaip ir varžos mažų pokyčių įvertinimo atveju, skaitmeninis signalų apdorojimas leidžia pasiekti gerų rezultatų.

Sukurtas matavimo algoritmas ir LabView programa leidžia tirti nusistovėjimo trukmės skaitmeninio signalo apdorojimo algoritmų efektyvumą ir galimybes. Galima tirti kiekvieno trukdžių parametro įtaką atskirai, ir kartu, keisti trukdžių įtaką ir lygį, numatyti įvertinimo neapibrėžtis ir atlikti statistinę analizę. Tokia analizė bus reikalinga kuriant sparčiųjų daugelio skilčių SAK nusistovėjimo trukmės nustatymo įrenginius. Ši programa leidžia atlikti išsamesnius tyrimus, kurie nėra šio darbo dalis.

Sukurta programa leidžia prijungti realų SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo įrenginį prie AK, įvesti signalus skaitmenine forma iš karto apdoroti šiuos signalus ir gauti įvertinimo rezultatus. Taigi ši autoriaus sukurta programa su nedideliais pataisymais skirtais efektyvesniam operatoriaus darbui gali būti naudojama SAK nusistovėjimo trukmių įvertinimo įrenginiuose.

4.6. Eksperimentinių tyrimų išvados

1. Pagamintas ir ištirtas Wheatstone'o tiltelio su automatinio skaitmeniniu balansavimu varžos mažų pokyčių įvertinimo įtaiso maketas. Tyrimo metu pasiūlyta prie ilgų jungimo kabelių prijungti papildomas talpas triukšmams slopinti. Eksperimentų rezultatai patvirtino, kad maketo skiriamoji geba ne žemesnė kaip 2^8 , ir įrenginys pagamintas pagal naudotą eksperimentuose schemą gali būti naudojamas konstrukcijų stebėsenai.

2. Ištirta kintamąja įtampa maitinamo Wheatstone'o varžų tiltelio parazitinių parametrų įtaka balansui ir nustatyta tiltelio parametrų įtaka balanso taško vietai ir įvertinimo patikimumui. Įrodyta, kad skaitmeniniu būdu apdorojant disbalanso signalą galima pasiekti pakankamą laboratoriniams konstrukcijų deformacijų tyrimams kokybę.

3. Eksperimentinis daugiakanalių stroboskopinių keitiklių tyrimas parodė, kad analitinės išvados teisingos, o skaitmeninio modeliavimo būdu parinkti elementų parametrai tinkami: sukurtuose SK maketuose signalai su 1 ns trukmės frontais keičiami neiškraipant frontų trukmės; keitiklių su komutatoriumi įėjime kanalų skaičius viršija 20; keitiklių su komutatoriumi išėjime kanalų skaičius neviršija 10; kompensacinių keitiklių savųjų triukšmų lygis nesiekia $(40 - 100) \mu V$.

4. Pasiūlyto daugiakanalio IG vėlinimo trukmės įvertinimo įrenginio maketų tyrimai parodė, kad įrenginio įvertinimo rezultatų tiek trumpalaikis tiek ilgalaikis nestabilumas yra pakankamai mažas ir neviršija $\pm 2\%$, o įvertinimo neapibrėžtis neviršija $\pm 3\%$. Šie įrenginiai tinka sparčiųjų IG dinaminį parametrų nustatymui.

5. Sukurta skaitmeninio signalo apdorojimo programa „LabView“ paketu SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo eksperimentiniam tyrimui. Skaitmeninio apdorojimo priemonėmis pavyko pasiekti, kad skaitmeniškai generuoto, trukdžių paveikto nusistovėjimo trukmės įvertinimo signalo, kurio trukdžių lygis nustatytas tris kartus didesnis už ištirto daugiakanalio kompensacinio stroboskopinio keitiklio išėjimo signalo trukdžius, nusistovėjimo trukmės įvertinimo neapibrėžtys neviršytų 1%, kai neapdoroto signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo neapibrėžtys siekia 140%. Taigi pasiūlytas automatizuotas sparčiųjų 12 ir daugiau skilčių SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo įrenginys tinka sėkmingam įgyvendinimui.

5. DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

1. Sukurtas ir išanalizuotas Wheatstone'o tiltelio automatinis skaitmeninis balansavimo metodas varžų mažų pokyčių įvertinimui. Sudaryta uždara, save reguliuojanti sistema, kurioje tiltelio balansavimui naudojamas SAK su R-2R matrica. Įrodyta, kad varžos mažų pokyčių įvertinimo rezultatai sistemoje nepriklauso nuo tiltelio maitinimo šaltinio įtampos stabilumo. Balansavimo metodas leidžia sumažinti išorinių atsitiktinių poveikių įtaką įvertinimo rezultatui, išvengti daugelio trūkumų, būdingų klasikiniams varžų mažų pokyčių įvertinimo įtaisams su nebalansuojamu Wheatstone'o tilteliu. Sukurta daugiakanalė sistema leidžia nesudėtingai, mažais kaštais įgyvendinti varžos mažų pokyčių įvertinimą. Sistemoje jungiamųjų laidų ir jutiklių komutatorių parametrai neįtakoja įvertinimo rezultatų. Sukurtos varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemos privalumai patvirtinti eksperimentais.

2. Įrodytos galimybės supaprastinti varžų mažų pokyčių įvertinimo mazgo grandinę naudojant skaitmeninių signalų apdorojimo priemones. Nustatyta, kad naudojant pasiūlytus ir žinomus rezultatų patikimumo didinimo metodus – daugiakartinius įvertinimus su rezultatų vidurkinimu, stiprintuvo nulinio dreifų kompensavimą etalonais, analogišku stiprintuvu ir pan., pasiekama 12–14 skilčių įvertinimo skiriamoji geba, kas atitinka 0,024 % – 0,006 % varžos įvertinimo neapibrėžtį. Tai tenkina reikalavimus konstrukcijų laboratorinių tyrimų įrangai. Nustatyta, kad įgyvendinant varžos mažų pokyčių įvertinimo sistemas su mikrovaldikliu pavyksta sumažinti sistemos sudėtingumą.

3. Modeliuojant kintamąją įtampą maitinamo Wheatstone'o tiltelio parazitinių parametrų įtaką įrodyta, kad, norint patikimai įvertinti varžų mažus pokyčius, būtina imtis papildomų priemonių, kurios paprasčiausiai įgyvendinamos tiltelio išėjimo signalus apdorojant skaitmeninėmis priemonėmis. Ištirta kintamąją įtampą maitinamo Wheatstone'o tiltelio parazitinių parametrų įtaka balanso taško nustatymui. Nustatyta skirtingų parametrų įtaka balanso taško vietai ir įvertinimo patikimumui.

4. Pasiūlytos naujos 2^{12} ir 2^8 skiriamųjų gebų varžų mažų pokyčių įvertinimo mazgo struktūrinės schemos, skirtos konstrukcijų laboratoriniams tyrimams ir jų stebėsenai. Pagamintas, ištirtas 2^8 skiriamosios gebos varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemos maketas. Tyrimo metu nustatyti būdai jungiamųjų kabelių inertiškumams slopinti. Apskritai eksperimentais įrodyta, kad jis tinka konstrukcijų stebėsenai.

5. Sukurtas daugiakanalis stroboskopinis keitiklis bei daugiakanalis dinaminių parametrų testeris. Jame panaudotas daugiakanalių varžų mažų pokyčių įvertinimo sistemos sukūrimo principas.

6. Sudaryta nauja sparčiųjų loginių elementų, trigerių, registų, skaitiklių daugiakanalė signalų vėlinimo trukmių įvertinimo įrenginio struktūrinė schema, kuri yra palyginti paprasta, nenaudojanti aukštadažnių komutatorių ir bendraašių kabelių. Jai sudaryti panaudotas naujai sukurtas ir ištirtas daugiakanalis kompensacinis keitiklis.

7. Eksperimentinis daugiakanalių stroboskopinių keitiklių tyrimas parodė, kad keitikliai su komutatoriumi išėjime gali turėti 6-12 kanalų, o keitiklių su komutatoriumi įėjime kanalų skaičius praktiškai neribotas. Daugiakanalių keitiklių su komutatoriumi įėjime ir modeliavimo metu gautais elementų parametrais, dinaminės savybės išlieka tokios pat kaip vienkanalio stroboskopinio keitiklio.

8. Nustatyta, kad mažų amplitudės pokyčių bei mažų laiko intervalų pokyčių įvertinimo patikimumui padidinti reikia naudoti skaitmeninio signalų apdorojimo metodus, naudotus varžų mažų pokyčių įvertinimui. Skaitmeninių metodų taikymas išsprendžia įvertinimo rezultatų įsiminimo ir kaupimo uždavinį. Parodyta, kad tik panaudojus kompensacinius pikinio detektavimo stroboskopinius keitiklius ir pritaikius skaitmeninį signalų apdorojimą sukuriama automatizuoti sparčių daugelio skilčių SAK dinaminių parametrų įvertinimo įrenginiai.

9. Sudaryta nauja nusistovėjimo trukmės įvertinimo įrenginio su skaitmeniniu signalo apdorojimu ir skaitmeniniu nusistovėjimo trukmės nustatymu struktūrinė schema. SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo eksperimentiniam tyrimui sukurta skaitmeninio signalo apdorojimo programa „LabView“ paketu. Skaitmeninio apdorojimo priemonėmis pavyko pasiekti, kad trukdžių paveikto nusistovėjimo trukmės įvertinimo signalo įvertinimo neapibrėžtys neviršytų 1%, kai tuo tarpu neapdoroto signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo neapibrėžtys siekia 140%.

10. Atliktais daugiakanalių stroboskopinių keitiklių eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad teorinės išvados ir skaitmeninio modeliavimo būdu parinkti elementų parametrai yra teisingi. Kanalų skaičių padidinus iki 20, stroboskopinio impulso amplitudės sumažėjimo nenustatyta. Keitiklis neiškraipo į jį siunčiamų impulsų su 1 ns trukmės frontais. Signalų vėlinimo trukmės įvertinimo įrenginių maketų stebėjimai parodė, kad įrenginio įvertinimo rezultatai stabilūs – jų nestabilumas neviršija $\pm 2\%$. Todėl pagal pasiūlytą daugiakanalę IG dinaminių parametrų įvertinimo schemą sukurti testeriai tinka sparčių skaitmeninių IG dinaminių parametrų įvertinimui.

LITERATŪRA

1. Curtis D. Johnson. Process Control Instrumentation Technology. Prentice Hall PTR 1997. 639 p.
2. Department of Mechanical and Nuclear Engineering. Stress, Strain and Strain Gages. The Pensilvania State University WEB site. Prieiga per internetą: <http://www.me.psu.edu/me82/Learning/Strain/strain.html>. Paskutinį kartą pasiektas 2005.02.05.
3. Grundig, L., Moncrieff, E., Schewe, H. On the Feasibility of Using Large Scale Photogrammetry to Accurately Determine In-service Strain Distribution Across Three-Dimensional Textile Roofs. In De Wilde, W. D. and Hamelin, P.(Eds.), Euromech 334 Textile Composites and Textile Structures, 15-16th May 1995, Lyon. Prieiga per internetą: <http://www.technet-gmbh.com/download/Publikationen/lyon95.pdf>. Paskutinį kartą pasiektas 2005.02.10.
4. Kubiuk, D. L., Greenwood, J. A. Development of Photogrammetric Methods of Stress Analysis and Quality Control. Prieiga per internetą: http://www-group.slac.stanford.edu/et/IWAA/TOC_S/PAPERS/DKubi02.pdf. Paskutinį kartą pasiektas 2005.02.10.
5. Maas, H. G. Photogrammetric techniques for deformation measurements on reservoir walls. Prieiga per internetą: http://www.tu-dresden.de/fhgipf/forschung/material/publ_maas/nalps.pdf. Paskutinį kartą pasiektas 2005.02.10.
6. Fonda, J. W., Watkins, S. E. Embedded fiber optic sensing for bridge rehabilitation. University of Missouri-Rolla, USA. Prieiga per internetą: http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/civil_structures/150_fonda.pdf. Paskutinį kartą pasiektas 2005.02.10.
7. Willshire A. J., Niewczas, P., Dziuda, L., Fusiek, G., McDonald, J. R. Dynamic Strain Measurement Using an Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor and an Arrayed Waveguide Grating Device. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. February 2004. Volume 53 , Number 1 (ISSN 0018-9456). P.4-9.
8. Chen, J., Bock, W. J. A Novel Fiber-Optic Pressure Sensor Operated at 1300-nm Wavelength. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. February 2004. Volume 53 , Number 1 (ISSN 0018-9456). P.10-14.
9. Kulkarni, M. N., Radhakrishnan, N., Rai, D. GPS & Structural Monitoring: Deformation Studies of Koyna Dam. GPS World (ISSN 1048-5104). November 2004. P. 14-19.
10. Kester, W. Bridge Circuits. OP AMP Applications. Analog Devices Inc. Printed in USA. 2002. P. 4.7-4.37.
11. Ambrasas, V. Fizikos pagrindai. Kaunas: Šviesa. 1990. 281 p.

12. Potter, D. Smart Plug and Play Sensors. IEEE Instrumentation & Measurement magazine Vol. 5, No.1 March 2002. P. 28-30.
13. Tarchanidis, K. N., Lygouras, N. Data Glove With a Force Sensor. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. June 2003. Volume 52 , Number 3 (ISSN 0018-9456). P. 984-989.
14. Baker, B. C. Bridge Sensing with the MCP6S2X PGAs. AN251 Microchip Technology inc. 2003.
15. Dabney, T. 15-Kilogram Scale Using the TC500A and the TC520. AN780 Microchip Technology inc. 2002.
16. Bowling, S. Ratiometric Sensing Using the PIC16C774. AN694 Microchip Technology inc. 2000.
17. Williams, J. Bridge Circuits – Marrying Gain and Balance. Linear Technology, Application Note 43. June 1990.
18. Strainstall Bridge Test System Manual 101624. Fylde modular instrumentation.
19. SG-Link. Wireless Strain Gauge. Microstrain WEB puslapis. Prieiga per internetą: http://www.microstrain.com/sg-link_specs.aspx. Paskutinį kartą pasiektas 2005.02.19.
20. McCarthy, M. Peak-t-Peak Resolution Versus Effective Resolution. Analog Devices Application Note AN-615.
21. Kvedaras, R. “Karaliaus Mindaugo” tilto Vilniuje dinaminių bandymų signalų analizės ataskaita. Vilnius, 2003.
22. Inaudi, D. State of the Art in Fiber Optic Sensing Technology and EU Structural Health Monitoring Projects. Prieiga per internetą: <http://www.smartec.ch/Bibliography/PDF/C100.pdf>. Paskutinį kartą pasiektas 2005.07.19.
23. Garg, A., Koster, G., Ruhl, M. Implementation of long term measurements at a building made of concrete with aggregate derived from concrete rubble. Prieiga per internetą: <http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon13gargkoster.htm>. Paskutinį kartą pasiektas 2005.07.19.
24. Bonfiglioli, B., Pascale, G. Internal Strain Measurements in Concrete Specimens in Compression. Prieiga per internetą: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn524/idn524.htm>. Paskutinį kartą pasiektas 2005.07.19.
25. Scott, R.H., Gill, P.A.T., Judge, R.C.B. Force transfer in compression lap joints in reinforced concrete. Magazine of Concrete Research: Vol. 41, No. 146, Mar 27-31 1989. Prieiga per internetą: <http://www.dur.ac.uk/richard.scott/paper3.html>. Paskutinį kartą pasiektas 2005.07.19.
26. AN1405/D Semiconductor Technical Data Rev 1, 09/ 2001. Motorola, Inc. 2001.– 8p.

27. Schoenwetter, H. K. High Accuracy Settling Time Measurements. // IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-32, No. 1. P. 22-27 (Mar 1983).
28. Schoenwetter, H. K. Settling Time Measurements. // paper for Digital Methods in Waveform Metrology Seminar, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ. 707, "Proceedings of the Seminar on Digital Methods in Waveform Metrology," Barry Bell, Ed. P. 87-109 (Oct 1985).
29. Souders, T. M., Schoenwetter, H. K., Hetrick, P. S. Characterization of a Sampling Voltage Tracker for Measuring Fast, Repetitive Signals // IMTC/87 Conference Proceedings, IEEE Instrumentation/Masurement Technology Conference, Boston, MA, April 27-29, 1987, digest published by IEEE. P. 240-243.
30. Souders, T. M., Schoenwetter, H. K., Hetrick, P. S. Characterization of a Sampling Voltage Tracker for Measuring Fast, Repetitive Signals. // IMTC/87 Conference Proceedings, IEEE Instrumentation/Masurement Technology Conference, Boston, MA, April 27-29, 1987. P. 240-243.
31. Williams, J. Measuring 16-bit settling times: the art of timely accuracy // EDN, Nov 19, 1998. P. 159
32. Williams, J. 30 nanosecond settling time measurement for a precision wideband amplifier // Application Note 79, Linear Technology Corp, 1999.
33. Williams, J. Component and measurement advances ensure 16-bit DAC settling time // Application note 74, Linear Technology Corp, 1998.
34. DPOs Deliver More Signal Information for Faster Design and Troubleshooting Answers. Tektronix Inc. application notes AN 55W-16965. 2004. 8 p.
35. Jansen J.M.L. An Experimental „Stroboscopic“ Oscilloscope for Frequencies up to about 50 MHz // Philips Technical Review, Vol. 12. 1950.
36. Paten R.B., Fussel L. Apparatus for Sampling Electric Waves. Pat. USA, kl. 324-77, No. 3278846.
37. Winingstad C.N. With the Sampling Scope Storage to Picosecond // Electronic Industries, Vol. 22, 1963, No. 8.
38. Magleby K.B. Plural Series Gate Sampling Circuit using Positive Feedback. Pat. USA No. 3011129.
39. Groove W.M. Sampling for Oscilloscopes and other RF Systems. DC through A Band // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MMT-14, No. 12, 1966.
40. Найденов А. И. Трансформация спектра наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1973. – 176 с.
41. Рябинин Ю. А. Стробоскопическое осциллографирование. М.: Сов. радио, 1972.

42. Rodwell, M. Beyond 40 GHz: Chips to be tested, Instruments to measure them. Prieiga per internetą: [www.ece.ucsb.edu/Faculty/rodwell/ Downloads/workshops/ Beyond_40GHz.pdf](http://www.ece.ucsb.edu/Faculty/rodwell/Downloads/workshops/Beyond_40GHz.pdf). Paskutinį kartą pasiektas 2005 04 28.
43. Eidukas D. Puslaidininkinių prietaisų impulsinių parametrų matavimo metodai // Radioelektronika, Kaunas, 1966 (rusų k.).
44. Eidukas D., Jankūnas E. Puslaidininkinių prietaisų dinaminų parametrų pikosekundinio diapazono informacinės-matavimo sistemos // Radioelektronika, T. V, Kaunas, 1969 (rusų k.).
45. Grigas S., Matusėvičius G., Stankevičius L., Eidukas D. Puslaidininkinių prietaisų impulsinių parametrų stroboskopinio metodo pagrindu automatinis matavimas // Mokslinės-techninės konf. Darbai. Radijo matavimai, Vilnius, 1969 (rusų k.).
46. Blake J.A., Paul S.T., Boyg J.C. System for measuring a characteristic of an electrical pulse. Pat. USA, kl. 324-68, No. 3312894.
47. Diržys A., Dinaminų SIG matavimo paklaidų, apsprendžiamų signalų iškraipymais matavimo grandinėje, įvertinimo klausimai // 6 mokslinės-techninės konferencijos medžiaga. Radiomatavimai-75, Vilnius, 1975 (rusų k.).
48. Andrews I.R., Gans W.L. Time domain automatic network analyzer // L'onde électrique, vol. 55, No. 10, 1975. – P. 569-574.
49. Kvedaras. V., Naidionov, A. Apie stroboskopinio laiko intervalų matavimo paklaidas // Radioelektronika. Moksl.-techn.konfer. darbai, 1974, Nr.10 (rusų k.).
50. Kvedaras, V. Tikslių stroboskopinių laiko intervalų matuoklių sudarymo klausimai. Radioelektronikos klausimai, ser. RT, leid.3, 1975 (rusų k.).
51. Kvedaras, V., Naidionov, A. Stroboskopinis integrinų schemų dinaminų parametrų matuoklis // Oscilografiniai matavimo metodai. II Visasąjunginės konf. darbai. Vilnius, 1975 (rusų k.).
52. Naidionov, A., Čelnokov, B., Kvedaras, V. Stroboskopinis oscilografas matuojantis laiko intervalus. M., Oscilografiniai matavimo metodai. Leid.1, d.1, 1973 (rusų k.).
53. Kvedaras, V., Naidionov, A. Stroboskopinis laiko intervalų matuoklis. SSSR autorystės liudijimas Nr.508776 (rusų k.).
54. Kvedaras, V., Naidionov, A., Čelnokov, B. Stroboskopinis laiko intervalų matuoklis. SSSR autorystės liudijimas Nr.600454 (rusų k.).
55. Kvedaras, V., Naidionov, A., Kaplan, G. Stroboskopinis laiko intervalų matuoklis. SSSR autorystės liudijimas Nr.699439 (rusų k.).

56. Kvedaras, V., Naidionov, A. Stroboskopinis integrinių schemų dinaminių parametrų matuoklis. // Oscilografiniai matavimo metodai. II Visasąjunginės konf. darbai. Vilnius, 1975 (rusų k.).
57. Kvedaras, V., Mackevič, S. Sklidimo vėlinimo laikų matuoklis // Radioelektronika. VTU mokslo darbai, T.28, Nr. 3, 1992. 95-103 p.
58. Vargiu G. Phase-locked signal sampling circuit with adaptive search circuit. Pat. USA kl. 328-151, No. 3416087.
59. Chu Sun-yen. Phase-locked signal sampling circuit. Pat. USA kl. 328-151, No. 3334305.
60. Jočys A. Stroboskopinis matavimo keitiklis ir kai kurie jo panaudojimo variantai. // Mokslinės-techninės konf. darbai „Radijo matavimai“, Vilnius, 1969 (rusų k.).
61. Kvedaras, V., Naidionov, A. Apie automatinių stroboskopinių laiko intervalų matuoklių sintezę // Radiomatavimai. VI Moksl.-techn. konfer.darbai. t. 3, Kaunas, 1975 (rusų k.).
62. Kvedaras, V., Naidionov, A. Stroboskopinis oscilografas. SSSR autorystės liudijimas Nr.521521 (rusų k.).
63. Kvedaras, V., Naidionov, A. Stroboskopinis oscilografas. SSSR autorystės liudijimas Nr.585445 (rusų k.).
64. Kvedaras, V., Lukšys, G. Stroboskopinis oscilografas. SSSR autorystės liudijimas Nr.1427999 (rusų k.).
65. Analog-Digital Conversion. Editor W. Kester. Analog Device Inc. 2004. 1055 p.
66. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. Под ред. А.-Й. К. Марцинкявичюса, Э.-А. К. Багданскиса. Москва: «Радио и связь» 1988.- 224 с.
67. Test and Measurement Catalog. Tektronix Inc. 2004.
68. Kvedaras, V., Bagdanskis, E., Naidionov, A., Narbutas, M. Keturpolių pereinamųjų procesų nusistovėjimo laikų matavimo metodas. SSSR autorystės liudijimas Nr. 1084704 (rusų k.).
69. Багданскис, Э.-А. К., Кведарас, В. Б. Измерение динамических параметров ЦАП // Автометрия. 1987. № 5. С. 97 – 101.
70. Kvedaras, V., Bagdanskis, E., Naidionov, A., Narbutas, M. Stroboskopinis keitiklis sparčių SAK dinaminių parametrų matavimui // Radioelektronika. Lietuvos aukš. mokyk. darbai, t.18, Nr.3, Vilnius, 1982 (rusų k.).

71. Багданскис, Э. К., Квядарас, В. Б., Мацкевич, С. Ф., Скурдянис, В. А. Лабораторный измеритель времени установления быстродействующих ЦАП // Электронная промышленность. 1986. вып. 10. С. 30.
72. Kvedaras, V., Mackevičius, S. Stroboskopinis SAK nusistovėjimo laikų matuoklis // Radioelektronika. Vilniaus technikos Universiteto darbai. V.: Technika. 1993, T. 29, Nr. 3. P. 92 – 98.
73. Lukšis, G., Kvedaras, V., Bagdanskis, E. Stroboskopinis laiko intervalų matuoklis. SSSR autorystės liudijimas Nr.1656468 (rusų k.).
74. Kvedaras, V., Pocius, R. V. Triukšmo lygio sumažinimas specializuotuose stroboskopiniuose keitikliuose // Radioelektronika. Mokslo darbai. V.: Technika. 1994, T. 30, Nr. 3. P. 130 – 134.
75. Kvedaras, V. Stroboskopinių pikinio detektavimo keitiklių savųjų triukšmų tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. K.: Technologija. 2001, Nr.3 (32). P. 53 – 58.
76. Pocius, R. Stroboskopinio keitiklio elementų parametrų įtakos jo dinaminėms charakteristikoms tyrimas // Radioelektronika: Mokslo darbai. – V.: Technika, 1992. T. 28, Nr. 3, P. 95-103.
77. Williams J. Measuring precision – amplifier settling time // EDN. – Oct. 28, 1999. – P. 85 – 94.
78. Квядарас, В., Багданскис, Э.-А.. Измерение времени установления ЦАП // Автометрия. – 1988. – No. 5.
79. Short, B.R., Grisell, T.L., Cristal, E.G. Broadband fundamental frequency synthesis from 2 to 20 GHz – design of frequency synthesis subsystem in HP's 8370 and 70340 Series microwave signal generators // Hewlett-Packard Journal, April 1993.
80. Атамалян, Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин. - М.: Высшая школа, 1989. 384 с.
81. Mittermayer, C., Steininger, A. On the determination of dynamic errors for rise time measurement with an oscilloscope // IEEE Transaction on Instrumentation and measurement, Dec. 1999, vol. 48. ISSN 0018-9456.

Autoriaus darbai disertacijos tema

- A1. Kvedaras, V., Kvedaras, R. Daugiakanalių stroboskopinių pikinio detektavimo keitiklių tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392–1215. Nr. 6 (29). Kaunas: Technologija, 2000. P. 60-64.
- A2. Kvedaras, R., Kvedaras, V., Martavičius, R. Elektroninė sistema unikalių konstrukcijų būsenos pokyčiams įvertinti // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392–1215. Nr. 6(48). Kaunas: Technologija, 2003. P. 28-32.
- A3. Kvedaras, V., Kvedaras, R. Prietaisas sparčių analoginių integrinių grandynų dinaminiams parametrams tirti // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392–1215. Nr. 7 (49). Kaunas: Technologija, 2003. P. 35-39.
- A4. Kvedaras, R. Reikalavimai konstrukcijų būsenų identifikavimo sistemoms // Šeštosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2003 m. kovo 14 d., medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika. ISBN 9986-05-695-0. Vilnius: Technika, 2004. P. 70-76.
- A5. Kvedaras, R., Martavičius, R. Requirements for construction state identification systems // Известия Белорусской инженерной академии, Минск, 2004, № 1(17)/1. С. 104-107.
- A6. Kvedaras V., Kvedaras R., Jankauskas Z. Measurements of Propagation Delay Times of High-Speed Digital IC // Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392–1215. Nr. 7 (56). Kaunas: Technologija, 2004. P. 33-36.
- A7. Kvedaras R. Fulfillment of General Requirements for Construction State Identification Systems // VI International Workshop for Candidates for a Doctor's Degree OWD. ISBN 83-915991-8-3. Vol. 19. PTETiS, 2004. P. 60-63.
- A8. Kvedaras V., Kvedaras R., Zaveckas V. Automatiniai stroboskopiniai keitikliai // Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392–1215. Nr. 6 (62). Kaunas: Technologija. 2005. P. 37-40.
- A9. Kvedaras, R., Martavičius, R. Balanced Wheatstone bridges in strain measurements // Measurement 2005, Proceedings of the 5th international conference. ISBN 80-967402-8-8. Smolenice, Slovakia, 2005. P. 388-391.
- A10. Kvedaras, R. Konstrukcijų deformacijų matavimo sistema. Diplominis darbas. - V.: VGTU Radioelektronikos katedra 1999.
- A11. Kvedaras, R. Konstrukcijų deformacijų matavimo būdo tyrimas. Mokslinio darbo ataskaita. MA studentų mokslinių darbų konkurso 1-a vieta. V.: VGTU Radioelektronikos katedra 1999.
- A12. Kvedaras, R. Konstrukcijų deformacijų matavimo metodo tyrimas. Baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos magistro laipsniui. - V.: VGTU Radioelektronikos katedra 2001.

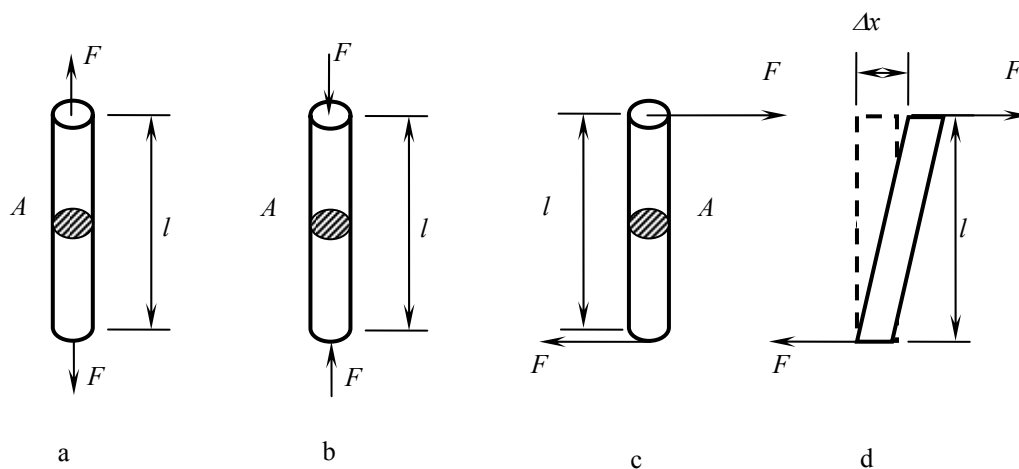
PRIEDAI

1 priedas. Deformacijų konstrukcijose jutikliai

Vientiso objekto deformacija yra apkrovimo jėga (tempimo, gniuždymo, šlyjamo ar pan.) rezultatas [1, 11]. Jėgos, sukeliančios deformacijas dažniausiai apibūdinamos kaip įtempimas.

Galima apibrėžti aiškią priklausomybę tarp vientisą objektą veikiančios jėgos ir jo deformacijos. Vientisi objektai yra atomų rinkiniai, kuriuose atstumai tarp atomų yra tokie, kad išlaikytų objekto pusiausvyrą su visomis išorinėmis objektą veikiančiomis jėgomis. Atstumai tarp atomų nustato objekto fizinius matmenis. Jei pasikeičia veikiančios jėgos, atstumai tarp atomų taip pat pasikeičia, taip sudarydami pusiausvyrą veikiančioms jėgoms. Atitinkamai pakeičiami ir objekto fiziniai matmenys. Toks pokytis vadinamas objekto deformacija veikiant išorinėms jėgoms.

Išorinių jėgų, vadinamų įtempimu, išsukta objekto deformacija gali būti skirtinga, priklausomai nuo veikiančių jėgų krypčių ir paties fizinio objekto parametrų ir gali būti skirstoma į tempimo, gniuždymo ir šlyties deformacijas.



P1.1 pav. Tempimo (a) ir gniuždymo (b) jėgos išreiškiamos kaip vientisą strypą veikiančios jėgos; šlyties įtempimą sukelia jėgų pora (c), kuri siekia deformuoti jungiantįjį objektą (d) :čia F – tempimo ir gniuždymo jėgos, A – strypo skerspjūvio plotas, l – strypo ilgis

Tempimo deformacijas sukelia tempimo jėga, kurios kryptis yra nukreipta į objekto išorę (P1.1 pav., a) taip, kad jį ištemptų ar nutrauktų. Įtempimas tokiu atveju aprašomas [1]:

$$\sigma_t = \frac{F}{A}, \quad (\text{P1.1})$$

čia F – objektą veikianti tempimo jėga, A – tempiamo objekto skerspjūvio plotas.

Įtempimo dimensija yra N/m^2 ir sutampa su slėgio dimensija.

Įtempimo iššaukta objekto deformacija išreiškiama kaip objekto ilgio pokytis lyginant su pradiniu ilgiu [1]:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l}, \quad (\text{P1.2})$$

čia Δl – objekto ilgio pasikeitimas, l – pradinis objekto ilgis.

Deformacija yra bedimensinis dydis. Kai objektą veikia tempimo jėga, jo ilgis l didėja, o tuo pačiu mažėja skerspjūvio plotas A .

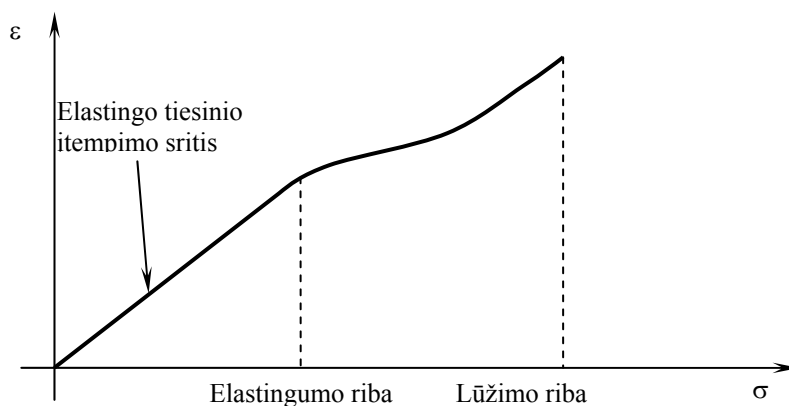
Vienintelis skirtumas, kai objektą veikia gniuždymo jėga (P1.1 pav., b) yra ta, kad objektą veikiančios jėgos vektorius yra nukreiptas į priešingą nei tempimo jėgos pusę. Todėl lieka galioti išraiškos (P1.1) ir (P1.2). Tačiau gniuždymo jėgos iššaukta deformacija yra neigiama, nes objekto ilgis šiuo atveju sumažėja.

Šlyties deformacijos atveju jėgos veikia objektą kaip parodyta P1.1 pav., c, d. Šiuo atveju įtempimas išreiškiamas taip pat kaip (2.1) išraiškoje, o deformacija yra [1]:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta x}{l}, \quad (\text{P1.3})$$

čia Δx – objekto šlytis nuo vertikalės (P1.1 pav. c, d), l – pradinis objekto ilgis.

Realaus objekto deformacijos veikiant skirtingiems įtempimams nėra tiesinės. Grafikas, išreiškiantis deformacijos priklausomybę nuo įtempimo pateiktas P1.2 paveiksle.



P1.2 pav. Tipinė įtempimo-deformacijos priklausomybės kreivė sudaryta iš tiesinės srities, neelastingos deformacijos srities ir lūžimo ribos: čia ε – objekto deformacija, σ – objekto įtempimas

Taigi priklausomybė tarp įtempimo ir deformacijos yra tiesinė tam tikrame įtempimo diapazone. Šiame diapazone medžiaga yra elastinga, t.y. jei nustoja veikti įtempimo jėgos išnyksta ir deformacija – objekto ilgis grįžta į pradinę padėtį l , o deformacija lygi 0. Jei peržengiama elastingumo riba deformacija tampa negrįžtama, nes t.t. objekto srityje pažeidžiama jo struktūra ir toliau objektas deformuojamas plastiškai. Toliau didinant

įtempimą objektas lūžta plastinės deformacijos vietoje. Kiekviena medžiaga elastingo tiesinio įtempimo srityje turi skirtingus parametrus, tačiau nepriklausomai nuo objekto fizinių parametrų šios srities parametrai tai pačiai medžiagai nekinta. Taigi galima teigti, kad tiesinė sritis ir šios srities statusas yra nekintantys konkrečiai medžiagai. Tempimo ir gniuždymo atveju ši konstanta vadinama elastingumo moduliu arba Jungo moduliu, kuris išreiškiamas [1]:

$$E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} = \frac{Fl}{A\Delta l}. \quad (\text{P1.4})$$

Elastingumo modulio dimensija N/m^2 . Panašiai išreiškimas ir šlyties modulis. Iš (1.4) išraiškos galima apibrėžti įtempimo priklausomybę nuo deformacijos. Ją apibrėžia Huko taisyklė [2]:

Elastingoms medžiagoms įtempimas tam tikroje ribotoje srityje iki elastingumo ribos yra tiesiškai proporcingas deformacijai:

$$\sigma_t = E\varepsilon_t. \quad (\text{P1.5})$$

Taigi Huko taisyklė galioja, kol pasiekiamas elastingumo riba. Pasiekus šią ribą įtempimas sukelia neproporcingas deformacijas.

Aliuminiui Jungo modulio vertė yra $6,89 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, variui – $11,73 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, plienui – $20,70 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, plastiškam polietilenui – $3,45 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ [1, 2].

2 priedas. Įtempimo jutikliai ir jų taikymas

Įtempimo jutikliai tvirtinami prie deformuojamos konstrukcijos ar jos elemento ir deformuojami (tempiami ar gniuždomi) taip pat, kaip ir tiriama konstrukcija. Dažniausiai naudojami įtempimo jutikliai, kurių varža kinta proporcingai jutiklio deformacijai. Dažniausiai naudojami deformacijos jutikliai, pagaminti metalinės vielos ar folijos pagrindu [2, 10].

Metalinės vielos varža išreiškiama per jos ilgį, skerspjūvio plotą ir savitąją varžą [11]:

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (\text{P2.1})$$

čia R – vielos varža, l – laidininko (vielos) ilgis, A – laidininko skerspjūvio plotas, ρ – laidininko savitoji varža.

Taigi veikiant deformacijai (ilgėjant laidininkui) varža kinta, nes didėja l , mažėja A ir daugeliui medžiagų didėjant deformacijai savitoji varža ρ taip pat didėja.

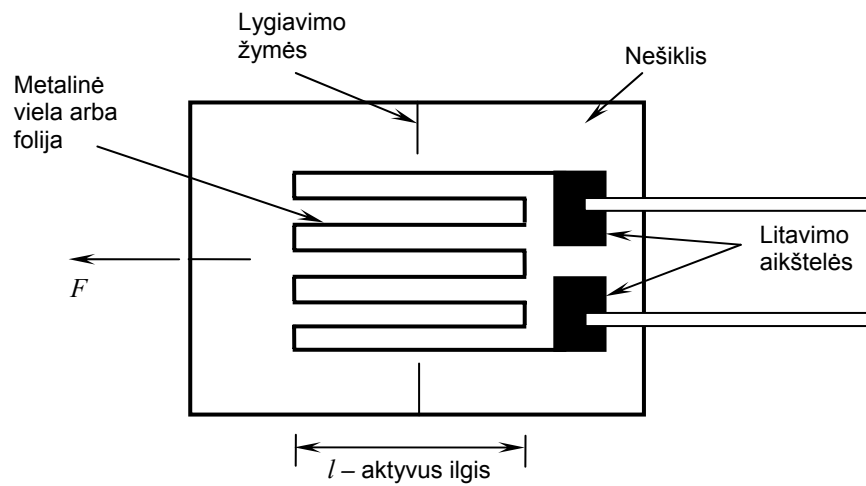
Tas pats pasakytina ir apie gniuždymo deformaciją, kai laidininko ilgis mažėja.

Taigi esant pastoviai temperatūrai vielos varža kinta tiesiškai ir proporcingai deformacijai:

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l} = S \varepsilon_l, \quad (\text{P2.2})$$

čia S – tenzojautrumo koeficientas.

Metaliniai įtempimo jutikliai dažniausiai gaminami iš plonos metalinės vielos ar folijos. Siekiant padidinti deformacijos veikiamos vielos ilgį – efektyvų ilgį – kompaktiškame jutiklyje, viela išdėstoma meandro forma (P2.1 pav.), kurios dalys išilgai veikiančios deformacijos yra galimai ilgesnės. Kuo didesnis efektyvus ilgis, tuo didesnė jutiklio varža ir tuo didesnis varžos pokytis veikiant deformacijai (didesnis S). Meandro skersinių (esančių skersai veikiančių deformacijų) dalių plotas daromas įmanomai mažesnis, siekiant sumažinti šlyties ir Puasono deformacijos poveikį. Viela ar folija netampriai tvirtinama prie plono tampraus pagrindo, kuris vadinamas nešėju. Šis pagrindas tvirtinamas prie tiriamos konstrukcijos. Taigi deformacija veikianti konstrukcijos elementą tiesiogiai perduodama metalinei vielai, kurios varža tiesiškai kinta proporcingai deformacijai. Metalinių įtempimo jutiklių varžos yra (30 – 3000) Ω diapazone. Dažniausiai naudojami jutikliai, kurių varžos yra 120, 350 ir 1000 Ω .



P2.1 pav. Įtempimo jutiklio metalinės vielos ar folijos pagrindu sandara

Teisingai sumontavus jutiklį, jo vielos deformacija yra proporcinga tiriamos konstrukcijos dalies deformacijai, taigi pagal (1) išraišką ir jutiklio varža kinta proporcingai konstrukcijos deformacijai.

Dažniausiai metaliniams jutikliams įtempimo jautrumo koeficientas S yra lygus 2.

3 priedas. StrainStall sistemos techninės charakteristikos

Šiame priede pateikiamos pagrindinės StrainStall deformacijų identifikavimo sistemos komponentų charakteristikos.

Stiprintuvo charakteristikos pateiktos P3.1 lentelėje.

P3.1 lentelė. Pagrindinės deformacijų identifikavimo stiprintuvo charakteristikos

Charakteristika	Vertė
Srovės šaltinių skaičius	2
Šaltinių signalo lygis	2 – 6 mA prie 24 V
Šaltinio triukšmų lygis	<0,1 μ A
Iėjimo impedansas	1 M Ω , 1 μ F
Triukšmo lygis	10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Išėjimo signalo lygis	± 10 V į 2 k Ω , 5nF

ASK modulis įgyvendintas naudojant National Instruments PCI-6033E plėtimo plokštę. Jos charakteristikos pateiktos P3.2 lentelėje:

P3.2 lentelė. Pagrindinės ASK charakteristikos

Charakteristika	Vertė
Sąsaja	PCI
Analoginių įėjimų skaičius	64 arba 32 diferenciniai
Kvantavimo lygis	16 skilčių
Diskretizavimo dažnis	100 kHz
Iėjimo signalo lygis	$\pm 0,1$ V ÷ ± 10 V
Identifikavimo jautris	0,0023 mV
Absoliutinė paklaida	< 2 mV
Santykinė paklaida	± 1 MRS
Iėjimo impedansas	100 G Ω , 100 pF

4 priedas. Automatiniai stroboskopiniai keitikliai

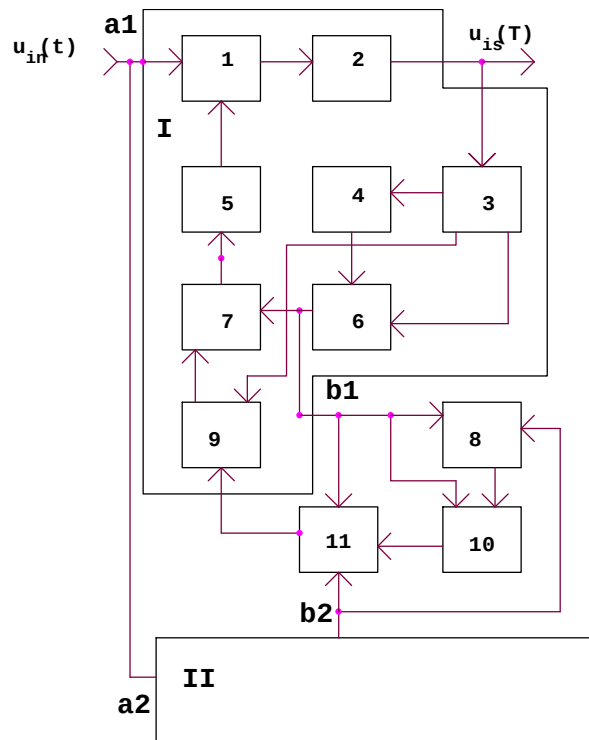
Darbe [64] pristatomas automatinis stroboskopinis keitiklis (P4.1 pav.) veikia taip.

Keitiklis turi du identiškus kanalus I ir II, kurie veikia analogiškai, tačiau turi nustatytus skirtingus laiko mastelio transformacijos mastelius. Kai apibrėžtą laiko tarpą normalizavimo bloko įėjime 3 nėra iš maišiklio 1 ir stiprintuvo 2 perduoto signalo, blokas 3 įjungia sinchronizacijos paieškos bloką 4, o šis pradeda keisti įtampa valdomo generatoriaus 6 impulsų pasikartojimo dažnį. Šie impulsai perduodami į skaitiklį su išankstiniu nustatymu 7. Skaitiklio 7 išėjimo impulsai, kurių pasikartojimo dažnis n kartų žemesnis, čia $n = 1, 2, 3, \dots$ – skaitiklio 7 dažnio dalinimo koeficientas, perduodami į stroboskopinių impulsų formuotuvą 5. Tuo būdu, sinchroniškai generatoriaus 6 dažniui, kinta ir trumpų stroboskopinių impulsų, kurie iš formuotuvo 5 perduodami į maišiklį 1 dažnis. Tuo atveju, jei keitiklio įėjime veikia tiriamieji impulsai, tam tikru laiko momentu bus įvykdyta keitiklio sinchronizacijos sąlyga ir maišiklio 1 bei stiprintuvo 2 išėjimuose atsiras tiriamasis signalas pakeistu laiko masteliu. Šis signalas fiksuojamas normalizatoriuje 3. Normalizatorius 3 išjungia paieškos bloką 4 ir pats generuoja išėjimo signalą, kurį perduoda į generatorių 6, keisdamas jo dažnį taip, kad tiriamasis laiko intervalas maišiklio 1 bei stiprintuvo 2 išėjimuose būtų lygus nustatytai tiriamojo laiko intervalo trukmei T_{i1} . Antrajame kanale II vyksta tokie patys reguliavimo procesai ir antrojo kanalo maišiklio 1 bei stiprintuvo 2 išėjimuose nustatoma tiriamojo laiko intervalo trukmė T_{i2} . Tiriamojo laiko intervalo trukmė, kada antrame kanale normalizuota pakeisto intervalo trukmė parenkama lygi $T_{i2} = 2 T_{i1}$ lygi

$$t_i = \frac{2T_{i1}F_s}{f_{STR1}}. \quad (P4.1)$$

Šioje formulėje esantis parametras $F_s = f_{STR1} - f_{STR2}$ ir nustatoma matuoklyje 10, gavus informaciją apie skirtuminį dažnį iš skirtuminio dažnio nustatymo bloko 8.

Kai įėjimo signalų pasikartojimo dažniai yra santykinai žemi, kaip minėta anksčiau, gali labai išaugti analizės trukmės ir padidėti išėjimo signalo dažnio nestabilumas. Šių trūkumų įtaka sumažinama skaitiklio nustatymo bloke įvertinant tiriamojo laiko intervalo trukmę bei stroboskopinių impulsų pasikartojimo dažnius ir nustačius kitas skaitiklių 7 išankstinio nustatymo vertes. To pasėkoje, pasikeičia skaitiklių 7 išėjimo impulsų ir tuo pačiu stroboskopinių impulsų laiko padėtis taip, kad keitiklyje vėl nuo pradžių pradedamas keisti tiriamasis laiko intervalas. Taip tiriamasis laiko intervalas keitiklyje keičiamas išmetant pauzę, esančią realiam įėjimo signalo tarp gretimų pasikartojančių laiko intervalų. Tai žymiai sutrumpina analizės trukmę ir padidina išėjimo signalo stabilumą.



P4.1 pav. Stroboskopinio keitiklio schema su sumažinta analizės trukme gaunama naudojant nustatomus skaitiklius: 1 – maišiklis; 2 – stiprintuvas; 3 – trukmės normalizavimo blokas; 4 – sinchronizacijos paieškos blokas; 5 – stroboskopinių impulsų generatorius; 6 – įtampa valdomas generatorius; 7 – skaitiklis su išankstiniu nustatymu; 8 – skirtuminio dažnio nustatymo blokas; 9 – skaitiklio nustatymo blokas; 10 – matuoklis; 11 – matavimo blokas

Kaip matyti, tokie automatiniai keitikliai yra pakankamai sudėtingai realizuojami ir todėl praktikoje naudojami retai.

5 priedas. Signalų modeliavimas Matlab paketu

Signalų modeliavimo programa Matlab paketu

```
t=0:1/fs:1.1;
A=10;
i=0;
smait=0;

for tt1=0:1/fs:0.5-1/fs, %Nekintanti signalo dalis
    i=i+1;
    smait(1,i)=A*sin(2*pi*200*tt1);
end
for tt2=0.5:1/fs:1.1, %Tiltelio balansavimo dalis
    i=i+1;
    smait(1,i)=A*sin(2*pi*200*tt2);
    if smait(1,i)>=0.9*A A=A/2; end %Signalų amplitudės mažinimas 2 kartus pasiekus
                                     maksimalią vertę
end
figure (1);
plot (t,smait);

spe=fft(smait,1024);
f=fs*(0:(1024/2-1))/1024;

figure (2);
plot (f,abs(spe(1:512))*2/1024);

Triukšmų signalai modeliuojami Matlab:

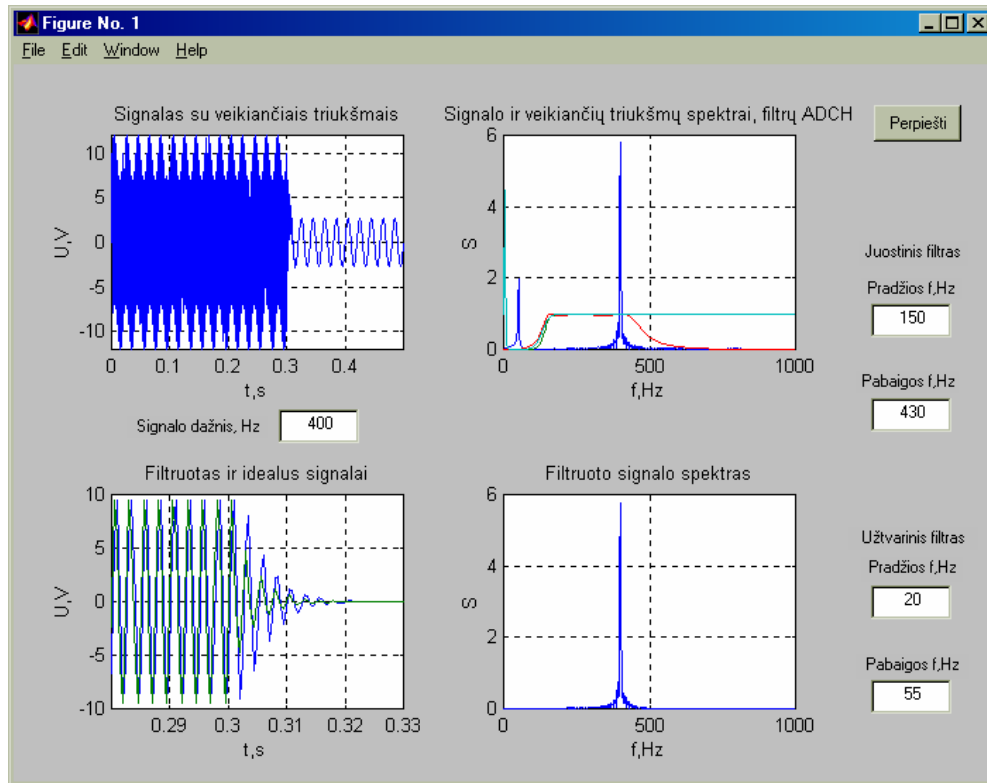
fs=2000;
t=0:1/fs:1.1;

bt=3.4e-8*randn(size(t)); %Šiluminiai triukšmai
tt=0.04*sin(50*2*pi*t); %Tinklo dažnio triukšmai
tru=bt+tt; %Visi stiprintuvo įėjime veikiantys trukdžiai

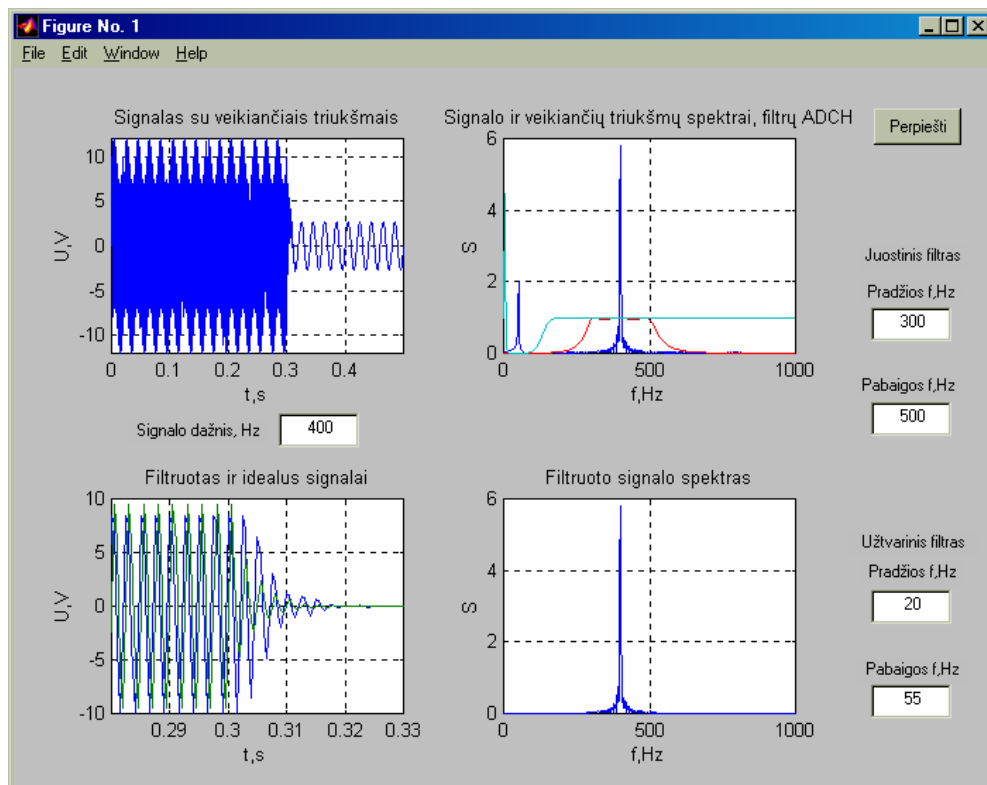
figure(1);
plot (t,tru);

trsp=fft(tru,1024);
f=fs*(0:(1024/2-1))/1024;
plot (f,abs(trsp(1:512))*2/1024); %Trukdžių spektras
```

6 priedas. Filtrų modeliavimo Matlab paketu rezultatai



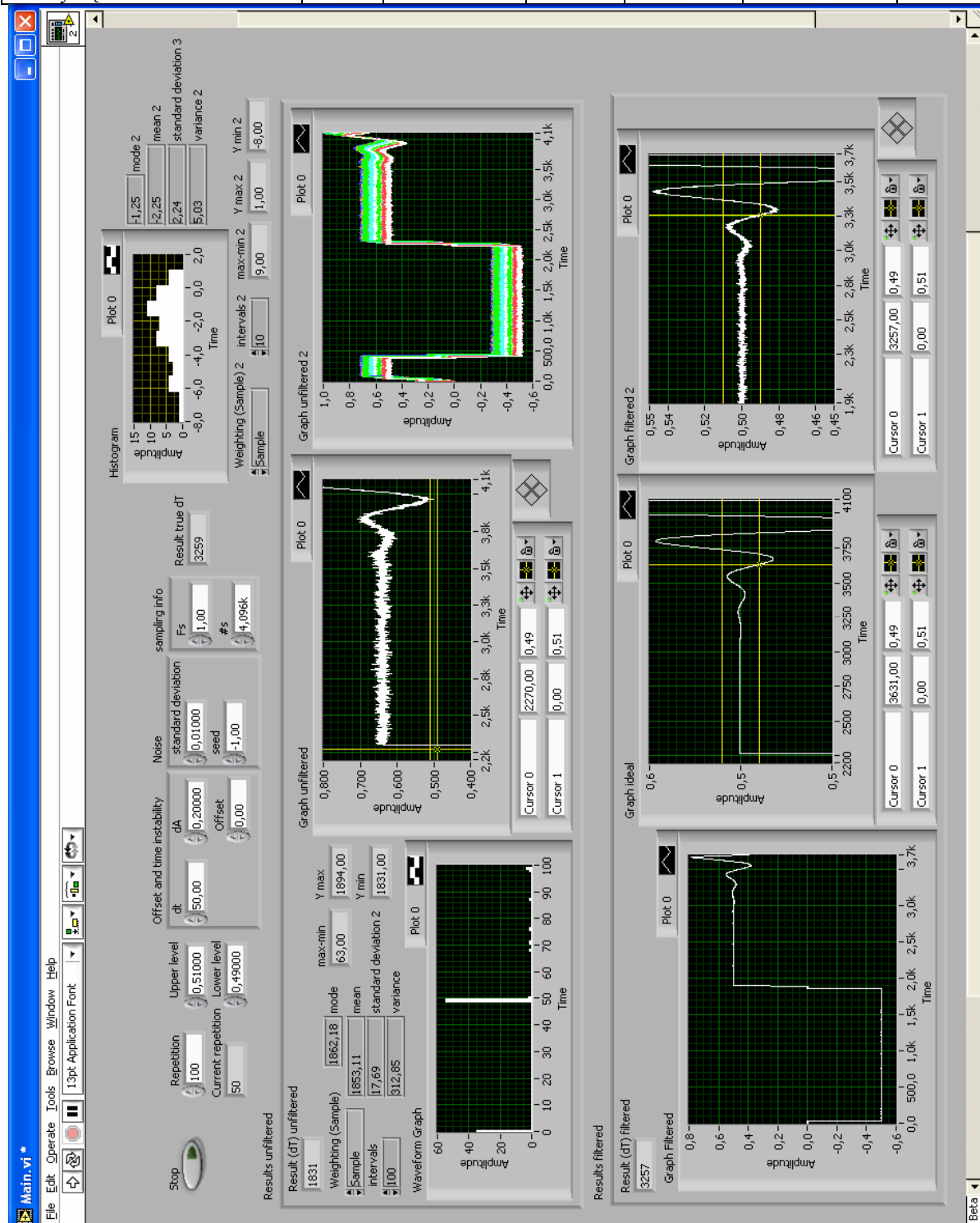
P5.1 pav. Modeliavimo rezultatai kai JF pabaigos dažnis 430 Hz



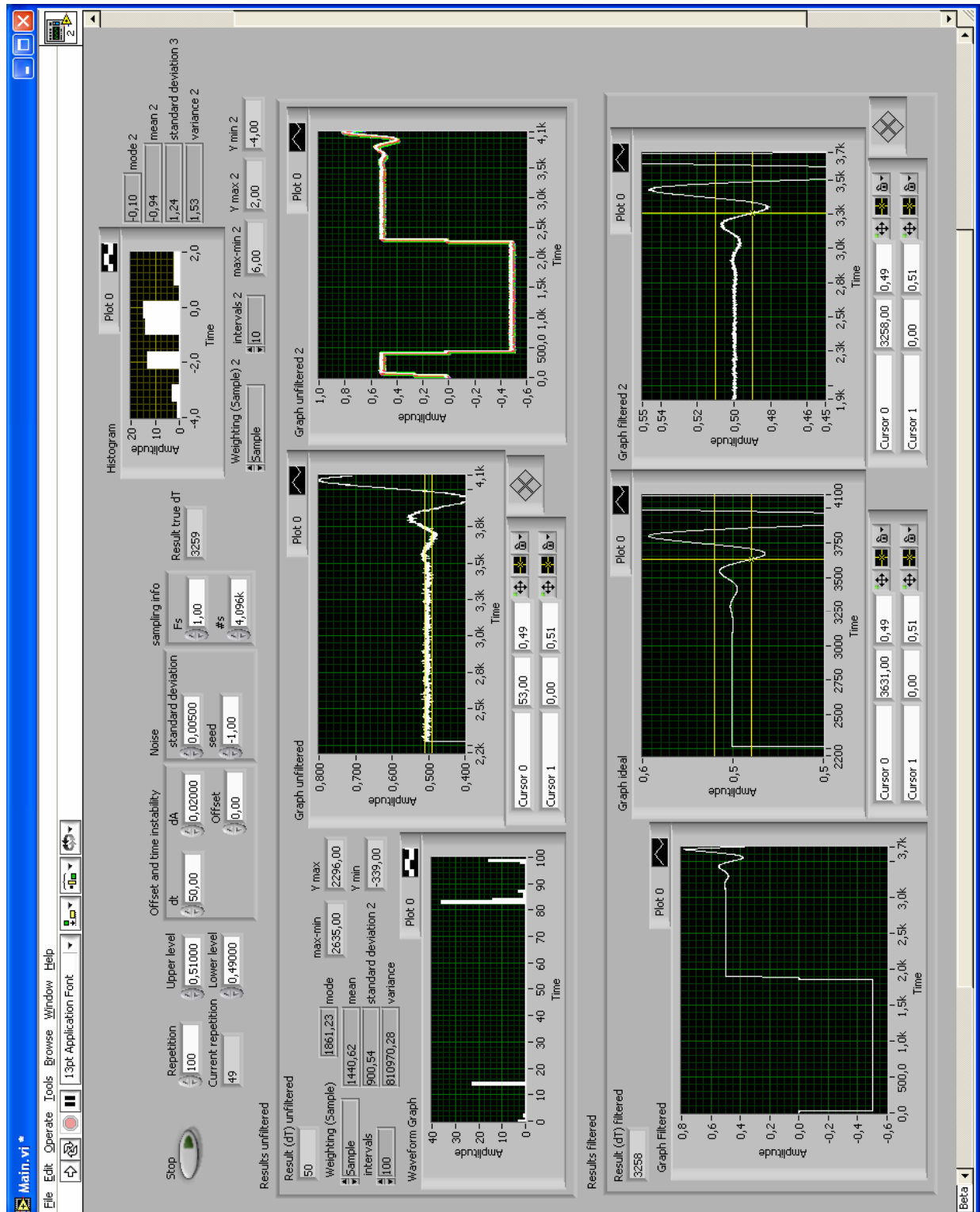
P5.2 pav. Modeliavimo rezultatai kai JF pradžios dažnis 300 Hz

7 priedas. SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo modeliavimas LabView programa

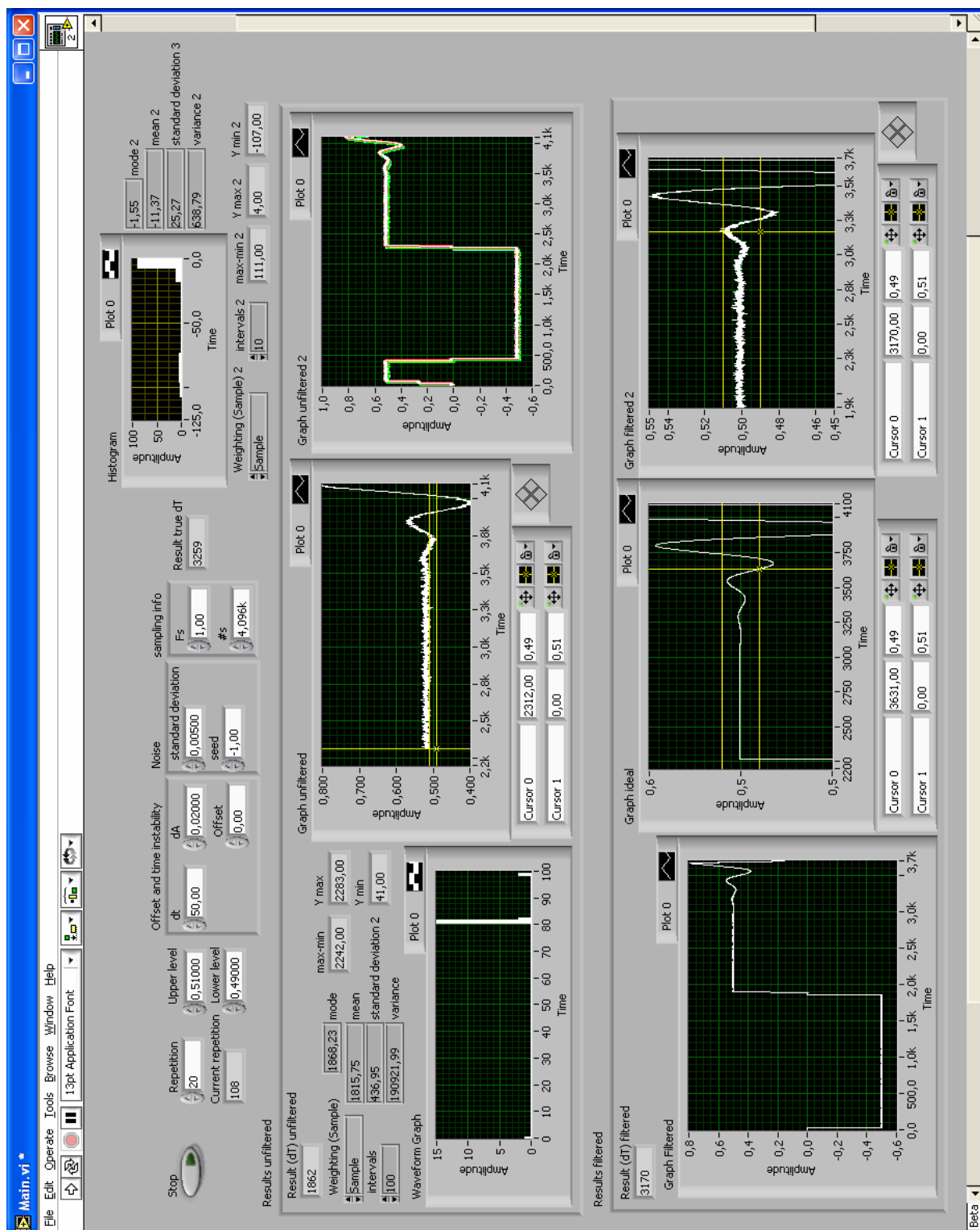
Absoliutinė vertė	837					
Atskaitos lygiai, V	0,02					
Bandymas Nr. 1		Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	-2,25	-1,25	2,24	-8	0,956
Amplitudės nestabilumas, V	0,2					
Triukšmų lygis, V	0,06					
Vidurkinama signalų	100					
Bandymų skaičius	50					



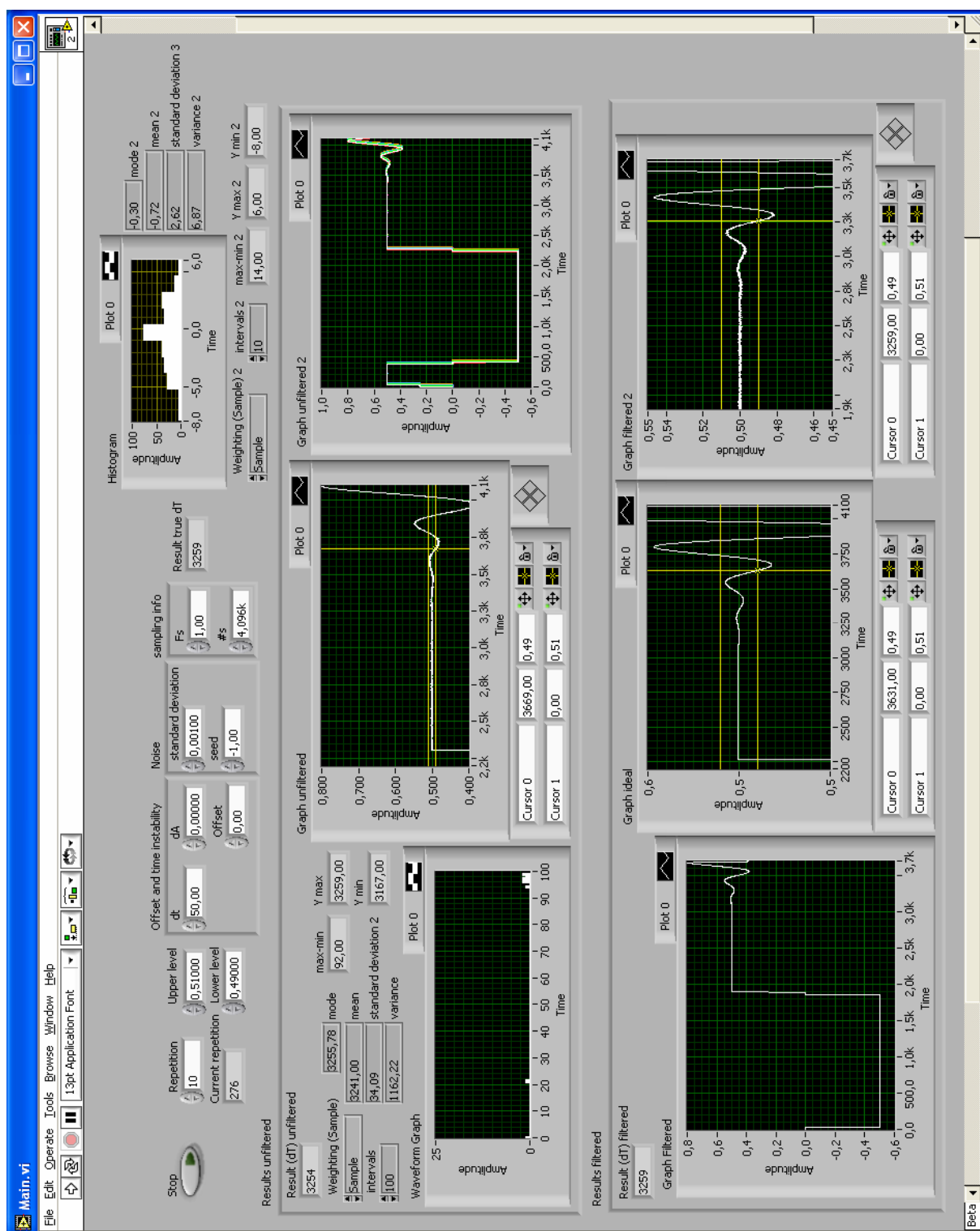
Bandymas Nr. 2		Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	-0,94	-0,1	1,24	-4	0,478
Amplitudės nestabilumas, V	0,02					
Triukšmų lygis, V	0,02					
Vidurkinama signalų	100					



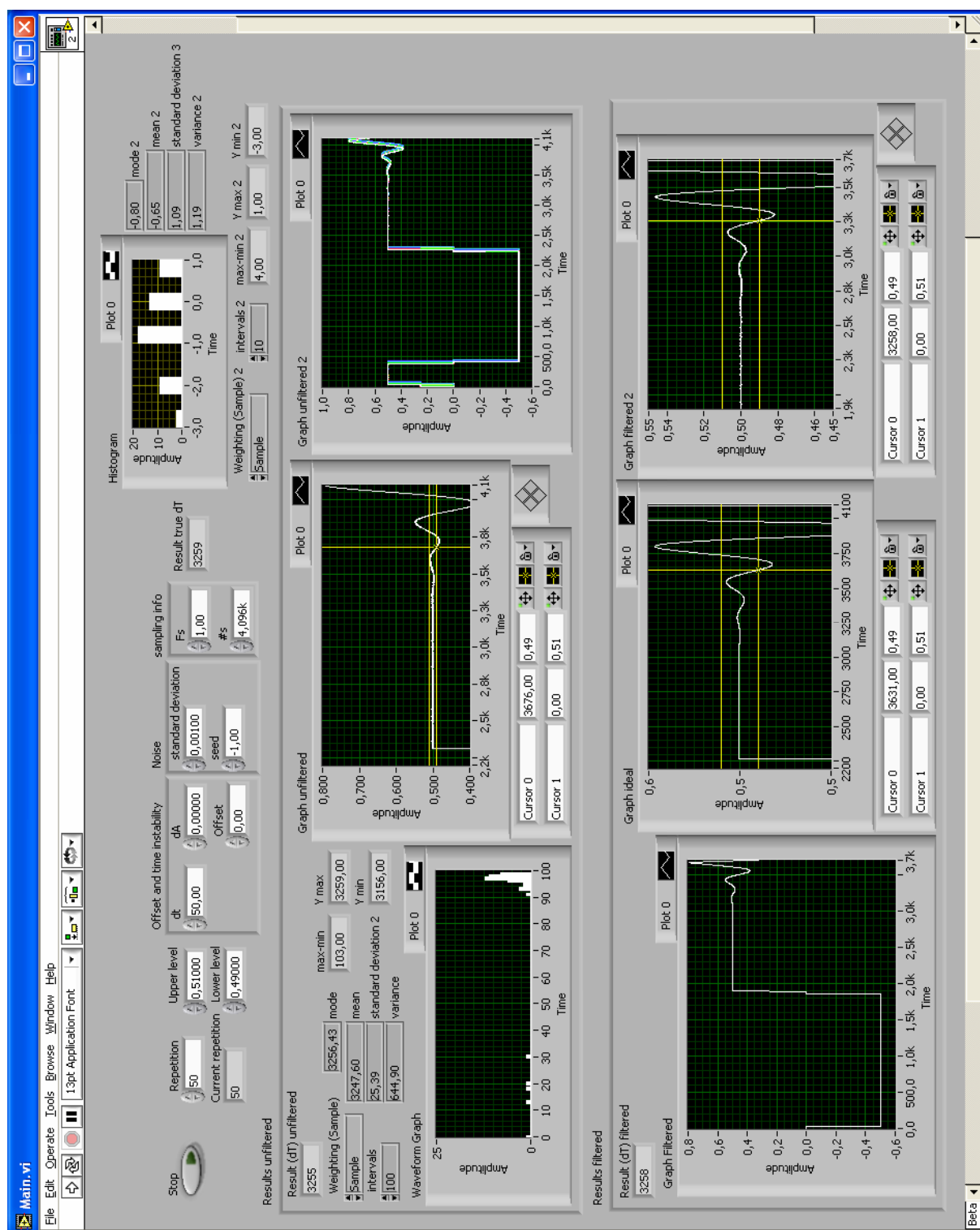
Bandymas Nr. 3		Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	-11,37	-,55	25,27	111	13,262
Amplitudės nestabilumas, V	0,02					
Triukšmų lygis, V	0,02					
Vidurkinama signalų	20					
Bandymų skaičius	108					



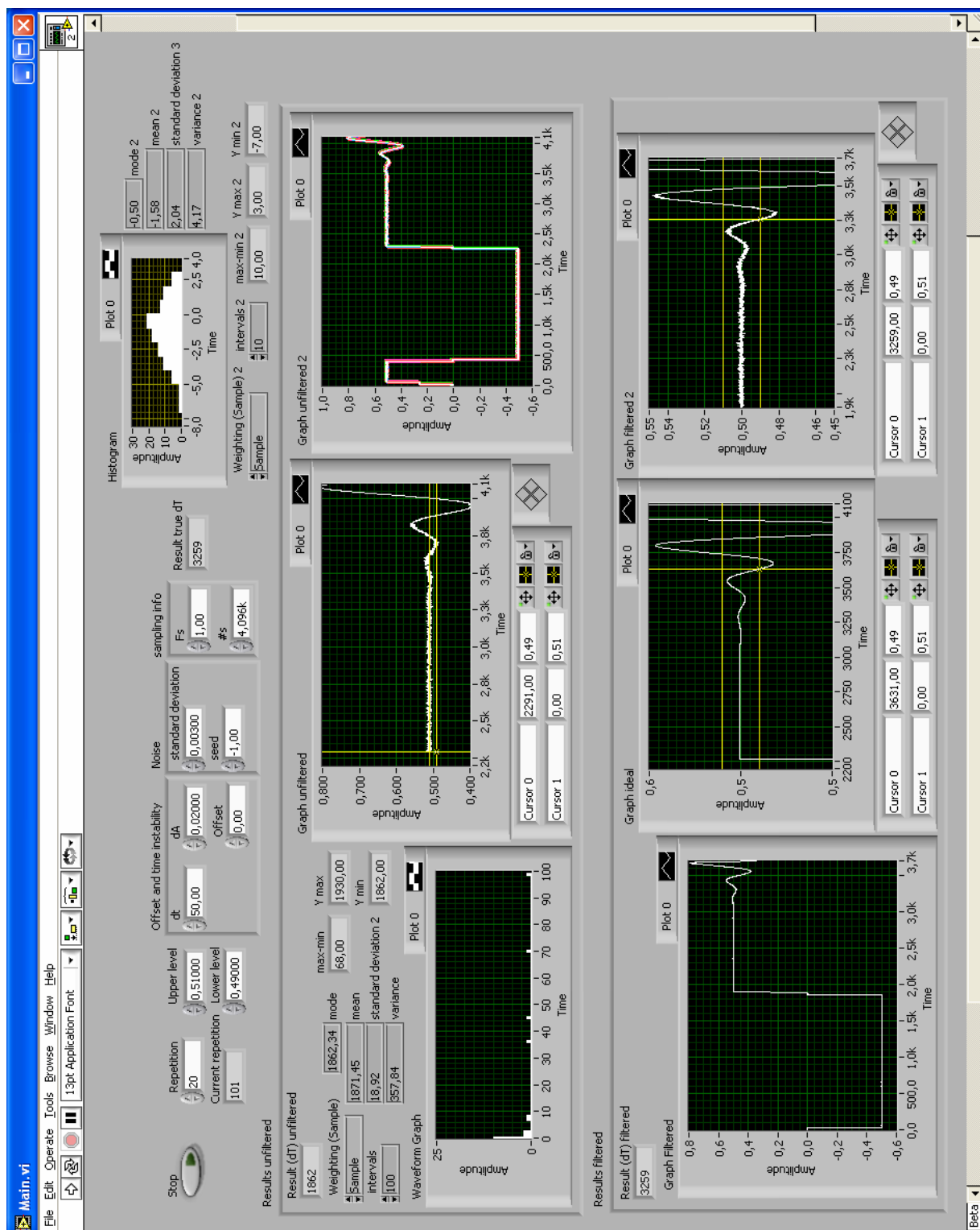
Bandymas Nr. 8			Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	Vid.	-0,72	-0,3	2,62	-8	0,956
Amplitudės nestabilumas, V	0	Nevid.	-18	-3,22	34,09	92	10,992
Triukšmų lygis, V	0,015						
Vidurkinama signalų	10						
Bandymų skaičius	276						



Bandymas Nr. 12			Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	Vid.	-0,65	-0,8	1,09	-3	0,358
Amplitudės nestabilumas, V	0	Nevid.	-12	-2,57	25,39	103	12,306
Triukšmų lygis, V	0,015						
Vidurkinama signalų	50						
Bandymų skaičius	50						



Bandymas Nr. 20	Realūs dydžiai						
Parametrai			Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	Vid.	-1,58	-0,5	2,04	-7	0,836
Amplitudės nestabilumas, V	0,02	Nevid.					
Triukšmų lygis, V	0,025						
Vidurkinama signalų	20						
Bandymų skaičius	101						

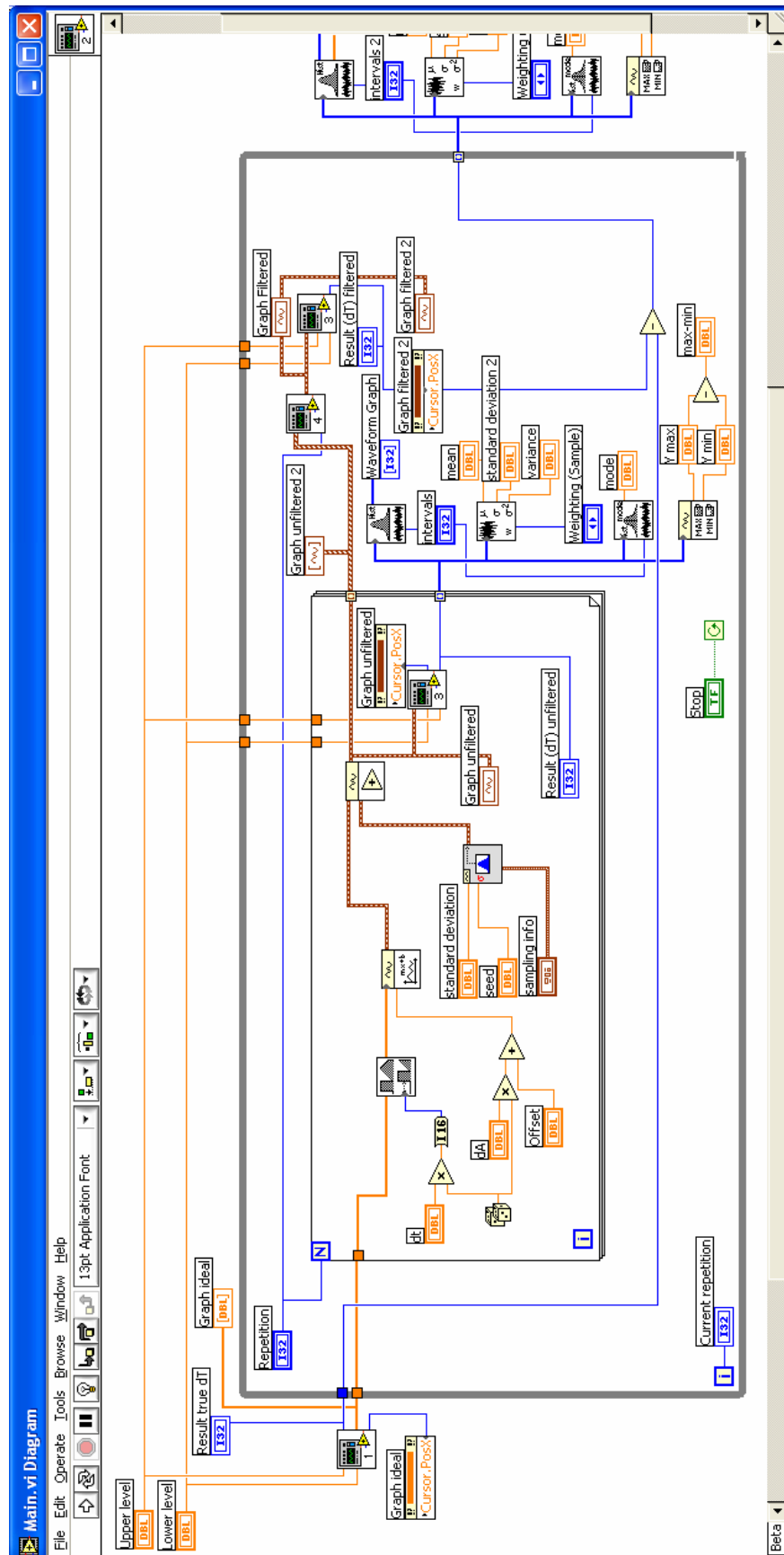


Bandymas Nr. 24			Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	Vid.	–0,82	–0,3	2,57	–8	0,956
Amplitudės nestabilumas, V	0,2	Nevid.					
Triukšmų lygis, V	0,015						
Vidurkinama signalų	10						
Bandymų skaičius	219						

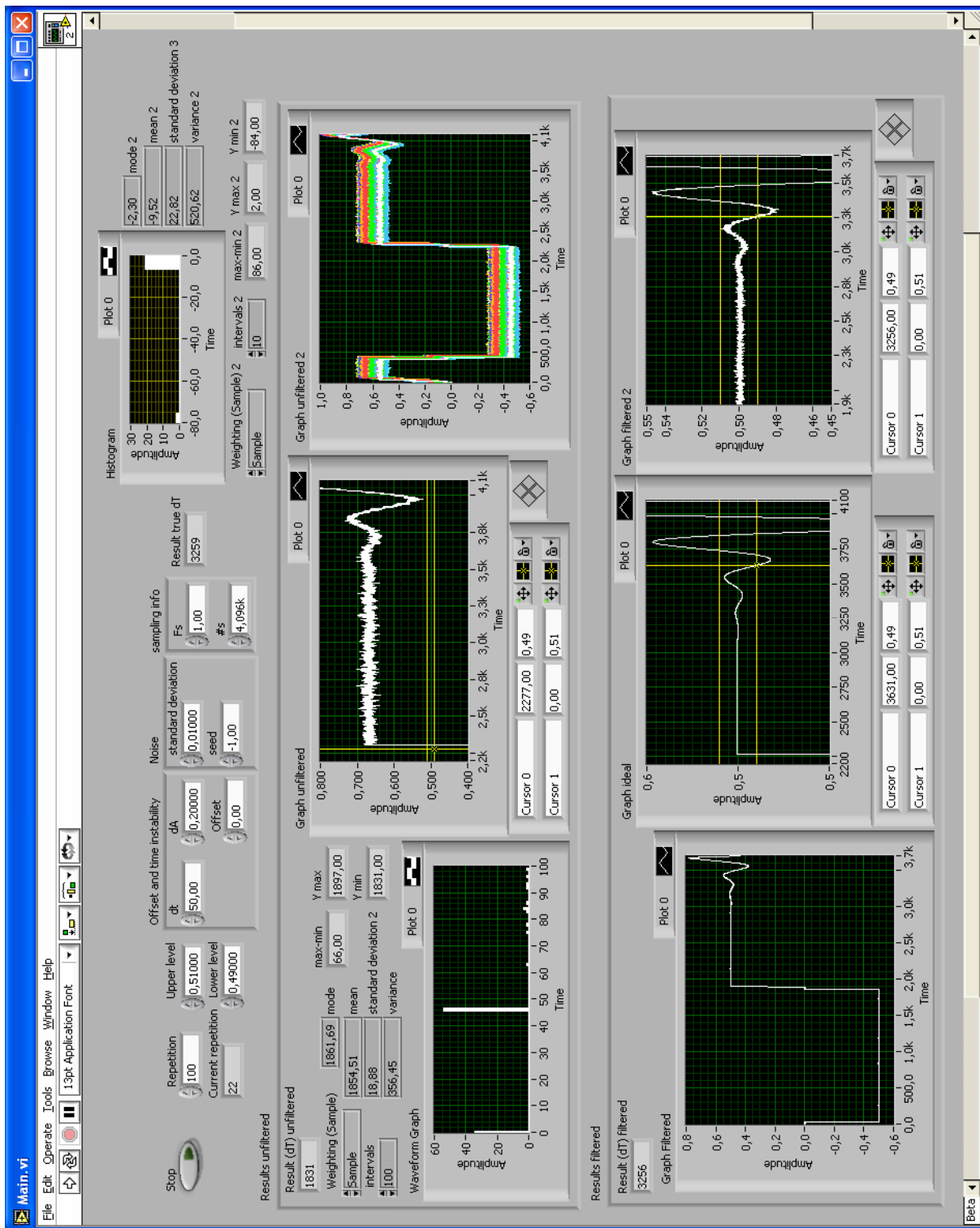
Bandymas Nr. 32	Realūs dydžiai						
Parametrai			Vidutinė vertė	Moda	Deviacija	Maksimalus skirtumas	%
Laiko nestabilumas, atskaitos	50	Vid.	–2,18	–1,85	2,34	–9	1,075
Amplitudės nestabilumas, V	0	Nevid.	–562	202,76	416,76	1212	144,8
Triukšmų lygis, V	0,025						
Vidurkinama signalų	20						
Bandymų skaičius	99						

8 Priedas. SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo LabView programos virtualieji instrumentai

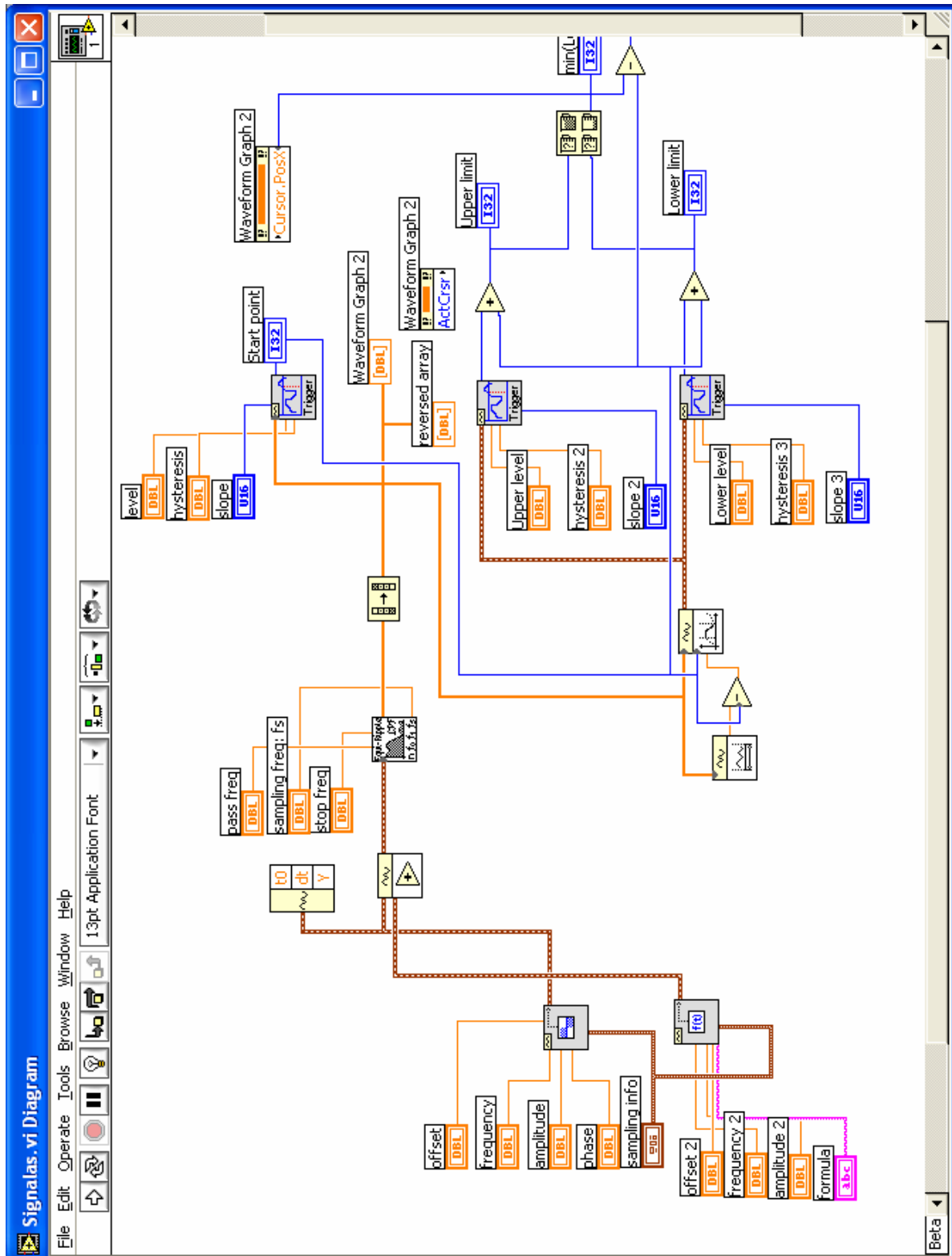
Pagrindinio virtualiojo instrumento diagrama



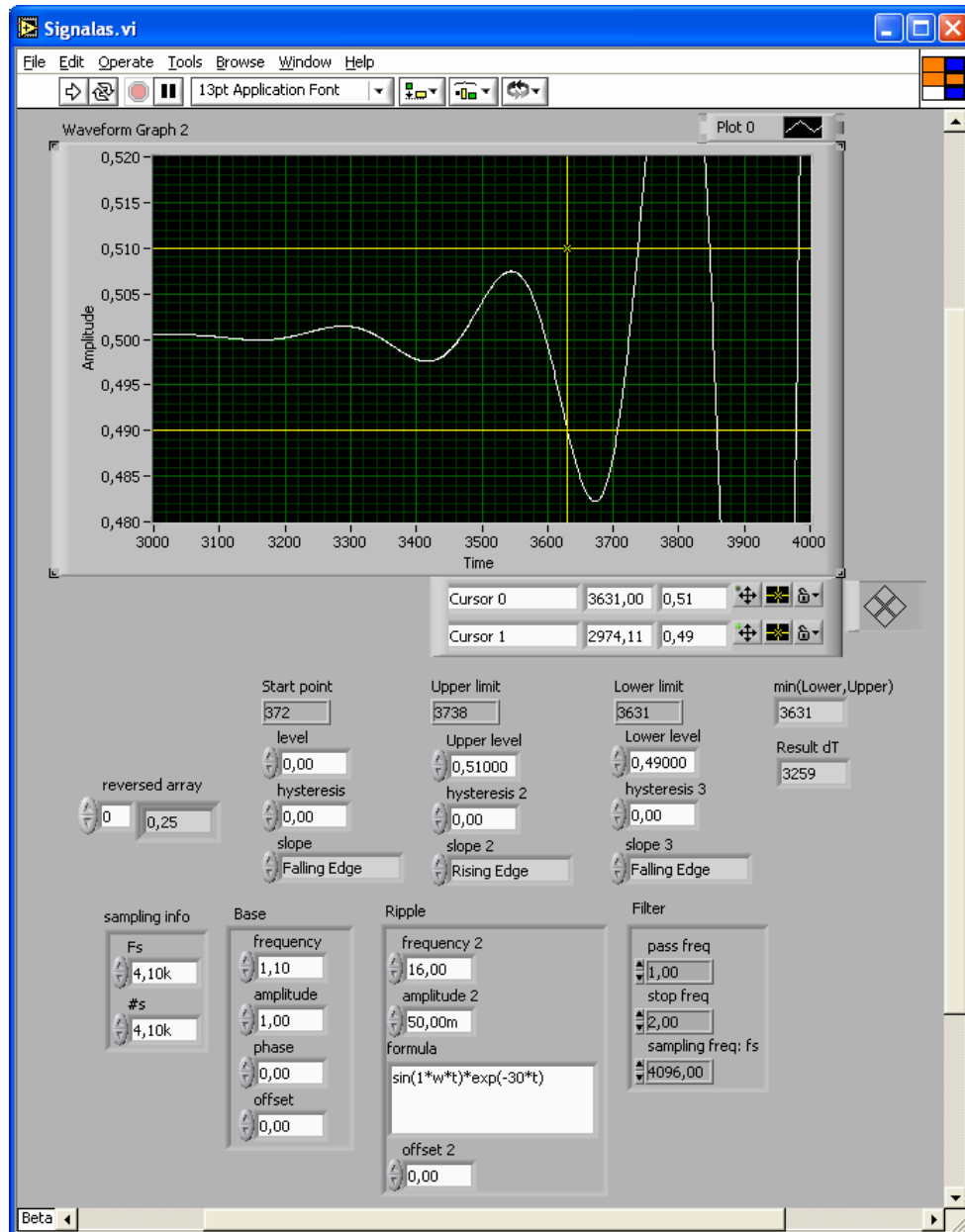
Pagrindinio virtualiojo instrumento valdymo panelė



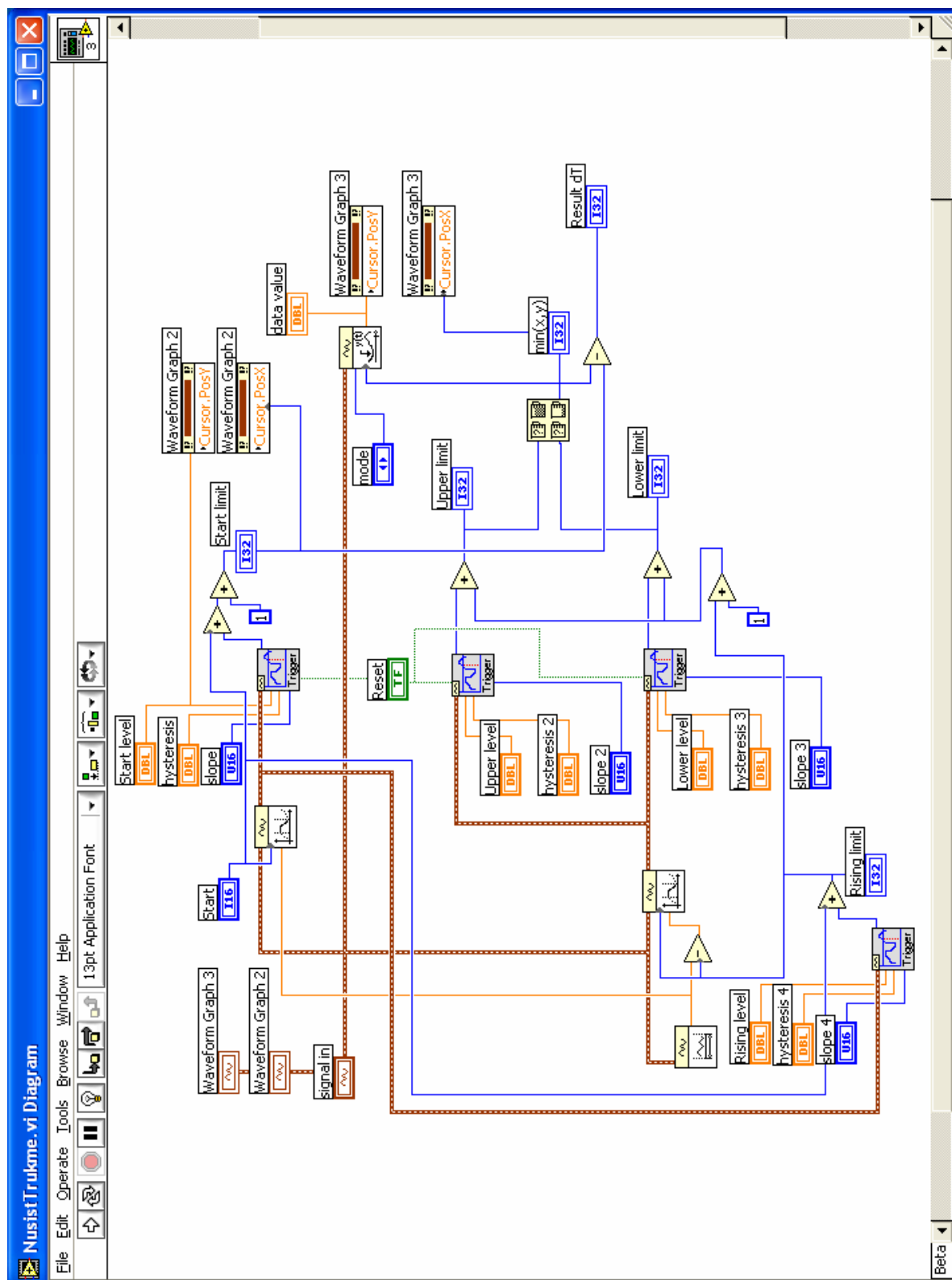
Signalo generavimo paprogramės virtualiojo instrumento diagrama



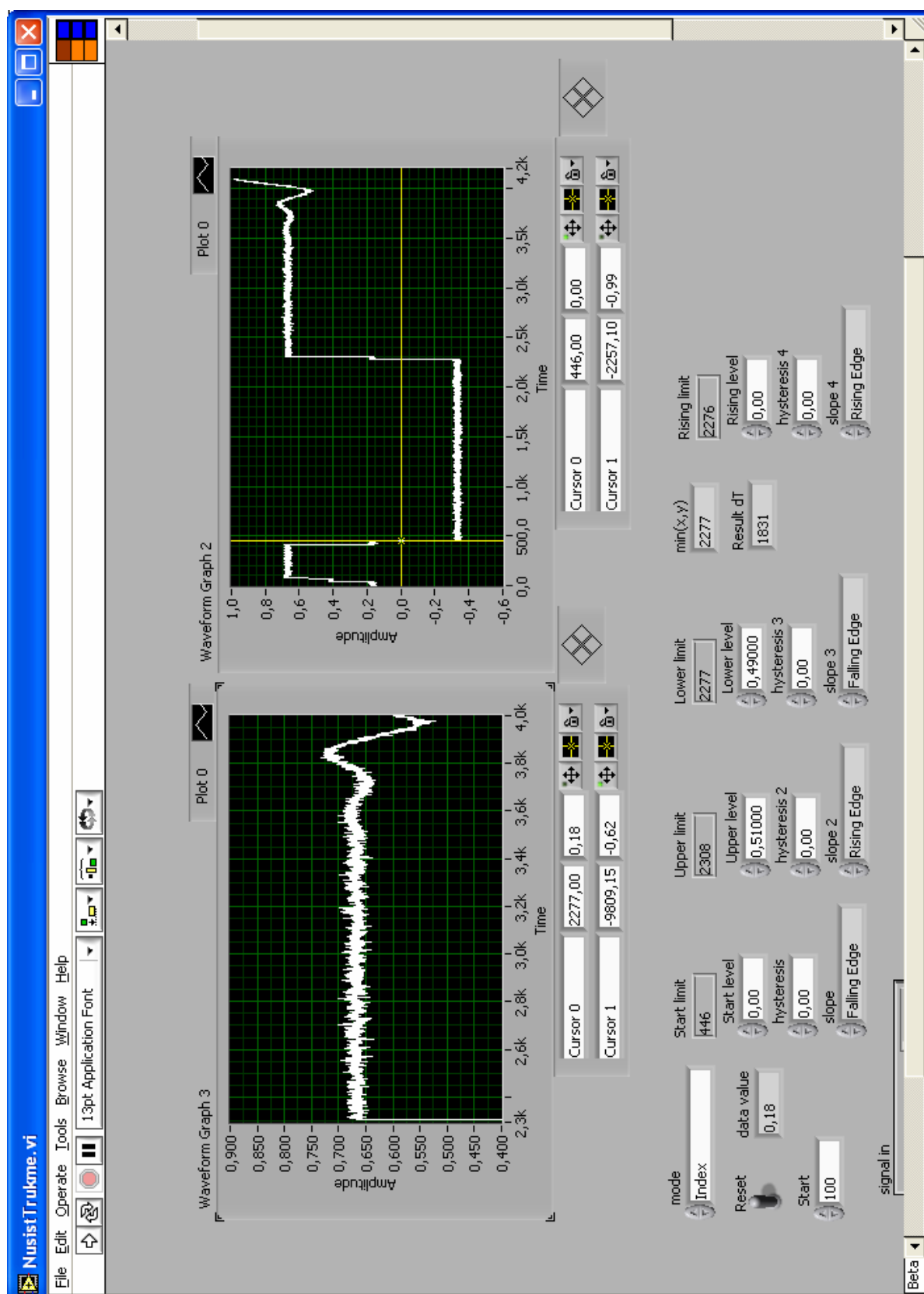
Signalų generavimo paprogramės virtualiojo instrumento valdymo panelė



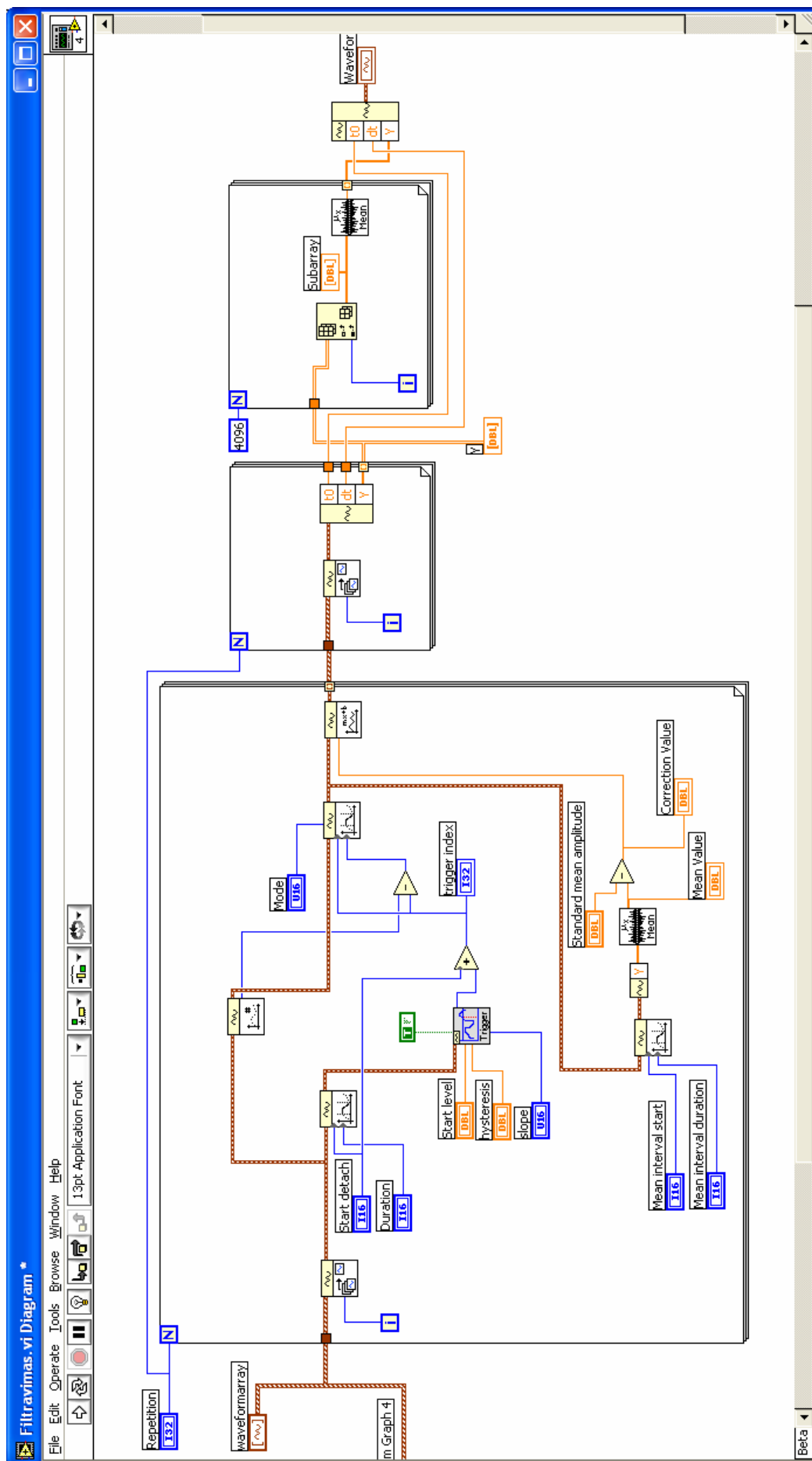
Nesuvirurkinto signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo paprogramės virtualiojo instrumento diagrama



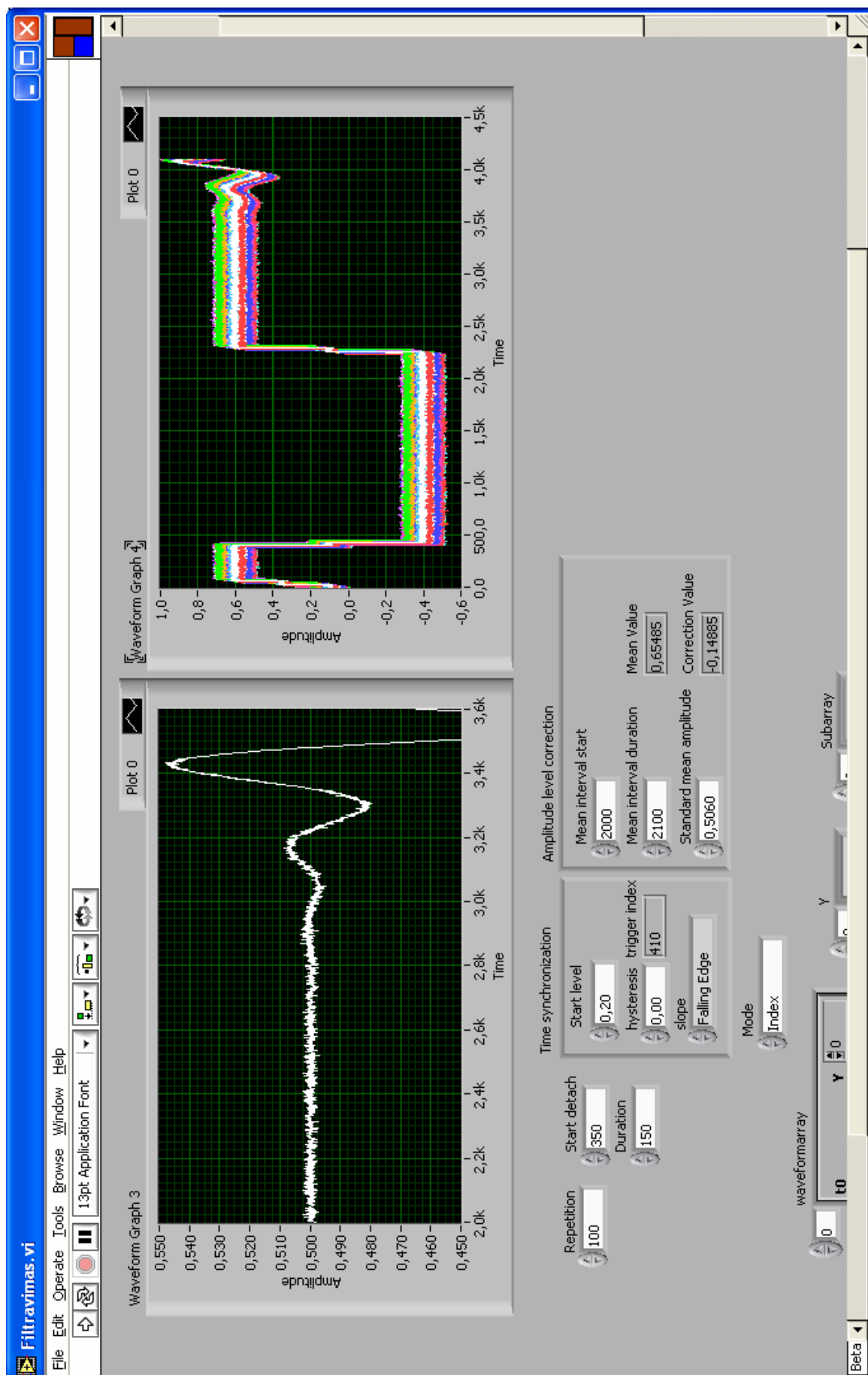
Nesuvidurkinto signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo paprogramės virtualiojo instrumento valdymo panelė



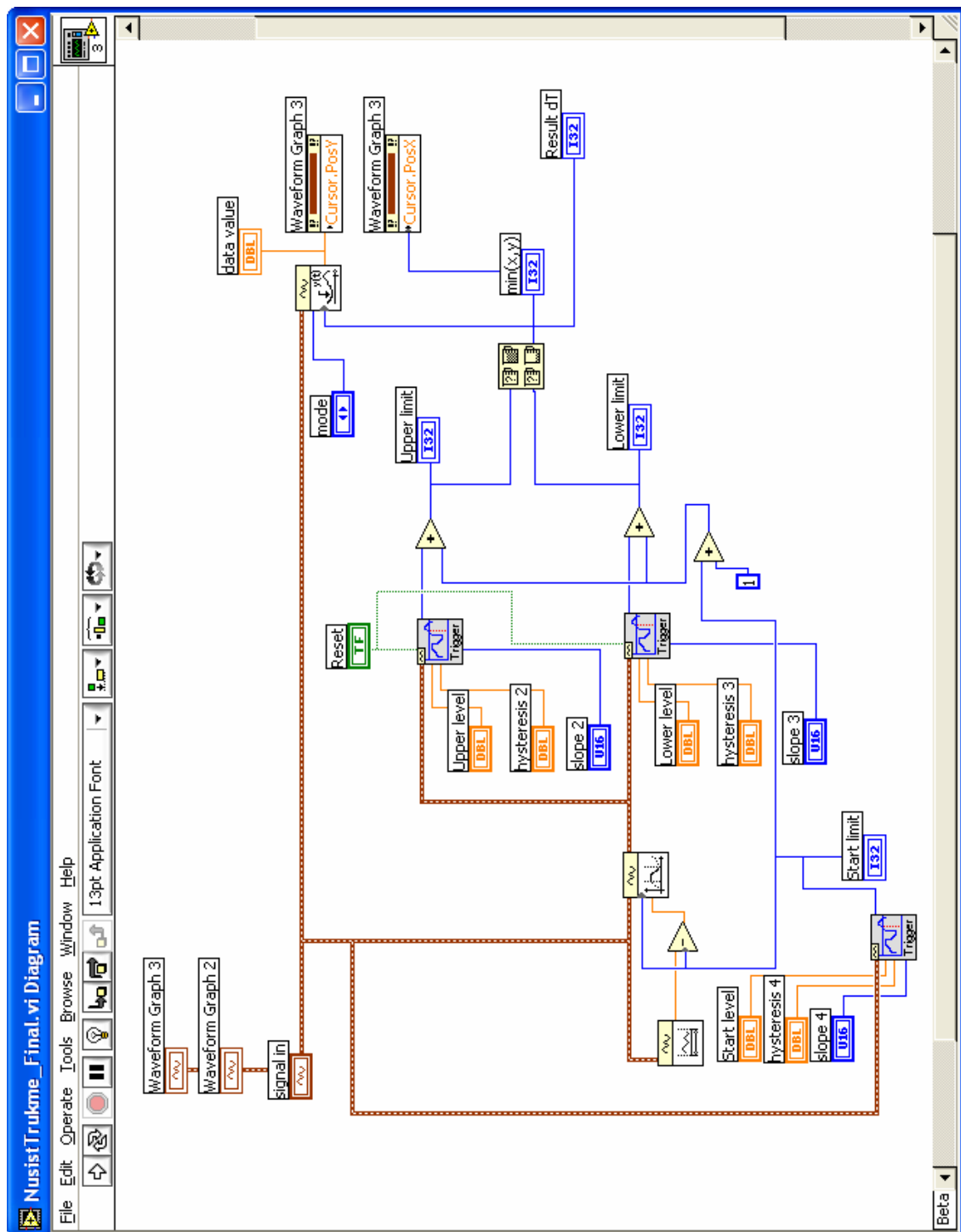
Signalo filtravimo paprogramės virtualiojo instrumento diagrama



Signalų filtravimo paprogramės virtualiojo instrumento valdymo panelė



Filtruoto signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo paprogramės virtualiojo instrumento diagrama



Filtruoto signalo nusistovėjimo trukmės įvertinimo paprogramės virtualiojo instrumento valdymo panelė

