



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Tomaš TANKELIUN

**20-GHZ PICOSCOPE 9300 STROBOSKOPINIO OSCILOSKOPO
AUTOMATIZUOTOS TESTAVIMO SISTEMOS KŪRIMAS IR TYRIMAS
DESIGN AND RESEARCH OF AUTOMATED TEST SYSTEM FOR 20-GHZ
PICOSCOPE 9300 SAMPLING OSCILLOSCOPES**

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)
prof. habil. dr. R. Martavičius
2015 m. _____ mėn. ____ d.

Tomaš TANKELIUN

**20-GHZ PICOSCOPE 9300 STROBOSKOPINIO OSCILOSKOPO
AUTOMATIZUOTOS TESTAVIMO SISTEMOS KŪRIMAS IR TYRIMAS
DESIGN AND RESEARCH OF AUTOMATED TEST SYSTEM FOR 20-GHZ
PICOSCOPE 9300 SAMPLING OSCILLOSCOPES**

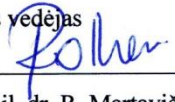
Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003
Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Vadovas	prof. dr. V. Urbanavičius (mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	_____ (parašas)	_____ (data)
Konsultantas	O. Zaytsev (mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	_____ (parašas)	_____ (data)
Lietuvių kalbos konsultantė	dr. A. Žemienė (mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	_____ (parašas)	_____ (data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis
Elektronikos inžinerijos studijų kryptis
Elektronikos studijų programa, valst. kodas 621H61003
Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

prof. habil. dr. R. Martavičius
2015 m. 03 mėn. 27 d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS

Studentui Tomáš TANKELIUN

Baigiamojo darbo tema: 20-GHz PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuotos testavimo sistemos kūrimas ir tyrimas

Design And Research Of Automated Test System For 20-Ghz
Picoscope 9300 Sampling Oscilloscopes

Patvirtinta 2013 m. 10 mėn. 30 d. dekanų potvarkiu Nr. 393el

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2015 m. 06 mėn. 4 d.

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo matavimo parametrų ir charakteristikų automatizuotą testavimo sistemą.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti analogiškų automatizuotų testavimo sistemų analitinę apžvalgą.
2. Išanalizuoti aukštadažnės matavimo įrangos testavimo principus ir metodus.
3. Sudaryti testuojamo PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuoto testavimo scenarijų.
4. Sudaryti automatizuotos testavimo sistemos struktūrinę ir principinę elektrinę schemas.
5. Sukurti automatizuotos testavimo sistemos valdymo programą.
6. Įgyvendinti suprojektuotą automatizuotą testavimo sistemą.
7. Ištirti automatizuotą testavimo sistemą.

Aiškinamojo rašto turinys

1. Įvadas
 - 1.1. Darbo aktualumas ir tikslas
 - 1.2. Darbo uždaviniai
 - 1.3. Naudoti tyrimo ir analizės metodai

1.4. Darbo naujumas ir praktinė nauda

1.5. Darbo struktūra

2. Automatizuotų testavimo sistemų analitinė apžvalga

3. Automatizuotų aukštadažnės matavimo įrangos testavimo metodų analizė

4. Automatizuotos testavimo sistemos projektavimas

5. Automatizuotos testavimo sistemos įgyvendinimas

6. Automatizuotos testavimo sistemos tyrimas

7. Apibendrinimas. Išvados

Literatūra

Priedai

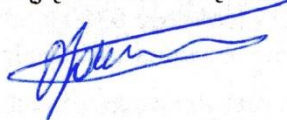
A priedas. Struktūrinė automatizuotos testavimo sistemos schema

B priedas. Elektrinė principinė automatizuotos testavimo sistemos schema

C priedas. PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuoto testavimo scenarijaus blokinė schema.

D priedas. Pranešimo 18-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga

Baigiamojo darbo rengimo konsultantas:



Oleg Zaycev

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas



(parašas)

prof. dr. Vytautas Urbanavičius

(mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau



(parašas)

2015 m. 05 mėn. 18 d.

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **20-GHz PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuotos testavimo sistemos kūrimas ir tyrimas**

Autorius **Tomaš Tankeliun**

Vadovas **prof. dr. Vytautas Urbanavičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

20-GHz PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuotos testavimo sistemos kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2015, 89 p., 53 iliustr., 10 lent., 31 bibl., 6 priedų.

Sukurta ir ištirta serijomis gaminamo PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuota testavimo sistema, leidžianti be operatoriaus nuolatinės priežiūros testuoti, pagal sudarytą testavimo scenarijų, svarbiausius osciloskopo matavimo parametrus, plečiant testavimo padengiamumą ir gerinant gaminamos produkcijos kokybę.

Automatizuotą testavimo sistemą sudaro testinių signalų iki 20 GHz generavimo ir matavimo įranga, signalų perdavimo traktų komutavimo įtaisas, asmeninis kompiuteris ir sistemos valdymo programa.

Atlikus sistemos tyrimus įsitikinta, kad sukurta automatizuota testavimo sistema atitinka visus užduoties reikalavimus.

Prasminiai žodžiai: automatizuota testavimo sistema, stroboskopinis osciloskopas, aukštų dažnių matavimo įranga, skaitmeninis signalų apdorojimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electronic Systems

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Electronics Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Design and Research of Automated Test System for 20-GHz PicoScope 9300 Sampling Oscilloscopes**

Author **Tomaš Tankeliun**

Academic supervisor **Prof Dr Vytautas Urbanavičius**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

Design and research of automated test system for 20-GHz PicoScope 9300 sampling oscilloscopes. Master's thesis in electronic engineering. Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, 2015. 89 p., 53 pictures, 10 tables, 31 references, 6 supplements.

The automated test system for the serially-produced PicoScope 9300 with a 20-GHz sampling oscilloscope has been developed and examined. The system allows testing the most important measurement parameters of a sampling oscilloscope according to the established test case and without permanent supervision of an operator in order to increase testing coverage and improve the quality of products.

The system consists of the equipment for measuring and generation of test signals (up to 20 GHz), the commutation device of canals of the transmission of signals, a personal computer and a control software program.

The results of the investigation prove that the automated test system which has been developed meets all the requirements of the task.

Keywords: automated test sistyem, sampling oscilloscope, high-frequency measurement equipment, digital signal processing.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei
gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomaš Tankeliun, 20093934

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, EKSfm-13

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. gegužės 21 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „20-GHz PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo automatizuotos testavimo sistemos kūrimas ir tyrimas“ patvirtintas 2013 m. spalio 30 d. dekanų potvarkiu Nr. 393el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: , Oleg Zaytsev. Mano darbo vadovas prof. dr. Vytautas Urbanavičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Tomaš Tankeliun

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

Žymenys ir santrumpos	11
Ivadas	13
Darbo aktualumas ir tikslas.....	13
Darbo uždaviniai	13
Naudoti tyrimo ir analizės metodai	14
Darbo naujumas ir praktinė nauda	14
Darbo struktūra.....	15
1. Automatizuotų testavimo sistemų analitinė apžvalga	17
1.1. Stroboskopiniai osciloskopai	17
1.1.1. Ekvivalentinio laiko strobavimo metodas.....	17
1.1.2. Atsitiktinis ekvivalentinio laiko strobavimas.....	18
1.1.3. Nuoseklus ekvivalentinio laiko strobavimas.....	19
1.1.4. Stroboskopiniai PS9300 serijos osciloskopai	20
1.1.5. Strobavimo įtaiso veikimo principas	22
1.2. Aukštadažnių testavimo sistemų vientisumo tobulinimas	24
1.3. Sistemos našumo, spartos ir pakartojamumo sąryšis	25
1.4. Aukštadažnės testavimo sistemos charakteristikų ir testuojamo įrenginio sąryšis	27
1.5. Aukštadažnės testavimo sistemos signalų perdavimo traktai	27
1.6. Skyriaus apibendrinimas.....	28
2. Aukštadažnės matavimo įrangos testavimo metodų analizė	31
2.1. Stroboskopinio osciloskopo dažninės charakteristikos matavimo metodai.....	31
2.2. Stroboskopinio osciloskopo kalibravimas naudojant didelės spartos fotodiodą.....	32
2.3. Signalų atspindžių įtakos įvertinimas	35
2.4. Skyriaus apibendrinimas.....	36
3. Automatizuotos testavimo sistemos projektavimas	39
3.1. Sistemos aukštadažnė matavimo įranga	39
3.2. ATS signalų perdavimo traktų projektavimas.....	42
3.3. Skyriaus apibendrinimas.....	46
4. Automatizuotos testavimo sistemos įgyvendinimas	47
4.1. ATS valdymo programinės įrangos programavimo aplinka	47
4.2. ATS valdymo programos įgyvendinimas	48
4.3. Vertikalaus kanalo testavimas.....	50
4.4. Horizontalaus kanalo ir sinchronizacijos grandinių testavimas	56
4.5. ATS valdymo programos veikimo algoritmas	59
4.6. Skyriaus apibendrinimas.....	61
5. Automatizuotos testavimo sistemos tyrimas	63
5.1. ATS vientisumo tyrimas	63
5.2. Priklausomybės tarp strobavimo įtaiso DACH ir DFCh tyrimas.....	68
5.3. Strobavimo įtaiso praleidžiamųjų dažnių juostos pločio prognozavimas taikant dirbtinių neuronų tinklus.....	78
5.3.1. Dirbtinių neuronų tinklo taikymas	78
5.3.2. Rezultatų apibendrinimas.....	84
Apibendrinimas. Išvados	85
Literatūros sąrašas	87
Priedai	90

A priedas. CD su pirminiu programos kodu	90
B priedas. Struktūrinė automatizuotos testavimo sistemos schema	91
C priedas. Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaiso principinė elektrinė schema	92
D priedas. PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo įvykdyto testavimo scenarijaus galutinė ataskaita	97
E priedas. Pranešimo 18-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma.....	99
F priedas. Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaiso spausdintinės plokštės ir surinktos konstrukcijos vaizdai	100

Žymenys ir santrumpos

VI (angl. <i>Virtual Instruments</i>)	virtualus instrumentas
DSO (angl. <i>Digital Storage Oscilloscope</i>)	skaitmeninis įrašantis osciloskopas
SCPI (angl. <i>The Standard Commands for Programmable Instrumentation</i>)	standartinės komandos programuojamai įrangai
SPDT (angl. <i>Single pole, double throw</i>)	vienpolis, dvikryptis
DNT	dirbtinių neuronų tinklas
ELS	ekvivalentinio laiko strobavimas
DACH	dažninė amplitudės charakteristika
DFCh	dažninė fazės charakteristika
ASK	analogas/skaičius keitiklis
SAK	skaičius/analogas keitiklis
ATS	automatizuota testavimo sistema
ADTS	aukštadažnė testavimo sistema
TP	testuojamas prietaisas
AK	asmeninis kompiuteris
SĮ	strobavimo įtaisas
RL	realaus laiko
AEL	atsitiktinio ekvivalentinio laiko
NEL	nuoseklaus ekvivalentinio laiko
INSG	išorinė netiesioginė sinchronizacijos grandinė

IVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Informacinių technologijų amžiuje kasdieniniai apdorojamų skaitmeninių duomenų kiekiai nenustojamai auga. Toks nenuilstantis informacinių technologijų srities augimas kelia vis aukštesnius reikalavimus skaitmeninius duomenis adoruojančiai įrangai. Vienas iš tokių reikalavimų yra duomenų perdavimo ir apdorojimo sparta. Bet kokio, aukštadažnius signalus apdorojančio arba generuojančio, įtaiso projektavimo, įgyvendinimo ir tyrimo procese yra naudojamas aukštadažnis osciloskopas, leidžiantis kontroliuoti kuriamo įtaiso atskirų mazgų darbą. Baigiamajame darbe yra tiriamas aukštadažnis, 20-GHz praleidžiamųjų dažnių juosto pločio *PicoScope 9300* serijos stroboskopinis osciloskopas, kurio veikimo principas pagrįstas ekvivalentinio laiko strobavimo metodu.

Pagrindinis baigiamojo darbo tikslas yra ištirti stroboskopinio osciloskopo darbinių charakteristikų matavimo metodus ir principus, sukurti automatizuotą testavimo sistemą (ATS), gebančią be nuolatinės operatoriaus priežiūros testuoti tiriamo stroboskopinio osciloskopo svarbiausius matavimo parametrus aukštadažnių signalų srityje, ir ištirti sukurtos ATS darbinės charakteristikas.

Darbo uždaviniai

Užsibrėžtam tikslui pasiekti buvo numatyti tokie uždaviniai:

1. Atlikti tiriamo stroboskopinio osciloskopo, kurio veikimas yra paremtas ekvivalentinio laiko matavimo metodu, darbo principų ir automatizuotų testavimo sistemų projektavimo principų analitinę apžvalgą;
2. Atlikti aukštadažnės matavimo įrangos testavimo metodų analizę;
3. Suprojektuoti ir įgyvendinti aukštadažnių signalų perdavimo traktų komutavimo įtaisą, kurio pagalba į vieną sistemą apjungiamą visa darbe naudojama testinių signalų matavimo ir generavimo įrangą;
4. Sukurti ATS valdymo programą, kuri didžiąja dalimi supaprastintų naujos įrangos prie sistemos prijungimo ir naujų testuojamo prietaiso testavimo scenarijų įgyvendinimo procesus;
5. Ištirti ATS darbinės charakteristikas, įvertinat sistemos našumo, spartos ir pakartojamumo rodiklių lygį.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Baigiamajame darbe stroboskopinio osciloskopo strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos pločio matavimui taikomi du skirtingi metodai. Pirmas – kintančio dažnio pastovios amplitudės harmoninio virpesio matavimo metodas, paremtas išorinių tikslių testavimo signalų generavimu, naudojant harmoninių virpesių generatorių ir signalų galios matuoklį. Antras – priešpriešiais sujungtų grandinių matavimo metodas, kai išnaudojami osciloskopų strobuojančių grandinių tam tikri konstrukciniai ypatumai, kurie leidžia praleidžiamųjų dažnų juostos pločio matavimus atlikti pasitelkus tik du vienodus tiriamus stroboskopinius osciloskopus ir impulsinių signalų šaltinį osciloskopų darbo režimų sinchronizacijai.

Osciloskopo į matavimo duomenis įnešamų matavimo klaidų, atsirandančių dėl osciloskopo laiko bazės ir sinchronizacijos grandinės netobulumų, kompensavimas atliekamas trim etapais kompensuojant: a) matavimo duomenyse atsirandančius atskirų signalo imčių drebėjimus, b) laiko bazės iškraipymus ir c) signalo įrašų dreifus. Klaidų įtakos tyrimui ir kompensavimui naudojami kryžminės koreliacijos skaičiavimu paremtas dreifo kompensavimo ir laiko bazės delta intervalų trukmių, idealus harmoninio virpesio atžvilgiu, kompensavimo metodai.

Automatizuotos testavimo sistemos tyrimas atliekamas renkant statistinius matavimo duomenis ir pagal juos analizuojant sistemos našumo, spartos ir pakartojamumo lygį.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Bet koks serijinio prietaiso gamybos procesas pasižymi aibe pasikartojančių veiksmų. Vienas iš efektingiausių būdų sumažinti gamybos kaštus yra tokio tipo procesų automatizavimas. Automatizuotas įrenginio testavimas leidžia pasiekti konkurencinį pranašumą, mažinti gamybos išlaidas ir užtikrinti aukštą produkto kokybę. Taip pat, automatizuotas testavimas pašalina žmogiškąjį faktorių, taip gerindama testavimo proceso pakartojamumo rodiklį, kadangi testavimo proceso neveikia operatoriaus žinių stoka arba jo nuovargis.

Šiuo metu rinkoje egzistuoja ganėtinai didelė universalių automatinių testavimo sistemų pasiūla. Dažniausiai tai būna labai lanksčios, pilnavertės, lengvai programuojamos sistemos, kurių pagalba galima nesunkiai užtikrinti lankstų ir patikimą gaminamo prietaiso testavimą. Tačiau tokios sistemos dažniausiai skirtos testuoti prietaisus, kurių mazgai dirba žemų arba vidutinių signalų dažnių srityse ir visai nepritaikyti testuoti aukštadažnių signalų matavimo įrangą.

Darbo struktūra

Pirmame darbo skyriuje apžvelgiami stroboskopiniame osciloskope naudojami ekvivalentinio laiko signalų matavimo metodai ir aukštadažnių testavimo sistemų projektavimo principai. Antrame skyriuje nagrinėjami aukštadažnės matavimo įrangos testavimo metodai. Trečiame ir ketvirtame darbo skyriuose pateikta automatizuotos testavimo sistemos projektavimo ir įgyvendinimo eiga. Paskutiniame skyriuje tiriamos automatizuotos testavimo sistemos charakteristikos, priklausomybės tarp osciloskopo dažninės amplitudės ir fazės charakteristikų bei triukšmo ir dažninės amplitudės charakteristikų.

1. AUTOMATIZUOTŲ TESTAVIMO SISTEMŲ ANALITINĖ APŽVALGA

Pagal *TechNavio* analitinės kompanijos atliktą pasaulinės skaitmeninių osciloskopų rinkos analizę [4] yra prognozuojamas tolesnis stabilus šios rinkos augimas 2013–2018 m. laikotarpiu, kuris tikėtina sieks apie 5,58 % per metus. Nors šis rodiklis ganėtinai geras, pati, ypač aukštadažnės (nuo pikosekundžių diapazono) matavimo įrangos, rinka pagal gaminamų prietaisų skaičių yra santykinai mažos apimties. Pagrindiniai tokios aukštos klasės įrangos gamintojai yra *Agilent Technologies* [19], *Danaher* (*Tektronix*, *Fluke*, *Keithley Instruments*) [20], *Teledyne LeCroy* [21]. Paminėtos įmonės savo produkcijos testavimą atlieka savarankiškai ir savo aukštadažnės įrangos testavimo sistemų nekomercializuoja. Dėl paminėtų priežasčių automatizuotų testavimo sistemų (ATS) apžvalginame skyriuje neapžvelgiamos konkrečios ATS, o dėmesys skirtas testuojamam įrenginiui, jo veikimo principui ir aptarti ATS projektavimo principai.

1.1. Stroboskopiniai osciloskopai

Stroboskopinių osciloskopų veikimo principas yra pagrįstas visų signalo dažnio komponentėlių strobavimu tam tikrame laiko intervale. Strobavimas gali būti atliktas signalo dažnių arba ekvivalentinio dažnio srityje [1], todėl stroboskopiniai osciloskopai, priklausomai nuo jų imtuvo analoginės dalės architektūros, yra skirstomi į dvi kategorijas:

- strobuojantys signalo dažnyje, kai strobavimo dažnis yra dvigubai spartesnis už signalo sparčiausiai kintančios komponentės dažnį;
- strobuojantys ekvivalentiniame dažnyje, kai signalo tam tikrų dažnio komponentėlių kitimo sparta yra didesne už strobavimo dažnį.

Pirmieji osciloskopai gali matuoti realaus laiko signalus, tačiau yra apriboti sistemos diskretizacijos sparta, tuo tarpu antrieji gali matuoti tik pasikartojančius arba periodinius signalus, kurių maksimalus matuojamas spektro komponentės dažnis visiškai nepriklauso nuo sistemos diskretizacijos spartos. Tačiau dažniausiai šie metodai apjungiami viename prietaise taip padarant jį universalesniu. Antros kategorijos stroboskopiniuose osciloskopuose naudojami specialūs skaitmeninių signalų apdorojimo metodai, leidžiantis atkurti tarpiniame dažnyje diskretizuotą signalą. Toliau yra aptarti ekvivalentinio laiko strobavimo metodai, kurių taikymas leidžia pagerinti tam tikras osciloskopo signalų matavimo charakteristikas, smarkiai neįtakojant visos matavimo sistemos sudėtingumo.

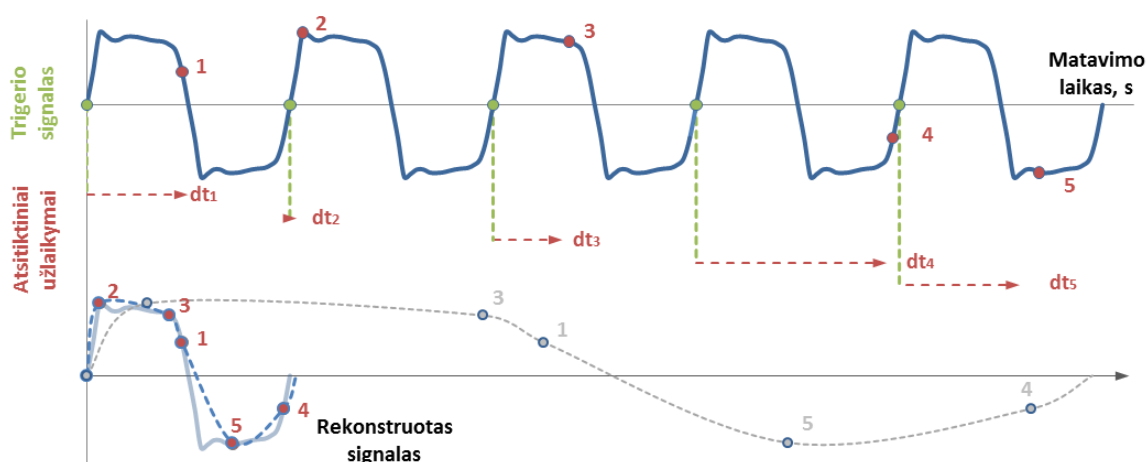
1.1.1. Ekvivalentinio laiko strobavimo metodas

Ekvivalentinio laiko strobavimo (ELS) metode pritaikytas laiko mastelio rekonstrukcijos algoritmas, kuris suteikia galimybę atkurti surinkto signalo (naudojant žemą strobavimo dažnį)

formą, kaupiant imtis iš kelių pasikartojančio signalo periodų [2]. Imtys gali būti renkamos nuosekliai arba atsitiktinai laiko ašies atžvilgiu. ELS metodo privalumas, lyginant su alternatyviu metodu – harmonikų strobavimu [5] yra tas, kad ELS metodas nepriklauso nuo signalo spektro komponentių padėties ir pasiskirstymo. ELS metodo pritaikymo sritys yra platesnės, bet jo įgyvendinimui reikalingos apriorinės žinios apie signalo formos pasikartojimo dažnį. Taikant šį metodą galima pasiekti kelių šimtų GHz eilės diskretizavimo dažnį [1]. Šiuo metu yra žinomi du ELS metodo taikymo variantai, leidžiantis kaupti signalo imtis nuosekliai arba atsitiktinai.

1.1.2. Atsitiktinis ekvivalentinio laiko strobavimas

Atsitiktinis imčių kaupimas plačiai naudojamas DSO (nuo angl. *Digital Storage Oscilloscope*) matavimo prietaisuose. Metodas pagrįstas matuojamo signalo atsitiktinių imčių ėmimu sinchronizacijos (trigerio) signalo atžvilgiu. Įgyvendinant atsitiktinį ELS metodą, sistemoje naudojamas vidinis strobavimo taktinis dažnis, kuris yra asinchroninis trigerio signalui. Pastarasis priklauso nuo matuojamo signalo periodo trukmės, t. y. pasikartojimo dažnio. Strobuojant nuosekliai laike, atsitiktinės imtys kaupiamos nepriklausomai nuo trigerio impulsų. Kartu abi strobavimo ir trigerio grandys generuoja atsitiktinius užlaikymus su žinomomis trukmėmis. Rezultate osciloskopo ekrane laiko ašies atžvilgiu žinomose pozicijose, kurias nusako sugeneruoti atsitiktiniai užlaikymai, yra vaizduojamos surenkamos imtys (1.1 pav.). Nors, kaip buvo minėta, strobavimas vyksta asinchroniškai signalo pasikartojimo atžvilgiu sistemoje galima apsieiti be atsitiktinių laikų užlaikymų generatoriaus, pakanka išmatuoti laiko tarpą tarp sinchronizacijos įvykio ir pirmo strobavimo impulso. Išmatuotas laikas gali charakterizuoti ir vienos imties padėtį laiko ašyje, ir visos sekos, kadangi tarpai tarp imčių atitinka strobavimo dažnį.



1.1 pav. Grafikas, vaizduojantis atsitiktinį ekvivalentinio laiko strobavimo metodą

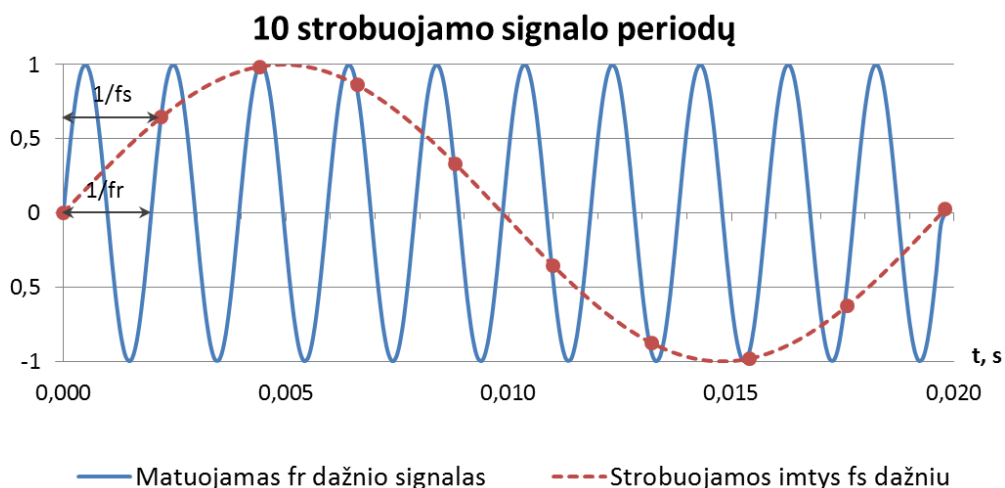
Pagrindinis atsitiktinio imčių kaupimo metodo privalumas yra galimybė išmatuoti ir atvaizduoti imtį dar iki trigerio impulso atsiradimo momento, tai leidžia „pagauti“ sparčiai kintančius, smailius

signalų šlaitus. Nuoseklaus strobavimo atveju signalo imtis kaupiama tik atsiradus sinchronizacijos įvykiui. Tai reiškia, kad spartūs kitimai signalo pradžioje negali būti išmatuoti ir dėl to siaurėja matavimo sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotis. Be to, kai matuojamas lėtai pasikartojantis signalas, atsitiktinis ELS metodas leidžia rinkti keletą imčių per trigerio signalo vieną periodą ir atvaizduoti renkamas imtis greičiau. Toks strobavimo metodas turi trūkumą, kai matuojamas aukšto dažnio signalas reikalingas spartus ir labai stabilus sinchronizacijos grandinės veikimo darbas. Atsitiktinis ELS metodas jautrus valdomojo signalo drebinėjimams (angl. *jitter*) ir laiko slinkimui (angl. *time drift*) sinchronizacijos ir strobavimo grandinių atžvilgiu. Tokie laiko iškraipymai daro įtaką generuojamų atsitiktinių užlaikymų tikslumui, dėl to mažėja visos matavimo sistemos raiška [6].

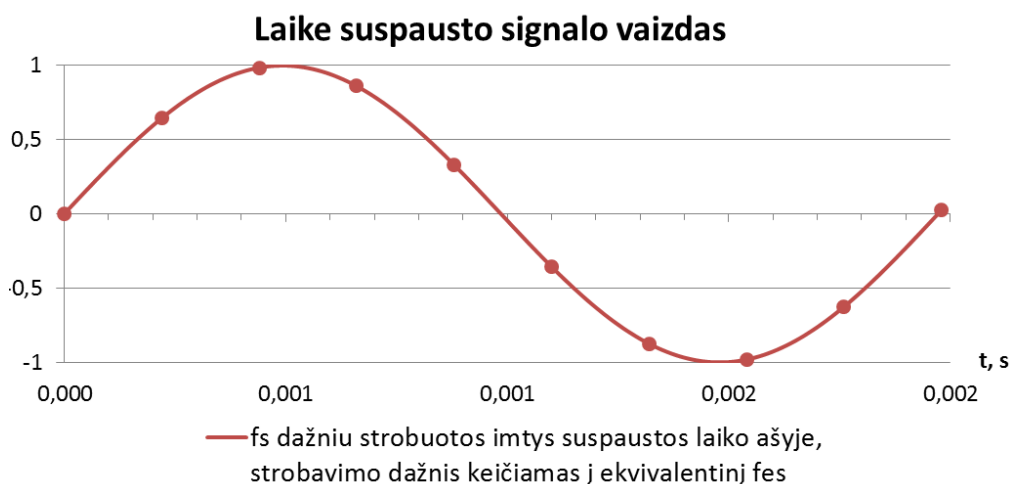
1.1.3. Nuoseklus ekvivalentinio laiko strobavimas

Kitas ELS metodo variantas atitinka vieną ar kelių signalo imčių rinkimą per signalo periodą nuosekliu būdu. Toks strobavimo metodas reikalauja apriorinių žinių apie signalo periodo dažnį, jis gali būti parenkamas rankiniu būdu arba išmatuotas signalo dažnį atstatančios grandinės pagalba (angl. *clock recovery*).

Stroboskopiniai osciloskopai grįsti šiuo metodu taip pat vadinami DSOs. Juose nuoseklus ELS metodas įgyvendinamas tokiu būdu, kad per vieną signalo periodą yra matuojama tik viena imtis. Kiekvieno matuojamo signalo periodo pradžioje sinchronizacijos grandinė sugeneruoja sinchronizacijos impulsą. Sudarant ir kiekvieną kartą inkrementuojant tam tikros trukmės užlaikymą tarp sinchronizacijos ir strobavimo įvykių, išmatuojamas vis naujas signalo periodo formos taškas. Pvz., antrojo sinchronizacijos impulso metu strobavimo grandinė lauks tam tikrą laiką dt prieš paimant signalo imtį. Trečio impulso metu prieš paimant imtį strobavimo užlaikymas jau truks $2dt$ ir t. t. Tokiu būdu imčių rinkimo procesas trunka tam tikrą laiką, kol nesukaupiamos visos reikalingos matuojamo signalo įrašo imtys. Parinkta užlaikymo trukmės vertė dt nusako ekvivalentinio strobavimo dažnį, pagal kurį rekonstruojamas išmatuotas signalas. Imtys, kurios buvo matuojamos per kelis signalo periodus, toliau suspaudžiamos laiko ašyje ir pateikiamos kaip surinktos per vieną periodą, naudojant ekvivalentinį strobavimo dažnį (1.2 pav. ir 1.3 pav.).



1.2 pav. Grafikas vaizduojantis matuojamo signalo strobavimą, taikant nuoseklaus ekvivalentinio laiko strobavimo metodą



2.3 pav. Grafikas vaizduojantis surinktų imčių suspaudimą laiko ašyje taikant nuoseklaus ekvivalentinio laiko strobavimo metodą

Strobavimo dažnis f_s mažesnis už signalo formos pasikartojimo dažnį f_r , tuo tarpu ekvivalentinis strobavimo dažnis f_{es} yra lygus:

$$f_{es} = N_s \cdot f_r, \quad (1.1)$$

čia N_s – imčių skaičius sukauptame įrašė (kitais signalo atvaizdavimo lange), nagrinėjamu atveju tai imčių skaičius viename rekonstruoto signalo periode.

1.1.4. Stroboskopiniai PS9300 serijos osciloskopai

Ankstesniame skyriuje aptarti matuojamo signalo imčių rinkimo būdai, taikant skirtingus skaitmeninius signalų apdorojimo metodus, taip pat yra naudojami ir PS9300 serijos osciloskopuose. Šie osciloskopai taikomi telekomunikacinių duomenų perdavimo signalų su 10

GB/s sparta matavimams arba sprendžiant įvairias matavimo užduotis aukštadažnių signalų iki 20 GHz srityje, pvz., tokias kaip puslaidininkinių komponentų arba sparčių loginių elementų tyrimai.

Pagrindinės *PS9300* osciloskopo elektrinės charakteristikos:

- praleidžiamųjų dažnių juostos plotis – 20 GHz;
- įėjimo signalo įtampos diapazonas – ± 1 V;
- maksimalus imčių kiekis per sekundę – 1 MS/s;
- dinaminis diapazonas – 60 dB;
- maksimalus ekvivalentinis strobavimo dažnis – 15 THz;
- sinchronizacijos grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis – 14 GHz;
- maksimalus signalo drebinimas – 1,8 ps;
- ASK raiška – 16 bit.

Kalbant apie *PS9300* osciloskopo mechanines charakteristikas galima būtų pažymėti, kad tai yra mažų matmenų, portatyvus prietaisas galintis dirbti derinyje tik su asmeniniu nešiojamuoju arba stacionariuoju kompiuteriu. Ryšis tarp kompiuterio ir osciloskopo gali būti realizuotas USB arba LAN sąsajų pagalba. Taip pat verta pažymėti, kad prietaiso vidinių elementų išdėstymas yra realizuotas vienplokštės architektūros pagrindu, t. y. vienoje spausdintinėje plokštėje išdėstyti elementai yra lengvai pasiekiami. Abu paminėti veiksniai neįneša jokių papildomų reikalavimų testavimo sistemos konstrukcijai. Visos ATS jungtys bus sukoncentruotos viename, testuojamo prietaiso prijungimo, taške. Dėl tuo atsiranda galimybė greitai prijungti arba atjungti testuojamą įrenginį nuo testavimo stendo.

PS9300 serijoje yra keli stroboskopinių osciloskopų modeliai. Visi modeliai apibudinami beveik tuo pačiu charakteristikų rinkiniu, kadangi prietaisai turi bendra architektūrą, ir, priklausomai nuo modelio, komplektuojami skirtingais arba papildomais komponentais, kurie suteikia pageidaujama funkcionalumą. Pagrindiniai *PS9300* serijos modelių skirtumai pateikti 2.1 lentelėje.



1.4 pav. *PicoScope 9312* stroboskopinio osciloskopo su impulsų galvutėmis vaizdas

1.1 lentelė. *PicoScope 9300* serijos modelių parametų ir funkcionalumo palyginimas

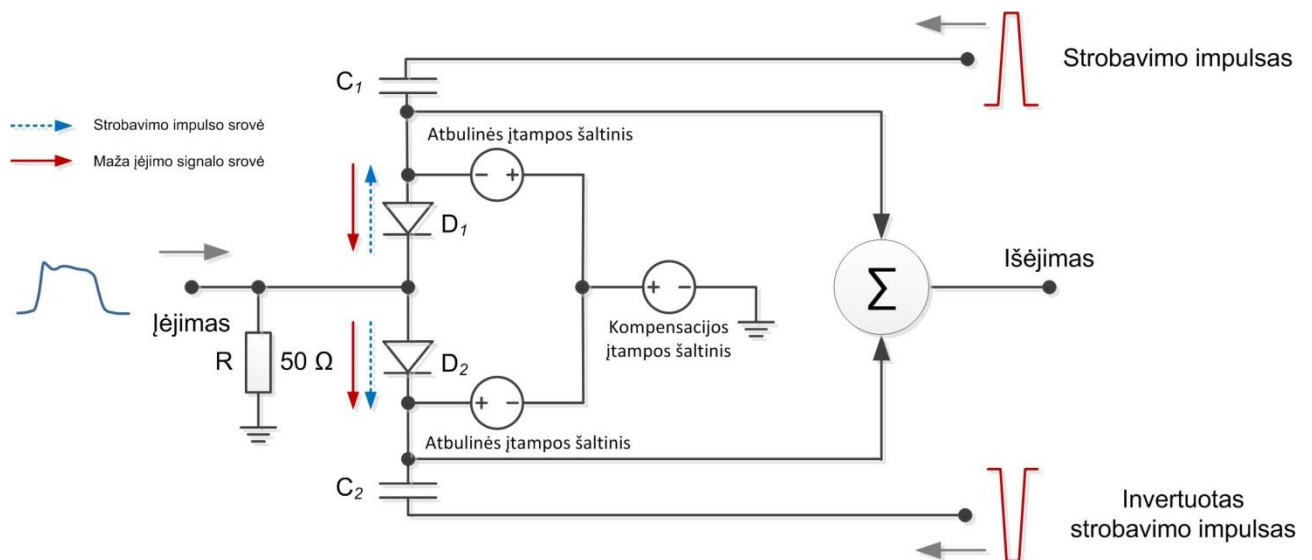
Parametrai ir galimybės	PS9301	PS9302	PS9311	PS9312	PS9321
2 × 20 GHz įėjimo kanalai	✓	✓	✓	✓	✓
Diferencialinis impulsinis generatorius TDR/TDT	–	–	60 ps	40 ps	–
Išorinė TDR/TDT impulsų galvutė	–	–	–	✓	–
9,5 GHz optinis–elektrinis keitiklis	–	–	–	–	✓
Sinchronizacijos signalo atstatymo grandis	–	✓	–	–	✓
USB prievadas	✓	✓	✓	✓	✓
LAN prievadas	–	✓	✓	✓	✓

Kaip ir visose osciloskopuose *PS9300* įrenginyje yra vertikali ir horizontali skleistinės. Pirmoje signalo vaizdas skleidžiamas pagal signalo įtampos kitimą, o antroje signalas skleidžiamas laiko ašies atžvilgiu. Horizontalaus kanalo kokybę priklauso nuo laiko bazės grandinės stabilumo matuojant ypač trumpas laiko trukmes, kurios gali sekti iki kelių dešimčių fento sekundžių. Tokios trukmės vadinamos delta intervalo trukmėmis ir dažniausiai jų stabilumas ir ribinės vertės pilnai nusako horizontalaus kanalo kokybę. Vertikalaus kanalo kokybę priklauso nuo kur kas didesnio parametų kiekio. Pagrindinis vertikalaus kanalo mazgas yra strobavimo įtaisas (SI) nuo kurio charakteristikų priklauso osciloskopo įėjimo charakteringojo impedanso dydis, įtampos netiesinių iškreipimų lygis, triukšmo dydis įėjime, praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ir t. t. Dažniausiai vertikalaus kanalo kokybę apsprendžia visas svarbiausias osciloskopo charakteristikas. Todėl logiška būtų testavimo sistemos kūrimą pradėti remiantis būtent vertikalios dalies parametrais ir toliau plečiant testavimo padengiamumą kituose įrenginio mazguose. Didelis testuojamų mazgų skaičius ir geras ATS vientisumas leidžia atrasti beveik visas įmanomas klaidas įrenginio gamybos procese.

1.1.5. Strobavimo įtaiso veikimo principas

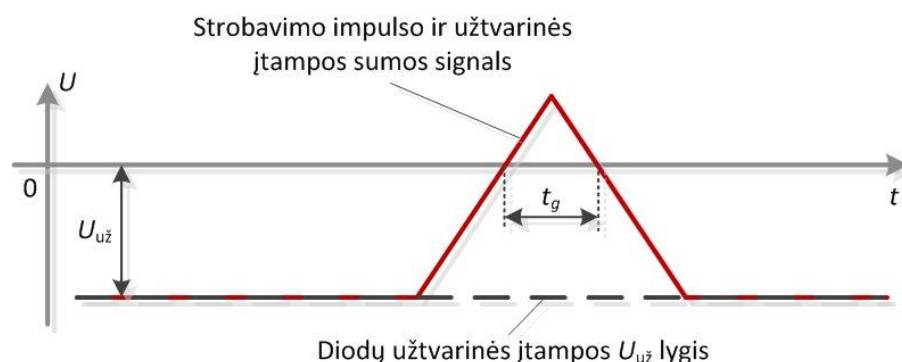
Strobavimo įtaise matuojamo signalo aukštadažnio spektro perkėlimas į žemesnio dažnio sritį vyksta įtaiso strobavimo grandinėje. Paveiksle 1.5 pateikta supaprastinta SI strobavimo grandinės principinė elektrinė schema, kurios pagrindą sudaro du aukštadažniai diodai D_1 ir D_2 . U_b įtampos šaltiniai nustato diodų darbo režimą į aukštos varžos būseną. Kiekvieną kartą iššaukant strobavimo impulsui, pastarasis, labai trumpam laiko tarpui nustato diodus į mažos varžos būseną. Kai diodai yra šioje būsenoje nenulinės vertės įtampa, esanti grandinės įėjime, sukuria srovę, kuri tekėdama per diodus pakrauna kondensatorius C_1 ir C_2 . Kondensatorių sukauptas krūvis tokioje grandinėje tiesiogiai priklauso nuo esamo įėjimo signalo įtampos lygio.

Tam, kad užtikrinti tik įėjimo signalo krūvio pernašą į kondensatorius, grandinė palaikoma subalansuotojo būsenoje. Diferencialiniai krūviai, kuriuos sukuria teigiamas ir neigiamas strobavimo impulsai, yra panaikunami, t. y. jie sukompensuoja vienas kitą. Sukauptas kondensatorių krūvis siunčiamas į išėjimą, kur jis toliau stiprinamas ir skaitmenizuojamas analogas/skaičius keitiklyje.



1.5 pav. Supaprastinta SI strobavimo grandinės principinė elektrinė schema

Strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis yra atvirkščiai proporcingas laiko tarpui, kurio metu diodas randasi mažos varžos būsenoje. Toks laiko intervalas vadinamas „vartų pločiu“ (angl. *gate width*) ir yra žymimas t_g [26]. Paveiksle 1.6 yra pavaizduoti diodo užtvarinės įtampos ir strobavimo impulso signalai, kurie nustato vartų plotį t_g .

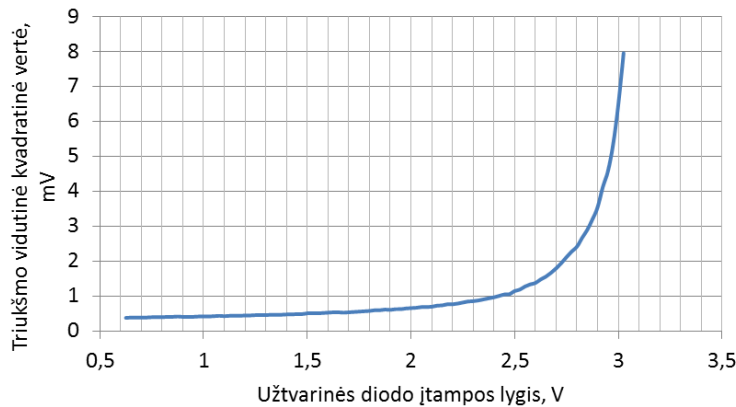


1.6 pav. Diodo užtvarinės įtampos ir strobavimo impulso signalų grafikai

Yra įrodyta [26], kad strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis apytiksliai gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\Delta F \cong \frac{0,35}{t_g}; \quad (1.2)$$

Jeigu strobavimo impulso forma nekinta, tai iš (1.2) ir 1.6 grafiko matyti, kad strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis gali būti plečiamas didinant diodo užtvarinės įtampos vertę. Tačiau toks veiksmas blogina strobavimo grandinės jautrumą, kadangi esant pastoviam triukšmo lygiui, kuris veikia sukaupią kondensatoriuje krūvį, naudingas signalo krūvis mažėja, mažėjant t_g trukmei. Tokiu būdu mažėja matuojamo signalo ir generuojamo triukšmo santykis.



1.7 pav. Išmatuota strobavimo grandinės triukšmo jėgime priklausomybė nuo užtvarinės įtampos

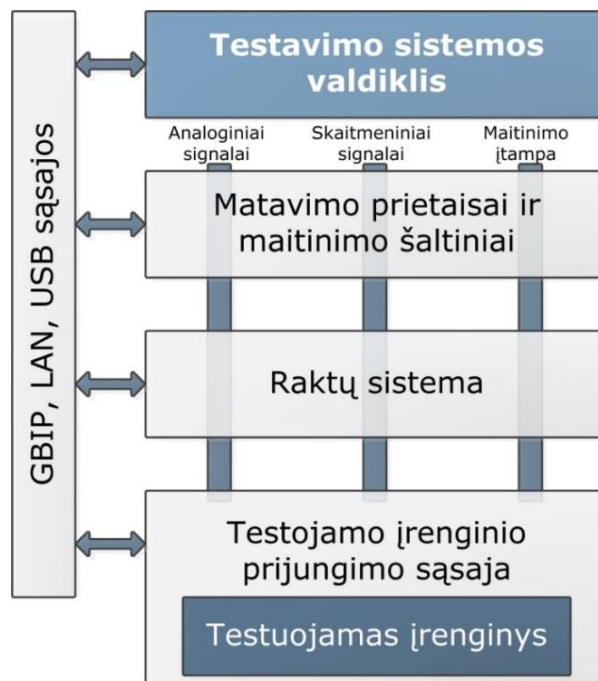
Paveiksle 1.7 pateiktoje strobavimo grandinės triukšmo charakteristikoje matyti, kaip didėja strobavimo grandinės jėgime generuojamo įtampos triukšmo lygis (t. y. mažėja grandinės jautrumas) didinant diodų užtvarinės įtampos lygį. Taigi egzistuoja atvirkštinė priklausomybė tarp strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ir jos jautrumo.

1.2. Aukštadažnių testavimo sistemų vientisumo tobulinimas

Nors daugumos aukštadažnių testavimo sistemų (ADTS) paskirtis testuoti tik kelių tipų įrenginius (stiprintuvus, siųstuvus, imtuvus ir pan.), kiekviena atskirai paimta sistema susiduria su skirtingais, unikaliais reikalavimais, uždaviniais ir darbo aplinkybėmis [7]. Kiekvienos ADTS unikalumą apibrėžia trys veiksniai, kurie tarpusavyje yra susieti. Tokie veiksniai yra:

- Našumas;
- Sparta;
- Pakartojamumas (stabilumas).

Kiekvienoje situacijoje ATS kūrėjas ieško kompromisų tarp paminėtų veiksnių, kurie leistų pasiekti norimą sistemos vientisumo (angl. *integrity*) lygį. Šių veiksnių įtaka sistemai pasireiškia visuose sistemos mazguose (1.8 pav.) nuo testuojamo įrenginio (angl. *device under test*) iki matavimo įrangos, todėl tobulinant atskirą sistemos mazgą kartu gerinamas visos sistemos vientisumo lygis. Toliau apžvelgiama šių veiksnių įtaką konstruojamai sistemai ir atsirandančios problemos dirbant aukštadažnių signalų srityje.



1.8 pav. Apibendrinta testavimo sistemos struktūrinė schema

1.3. Sistemos našumo, spartos ir pakartojamumo sąryšis

Dažniausiai kuriant ATS vienas ar du iš 1.2 poskyryje paminėtų veiksnių apibrėžia būsimai sistemai keliamus reikalavimus ir matavimo įrangos pasirinkimą. Sąryšiai tarp sistemos našumo, spartos ir pakartojamumo yra pateikti 1.2–1.4 lentelėse. Aukštadažnėse testavimo sistemose šie veiksniai apibrėžiami sekančiu būdu:

Našumas. ADTS įrangoje našumas apibrėžiamas kaip prietaiso tikslumas, matavimo diapazono plotumas ir prietaiso praleidžiamųjų dažnių juostos plotis. Prietaiso tikslumas nusako absoliutų tikslumą matuojant signalo amplitudę ir dažnį. Matavimo diapazonas nusako tokias prietaiso charakteristikas kaip dinaminį diapazoną, signalo amplitudžių ir jų fazių iškraipymus, triukšmo lygį, jos savo ruožtu charakterizuoja prietaiso tinkamumą preciziškai išmatuoti signalą. Praleidžiamųjų dažnių juostos plotis apibrėžia virpesio ribinį dažnį, kuris dar gali būti tinkamai apdorotas sistemoje.

Sparta. Testavimo sistemos veikimo greitis priklauso nuo naudojamos įrangos, aparatinių galimybių ir nuo programinės įrangos. Labiausiai sparta ribojama aparatinėje sistemos dalyje tokių veiksnių kaip nustatymo (pasiruošimo) laiko, matavimo proceso trukmės, duomenų apdorojimo ir perdavimo trukmių analoginėje prietaiso dalyje. Aukštadažnėse sistemose pagrindinis spartos ribojimo šaltinis yra pereinamieji procesai, kurie atsiranda perjungiant raktų pozicijas, keičiant maitinimo įtampą ir t. t.

Pakartojamumas. Bet kokiai testavimo sistemai yra labai svarbu užtikrinti charakteristikų pastovumą iš dienos į dieną testuojant skirtingą prietaisų kiekį. Tačiau pakartojamumo sąvoka

neapibrėžia aukšto matavimų tikslumo, kuris priklauso nuo atskirų matavimo prietaisų. Kiekvieno matavimo prietaiso pakartojamumas gali skirtis priklausomai nuo matavimo tipų ar režimų, todėl j tai turi būti atsižvelgta. Tam tikru mastu, pakartojamumas gali būti pagerintas vidurkinant daugiau matavimo rezultatų arba taikant kitus matavimo duomenų apdorojimo algoritmus, leidžiančius sumažinti atsitiktinių procesų įtaką.

1.2 lentelė. Sąryšiai tarp ATS parametrų, kai pagrindinis veiksnys yra našumas

Reikalaujamas sistemos našumo lygis:	Įtaka sistemos spartai	Įtaka sistemos pakartojamumui
Žemas	Gali dirbti greičiau. Mažiau skiriama laiko sistemos kalibravimui ir išmatuotų duomenų vidurkinimui.	Tikėtina neigiama, kadangi žemo našumo įranga neužtikrins pakankamo matavimų pastovumo.
Aukštas	Turi dirbti lėčiau. Daugiau laiko skiriama tokiems uždaviniams kaip įrenginių kalibravimui, perdavimo traktų derinimui ir klaidų kompensavimui užtikrinant aukštą tikslumą.	Tikėtina teigiama, nes geresnė matavimo įranga užtikrins žemesnį triukšmo, iškraipymų lygį, geresnę apsaugą nuo išorinių poveikių.

1.4 lentelė. Sąryšiai tarp ATS parametrų, kai pagrindinis veiksnys yra sparta

Reikalaujamas sistemos spartos lygis:	Įtaka sistemos našumui	Įtaka sistemos pakartojamumui
Žemas	Aukštesnis tikslumas, kadangi daugiau laiko gali būti skirta kalibravimo procedūroms, perdavimo traktų derinimui ir klaidų kompensavimui.	Teigiama. Galima padidinti apvalinamų duomenų skaičių, imčių skaičių. Galimybė naudoti metodus, tokius kaip ilgą RMS detekciją arba laiko trukmei imlius algoritmus.
Aukštas	Žemesnis tikslumas. Didelė sistemos sparta riboja jos matavimo tikslumą, raišką, imčių kiekį.	Neigiama. Duomenų apdorojimo algoritmai per trumpą laiką duos blogesnę rezultatą.

1.4 lentelė. Sąryšiai tarp ATS parametrų, kai pagrindinis veiksnys yra pakartojamumas

Reikalaujamas sistemos pakartojamumo lygis:	Įtaka sistemos našumui	Įtaka sistemos spartai
Žemas	Tikėtina mažesnė. Mažas sistemos pakartojamumas susietas su didesniu klaidų skaičiumi – mažesniu našumu.	Gali dirbti greičiau. Mažiau laiko prarandama gerinant matavimų pastovumo lygį.
Aukštas	Turi būti teigiama. Aukštam pakartojamumo lygio užtikrinimui reikalinga brangesnė įranga, kuri kartu pasižymės ir geru našumu.	Dirbs lėčiau. Gali tekti padidinti matavimų skaičių vidurkinimui. Tam tikri duomenų apdorojimo algoritmai užtrunka ilgiau.

1.4. Aukštadažnės testavimo sistemos charakteristikų ir testuojamo įrenginio sąryšis

Įprasta automatinė testavimo sistema atlieka tris paprastas pagrindines užduotis: generuoja signalus, juos matuoja ir komutuoja. Reikalinga įranga (signalų generatoriaus, galios matuoklis, spektro analizatorius, komutavimo matrica ir perdavimo traktai) sistemai sudaryti pasirenkama atsižvelgiant į testuojamo prietaiso konstrukcines ir elektrines charakteristikas. Aukštų dažnių srityje kai kurios charakteristikos įgyja ypač didelę svarbą [7].

Elektriniai parametrai

Testuojamo prietaiso (TP) elektriniai parametrai yra svarbiausi renkantis ATS sudedamąsias dalis. Pradedama nuo pagrindinių TP charakteristikų. Nustatoma ar TP yra pasyvus ir tiesinis ar aktyvus ir netiesinis. Su pasyviais, tiesiniais dirbti yra paprasčiau, nes jie turi pastovų stiprinimo lygį ir fazės postūmį, nepriklausomai nuo signalo galios visoje praleidžiamųjų dažnių juostoje. Visai kitas atvejis dirbant su netiesiniais, aktyviais TP, nes jų darbinis dažnių diapazonas labiau jautrus įeinamo signalo galios lygiui, dėl to svyruoja ir gaunami galutiniai rezultatai. Šiuo atveju siekiant tiksliau kontroliuoti signalų galios lygius ATS reikalingi papildomi operaciniai stiprintuvai arba slopintuvai (angl. *attenuators*). Atskirti ir išmatuoti mažą signalo, kuris perduodamas į TP, galios dalį gali būti naudojami preciziniai signalų šakotuvai. Tokie papildomi sistemos mazgai gali pabloginti perdavimo traktų charakteristikas. Aukštuose dažniuose kiekvienas sistemos elementas pasižymi kompleksine varža, o kiekviena papildoma jungtis įneša signalų atspindžius.

Konstrukciniai parametrai

ATS sistemos konstrukciniams parametrų priklauso toks parametras, kaip reikalingų jungčių, perduodančių signalus ir maitinimo įtampą, skaičius. Jungčių skaičius tiesiogiai įtakoja komutuojančios matricos dydį ir komutuojančių laidų skaičių. Naudojant vieną komutavimo matricą, turinčią pakankamą jungčių skaičių, galima tam tikrais atvejais sumažinti signalų vėlinimo trukmes ir jų slopinimą.

1.5. Aukštadažnės testavimo sistemos signalų perdavimo traktai

Be papildomos ATS korekcijos, į jos sudėtį įeinančios įrangos charakteristikos, po savikalibravimo proceso, atitinka specifikacijoje pateiktas reikšmes tik įrangos įėjimo ir išėjimo jungtyse. Visos ATS geram pakartojamumui užtikrinti ir mažam neapibrėžties lygiui pasiekti, kalibravimo procesą reikėtų perkelti kuo arčiau testuojamo prietaiso. Egzistuoja keli šio tikslo

įgyvendinimo būdai priklausomai nuo to, ar signalų perdavimo traktai yra pasyvūs ar aktyvūs, ir ar TP išdėstytas šalia ATS, ar yra nutolęs pvz., kitoje patalpoje arba kitame pastate.

Pasyvūs ir aktyvūs perdavimo traktai

Pasyvūs įtaisai visame perdavimo dažnių juostos ir prieinamos galios ruože pasižymi pastoviu slopinimu ir fazės postūmio lygiu. Tačiau kiekvienas papildomas sujungimas viso signalo perdavimo trakto ilgyje gali sukelti impedanso neatitikimus, kurie susieti su įnešamais nuostoliais ir fazių postūmiais į perduodamą signalą. Iš pirmo žvilgsnio paprastas pasyvus elementas aukštuose dažniuose turi būti nagrinėjamas jau kaip kompleksinė perdavimo linija, kurios apibudinimui nepakanka paprasto nuostolių ir fazės postūmio algebrinio sumavimo išilgai tos perdavimo linijos.

Siekiant sumažinti minėtų veiksnių įtaką testavimo sistemai, patartina naudoti vektorinį perdavimo linijų analizatorių (angl. *vector network analyzer* – VNA), kad išmatuoti visą perdavimo traktą arba S parametrais charakterizuoti kiekvieną trakto elementą. Toliau naudojant vektorinę algebrą reikia sumodeliuoti pilną įnešamą nuostolį ir fazės postūmį visame perdavimo linijos ilgyje. Linijos modelį aprašantys koeficientai gali būti saugomi kompiuteryje ir lengvai pritaikomi atsiradus poreikiui patikslinti ATS matavimo rezultatus.

Aktyvių įtaisų našumas priklauso nuo įėjimo signalo galios lygio, todėl matavimo tikslumas priklauso nuo įrenginio tiesinio ir netiesinio darbo diapazono. Jeigu aktyvus prietaisas, pvz., stiprintuvas veikia tiesiniame diapazone gerokai žemiau įsisotinimo lygio, atliekant kalibravimo arba matavimo operacijas, bet kokiam įėjimo signalo galios lygiui gali būti tiksliai pritaikyti kalibravimo koeficientai. Vėl gi, perdavimo traktą galima charakterizuoti S parametrais ir naudojant vektorinę algebrą, sukurti modelį, kuris realiu laiku tiksliai koreguotu matavimo rezultatus.

Tikslu supaprastinti aukštadažnių perdavimo traktų charakterizavimo ir koregavimo procesus, stengiamasi kiek įmanoma atsisakyti aktyvių elementų naudojimo. Tai sumažina kaip kalibravimo sudėtingumą taip ir klaidų atsiradimo tikimybę svyruojant signalo galiai, kai aktyvus elementas dirba netiesiniame režime [7,8].

1.6. Skyriaus apibendrinimas

Galutinis gaminamo prietaiso testavimas yra labai svarbi viso gamybos proceso dalis, kadangi nuo jo priklauso galutinė prietaiso kokybė. Atliekant produkto testavimą siekiama atrasti visas, net nežymias, gamybos klaidas ir nuokrypius atsirandančias kiekviename gamybos etape. Patikimos testavimo sistemos paskirtis – garantuoti kiek įmanoma didžiausią gamybos klaidos radimo tikimybę. Todėl didinant TS efektyvumą turi būt pereinama prie automatinių testavimo sistemų. Toks žingsnis leidžia atsikratyti žmogiškojo faktoriaus įtakos, susijusios su operatoriaus nepatirties

arba nuovargio lygiu, ženkliai pagreitinti testavimo procesą, aprėpiant didesnę testuojamų parametrų skaičių, ir suteikia galimybę mažinti gamybos kaštus.

Visa testavimo sistema kuriama remiantis testuojamo prietaiso *PicoScope 9300* serijos stroboskopinių osciloskopų charakteristikomis. Šis osciloskopas yra mažas portatyvus prietaisas, dirbantis deriny su asmeniniu kompiuteriu ir pasižymintis plačiomis elektrinių signalų matavimo galimybėmis. Toks testuojamas prietaisas kelia aukštus reikalavimus testavimo sistemai, kadangi turi būti užtikrintas stabilus ir patikimas darbas plačiame dažnių ruože nuo 0 iki 20 GHz.

Kuriant automatinę testavimo sistemą daug dėmesio turi būti skirta jos vientisumo tobulinimui, kuris priklauso nuo trijų pagrindinių veiksnių: našumo, spartos ir pakartojamumo. Dažniausiai paminėti veiksniai yra tarpusavyje priklausomi ir įtakoja vienas kitą. Vieno parametro gerinimas teigiamai arba neigiamai įtakoja kitą, todėl pasiekti aukštą vientisumo lygį yra ganėtinai sudėtinga, turi būti priimami tam tikri kompromisai sistemos kūrimo etape.

Augant sistemos testavimo padengiamumui, t.y. testuojamo prietaiso testuojamų mazgų skaičiui, sparčiai auga ir visos testavimo sistemos sudėtingumas. Atsiranda nemažas skaičius prietaiso ir TS sujungimo taškų, komutavimo relių, signalų perdavimo traktų. Visi šie elementai neigiamai veikia sistemos matavimo rezultatus. Rezultatų tikslumo tobulinimui stengiamasi vengti netiesinių signalo perdavimo traktų arba pilnai charakterizuoti tokias perdavimo linijas, kuriant matematinį modelį matavimo rezultatų tikslinimui.

2. AUKŠTADAŽNĖS MATAVIMO ĮRANGOS TESTAVIMO METODŲ ANALIZĖ

Šiame skyriuje apžvelgiami keli stroboskopinio osciloskopo matavimo parametrų patikros metodai, kurie gali būti taikomi matuojant jo praleidžiamųjų dažnių juostos plotį. Taikant bet kokį matavimo metodą sukaupuose duomenyse atsiranda tam tikro lygio neapibrėžtis. Neapibrėžties šaltiniai gali būti įvairūs, o jų daroma įtaka matavimams irgi skirtinga. Tinkamai neįvertinus tam tikrų veiksnių gali būti klaidingai interpretuojami matavimo rezultatai. Skyriuje taip pat pateikiami keli stroboskopinio osciloskopo parametrų matavimo klaidos mažinimo metodai, kai yra žinoma apriorinė informacija apie klaidų šaltinius.

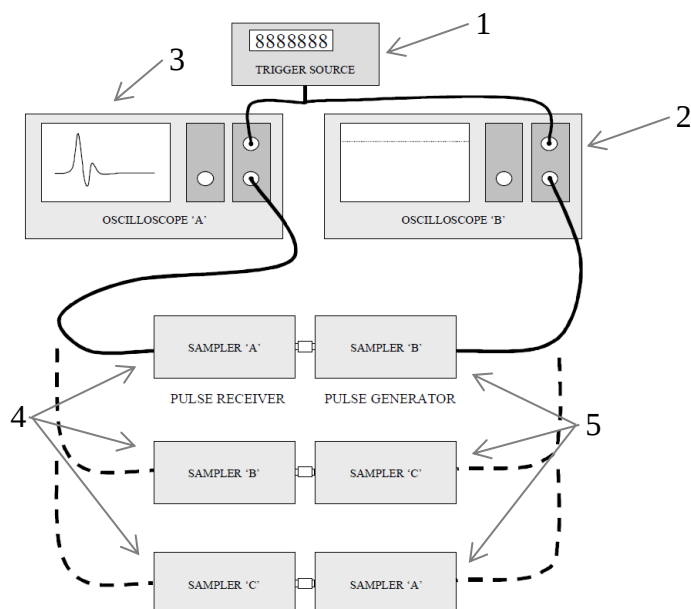
2.1. Stroboskopinio osciloskopo dažninės charakteristikos matavimo metodai

Plačiausiai naudojami trys pagrindiniai metodai [9, 10, 14], leidžiantys išmatuoti plačiajuosčio stroboskopinio osciloskopo impulsinę arba kompleksinę dažninę charakteristiką:

1. matavimai taikant kintančio dažnio harmoninį virpesį (angl. *swept-sine calibration*);
2. matavimai naudojant dvi priešpriešai sujungtas strobavimo grandis (angl. *Nose-to-Nose calibration*);
3. matavimai su žinomos formos impulsiniu signalu.

Praleidžiamųjų dažnių juostos matavimas, taikant pastovios amplitudės, bet kintančio dažnio harmoninį virpesį, yra pagrįstas išmatuotų signalo amplitudžių santykio apskaičiavimu. Yra palyginami stroboskopinio osciloskopo signalo amplitudės matavimo rezultatai su to paties signalo galios matavimais, naudojant kruopščiai sukalibruotą elektrinių virpesių galios matuoklį. Priklausomai nuo generuojamo harmoninio virpesio dažnio kitimo žingsnio gaunama atitinkamo tankumo dažninė amplitudės charakteristika. Šis metodas iš visų įvardintų yra laikomas pačiu tiksliausiu [13]. Pagrindinis jo trūkumas, kad išmatuota dažninė charakteristika neturi savyje informacijos apie fazinius signalų iškraipymus. Be dažninės charakteristikos neįmanoma įvertinti tiriamo stroboskopinio osciloskopo impulsinės charakteristikos laiko srityje.

Taikant priešpriešais sujungtų dviejų strobavimo grandinių matavimo metodą, dažninė charakteristika išmatuojama naudojant tik kelias (2 arba 3) strobavimo grandines, t. y. tik pačius tiriamus stroboskopinius osciloskopus, be papildomų signalų matavimo ir generavimo įrenginių, išskyrus atvejį, kai reikalingas papildomas, santykinai nedidelio dažnio, sinchronizacijos signalas, kuris siunčiamas į osciloskopų trigerio grandis (2.1 pav.).



2.1 pav. Trijų storbuojančių osciloskopų sistema dažninės charakteristikos matavimui taikant priešpriešiais sujungtų strobavimo grandinių metodą. Čia 1 – synchronizacijos signalo šaltinis; 2 – osciloskopas, veikiantis kaip generatorius; 3 – osciloskopas, veikiantis kaip imtuvas; 5 ir 4 – trijų strobavimo grandžių matavimo kombinacijos, kai kiekviena yra naudojama kaip impulsinio signalo imtuvas arba generatorius. Pritaikyta iš [11]

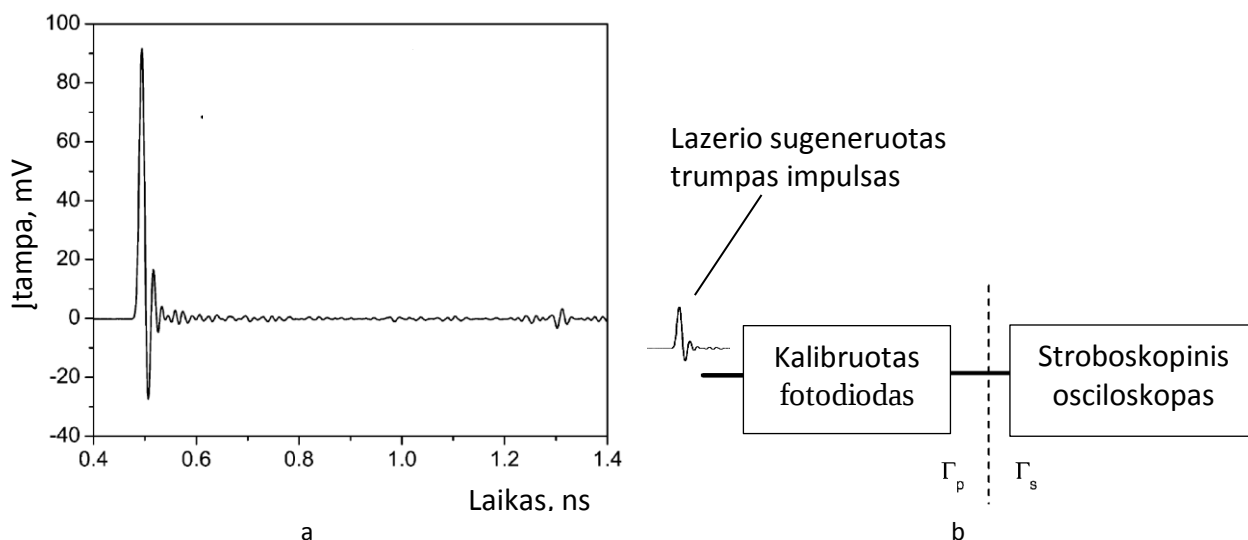
Dėl stroboskopinio osciloskopo strobavimo grandinės ypatingos sandaros, jos įėjime gali būti generuojamas „žinomos“ formos impulsinis signalas (angl. *kick-out*). Šis metodas yra paremtas prielaida, kad sugeneruotas impulsinis signalas yra proporcingas tiriamo stroboskopinio osciloskopo impulsinei charakteristikai.

Žinomos formos impulso signalo taikymo metodo, skirto osciloskopo dažninei charakteristikai išmatuoti, esmė yra pakankamai paprasta. Jeigu nagrinėjama sistema yra tiesinė, tai atlikus žinomos formos impulso signalo ir to signalo osciloskopo matavimo rezultatų dekonvolucijos operaciją gaunama impulsinė charakteristika, kuri išsamiai apibūdina tiriamą osciloskopą. Praktikoje taip gautas matavimo rezultatas yra stipriai iškraipytas pašalinių netiesinių veiksmių. Taip pat žinios apie signalo formą yra neišsamios, ypač matuojant plačiajuosčių osciloskopų parametrus, kai reikalingas pakankamai siauras kelių pikosekundžių trukmės impulsinis signalas, nes nėra įranga, kuri galėtų pakankamai tiksliai išmatuoti šį testinį impulsą.

2.2. Stroboskopinio osciloskopo kalibravimas naudojant didelės spartos fotodiodą

Stroboskopinio osciloskopo dažninės charakteristikos matavimo procedūra, naudojant didelės spartos fotodiodą (kaip impulso šaltinį), yra paremta žinomos formos impulso signalo matavimo metodu. Pagrindinė problema, taikant žinomos formos impulso signalo metodą, yra tokio signalo šaltinio įgyvendinimas. Siekiant reikiamo signalo ir triukšmo santykio, sugeneruoto bandomojo impulso galia aukštųjų dažnių srityje turėtų būti pakankamai didelė. Priešingu atveju, matuojant praleidžiamųjų dažnių juostą, minėta aukštųjų dažnių sritis pasižymės didele neapibrėžtimi. Tracy

S. Clement savo darbe [14] nagrinėja du tokių impulsų, su labai plačia pernešamų komponentų dažnio juosta, generavimo būdus: elektrinį ir optoelektrinį. Kita problema, taikant nagrinėjamą metodą, yra tikslus impulso šaltinio sistemos atsako nustatymas t. y. pakankamai sudėtinga tiksliai įvertinti sugeneruoto impulso tikrąją formą, nes visos matavimo sistemos yra riboto praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ir pačios įneša į matavimo rezultatus tam tikrą neapibrėžtį.

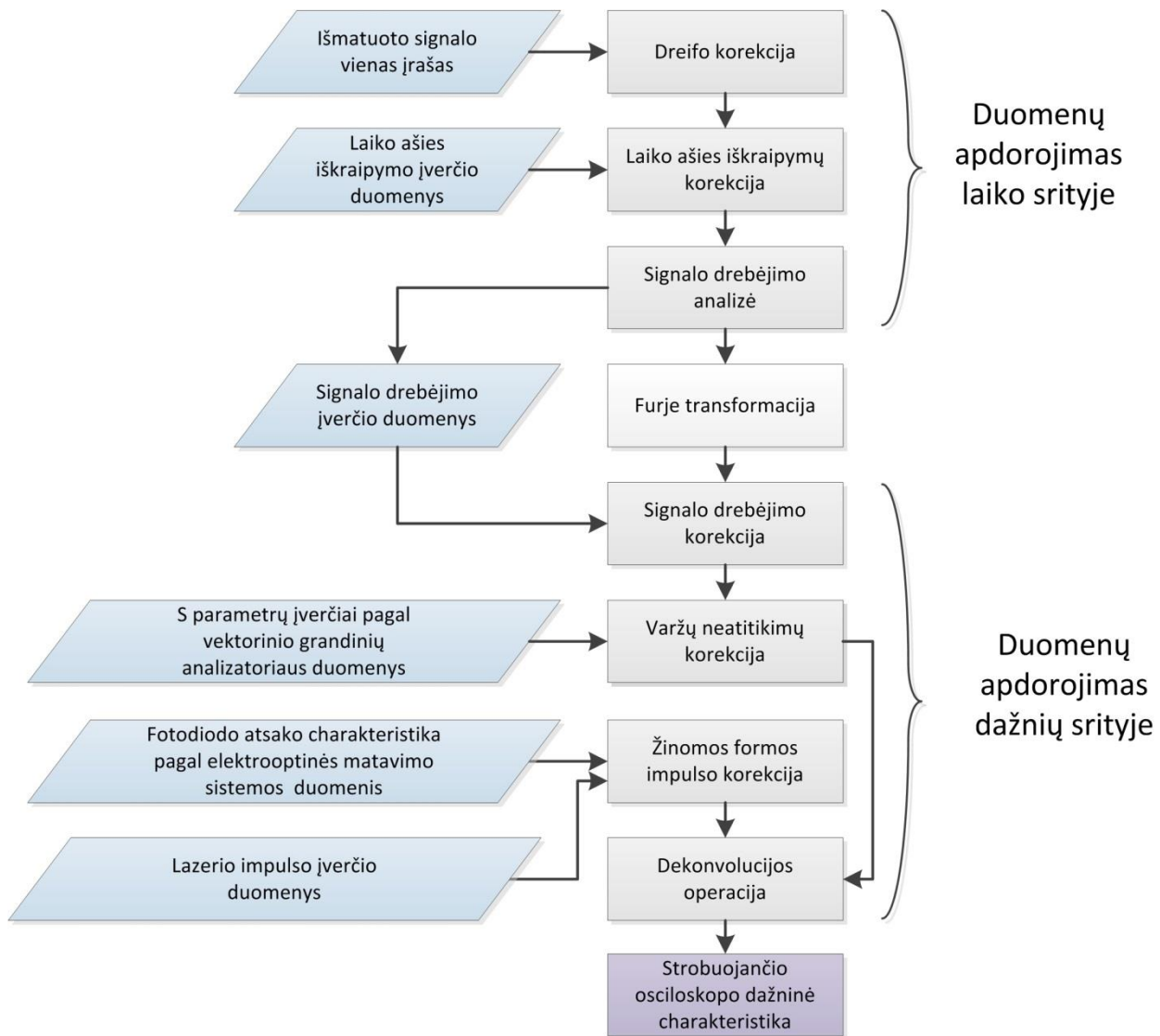


2.2 pav. Išmatuotas testuojamu stroboskopiniu osciloskopu fotodiodo sugeneruotas signalas, pavaizduotas laiko srityje (a) ir šios matavimo sistemos struktūrinė schema (b), pritaikyta iš [14]

Paveiksle 2.2 pavaizduotas išmatuotas impulsinis signalas, kuris yra sugeneruotas optoelektroninės generavimo sistemos, pagamintos fotodiodo (XPDV2020R) pagrindu, kurio praleidžiamųjų dažnių juosta siekia 50 GHz. Sistemai kalibruoti (signalui formai įvertinti) yra išmatuota jos kompleksinė dažninė charakteristika nuo 0,2 iki 110 GHz dažnio, taikant specialią elektrooptinę matavimo sistemą [14]. Fotodiodas yra sužadinas lazerio impulsu, kurio plotis pusės amplitudės lygyje siekia 70 fs esant 1550 nm bangos ilgiui ir impulso 8,66 MHz pasikartojimo dažniui. Rezultate sistemos išėjime gaunamas periodinis elektrinis impulsinis signalas, kurio trukmė siekia 6 ps. Siekiant išvengti netiesinių iškreipimų, matuojant signalą stroboskopiniame osciloskope, signalo amplitudė parenkama mažesnė negu 150 mV. Dar vienas fotodiodas naudojamas sinchronizacijos signalui generuoti.

Apžvelgtame darbe tiriamas osciloskopas pasižymi laiko srities iškreipimais, kurie pasireškia kaip matuojamo signalo trūkiai (tarp surinktų taškų grupių atsiranda laiko srities plyšys) kas 4 ns. Keičiant vėlinimą tarp fotodiodo impulsinio ir sinchronizacijos signalų šių iškreipimų galima atsikratyti, jeigu matuojamo signalo įrašas trumpesnis už 4 ns. Norint gauti didesnį signalo ir triukšmo santykį, yra renkama 100 matuojamo signalo įrašų. Toliau vykdomas matavimo rezultatų vidurkinimas gali pagerinti signalo ir triukšmo santykį iki 20 dB (aukštadažnių komponentų) [15]. Tačiau surinkti įrašai yra vidurkinami tik po matavimo korekcijos operacijos tam, kad būtų tinkamai įvertintas dreifas, kuris iškraipo signalo padėtį laiko ašyje. Taip pat kiekviename įraše yra

įvertinama triukšmo dedamoji, o gautas įvertis naudojamas signalo dreifo ir drebėjimo įtakos sumažinimo algoritmuose.

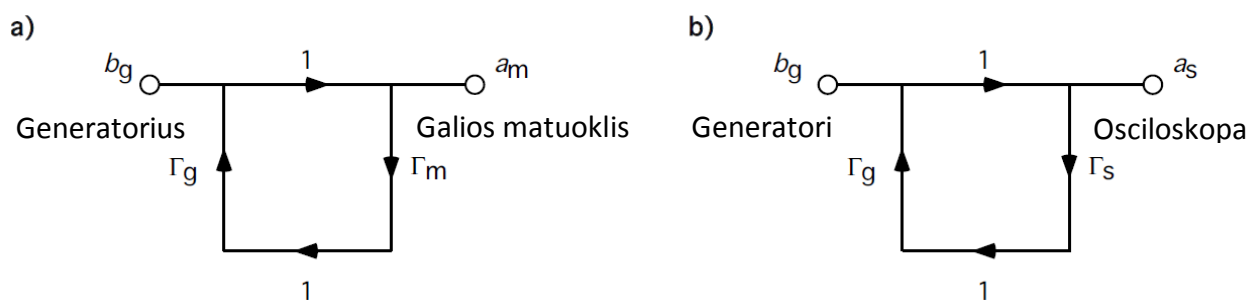


2.3 pav. Strobuskopinio osciloskopo dažninės charakteristikos matavimo duomenų korekcijos algoritmo blokinė diagrama

Paveiksle 2.3 pateikta blokinė diagrama, kuri vaizduoja vieno išmatuoto fotodiodo impulsinio signalo įrašo apdorojimo procedūrą. Matavimo duomenims yra pritaikomos kelios pagrindinės korekcijos, leidžiančios sumažinti matavimo neapibrėžtis, kurios atsiranda dėl išmatuoto signalo dreifo ir drebėjimo – laiko srities iškreipimų (angl. *Time base distortions* – TBD). Prie papildomų duomenų korekcijos yra priskiriamos operacijos, įvertinančios signalų atspindžius tarp fotodiodo ir strobuskopinio osciloskopo, ir žinomos formos signalo tikslus nustatymas pagal elektrooptinio matavimo sistemos rezultatus ir lazerinio impulso charakteristikas. Po duomenų korekcijos, atlikus dviejų signalų dekonvolucijos operaciją dažnių srityje gaunama strobuskopinio osciloskopo dažninė charakteristika.

2.3. Signalų atspindžių įtakos įvertinimas

Iš generatoriaus į stroboskopinį osciloskopą perduodant elektrinį signalą, kuris pasižymi tam tikrą galia, signalas tolygiai silpsta sklindant išilgai perdavimo trakto. Kartu dėl neidealių sistemos įrenginių skiriasi ir jų charakteringasis impedansas. Įrenginių sujungimo vietose ir imtuvo apkrovoje dalis perduodamos signalo galios atsispindi ir grįžta atgal į perdavimo traktą. Kad signalo perdavimo trakto įtaka dažninės charakteristikos matavimo rezultatams, taikant kintančio dažnio harmoninio virpesio matavimo metodą, būtų tinkamai įvertinta, turi būti atlikta perdavimo trakto analizė [12].



2.4 pav. Signalo šaltinio sujungimo su galiuos matuokliu (a) ir osciloskopu (b) diagramos. Pritaikyta iš [12]

Signalų šaltinio galiai matuoti, galiuos matuoklis, prijungiamas tiesiai prie šaltinio (signalų perdavimo trakto) išėjimo (2.4 pav., a). Kadangi galiuos matuoklio jutiklis pasižymi tam tikra reakcija į matuojamą signalą, reikalingi du korekcijos koeficientai sąryšiui tarp išmatuotos P_m ir realios (krantinčios į jutiklį) $|a_m|^2$ signalo galios (vertikalūs skliaustai žymi, kad tai yra signalo amplitudė, o amplitudės kvadratas žymi signalo galią) nustatyti:

$$P_m = \eta \left(|a_m|^2 - |b_m|^2 \right) = \eta |a_m|^2 \left(1 - |\Gamma_m|^2 \right), \quad (2.1)$$

čia $1 - |\Gamma_m|^2$ – nuostoliai dėl jutiklio ir perdavimo trakto impedansų nesuderinamumo, kurios sudaro signalo, atspindėjusi nuo jutiklio galios dalis; b_m – atsispindėjęs signalas; η – jutiklio naudingumo koeficientas, kuris apibrėžtas varžiniais ir signalo išspinduliavimo nuostoliais. Naudingumo koeficientas priklauso nuo matuojamo signalo dažnio. Įprastu atveju galiuos matuoklio gamintojas pateikia naudingumo koeficientų lentelę, kurioje kiekvienas koeficientas atitinka tam tikrą, matuojamo elektrinio virpesio, dažnį.

Išmatavus signalo šaltinio ir galiuos matuoklio atspindžio koeficientus Γ_g ir Γ_m atitinkamai, galima nustatyti priklausomybę tarp signalų a_m ir b_g galios verčių, čia b_g – signalo šaltinio signalas:

$$|a_m|^2 = \frac{|b_g|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_m|^2}, \quad (2.2)$$

čia $|1 - \Gamma_g \Gamma_m|^2$ – varžų neatitikimo neapibrėžtis. Sujungiant (2.1) ir (2.2) lygtis galima apskaičiuoti realiąją signalo šaltinio galią išmatuotos P_m galios vertės atžvilgiu:

$$|b_g|^2 = \frac{P_m |1 - \Gamma_g \Gamma_m|^2}{\eta (1 - |\Gamma_m|^2)}. \quad (2.3)$$

Kadangi stroboskopinis osciloskopas gali būti nagrinėjamas kaip tiesinė sistema, jo išmatuotas signalas $y(t)$ atitinka matuojamo signalo $x(t)$ su osciloskopo impulsinės charakteristikos $h(t)$ sąsukos operacijos rezultata [10]. Dažnių srityje tai atitinka daugybos operaciją:

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega). \quad (2.4)$$

Norint išmatuoti signalo galią naudojant osciloskopą, osciloskopas yra tiesiai jungiamas prie signalo šaltinio (2.4 pav., b). Išmatuoto signalo $y(t)$ spektras $Y(\omega)$, padalintas iš osciloskopo dažninės charakteristikos $H(\omega)$ laiko srityje, grąžins signalą $x(t)$ (t. y. a_s signalas veikiantis osciloskopo įėjimą). Išmatavus osciloskopo Γ_m ir signalo šaltinio Γ_g atspindžio koeficientus, gali būti nustatyta priklausomybė tarp a_s ir pagal (2.3) formulę įvertinto b_g signalų galios:

$$|b_g|^2 = \frac{|y|^2 |1 - \Gamma_g \Gamma_s|^2}{|h|^2}. \quad (2.5)$$

Kadangi b_g šaltinio signalas yra pastovus ir jo galios vertė nepriklauso nuo matavimo tipo (su osciloskopu ar galios matuokliu), formules (2.4) ir (2.5) galima prilyginti tarpusavyje. Rezultate gauname perdavimo koeficiento $|H|$ išraišką, kuri yra išreikšta per išmatuotas signalo galias ir atspindžio koeficientus:

$$|H| = \frac{|Y| |1 - \Gamma_g \Gamma_s|}{|1 - \Gamma_g \Gamma_m|} \sqrt{\frac{\eta (1 - |\Gamma_m|^2)}{P_m}}. \quad (2.6)$$

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Stroboskopiniu osciloskopu išmatuotas elektrinis signalas yra pateikiamas kaip dviejų dimensijų (laiko ir įtampos) grafikas. Kiekviename horizontaliame ir vertikaliame matavimo kanale atitinkamai, nepriklausomai vienas nuo kito, atsiranda matavimo klaidų, todėl yra svarbu matuojant vieno kanalo (pvz., horizontalaus) tam tikrą parametą, kartu įvertinti, kaip šio matavimo rezultatas buvo paveiktas vertikalaus kanalo sistemos (t. y. osciloskopo matavimo klaidą) ir, esant galimybei, ją sumažinti.

Skyriuje aptarti trys praleidžiamųjų dažnių juostos matavimo būdai: 1) priešpriešiais sujungtų strobavimo garndinių, 2) žinomos formos signalo ir 3) kintančio dažnio harmoninio virpesio matavimo metodai. Apžvelgus publikacijas apie antrą metodą, prieita prie išvados, kad vertikalaus kanalo dažninės amplitudės charakteristikos matavimo rezultatas yra labai paveiktas horizontalaus kanalo (laiko bazės) nestabilumo. Laiko bazės iškraipymai, temperatūriniai dreifai ir signalo drebjimai išilgai laiko ašies nulemia papildomą neapibrėžtį. Tas pats galioja ir priešpriešiais sujungtų strobavimo grandinių matavimo metodui, šiuo atveju keičiasi tik impulsinio signalo šaltinis.

Kintančio dažnio ir pastovios amplitudės harmoninio virpesio matavimo metodas nėra priklausomas nuo laiko bazės nestabilumo, nes šiuo atveju imtys yra kaupiamos asinchroniškai matuojamo signalo atžvilgiu, naudojant maksimalią strobavimo spartą. Stroboskopinio osciloskopo signalų sinchronizavimo grandinė yra deaktyvuota. Tačiau šiuo atveju prarandama galimybė matuoti dažninę fazės charakteristiką – tai yra pagrindinis šio metodo trūkumas.

Siekiant mažinti parametrų matavimo klaidas, turi būti atsižvelgta į perduodamus nuo generatoriaus iki stroboskopinio osciloskopo signalų atspindžius, kurie įvyksta esant impedansų neatitikimui tarp generatoriaus išėjimo osciloskopo apkrovos ir perdavimo trakto elementų.

3. AUTOMATIZUOTOS TESTAVIMO SISTEMOS PROJEKTAVIMAS

Šiame skyriuje pateikta stroboskopinių osciloskopų automatizuotos testavimo sistemos (ATS) projektavimo eiga. ATS sudaro aukštadažnė ir žemadažnė elektrinių signalų matavimo ir generavimo įranga, signalų komutavimo sistema ir asmeninis kompiuteris su specialiai ATS valdymui sukurta programine įranga.

3.1. Sistemos aukštadažnė matavimo įranga

Kaip jau buvo minėta, atliekant matavimo sistemų paiešką nebuvo aptikta gaminamų aukštadažnių testavimo sistemų, kurių funkcionalumas ir charakteristikos atitiktų testuojamo prietaiso keliamus reikalavimus. Vienintelis būdas realizuoti ATS yra apjungti į vieną sistemą prieinamą atskirą aukštadažnių ir žemadažnių signalų matavimo ir generavimo įrangą. Toliau pateikiamas automatizuotoje testavimo sistemoje naudojamos įrangos sąrašas.

***Agilent N1914A* dviejų kanalų galios matuoklis**

Osciloskopo imčių rinktuvas arba signalo perdavimo traktas pasižymi netiesiniais iškraipymais. Dirbant su aktyviais netiesiniais įtaisais, yra labai svarbu kontroliuoti bandomųjų signalų galios lygį, siekiant likti to įtaiso charakteristikos tiesinėje dalyje. Aukštadažnių signalų galios matuoklio paskirtis – išmatuoti bandomojo signalo galią ir informaciją perduoti ATS valdymo mazgui, kuris, esant būtinybei, tą galią pakoreguotų.

Agilent N1914A (3.1 pav.) galios matuoklis suteikia galimybę greitai ir pakankamai tiksliai matuoti sudėtingos formos elektrinius signalus. Žemiau pateiktos jo svarbiausios bendros darbo charakteristikos ir parametrai:

- praleidžiamųjų dažnių juostos plotis nuo 9 kHz iki 110 GHz (priklauso nuo jutiklio galvutės);
- dinaminis diapazonas nuo –70 dBm iki 44 dBm (priklauso nuo jutiklio galvutės);
- diskretizavimo sparta iki 400 imčių per sekundę;
- GPIB, LAN/LXI-C ir USB sąsajų palaikymas;
- absoliuti neapibrėžtis: $\pm 0,02$ dB logaritminiame, $\pm 0,5$ % tiesiniame mastelyje;
- santykinė neapibrėžtis: $\pm 0,04$ dB logaritminiame, ± 1 % tiesiniame mastelyje.



3.1 pav. Agilent N1914A dviejų kanalų galios matuoklis, vaizdas iš priekio (a) ir galo (b)

Galios matuoklio našumas priklauso nuo naudojamų galios matavimo jutiklių (galvučių). Prietaiso komplekte du jutikliai – N8485A ir N8487A. Abu jutikliai yra termoporiniai, pasižymintys tais pačiais parametrais, pagrindinis skirtumas slypi praleidžiamųjų dažnių juostos plotyje. N8485A jutiklio juostos plotis yra nuo 10 MHz iki 33GHz, N8487A – nuo 50 MHz iki 50 GHz. Kadangi matuoklis turi du nepriklausomus kanalus, du jutikliai gali būti naudojami vienu metu. Dar du papildomus specialius jutiklius galima pajungti iš galinės prietaiso pusės per USB sąsają.

Fluke 8845A skaitmeninis precizinis multimetras

Multimetras paskirtis kuriamoje testavimo sistemoje kontroliuoti žemadažnių signalų įtampas lygi, o taip pat matuoti PS9300 osciloskopo svarbių mazgų darbo įtampas arba varžas. Pagrindinės multimetras charakteristikos:

- nuolatinės įtampos matavimo neapibrėžtis iki 0,0024 %;
- nuolatinės srovės matavimo diapazonas nuo 100 μ A iki 10 A su 100 pA matavimo raiška;
- varžos matavimo diapazonas: nuo 10 Ω iki 1 G Ω su 10 $\mu\Omega$ matavimo raiška;
- galimybė matuoti signalo dažnį arba periodą.

Nuotolinis skaitmeninio multimetras Fluke 8845A (3.2 pav.) valdymas vykdomas siunčiant jam tam tikras komandas, kurias jis gauna nuo sistemos valdymo mazgo (asmeninio kompiuterio – AK) per vieną iš palaikomų komunikavimo sąsajų. Multimetras palaiko GPIB, LAN, RS-232 duomenų perdavimo protokolus. Analizuojant multimetras galimybes, bendraujant per Ethernet sąsają, buvo pastebėta, kad jis dirba ganėtinai nestabiliai ir žymiai sumažina visos sistemos patikimumą. Todėl šiuo atveju buvo atsisakyta jungti prietaisą į bendrą tinklą, o bendravimą realizuoti pasitelkus USB<>RS-232 keitiklį.



a



b

3.2 pav. Fluke 8845A skaitmeninis precizinis multimetras, vaizdas iš priekio (a) ir galo (b)

Multimetro nuotoliniam valdymui realizuoti naudojama SCPI (angl. *The Standard Commands for Programmable Instrumentation*) programavimo kalba, kuri skirta standartizuoti bendravimo protokolą tarp įrenginio ir AK. SCPI kalbos sintaksė yra grindžiama ASCII simboliais ir todėl kalba gali būti įskiepyta į bet kokią kitą kompiuterinę programavimo kalbą.

Hittite HMC-T2240 40 GHz sintezuojantis signalų generatorius

Norint charakterizuoti testuojamo matavimo įrenginio matavimo galimybes, ATS privalo plačiame dažnių diapazone generuoti labai tikslūs bandomuosius signalus. Sistemos įtaka bandomiesiems signalams turi būti minimali, priešingu atveju bus gaunami klaidingi testavimo rezultatai. Tokius bandomuosius signalus generuoja plačiajuostis signalų generatorius. Nagrinėjamas *Hittite HMC-T2240* (3.3 pav.) generatorius pasižymi šiomis charakteristikomis:

- generuojamų virpesių dažnių juosta nuo 10 MHz iki 40 GHz;
- signalo išėjimo galia iki 30 dBm esant 1 GHz ir iki 20 dBm esant 40 GHz;
- fazinis triukšmas – 98 dBc/Hz;
- šalutinių signalo komponentų slopinimas – 70 dBc esant 10 GHz dažniui;
- minimali generuojamo signalo galios raiška 0,1 dB;
- minimali generuojamo signalo dažnio raiška 1 Hz.



a



b

3.3 pav. Hittite HMC-T2240 nuo 10 MHz iki 40 GHz sintezuojančio signalų generatoriaus, vaizdas iš priekio (a) ir galo (b)

Hittite HMC-T2240 generatoriaus nuotolinis valdymas realizuojamas jau nagrinėtu SCPI protokolo pagalba. Generatorius palaiko neslopstančios bangos (angl. *Continuous Wave*) arba žingsninio dažnio keitimo darbo režimus. Bendravimas su kitomis sistemomis gali būti realizuotas per USB, GPIB arba *Ethernet* sąsajas.

3.2. ATS signalų perdavimo traktų projektavimas

Testuojamas *PS9300* osciloskopas yra santykinai sudėtingas įrenginys pasižymintis dideliu mazgų skaičiumi (pvz.: trigerio, strobavimo, laiko skleistinės grandys ir t. t.), todėl jo automatizuotos testavimo sistemos projektavimas ir įgyvendinimą yra suskirstyti į kelis etapus:

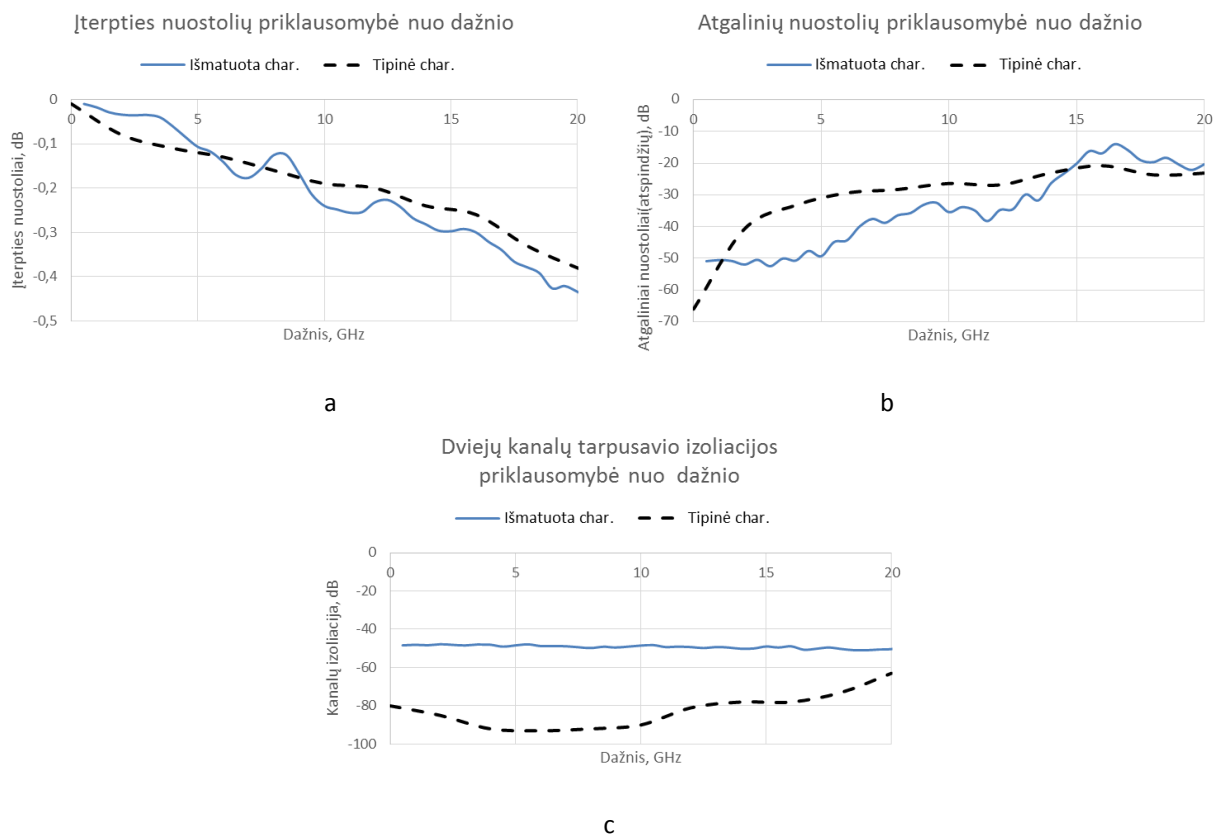
- y kanalo testavimo sistemos aukštadažnės dalies projektavimas ir įgyvendinimas;
- y kanalo testavimo sistemos žemadažnės dalies projektavimas ir įgyvendinimas;
- x kanalo testavimo sistemos dalies projektavimas ir įgyvendinimas;
- Papildomų mazgų testavimo sistemos dalių projektavimas ir įgyvendinimas.

Prie papildomų osciloskopo mazgų galima priskirti tunelinių diodų impulsinius generatorius, signalo sinchronizacijos grandis, optoelektroninį keitiklį ir papildomą (3–4 kanalas) imčių rinktuvą. Papildomi mazgai yra specifiniai, t. y. kiekvieno iš jų testavimas yra unikalus ir reikalauja nuosavo atliekamų testavimo veiksmų plano, o tam tikrais atvejais, papildomos įrangos, kuri neįeina į ATS sudėtį (pvz., optoelektroninis keitiklis), todėl tokių mazgų testavimas nebus realizuotas.

Testavimo sistemos įgyvendinimas pradedamas nuo y (vertikalaus) kanalo testavimo sistemos dalies kūrimo. Jis suskirstytas į du etapus: aukštadažnę ir žemadažnę. Aukštadažnė sistemos dalis sudaro ATS pagrindą tolesniam jos tobulinimui. Vertikalaus kanalo ATS sistemos struktūrinė schema su detalizuota aukštadažne dalimi pateikta 3.5 pav. Sistema komutuoja tarpusavyje signalo generatoriaus, galios matuoklio, dažniamačio ir testuojamo įrenginio signalo perdavimo kanalus. Siekiant užtikrinti reikiamą ATS našumą, signalams komutuoti, naudojamos kokybiškos aukštadažnės relės (*Teledyne CCR-33S1O-N*), kurių garantuotas minimalus signalo praleidžiamųjų dažnių juostos plotis siekia 18 GHz. Buvo atlikti gautų relių parametrų (įterpties nuostolių *IL*, atgalinių nuostolių *RL* (signalų atspindžių) ir dviejų kanalų tarpusavio izoliacijos *IS*) priklausomybės nuo dažnio matavimai ir skaičiavimai, rezultatai pateikti 3.4 pav. Gautus relių testavimo rezultatus palyginus su pateiktais jų specifikacijoje [22] matoma, kad jie yra šiek tiek prastesni už tipinius (aukštuose dažniuose), bet atitinka keliamus reikalavimus. Skaičiavimai buvo atlikti pagal formulę:

$$S = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} , \quad (3.1)$$

čia S – matuojamas koeficientas IL , RL arba IS išreikštas decibelais; P_2 – harmoninio virpesio galia relės išėjime sujungtame su įėjimu, atspindėto nuo relės įėjimo, relės išėjime atjungtame nuo įėjimo atitinkamai; P_1 – relės įėjime krentančio harmoninio virpesio galia.



3.4 pav. Aukštadažnių relių įterpties nuostolių (a), atgalinių nuostolių dėl atspindžių nuo įėjimo (b), dviejų kanalų tarpusavio izoliacijos (c) patikros rezultatai

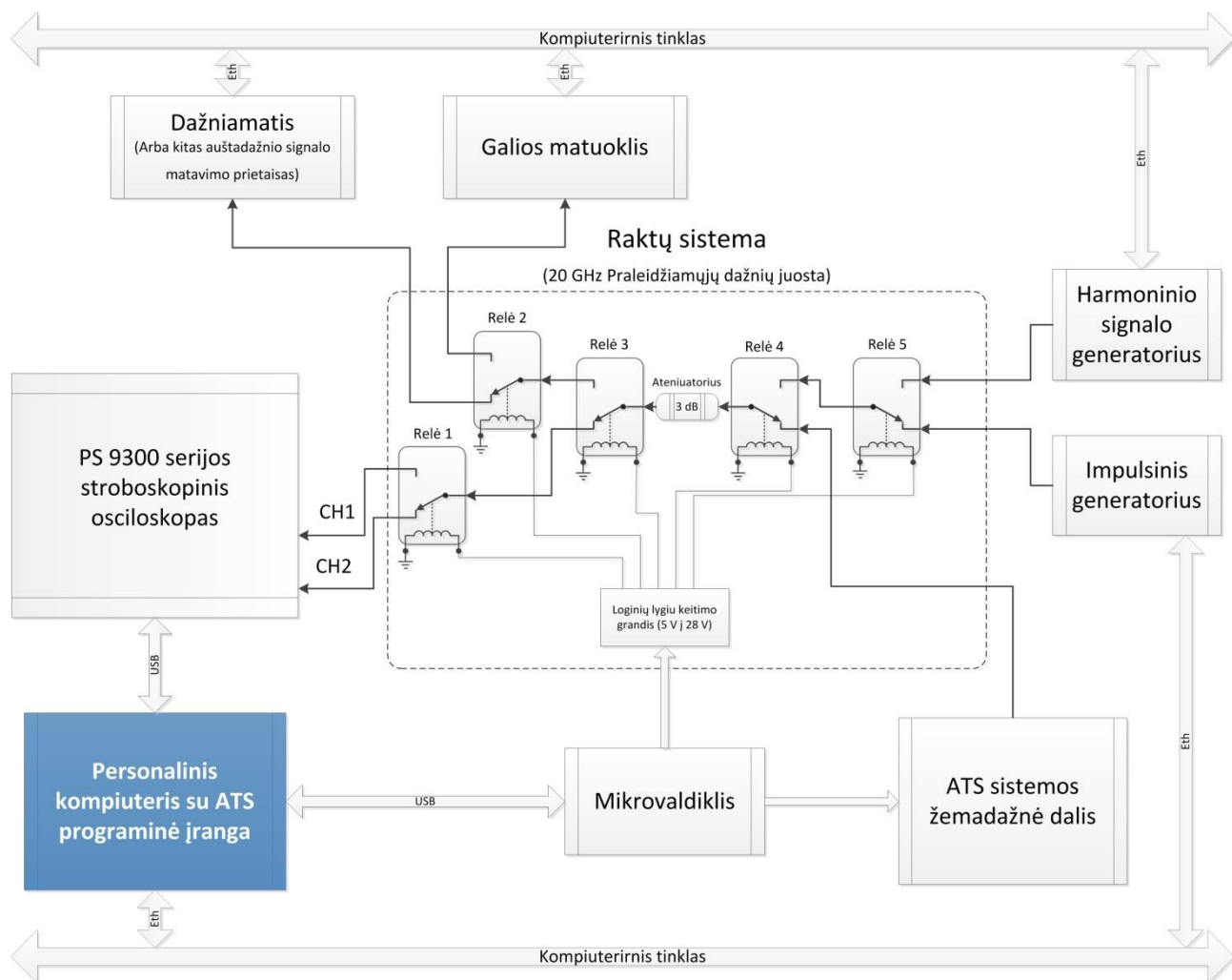
Relės valdomos 28 V įtampos signalu ir yra „*Failsafe*“ SPDT tipo (kai valdymo įtampa yra lygi nuliui – įėjimas yra komutuojamas į pirmą išėjimą, o esant valdymo signalo aukštai būsenai – į antrą). Relės persijungimo trukmė siekia 20 ms, o vidutinis persijungimo ciklą skaičius – 5 milijonai. Signalai tarp relių perduodami koaksialiniais kabeliais naudojant SMA tipo jungtis signalo perdavimo traktams sujungti. Projektuojant ATS, buvo prieinami keli koaksialinių kabelių tipai. 3.1 lentelėje yra pateikti pagrindiniai jų parametrai. Nors svarbiausias parametras, renkantis kabelio tipą, yra signalo slopinimas, 141 ir 250 tipo kabeliai, kurių slopinimo lygis yra pakankamai mažas, turi pernelyg platų minimalų lenkimo spindulio ilgį. Kadangi relėse visos trys jungtys yra greta viena kitos vienoje plokštumoje, sujungiant signalų perdavimo traktus į vieną bendrą sistemą, kabeliai yra lenkiami 90° arba net 180° laipsnių kampais. Siekiant signalų komutatorių sutalpinti į PS9300 serijos korpusą (jo matmenys: 160×240×35 mm), dėl aptartų mechaninių apribojimų buvo pasirinktas 085 tipo koaksialinis kabelis. Lyginant jį su 141 kabelio parametrais, signalo slopinimo lygis yra dvigubai didesnis, tačiau, kai ilgiausios signalo perdavimo linijos ilgis siekia vos 350 mm, tuomet slopinimo skirtumas, perduodant 20 GHz harmoninį virpesį, yra lygus tik 0,7 dB.

Atsižvelgiant į relių parametrų matavimo rezultatus, bendras prognozuojamas sistemoje 20 GHz harmoninio virpesio slopinimo lygis sieks 13–15 dB.

3.1 lentelė. Prieinamų koaksialinių kabelių pagrindiniai parametrai

Kabelio tipas	Skersmuo, mm	Ilginė talpa, pF/m	Charakteringasis impedansas, Ω	10 GHz slopinimas dB/100 m	20 GHz slopinimas dB/100 m	Minimalus lenkimo spindulys, mm
.047SRF-W	1,2	95,1	50±2.5	419	629	3,18
.085SRF-W	2,54	95,1	50±2	272	413	3,18
.141SRF-W	4,27	95,1	50±2	148	213	10
.250SRF-C	6,8	95,1	50±2	98	141	30

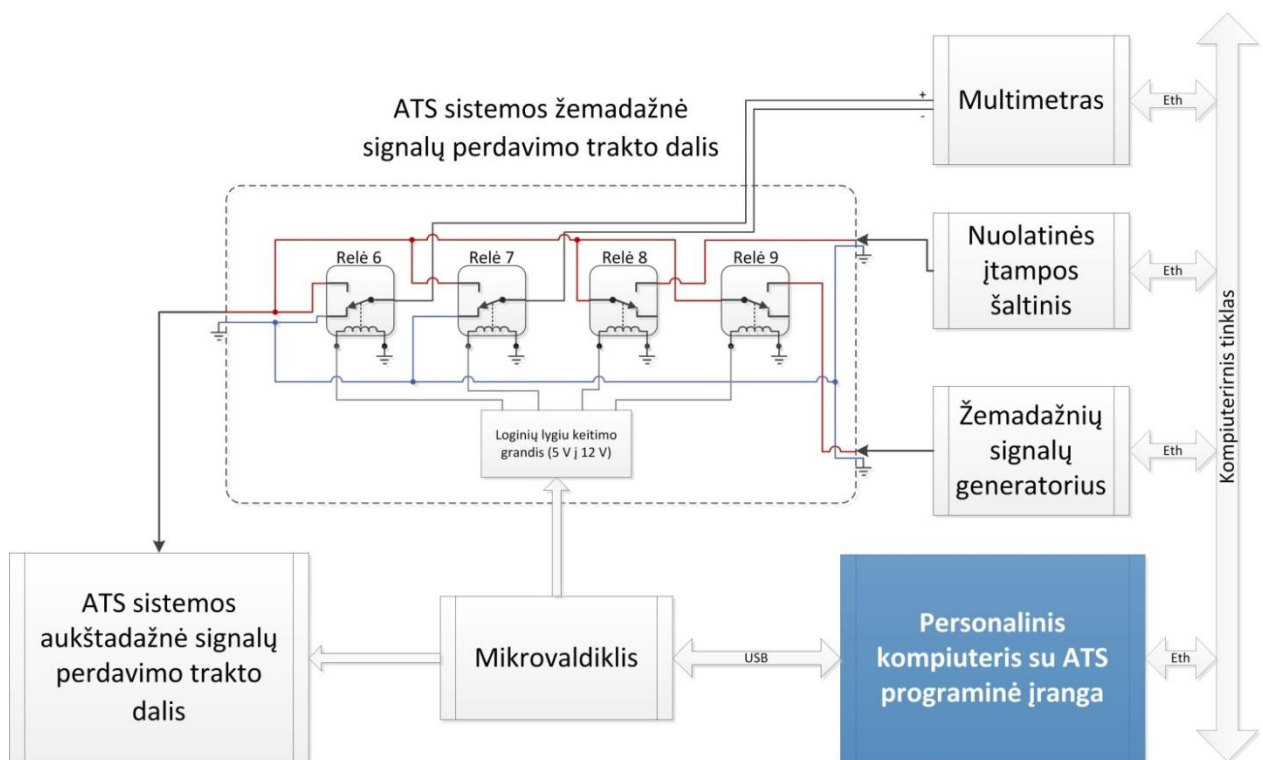
Struktūrinėje schemoje (3.5 pav.) pavaizduotas 3 dB atenuatorius yra reikalingas dar labiau padidinti slopinimą signalo atspindžių, kurie sklinda perdavimo linija kaskart atsispindėdami nuo testuojamo įrenginio įėjimo apkrovos arba generatoriaus išėjimo. Šie atspindžiai atsiranda dėl įrenginių ir signalo perdavimo traktų netobulumo (charakteringojo impedanso skirtumo).



3.5 pav. ATS dalies, vertikalaus kanalo patikrai, struktūrinė schema

Relė pažymėta schemoje (3.5 pav.) kaip Relė 4 komutuoja testuojamo įrenginio įėjimus su žemadažne ATS dalimi. Žemadažnio signalų perdavimo trakto dalis yra pavaizduota 3.6 pav. Visa

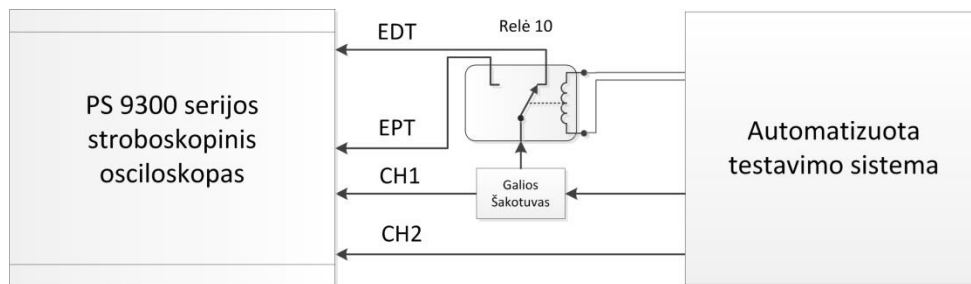
žemadažnė dalis yra realizuota kaip atskiras modulis, signalų perdavimo linijos yra ištrasuotos specialioje spausdintinėje plokštėje. Plokštėje yra trys MMCX tipo jungtys koaksialiesiems kabeliams prijungti (schemoje – pastorintos juodos linijos) ir 3,5 mm audio jungtis multimetrom kabeliams prijungti. Schemoje relė 6 ir relė 7 komutuoja multimetrom įėjimą trimis būdais: keičiant matavimo poliariškumą ir trumpinant į žemintą laidininką. Relė 8 ir relė 9 komutuoja reguliuojamo nuolatinės įtampos šaltinio ir žemadažnio signalo generatoriaus išėjimą atitinkamai į bendrą signalo perdavimo liniją (pažymėta raudona spalva). Siekiant atsikratyti nepageidaujamų įtampų kritimų (dėl perdavimo linijų nesimetriškumo) ir eterinių ir maitinimo šaltinių indukuojamų triukšmų linijos ilgyje įtakos, signalų perdavimo takelių ilgis yra minimalus, o signalinio ir žeminto takelių ilgius stengiamasi padaryti vienodus. Įžeminta signalo perdavimo linija (3.6 pav. pažymėta mėlyna spalva) yra atskirta nuo bendros ATS žemės ir susijungia tik įrenginiuose per bendrą tinklo įžeminimą. Taip yra sumažinami įtampos šaltinių (keitiklių) indukuojami triukšmai. ATS sistema iš viso turi keturis įtampos keitiklius: +28 V; +5 V; –5 V; +3,3 V, visi maitinami nuo +15 V maitinimo bloko. Didžiausius triukšmus, kurių dažnis siekia 1 MHz, į žemintą laidininką indukuoja +28 V įtampos keitiklio raktas dirbantis poroje su induktyviąja apkrova.



3.6 pav. ATS žemadažnės signalo perdavimo dalies ir sąveikos su kitais sistemos komponentais struktūrinė schema

Paveiksle 3.7 yra pavaizduota ATS ir testuojamo stroboskopinio osciloskopo sujungimo schema, naudojant papildomą išorinę relę ir signalo galios daliklį (šakotuvą). Tai yra vertikalaus kanalo testavimo signalų perdavimo trakto patobulinimas, skirtas testuoti horizontalaus kanalo (laiko bazės) ir papildomų mazgų parametrus. Prie papildomų mazgų šiuo atveju priskiriamos matuojamo signalo sinchronizacijos (trigerio) grandinės. Iš viso jų yra trys:

- Vidinė tiesioginė pirmojo arba antrojo kanalo sinchronizacijos grandinė;
- Išorinė tiesioginė sinchronizacijos grandinė;
- Išorinė sinchronizacijos grandinė su dažnio daliklių.



3.7 pav. ATS sujungimas horizontalaus kanalo patikrai struktūrinė schema

ATS signalų komutatoriaus valdymui yra panaudotas *Atmega 328P* mikrovaldiklis. Duomenų perdavimo ryšis tarp mikrovaldiklio ir personalinio kompiuterio realizuotas *FTDI FT232RL* valdiklio pagalba, kuris atlieka *USB<>UART* protokolų keitimą. Į įrenginio jungtį, prie kurios prijungiamas papildomas vidinis modulis, yra išvesta *I2C* šyna. Jos pagalba į sistemą galima prijungti papildomų temperatūros daviklių (pagrindinis yra sumontuotas *PS9300* prietaiso spausdintinėje plokštėje) tikslesniam aplinkos ir osciloskopo temperatūrai kontroliuoti, mažinant temperatūrinio dreifo (dinaminės paklaidos) įtaką matavimo rezultatams.

3.3. Skyriaus apibendrinimas

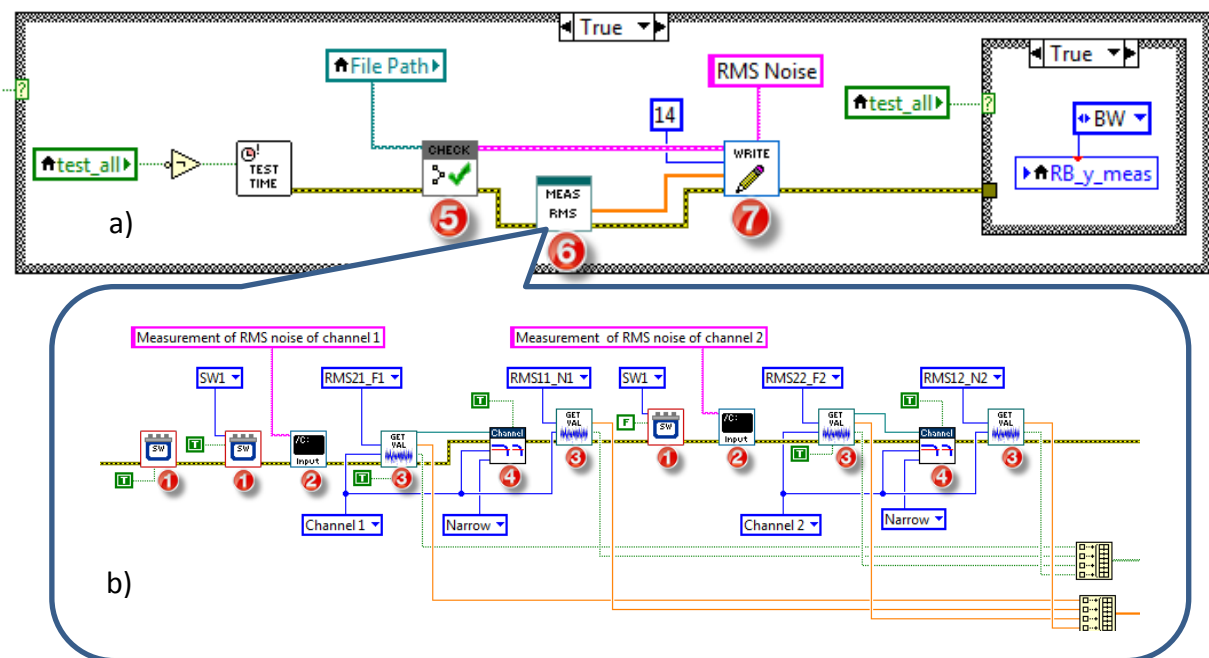
Automatizuota stroboskopinio osciloskopo testavimo sistema (ATS) sudaro signalų generavimo ir matavimo aukštadažnė įranga, signalų perdavimo traktus komutuojuantis prietaisas, asmeninis kompiuteris ir programinė valdymo įranga. Pagrindinis ATS mazgas yra vertikalios kanalo parametrų testavimo aukštadažnių signalų komutavimo sistema. Papildomai žemadažnių signalų komutavimui prijungiamas vidinis modulis. Horizontalaus kanalo ir sinchronizacijos grandinių testavimui prie sistemos prijungiamas išorinis signalo šakotuvai ir papildoma aukštadažnė relė. ATS signalų komutavimo prietaiso principinė elektrinė schema ir spausdintinės plokštės vaizdas yra pateikti C priede.

4. AUTOMATIZUOTOS TESTAVIMO SISTEMOS ĮGYVENDINIMAS

Visą automatizuotos testavimo sistemos testinių signalų generavimo arba matavimo įrangą ir tų signalų perdavimo traktų komutavimo įtaisus yra valdomi sistemos asmeninio kompiuterio pagalba, kuriame veikia ATS valdymo programa. Šiame skyriuje aprašomas ATS valdymo programos įgyvendinimo procesas, pateiktas programoje realizuotas stroboskopinio osciloskopo parametrų testavimo scenarijus ir tų parametrų matavimo rezultatai.

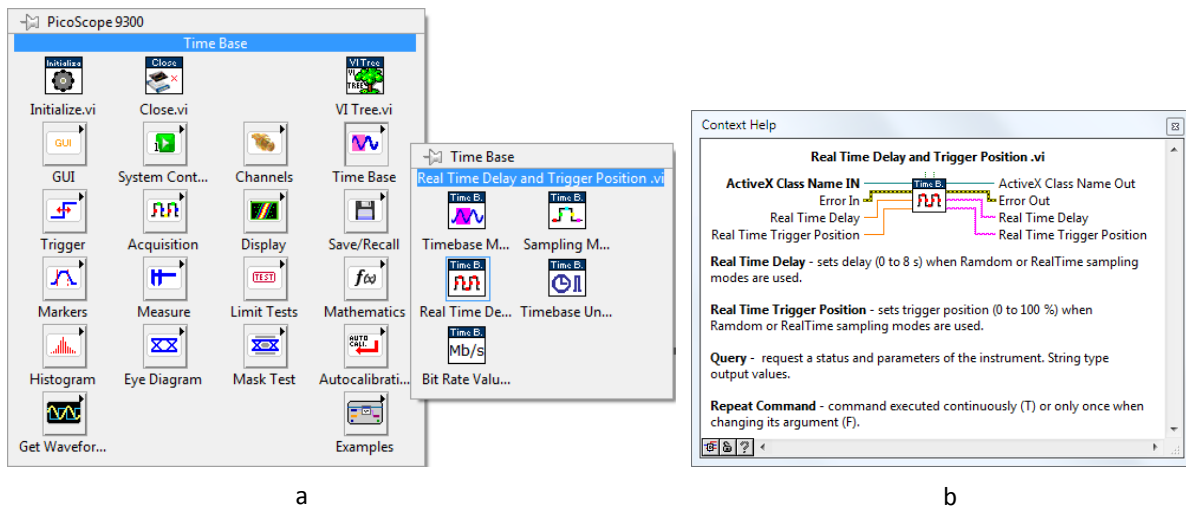
4.1. ATS valdymo programinės įrangos programavimo aplinka

ATS programinė įrangos įgyvendinimui buvo pasirinkta *LabView* [18] grafinė G programavimo kalba. Ji veikia srautinių duomenų architektūros pagrindu. Kiekvienas programos operatorius yra vykdomas tik sulaukus visų reikalingų duomenų. Operatoriai, kurie nėra susieti duomenų srautais yra vykdomi lygiagrečiai atsitiktinių eiliškumu. Ši programavimo kalba leidžia paspartinti programinės įrangos kūrimo procesą ženkliai supaprastinant tam tikrų užduočių, pvz. bendravimo tarp programos ir matavimo prietaiso protokolo realizavimą, atlikimą. *LabView* programavimo aplinkoje realizuoti sudėtingi duomenų apdorojimo algoritmai, kurie grafiškai bus sunkiai skaitomi, įskiepijami kaip *dll* bibliotekos, parašytos kitų programavimų kalbų pagalba. Darbe buvo naudojama *LabView* 2013 programavimo aplinka. Kuriant ATS valdymo programą buvo maksimaliai laikomasi virtualiųjų įrankių programavimo koncepcijos [16], kad pasiekti vaizdų ir skaidrų programos struktūriškumą. Rezultate programos kodas yra paprastai skaitomas, o papildomų testavimo scenarijų realizavimas nereikalauja įdėti daug pastangų.



4.1 pav. Programos kodo moduliškumo pavyzdys: pagrindinio programos bloko kodo fragmentas (a), triukšmo matavimo bloko kodo fragmentas (b)

Yra sukurtas valdymo programos karkasas, į kurį naujas testavimo scenarijus gali būti įdėtas kaip atskiras virtualusis instrumentas (VI), pvz., 4.1 pav. 6 blokas (triukšmo osciloskopo įėjime vidutinės kvadratinės vertės matavimas). 5 ir 7 blokas yra bendri visiems testavimo etapams. Triukšmo matavimo VI susideda iš kelių specialių (blokai pažymėti numeriu 3) ir bendrų (1,2) VI, kur paskutiniai skirti įrangos ir programos grafinės sąsajos valdymui. Jie yra sutalpinti į atskirą VI biblioteką. Blokas, pažymėtas numeriu 4, priklauso tiriamo osciloskopo *PS9300* nuotolinio valdymo grupei. Siekiant palengvinti ir paspartinti darbą su osciloskopu buvo sukurta įrenginio tvarkyklė (angl. *LabView plug and play instrument driver*), kuri pasirūpina bendravimo protokolo realizavimu tarp stroboskopinio osciloskopo ir programinės įrangos. Bendravimo protokolas paremtas *ActiveX* technologija naudojant COM (angl. *Component Object Model*) objektus.

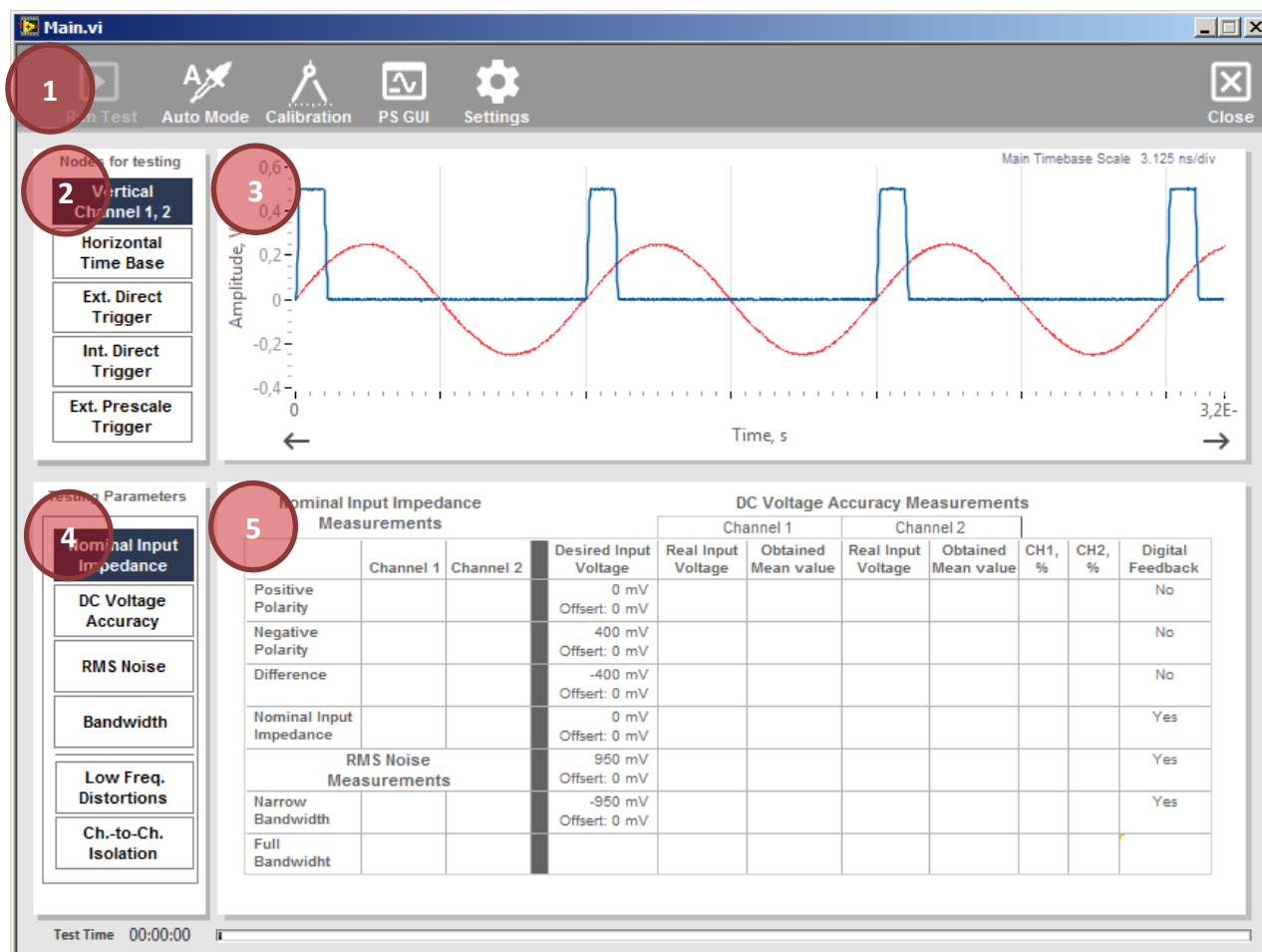


4.2 pav. *PS9300* stroboskopinio osciloskopo *LabView* tvarkyklės valdymo paletė (a), tvarkyklės konkretaus VI aprašo langas (b)

Paveiksle 4.2, a pateikta *PS9300* įrenginio tvarkyklės paletė integruota į *LabView* programavimo aplinką. Paveiksle 4.2, b pateiktas konkretaus vieno tvarkyklės VI aprašo langas, kur aprašytos VI atliekamos funkcijos ir jo įėjimų ir išėjimų terminalų paskirtys.

4.2. ATS valdymo programos įgyvendinimas

Relių sistemos komutavimo signalus generuoja mikrovaldiklis. Pastarasis taip pat kaip ir visi kiti ATS signalų matavimo ir generavimo prietaisai yra valdomi ATS valdymo programos dirbančios *Windows XP* operacinės sistemos aplinkoje. Bendravimas tarp sistemos įrenginių vyksta per *Ethernet* arba *USB* sąsajas. Ryšis yra realizuotas *VISA* (angl. *Virtual Instrument Software Architecture*) protokolo pagrindu. Sistemos įrenginių valdymo komandų formavimui naudojama *SCPI* standartizuota kalba.



4.3 pav. ATS valdymo programos pagrindinio lango vaizdas, čia: 1 – įrankių juosta; 2 – testuojamų mazgų parinktės laukas; 3 – osciloskopu surinktų signalų imčių ir konstruojamų histogramų atvaizdavimo laukas; 4 – mazgo testuojamo parametro parinktės laukas; 5 – pasirinkto parametro matavimo rezultatų (lentelių arba/ir grafikų) atvaizdavimo laukas

ATS programinės įrangos pagrindinio lango vaizdas yra pateiktas (4.3 pav.). Lango plotas yra padalintas į penkias pagrindines sritis. Numeriu 1 pažymėta programos valdymo juosta, kurioje patalpinti 6 mygtukai. Jų paskirtis aprašyta 4.1 lentelėje. Numeriu 2 pažymėta testuojamų mazgų pasirinkimo sritis (vertikalaus ir horizontalaus kanalų, trigerių grandinių). Numeriu 3 pažymėta surinktų duomenų iš stroboskopinio osciloskopo atvaizdavimo sritis. Ketvirtoje srityje pateikti pasirinkto mazgo testuojami parametrai. Penktoje – pasirinkto parametro testavimo rezultatai.

4.1 lentelė. Programos valdymo juostos mygtukų paskirtys

Mygtuko piktograma	Mygtuko pavadinimas	Mygtuko paskirtis
	Run Test	Testavimo proceso paleidimas arba nutraukimas.
	Auto Mode	Automatinio arba rankinio testavimo režimo pasirinkimas. Automatinio režimo atveju visi parametrai testuojami iš eilės. Rankinio – gali būti ištestuotas pasirinktas parametras atnaujinant atitinkamas duomenų bylas ir ataskaitą.
	Calibration	Kanalų kalibravimo proceso paleidimas prijungiant antrą galios matavimo jutiklį.

	PS GUI	Stroboskopinio osciloskopo <i>PS9300</i> grafinės valdymo sąsajos iškvietimas.
	Settings	ATS valdymo programos parametru nustatymo lango iškvietimas.
	–	Matuojamo signalo laiko skalės keitimo mygtukai.

4.3. Vertikalaus kanalo testavimas

Stroboskopinis osciloskopas matuodamas elektrinį, signalą esantį jo įėjime, konstruoja įtampos nuo laiko priklausomybės grafiką, kurių sąryšis yra: $y = f(x)$. Grafiko vertikali y ašis vaizduoja signalo amplitudę, o horizontali x ašis – laiką. Vertikalus ir horizontalus kanalai yra nagrinėjami kaip atskiri mazgai, kadangi jų parametrai nagrinėjamame lygyje yra abipusiškai nepriklausomi.

Vertikalaus kanalo signalo matavimo klaida yra nulemta kelių veiksnių: signalo įėjimo grandinės (pasyvių elementų, perdavimo traktų ir strobavimo diodų) netiesinių iškreipimų, stiprintuvo iškreipimų, analogas/skaičius keitiklio (ASK) kvantavimo klaidos. Dauguma matuojamo signalo nuolatinės dedamosios iškreipimų yra sukompensuojami iki tam tikro lygio, atliekant vertikalaus kanalo kalibravimo procedūrą.

Strobavimo grandinės įėjimo varžos matavimas

Pirmas matuojamas vertikalus kanalo parametras yra osciloskopo įėjimo charakteringosios varžos realioji dalis R_{in} , kuri paprastai turi būti lygi 50Ω . Toks dydis garantuoja mažą matuojamų signalų atspindžių lygį. Automatizuotoje testavimo sistemoje nėra galimybės matuoti strobavimo grandinės įėjimo būdingąją varžą. Ši įėjimo varžos matavimai taip pat reikalingi nustatyti tiksliai, paduodamo į osciloskopo įėjimą, neiškreipyto harmoninio virpesio amplitudę V_{pp} (nuo apatinio piko iki viršutinio piko), kuri, remiantis galios matuoklio parodymais P , yra lygi:

$$V_{pp} = \sqrt{8 \cdot P \cdot R_{in}}. \quad (4.1)$$

Strobavimo grandis yra simetriška (1.5 pav.), kurioje strobavimo rakto funkciją vykdo du, pasižymintys plačia praleidžiamųjų dažnių juosta, strobavimo diodai. Kadangi kiekvieno diodo strobavimo impulsas yra invertuotas kito diodo atžvilgiu, impulsai turėtų būti pilnai sukompensuoti strobavimo grandinės įėjime. Tačiau, atsirandant skirtumams diodų perdavimo charakteristikų ir strobavimo impulsų formose, tampa neįmanoma pilnai sukompensuoti grandinės įėjimo, dėl ko jame atsiranda tam tikras įtampos lygis. Atliekant įėjimo varžos matavimus multimetro įėjime, prie jo generuojamos matavimo srovės, prisideda ir parazitinė strobavimo grandinės srovė, kuri įneša papildomą matavimo klaidą. Keičiant matavimo poliškumą, atitinkamai komutuojuant multimetro įėjimą, paminėta matavimo klaida yra eliminuojama. Be įėjimo varžos, kartu pagal skirtingo

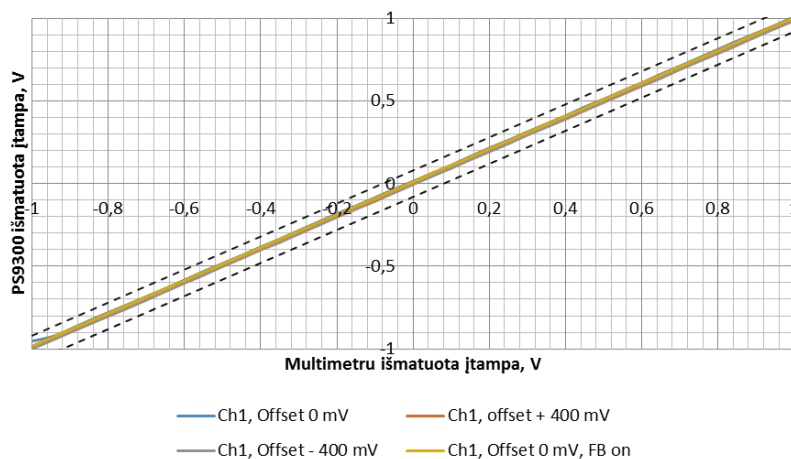
poliškumo matavimų rezultatų skirtumą, yra įvertinama ir grandinės nesukompensuota įėjimo įtampa. Formulė, pagal kurią apskaičiuojama grandinės įėjimo varža:

$$R = \frac{R_{\text{pos}} + R_{\text{neg}}}{2} - R_L, \quad (4.2)$$

čia R_{pos} ir R_{neg} yra multimetromatavimosios varžos įvertis, kai matuojamą srovę I_m veikia teigiamos arba neigiamos krypties parazitinė srovė $\pm I_p$ atitinkamai; R_L – matavimo linijos varža, matuojama trumpinant linijos galą atitinkamomis relėmis.

Nuolatinės įtampos nuokrypio matavimas

Strobavimo grandies, įėjimo stiprintuvo ir ASK įnešami iškraipymai į nuolatinės įtampos signalą yra įvertinami kalibruojant ir atmintyje išsaugant kalibravimo koeficientų duomenų masę. Kalibravimo procedūra atliekama naudojant vidinius 16 bitų skaičius/analogas keitiklius (SAK) kaip etaloninės įtampos šaltinius. Jų kvantavimo paklaida siekia $30 \mu\text{V}$, kas yra žymiai mažiau už tipinį įėjimo grandinės generuojamą triukšmą $0,6\text{--}2,0 \text{ mV}$ (vidutinė kvadratinė vertė). SAK yra skirti grandinės įėjimo įtampos kompensavimui. ATS įvertina kalibravimo procedūros tikslumą, nuolatinės įtampos matavimo iškraipymus, paduodant į grandinės įėjimą etaloninės nuolatinės įtampos signalą. Matavimas vykdomas aprėpiant visą strobavimo grandinės darbinės įtampos $\pm 1 \text{ V}$ diapazoną, esant skirtingiems stroboskopinio osciloskopo matavimo nustatymams: numatytas matavimo režimas, veikiant grandinės įėjime teigiamai ir neigiamai kompensacijos įtampai (tipinė vertė $\pm 400 \text{ mV}$) ir aktyvuojant matavimo režimą su atgaliniu ryšiu, kai grandinės įėjimą kiekvieną kartą siekiama sukompensuoti į nulinę įtampos reikšmę, atsižvelgiant į praeitos imties įtampos vertę. Keturių pirmojo kanalo charakteristikų matavimai pateikti 4.4 pav. Čia brūkšninės linijos žymi pagal specifikaciją leidžiamą nuokrypį, nors, kaip matoma iš rezultatų jis yra žymiai mažesnis.



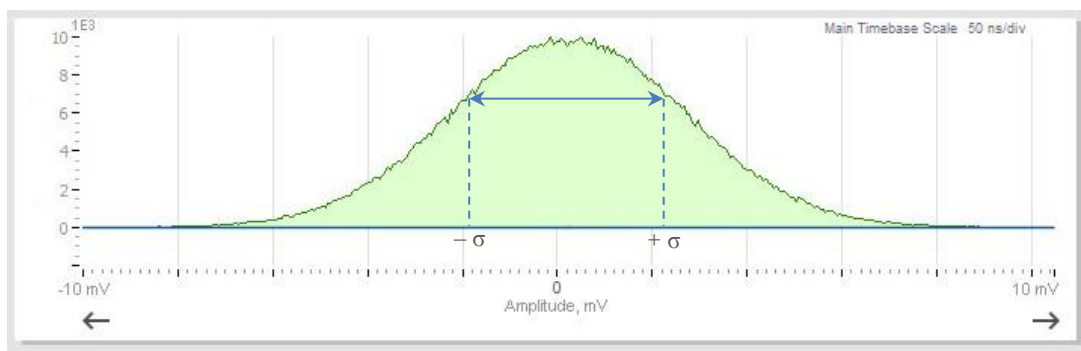
4.4 pav. Nuolatinės įtampos nuokrypių matavimo rezultatų grafikas esant skirtingiems stroboskopinio osciloskopo matavimo nustatymams

Triukšmo įtampos matavimas

Išmatuotas elektrinis signalas yra paveiktas mažos triukšmo įtampos, generuojamos strobavimo įtaiso grandinėje. Pagrindinis atsitiktinių elektrinių virpesių šaltinis yra operacinis stiprintuvas, kuris skirtas aprėpti visą ASK darbo diapazoną. Taip pat jų atsiranda dėl strobavimo diodų gardėlės šiluminių virpesių ir ASK kvantavimo klaidos, tačiau šių triukšmų amplitudė yra santykinai mažesnė. Šį generuojamo triukšmo įverčiui gauti komutavimo sistema stroboskopinio osciloskopo įėjimą atjungia nuo signalų perdavimo trakto ir prasideda tuščio įėjimo signalo imčių kaupimas. Iš sukauptų imčių konstruojama matavimo histograma (4.5 pav.), kurios pasiskirstymas yra artimas normaliajam, ir apskaičiuojamas standartinis nuokrypis pagal formulę:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (4.3)$$

čia N – histogramos intervalų skaičius; x_i – i -tojo intervalo amplitudė; μ – amplitudžių vidurkis. Išmatuota reikšmė atitinka iš tų pačių signalo imčių apskaičiuotą vidutinę kvadratinę vertę.



4.5 pav. Triukšmo įtampos matavimo histograma esant tuščiam strobavimo įtaiso įėjimui

Dažninės amplitudės charakteristikos matavimas

Harmoninio virpesio dažnis, kuriuo išmatuota amplitudė sudaro 70,7% (-3,01 dB) nuo krentančios įėjime, yra atkirtos dažnis f_c , nusakantis praleidžiamųjų dažnių juostos plotį. Siekiant atsikratyti klaidos dėl netobulai sukompensuotos nuolatinės įtampos, matavimo rezultatas, normuojamas pagal DC komponentę. Kadangi, paprastai, aukštadažniai harmoninių virpesių generatoriai nesugeba generuoti žemadažnių virpesių, dažninę amplitudės charakteristiką priimta [24] normuoti pagal žemiausią stabiliai generuojamo virpesio dažnį, kuris nėra didesnis už 5 % nuo f_c . Mūsų atveju naudojamo harmoninių virpesių generatoriaus žemiausias generuojamas dažnis yra 10 MHz. ATS išmatuotą DACH normuojama pagal 100 MHz dažnį, kadangi eksperimentiniu būdu aptikta, kad šioje dažnių srityje strobavimo grandinė įneša mažiausius iškraipymus į matuojamą harmoninį virpesį.

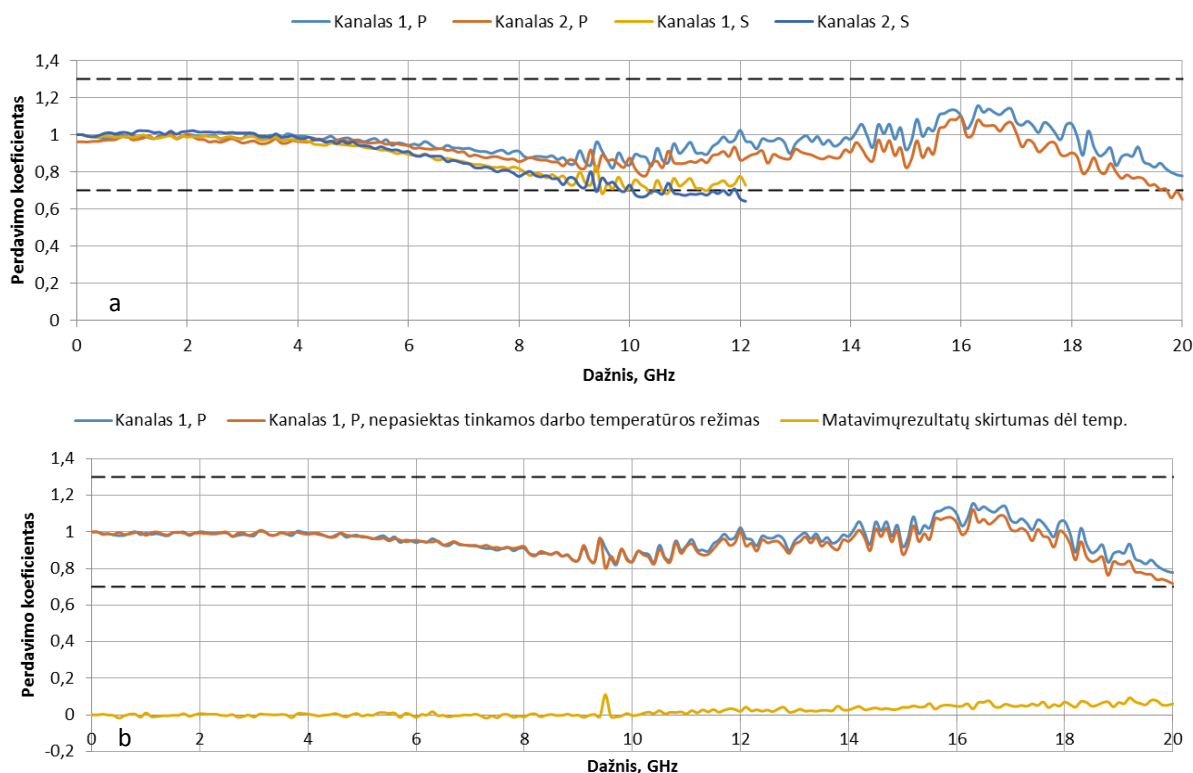
Dažninės amplitudės charakteristikos (DACH) matavimui ATS naudoja du galios jutiklius, iš kurių vienas yra atraminis (parodytas 3.5 pav.), tuo tarpu antras – naudojamas tik kalibravimo procedūrai atlikti, prijungiant jį iš eilės prie dviejų ATS išėjimų skirtų pirmajam ir antrajam

stroboskopinio osciloskopo kanalui prijungti. Kalibravimo procedūra prasideda nuo reikalingų testavimo parametrų parinkties. Yra užduodami matuojamos DACH režiai ir tankis bei harmoninio virpesio pageidaujama galios vertė, kuri bus pastovi, nepriklausomai nuo virpesio dažnio. Kadangi naudojamo harmoninių virpesių generatoriaus minimalus stiprinimo žingsnis siekia 0,1 dBm (absoliuti signalo galia P , išreikšta logaritminiais vienetais 1 mW galios atžvilgiu), tai pvz., pagal nutylėjimą kalibruojant 100 μ W galios vertei atsiranda $\pm 1,9 \mu$ W paklaida. Todėl, atliekant kalibravimo operaciją, į kalibravimo koeficientų masyvą be atraminio galios jutiklio parodymų P_{B_C} įrašomi ir antrojo P_{A_C} . Klaida eliminuojama skaičiuojant signalo perdavimo koeficientą:

$$K_{BW} = \frac{U_{\text{hist}}}{\sqrt{8 \cdot R_{\text{in}} \cdot (P_{A_C} - (P_{B_C} - P_B))}}, \quad (4.4)$$

čia R_{in} – išmatuota osciloskopo apkrovos varža; U_{hist} – harmoninio virpesio osciloskopo pasirinktame kanale išmatuotos įtampos lygis taikant histogramos matavimus; P_B – atraminio galios jutiklio parodymai.

ATS pagal nutylėjimą matuoja keturias, užduotos raiškos, DACH (4.6 pav.) pirmajam ir antrajam kanalui, kai kiekvienas iš kanalų dirba pilnos arba siauros pralaidumo juostos režime. Matavimo režimai yra nustatomi keičiant operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficientą (komutuojuant atitinkamas varžas) ir strobavimo diodų užtvarinės įtampos vertes.

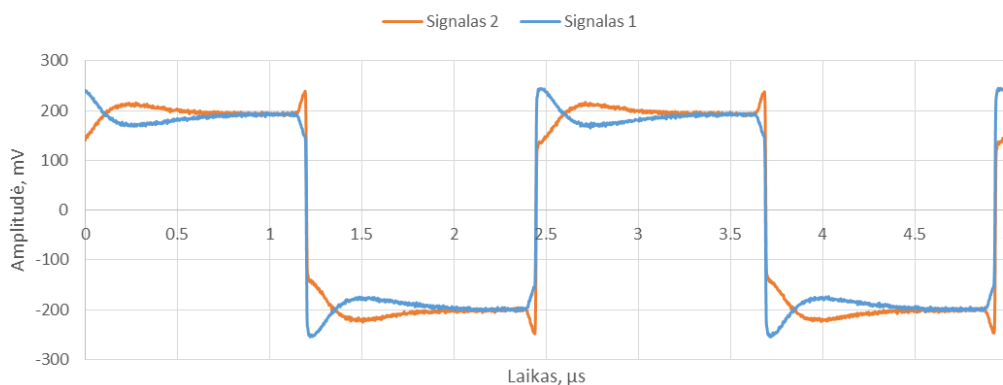


4.6 pav. Pirmojo ir antrojo kanalų DACH matavimo rezultatų grafikas, kai kiekvienas iš kanalų dirba pilnos ir siauros praleidžiamųjų dažnių juostos režimais (a), matavimų pakartojamumo patikra matuojant tą patį kanalą, kai antruoju atveju nepasiektas tinkamas temperatūrinis darbo režimas (b)

Paveiksle 4.6, a pateiktos išmatuotos charakteristikos pakankamai tolygiai kinta iki 9 GHz dažnio. Viršijus šį dažnį matavimo rezultatus pradeda įtakoti matavimo sistemoje atsirandantys signalų atspindžiai. Iš pirmojo ir antrojo kanalų, dirbančių pilnos praleidžiamųjų dažnių juostos pločio režimu, DACH matyti, kad atspindžių iškraipymo amplitudės priklauso nuo dažnio ir yra beveik pastovios. Paveiksle 4.6, b pateikti matavimo rezultatai parodo gerą ATS matavimų pakartojamumą. Skirtumas aukštadažnėje srityje atsiranda, kai testuojamas stroboskopinis osciloskopas yra nepakankamai įšilęs. ATS veikianti automatinio režimu matavimus pradeda pasiekus reikalingą temperatūrinį darbo režimą ($\sim 50^\circ\text{C}$). Temperatūrinis dreifas įneša dinaminę paklaidą į DACH matavimų rezultatus, todėl matavimo metu, pakitus stroboskopinio osciloskopo vidiniai temperatūrai daugiau negu vienam laipsniui, ATS pristabdo testavimo procesą osciloskopo autokalibracijai atlikti.

Žemadažnių virpesių iškraipymų matavimas

Dėl parazitinių strobavimo diodų sandūros talpų per užtvirtą diodų tiltelį prateka aukštadažnė srovė, kuri patenka į operacinio stiprintuvo įėjimą. Kadangi operacinis stiprintuvas turi riboto pločio praleidžiamųjų dažnių juostą (apie $\sim 10\text{ MHz}$) visi aukštadažniai signalai yra nuslopunami. Todėl, kai diodai nėra strobuojami strobavimo impulsų, ASK įėjimas yra pastoviai paveiktas žemadažnių virpesių, esančių strobavimo grandinės įėjime. Šio nepageidaujamo efekto, kuris iškraipo matuojamo signalo formą (4.7 pav.), atsikratoma iškompensuojant parazitinę diodo talpą įjungus kompensavimo grandinę. ATS tikrina kompensavimo operacijos kokybę. Į pirmąjį ir antrąjį strobavimo grandinės įėjimą yra paduodami stačiakampiai, žinomos formos (įvertintas naudojant 40 GHz matavimo sistemą) impulsai, kurių pasikartojimo dažnis pagal nutylėjimą yra lygus 400 kHz.

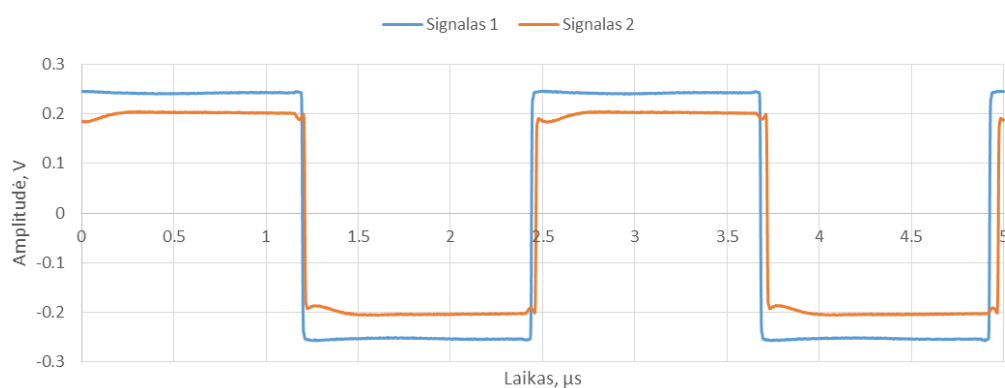


4.7 pav. Stačiakampių impulsų, iškraipytų diodų parazitinių talpų, matavimo rezultatai

Žemadažnių virpesių iškraipymai matuojami dviem būdais. Pirmuoju atveju iš surinktų signalo imčių sukonstruotos histogramos nustatoma stačiakampių impulsų amplitudė ir jos atžvilgiu surandamos maksimalios įtampos vertės imtys. Procentinis santykis tarp šios vertės ir signalo

amplitudės duoda signalo išmėtymo įvertį. Suradus minimalią šio parametro vertę yra pasiekiamas geriausias diodo parazitinės talpos sukompensavimo rezultatas.

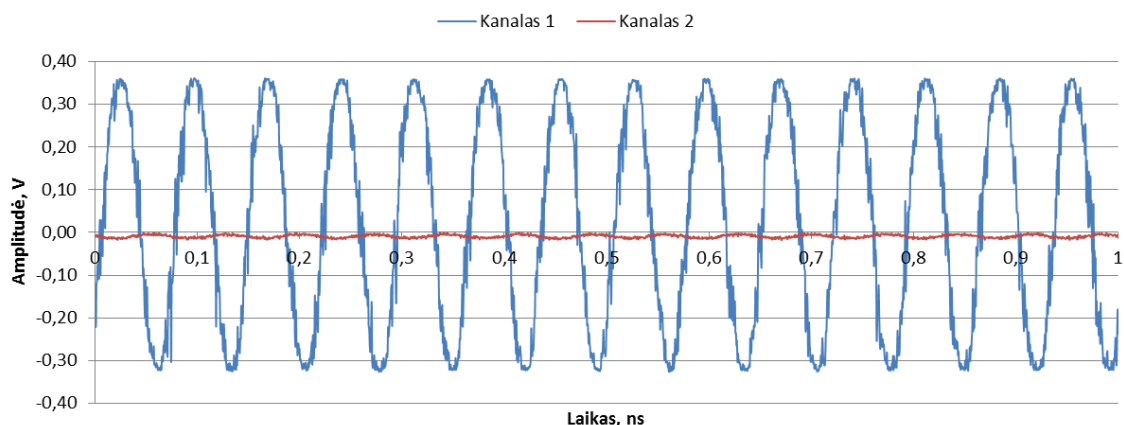
Antruoju atveju išmatuotam stačiakampių impulsų signalui yra sukuriamas idealus dirbtinis signalas su atitinkama kitimo sparta ir fronto užaugimo ir nukritimo trukmėmis. Apskaičiuojant koreliacijos koeficientą tarp šių stačiakampių impulsų įvertinama užtverto diodo varža, kuri pvz., sumažėja pažeidus diodų pn sandūrą, kai į grandinės įėjimą buvo paduotas pernelyg didelės įtampos signalas arba esant brokuotam diodui. Paveiksle 4.8 pateiktis dviejų stačiakampių impulsų matavimo rezultatai, esant sukompensuotai parazitinei diodų talpai (pagal signalo išmetimo lygį: „signalas 1“ – 0,77 %; „signalas 2“ – 0,68 %), kai viena iš dviejų strobavimo grandinių turi pažeistą strobavimo diodą (4.8 pav., „Signalas 2“).



4.8 pav. Dviejų strobavimo grandinių stačiakampių impulsų matavimo rezultatai, kai yra sukompensuotos parazitinės diodų talpos ir viena grandinė turi pažeistą diodą

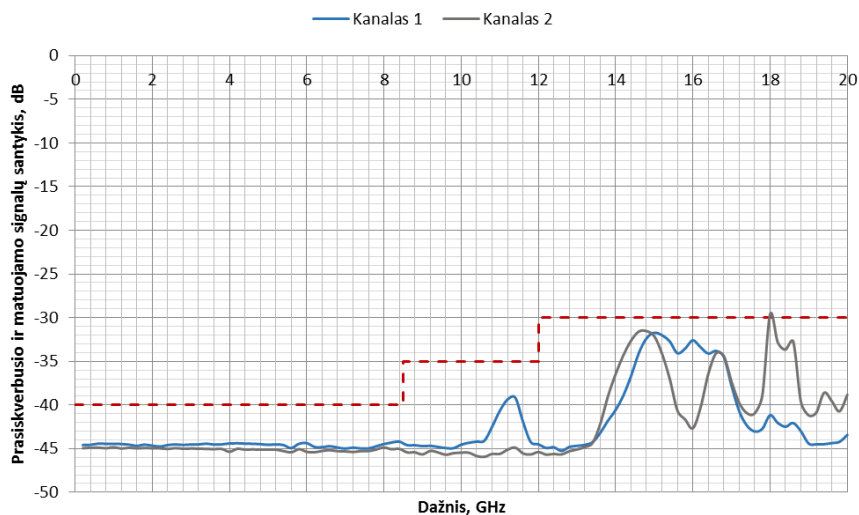
Kanalų tarpusavio izoliacijos matavimas

Strobavimo grandinėje pirmas ir antras įėjimo kanalai yra simetriški ir yra išdėstyti viename korpuse. Aukštadažniui signalui sklindant vieno kanalo strobavimo grandinės perdavimo linijoje, aplink liniją susikuria elektromagnetinė banga, kuri sklinda toliau erdvėje (strobavimo grandinės metalinio korpuso ribose). Antrojo kanalo signalo perdavimo liniją veikiama šios elektromagnetinės bangos, bangos elektrinis ir magnetinis laukai indukuoja linijoje kintančias sroves, kurios patenka tiesiai į strobavimo grandinės kanalo apkrovą (4.9 pav.). Tokiu būdu pirmojo kanalo apkrovoje krentančio signalo dalis prasiskverbia į antrąjį kanalą.



4.9 pav. Pirmąjį kanalą veikiančio ir į antrąjį kanalą prasiskverbusio signalų grafikas

Strobavimo įtaiso kanalų tarpusavio izoliacijos gerinimui, kanalų kameros atskiriamos aukštadažnių elektromagnetinių bangų energijos absorberiais. ATS atlieka kanalų tarpusavio izoliacijos kokybės patikrą trijose testavimo signalų dažnių intervaluose: DC–8 GHz; 8–12 GHz; 12–20 GHz. Pagal patikros algoritmą atliekama rezonansinių taškų (kai į tuščio kanalo apkrovą pakanka maksimalus signalo energijos kiekis) paieška, iš eilės matuojant visuose trijose intervaluose, kai kiekvienam intervalui užduodama skirtinga matuojamo ir prasiskverbusio signalų santykio riba. ATS operatorius rankiniu būdu gali užduoti matuojamų taškų tankį. Matavimo rezultatų pavyzdys pateiktas 4.10 pav.



4.10 pav. Kanalų tarpusavio izoliacijos matavimo rezultatų grafikas

4.4. Horizontalaus kanalo ir sinchronizacijos grandinių testavimas

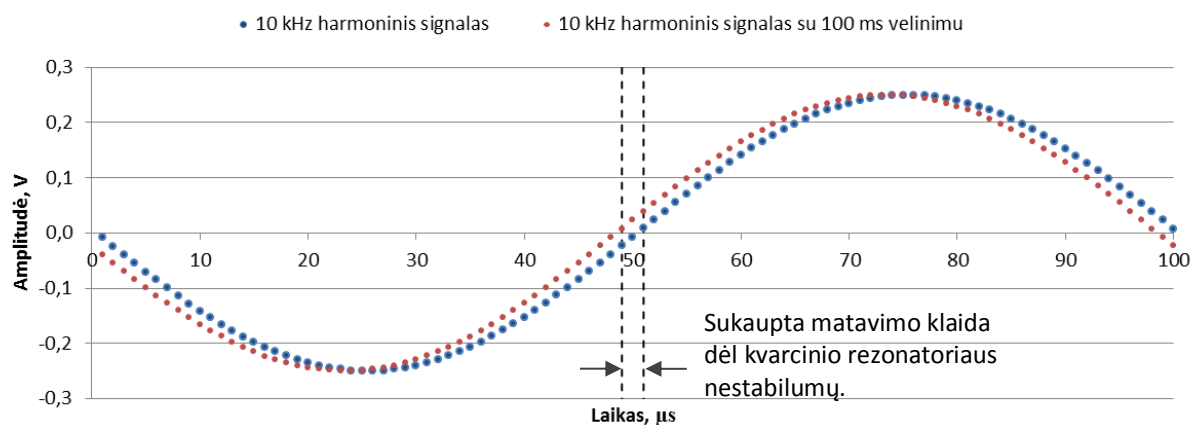
Stroboskopinis osciloskopas, priklausomai nuo matuojamo elektrinio signalo formos ir pasikartojimo dažnio, naudojant skirtingus imčių kaupimo režimus, matavimus gali vykdyti vienu iš trijų būdų: 1) realaus laiko; 2) atsitiktinio ekvivalentinio laiko; 3) nuoseklaus ekvivalentinio laiko.

Kiekvieno režimo darbą realizuoja atitinkama laiko bazės grandis. Sinchronizacija tarp šių grandžių ir matuojamo signalo užtikrina keturios specialios sinchronizacijos grandys: 1) išorinė tiesioginė sinchronizacijos grandis; 2) išorinė su signalo pasikartojimo dažnio daliklių sinchronizacijos grandinė; 3) vidinė tiesioginė pirmojo ir 4) antrojo kanalo sinchronizacijos grandys.

Horizontalaus kanalo parametrų matavimas

Horizontalaus kanalo patikimumas ir kokybė tikrinami matuojant du parametrus: 1) laiko bazės taktuojančio kvarcinio generatoriaus stabilumą ir 2) deltą laiko intervalų, tarp renkamų signalo gretimų imčių, naudojant skirtingus jų kaupimo režimus, trukmę.

Kvarcinio rezonatoriaus, kuris taktuoja ASK, strobavimo ir laiko bazės grandinės stabilumas tikrinamas stabilaus 10 kHz dažnio harmoninio virpesio atžvilgiu. Matavimas atliekamas imtis kaupiant realiu laiku, kai signalas strobuojamas maksimaliu 1 MHz dažniu. Nustačius matuojamo signalo įrašo ilgį lygų 100 μ s yra surenkama 100 imčių. Toliau ATS algoritmas nustato 100 ms vėlinimą trigerio grandinės matuojamo signalo sinchronizacijos taško atžvilgiu. Tokiu būdu surenkamas dar vienas 100 imčių signalo įrašas, kuriame pirmoji imtis buvo gauta praleidus 100000 strobavimo impulsų. ATS algoritmas kiekviename įrašė nustato artimiausias x ašiai (0 V įtampai) esančias imtis. Tiesiškai prainterpoliavus atstumą tarp kiekvieno įrašo imčių porų randami du susikirtimo su x ašimi taškai. Išmatuotas atstumas tarp taškų laiko ašies atžvilgiu nusako sukaupą klaidą dėl kvarcinio rezonatoriaus nestabilumą (4.11 pav.). Surenkant 128 signalų įrašus yra apytiksliai 11 kartų sumažinama matavimo neapibrėžtys atsirandanti dėl generuojamų triukšmų.



4.11 pav. Kvarcinio rezonatoriaus generuojamų impulsų sekos nestabilumo matavimo grafikas

Atstumų tarp matuojamo signalo įrašo gretimų imčių, t.y. delta intervalų trukmių nuokrypiai įvertinami matuojant stabilaus harmoninio virpesio periodo trukmę. ATS sudėtyje esantis harmoninių virpesių HMC-T2240 generatorius užtikrina 1,5 ppm pagrindinės harmonikos dažnio stabilumą ir gera šalutinių harmonikų slopinimą – 75 dBc nešlio galios atžvilgiu. Pvz., matuojant 14 GHz harmoninio virpesio periodą generuojamo virpesio dažnio nuokrypiai siekia ± 21 kHz ($\sim 0,1$

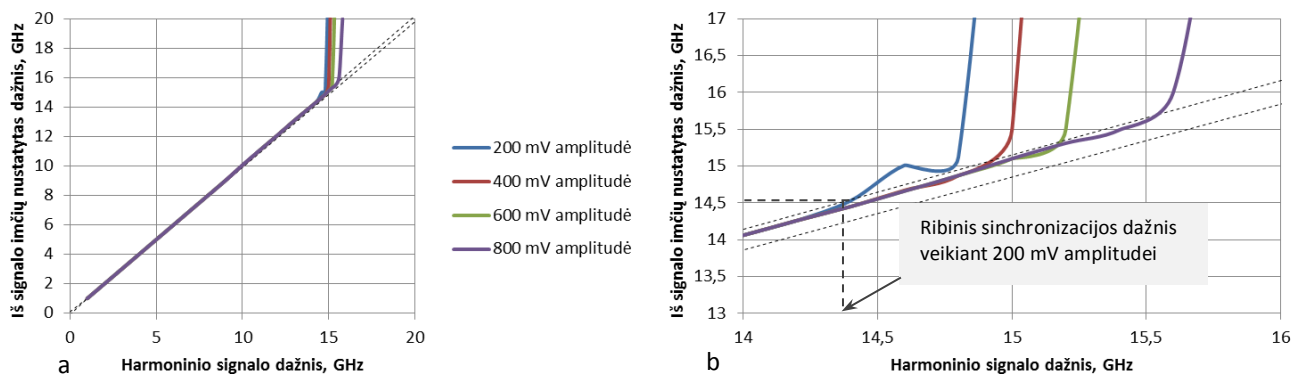
fs), tai yra žymiai mažiau negu pagal specifikaciją leidžiama matavimo paklaida $\pm 3 \text{ ps} \pm 1 \%$ nuo delta intervalo trukmės. Nagrinėjamu atveju kaupiant pagal nutylėjimą 2000 imčių esant 2 ns signalo įrašo lango pločiui, delta intervalo trukmė siekia 1 ps. Esant būtinybei tiksliai kontroliuoti ATS generuojamų signalų dažnius, sistemoje yra numatyta dažniamčio prijungimo galimybė.

Kaupiant signalo imtis realiu laiku, delta intervalų stabilumas priklauso nuo kvarcinio rezonatoriaus (strobavimo dažnio) stabilumo. Šiuo atveju pagal nutylėjimą analizuojamas signalų dažnių intervalas yra nuo 1 Hz iki 100 kHz. Kaupiant imtis ekvivalentiniu laiku, naudojant atsitiktinį ekvivalentinio laiko strobavimo metodą, prie kvarcinio rezonatoriaus įnešamos klaidos prisideda laiko trukmės matavimo grandinės klaida. Grandinė matuoja trukmę tarp matuojamo signalo sinchronizacijos įvykio ir realiu laiku sukauptos imčių sekos n -tosios imties (pagal nutylėjimą $n = L / 2$, čia L – imčių sekos ilgis). Kadangi laiko trukmės matavimo grandinės raida yra santykinai maža, paklaida gali siekti iki $\pm 4 \text{ ns}$. Harmoninių virpesių periodų matavimas pagal nutylėjimą atliekamas irgi santykinai siaurame intervale nuo 1 kHz iki 5 MHz.

Testuojant pagrindinį stroboskopinio osciloskopo darbo režimą, kai jis matuoja signalą taikant nuoseklų ekvivalentinio laiko strobavimo metodą, analizuojamas platus dažnių ruožas nuo 100 Hz iki 14 GHz. Apatinė intervalo vertė yra apribota imčių kaupimo trukme, kadangi šiame režime imtis strobuojama vieną kartą per signalo periodą, kiekvieną kartą inkrementuojant vėlinimą tarp sinchronizacijos įvykio ir strobavimo impulso, kol nebus surinkta 2000 taškų (vieno taško matavimas trunka kelias minutes), viršutinė – sinchronizacijos grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plokštumi. Laiko vėlinimas yra generuojamas skaitmeniniu ir analoginiu būdų. Skaitmeninis vėlinimas realizuotas skaitmeninio skaitiklio pagrindu, kurio laiko intervalų diskretiškumas lygus 2 ns. Vieno 2 ns impulso intervale dirba analoginio vėlinimo grandinė, kuri sudaryta pagrinde iš srovės šaltinio, kraunamo kondensatoriaus, komparatoriaus ir SAK. Srovės šaltinis periodiškai kraudamas kondensatorių generuoja pjūklo formos signalą. Keičiant SAK išėjimo įtampos vertę nustatomas komparavimo taškas pjūklo formos signale. Naudojant didelės raiškos 12-bitų SAK ir aprėpiant beveik visą jo dinaminį diapazoną generuojami tikslūs fento sekundės eilės vėlinimai (minimali delta intervalo trukmė 6,2 fs). Jų tikslumas ribojamas pjūklo formos signalo netiesiškumais. Šiuo atveju ATS delta intervalų tikslumą tikrina dviejuose intervaluose, kai signalo įrašo trukmė mažesnė už 2 ns, kai naudojamas tik analoginis vėlinimas, ir kitu atveju, kai naudojamas analoginis ir skaitmeninis vėlinimas. Paskutiniuoju atveju harmoninių virpesių periodų matavimo rezultatas yra paveiktas imčių sekos „surišimo“ vietomis (atsiranda analoginio vėlinimo pjūklo formos signalo periodo pradžioje ir pabaigoje).

Sinchronizacijos grandinių parametrų matavimas

ATS sinchronizacijos grandinių patikrą vykdo matuodama jų įėjimo varžas (analogiškai kaip ir vertikalus kanalo atveju), praleidžiamųjų dažnių juostos plotį ir įnešama signalo drebinimą. Praleidžiamųjų dažnių juostos plotis matuojamas ieškant laiko ašies ir išmatuoto harmoninio virpesio susikirtimo taškų (artimiausi taškai prainterpoliuojami tikslios susikirtimo vietos nustatymui). Didinant harmoninio virpesio dažnį praleidžiamųjų dažnių juostos pabaigos riboje išauga grandinės į matuojama virpesį įnešamas drebinimo lygis. Kai pagal paveiktus triukšmo susikirtimo taškus nustatytas signalo dažnis skiriasi daugiau negu 1 % nuo realaus dažnio, taškas žymimas kaip praleidžiamųjų dažnių juostos ribiniu tašku (4.12 pav. b).



4.12 pav. Strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ir jautrumo matavimo grafikas (a) ir grafike iškirta grandinės dažnių juostos ribinė dalis (b)

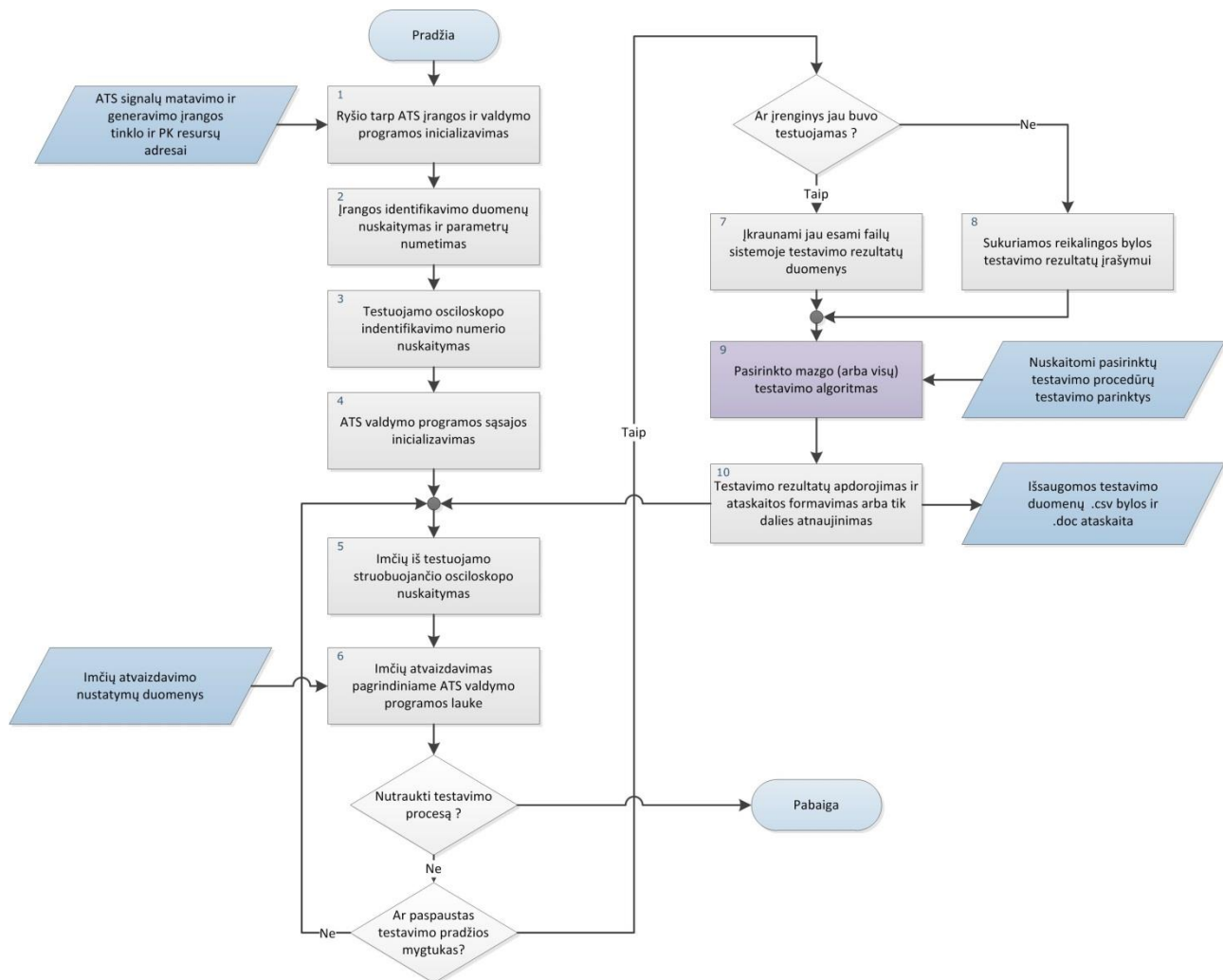
Matavimo procese tiksliai kontroliuojama įėjimo signalo amplitudė. Kartojant praleidžiamųjų juostos pločio matavimus esant skirtingoms įėjimo signalo amplitudėms (200mV , 400 mV, 600 mV, 800 mV) nustatomas sinchronizacijos grandinių jautrumas.

Sinchronizacijos grandinių įnešamo drebinimo į matuojamą signalą matavimai atliekami užduotame dažnių intervale analizuojant harmoninio virpesio su laiko ašimi susikirtimo vietą (didžiausias matuojamo harmoninio virpesio statusas). Lango plotis yra 10 kartų siauresnis už signalo periodą, aukštis siekia ± 8 mV. Signalų drebinimo įvertis gaunamas apskaičiuojant, iš sukauptų imčių, vidutinę kvadratinę vertę $\times$ ašies atžvilgiu.

4.5. ATS valdymo programos veikimo algoritmas

Pasirinktų stroboskopinio osciloskopo mazgų testavimas pradedamas pagrindiniame ATS valdymo programos cikle. Pagrindinio programos algoritmo blokinė diagrama yra pateikta 4.13 pav. Prieš įžengiant programai į pagrindinį ciklą yra vykdomas inicilizacijos procesas, kurio metu nustatomas ryšis tarp ATS valdymo programos ir kitų sistemos įrenginių, yra vykdomas identifikavimo numerių nuskaitymas ir numatytų signalų matavimo arba generavimo parametrų

nustatymas. Algoritmas nuskaityti unikalų testuojamo stroboskopinio osciloskopo identifikavimo numerį, kuris reikalingas programos darbui su failų sistema. Jeigu testuojamas osciloskopas neturi unikalaus serijinio numerio (nebuvo įrašytas į įrenginio atmintį), vartotojas gali stebėti renkamų imčių atvaizdavimo procesą (6 blokas), tačiau testavimo proceso paleidimo mygtukas yra blokuojamas. Algoritmui įžengus į pagrindinį ciklą įmanoma koreguoti signalo imčių kaupimo nustatymus, keičiant imčių skaičių viename įraše (pagal nutylėjimą 2000) ir laiko skalę.



4.13 pav. ATS valdymo programos pagrindinio algoritmo blokinė diagrama

Paleidus pasirinkto mazgo testavimo procedūrą, programos algoritmas tikrina failų sistemą (pasirinktą aplanką, kuris nustatomas ATS valdymo programos nustatymų lange), patikrina ar egzistuoja visos reikalingos bylos ir sukuria trūkstamas. Vykdant testavimo procesą vartotojui pagrindiniame valdymo programos lange yra atvaizduojamas skirtukas, atitinkantis šiuo metu testuojamą mazgą. Visi matavimo duomenys (grafikai, duomenų lentelės) ir tarpiniai rezultatai į vartotojo sąsają išvedami realiu laiku. Visi surinkti duomenys išsaugomi .csv bylose. Iš duomenų

masyvų taip pat sugeneruojama *.doc* formato testavimo procedūros ataskaita (D priedas) išrenkant reikalingus matavimo duomenų taškus.

4.6. Skyriaus apibendrinimas

Automatizuotos *PS9300* serijos stroboskopinio osciloskopo testavimo sistemos valdymo programa yra realizuota naudojant *Labview* grafinę programavimo aplinką. Supaprastinta bendravimo protokolo tarp ATS komponentų įgyvendinimo procedūra ir sukurtos tų komponentų *LabView* tvarkyklės leidžia pasiekti gerą lankstumo lygį prijungiant prie sistemos naują signalų matavimo arba generavimo įrangą ir realizuojant naujus testavimo scenarijus.

ATS testuoja stroboskopinio osciloskopo vertikaliosios kanalo, horizontaliosios kanalo ir trijų strobavimo grandinių parametrus pagal numatytus valdymo programos parametrus. Vartotojas gali keisti matuojamų, tam tikro parametro charakteristikos taškų skaičių bei vidurkinamų imčių kiekį, taip koreguojant sistemos spartos ir našumo santyki. ATS testavimo proceso pabaigoje sugeneruoja testavimo rezultatų ataskaitą.

5. AUTOMATIZUOTOS TESTAVIMO SISTEMOS TYRIMAS

Šiame skyriuje pateiktas automatizuotos testavimo sistemos vientisumo lygio tyrimas. Tyrimo metu statistiškai apdorojant eksperimentinius duomenis įvertinamas sistemos našumas, sparta ir parametrų matavimų pakartojamumas. Siekiant nustatyti ar osciloskopo strobavimo grandinė yra minimalios fazės, tiriamas šios grandinės dažninės amplitudės ir dažninės fazės charakteristikų sąryšis. Priklausomybės tarp strobavimo grandinės triukšmo ir dažninės amplitudės charakteristikų tiriamos taikant dirbtinių neuronų tinklus.

5.1. ATS vientisumo tyrimas

Automatizuotos testavimo sistemos charakteristikų tyrimas vykdomas pagal tris apžvalginiam skyriuje aptartus kriterijus: našumas, sparta ir pakartojamumas. Šie trys kriterijai kartu apsprendžia bendrą ATS vientisumo lygį.

Sistemos našumas tiriamas siekiant eksperimentiniu būdu įvertinti sisteminės ir atsitiktinės ATS matuojamų parametrų (aptartų 4 skyriuje) paklaidas. Šiuo atveju etaloninėmis parametrų vertėmis laikomos rankiniu būdu gautos parametrų matavimo vertės, kuomet yra minimizuoti signalų perdavimo traktų ilgiai ir jungčių skaičiai, naudojami kokybiški, 40 GHz praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ir šiame intervale vienetui artimam stovinčios bangos koeficiento, koaksialinius kabelius, atenuatorius ir adapterius. Matavimo metu siekiant atsikratyti dinaminės paklaidos įtakos kontroliuojamas temperatūrinis darbo režimas. Tokiu būdu išmatuotų parametrų absoliuti paklaida įvertinama pagal matavimo įrangos specifikacijoje pateiktus įverčius.

ATS išmatuoto stroboskopinio osciloskopo kiekvieno parametro matavimo rezultatas gali būti išreikštas tokiu pavidalu:

$$x = (x_0 + \Delta) \pm \sigma, \quad (6.1)$$

čia x_0 – išmatuota vertė; Δ – visų paklaidų, kurios yra determinuotos (sisteminės neatsitiktinės paklaidos), algebrinė suma (determinuotos paklaidos sumuojamos su matavimo rezultatais kaip korekcijos koeficientai); σ – visų atsitiktinių paklaidų geometrinė suma.

Lentelėse 5.1–5.3 pateikti ATS stroboskopinio osciloskopo tam tikrų parametrų matavimų paklaidos įvertinimo rezultatai. Tų parametrų, kurių matavimo rezultatų sklaidos pobūdis panašus į lenteles jau įtrauktų parametrų matavimų paklaidos pobūdį (pvz., 2 kanalo DACH matavimai), lentelėse nėra pateikti. Statistiniams duomenims surinkti kiekvieno parametro matavimai buvo kartojami 50 kartų.

5.1 lentelė. Stroboskopinio osciloskopo vertikalaus kanalo parametrų matavimo klaidos įvertinimas

Matuojamas parametras	Taškas/ režimas	Kan- alas	Vidutinė vertė, x_0	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis, σ	Sisteminė klaida, Δ
Strobavimo grandinės realioji įėjimo varža	–	1	49,63 Ω	49,38 Ω	49,61 Ω	0,0275 Ω	– 0,09 Ω
	–	2	49,63 Ω	49,37 Ω	49,62 Ω	0,0309 Ω	– 0,10 Ω
Nuolatinės įtampos nuokrypis	0 mV	1	0,5 mV	– 0,02 mV	1,01 mV	0,21 mV	– 0,4 mV
	400 mV	1	0,69 %	0,24 %	0,89 %	0,172 %	0,16 %
	– 400 mV	1	0,64 %	0,15 %	0,95 %	0,171 %	0,18 %
	950 mV	1	0,57 %	0,30 %	0,78 %	0,097 %	0,26 %
	– 950 mV	1	0,60 %	0,42 %	0,86 %	0,097 %	0,31 %
Įtampos triukšmo vidutinė kvadratinė vertė	Siauros juostos	1	0,74 mV	0,72 mV	0,76 mV	0,005 mV	– 0,01 mV
	Plačios juostos	1	1,80 mV	1,78 mV	1,84 mV	0,012 mV	0,00 mV
	Siauros juostos	2	0,75 mV	0,74 mV	0,77 mV	0,006 mV	0,01 mV
	Plačios juostos	2	1,71 mV	1,64 mV	1,75 mV	0,036 mV	– 0,01 mV
Strobavimo grandinės signalų perdavimo koeficientas	2 GHz	1	0,97	0,96	0,98	0,0037	0,009
	4 GHz	1	0,98	0,95	0,99	0,0083	0,019
	6 GHz	1	0,93	0,92	0,95	0,0082	0,021
	8 GHz	1	0,91	0,89	0,93	0,0097	0,006
	10 GHz	1	0,83	0,81	0,85	0,0071	0,011
	12 GHz	1	0,99	0,96	1,01	0,0136	– 0,041
	14 GHz	1	0,96	0,94	0,98	0,0100	– 0,012
	16 GHz	1	1,07	1,03	1,1	0,0138	– 0,038
	18 GHz	1	1,00	0,98	1,02	0,0117	– 0,051
	20 GHz	1	0,73	0,71	0,75	0,0114	0,020
Žemadažnių signalų iškraipymas	–	1	1,90 %	1,71 %	2,05 %	0,082 %	0,41 %
	–	2	1,20 %	1,12 %	1,38 %	0,038 %	0,52 %
Kanalų tarpusavio izoliacija	2 GHz	1	– 44,49 dB	– 44,81 dB	– 44,39 dB	0,084 dB	– 0,05 dB
	5 GHz	1	– 44,54 dB	– 44,85 dB	– 44,44 dB	0,082 dB	– 0,09 dB
	8 GHz	1	– 44,52 dB	– 44,82 dB	– 44,38 dB	0,079 dB	– 0,10 dB
	11 GHz	1	– 40,46 dB	– 40,62 dB	– 40,31 dB	0,081 dB	– 0,09 dB
	14 GHz	1	– 40,68 dB	– 40,96 dB	– 40,60 dB	0,071 dB	– 0,13 dB
	17 GHz	1	– 37,87 dB	– 37,93 dB	– 37,43 dB	0,088 dB	– 0,20 dB
	20 GHz	1	– 43,23 dB	– 43,55 dB	– 43,09 dB	0,085 dB	– 0,11 dB

5.2 lentelė. Stroboskopinio osciloskopo horizontalaus kanalo parametrų matavimo klaidos įvertinimas

Matuojamas parametras	Matuojamas taškas	Vidutinė vertė, x_0	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis, σ	Sisteminė klaida, Δ
Kvarcinio rezonatoriaus stabilumas	–	1,60 μ s	1,07 μ s	1,91 μ s	0,031 μ s	– 0,21 μ s
Delta intervalų trukmių stabilumas. Realaus laiko režimas	2 Hz	500,1 ms	499,9 ms	500,5 ms	0,062 ms	0,02 ms
	2 kHz	500,0 μ s	499,8 μ s	500,2 μ s	0,051 μ s	0,01 μ s
	100 kHz	9,99 μ s	9,98 μ s	10,01 μ s	0,007 μ s	– 0,01 μ s
Delta intervalų trukmių stabilumas. Atsitiktinio ekvivalentinio laiko režimas	2 kHz	500,1 μ s	499,8 μ s	500,6 μ s	0,086 μ s	0,03 μ s
	500 kHz	2,001 μ s	1,995 μ s	2,012 μ s	0,003 μ s	0,01 μ s
	5 MHz	199,6 ns	197,9 ns	201,4 ns	0,056 ns	0,09 ns
Delta intervalų trukmių stabilumas. Nuoseklaus ekvivalentinio laiko režimas. Lango plotis > 2ns	100 Hz	10,01 ms	9,99 ms	10,02 ms	0,009 ms	0,01 ms
	10 MHz	99,99 ns	99,87 ns	100,09 ns	0,066 ns	– 0,03 ns
	500 MHz	1,996 ns	1,988 ns	2,005 ns	0,002 ns	0,01 ns
Delta intervalų trukmių stabilumas. Nuoseklaus ekvivalentinio laiko režimas. Lango plotis < 2 ns	1 GHz	1,005 ns	0,995 ns	1,007 ns	0,002 ns	– 0,01 ns
	5 GHz	202,3 ps	197,9 ps	203,6 ps	0,523 ps	0,93 ps
	14 GHz	70,97 ps	70,77 ps	71,39 ps	0,445 ps	– 0,81 ps

5.3 lentelė. Stroboskopinio osciloskopo sinchronizacijos grandinių parametrų matavimo klaidos įvertinimas

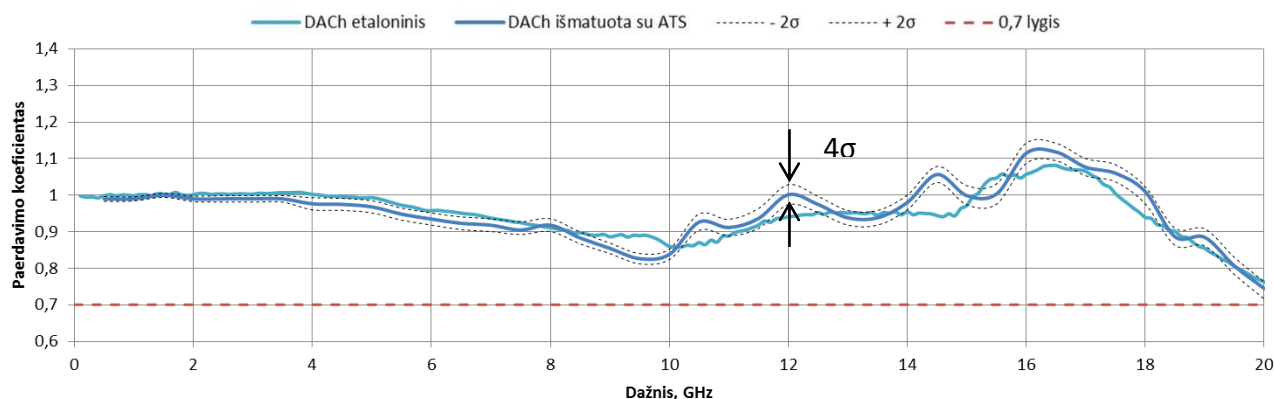
Matuojamas parametras	Matuojamas taškas	Vidutinė vertė, x_0	Minimali vertė	Maksimali vertė	Standartinis nuokrypis, σ	Sisteminė klaida, Δ
Išorinė tiesioginės sinchronizacijos grandinė						
Grandinės sinchronizuoto matuojamo signalo dažnis	2,5 GHz	2,501 GHz	2,498 GHz	2,505 GHz	0,002 GHz	0,01 GHz
Grandinės į signalą įnešamų drebjimų vidutinė kvadratinė vertė	2,5 GHz	1,81 ps	1,76 ps	1,92 ps	0,031 ps	– 0,13 ps
Vidinė tiesioginės sinchronizacijos grandinė						
Grandinės sinchronizuoto matuojamo signalo dažnis	100 MHz	99,9 MHz	99,5 MHz	100,4 MHz	0,161 MHz	0,01 MHz
Grandinės į signalą įnešamų drebjimų vidutinė kvadratinė vertė	100 MHz	28,1 ps	27,3 ps	28,9 ps	0,126 ps	– 0,09 ps
Išorinė sinchronizacijos grandinė su dažnio dalikliu						
Grandinės sinchronizuoto matuojamo signalo dažnis	14 GHz	13,9 GHz	13,8 GHz	14,1 GHz	0,066 GHz	0,05 GHz
Grandinės į signalą įnešamų drebjimų vidutinė kvadratinė vertė	14 GHz	1,92 ps	1,88 ps	1,94 ps	0,016 ps	– 0,06 ps

Apskaičiuotas iš sukauptų matavimo verčių standartinis nuokrypis rodo sistemos matavimo rezultatų atsitiktinės paklaidos σ vertę. Kadangi ATS paklaidos buvo tiriamos pakartotinai testuojant tik vieną stroboskopinį osciloskopą, tai atsitiktinės paklaidos vertė įgyja tokį pobūdį:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\Sigma\text{ats}}^2 + \sigma_{\Sigma\text{pld}}^2 + \sigma_{\Sigma\text{mtd}}^2}, \quad (5.2)$$

čia $\sigma_{\Sigma\text{ats}}$ – visų atsitiktinių paklaidų suma, kuri mažinama vidurkinant daugkartinių matavimų rezultatus; $\sigma_{\Sigma\text{pld}}$ – papildomų paklaidų, kurios koreliuoja su išoriniais faktoriais kaip temperatūra arba maitinimo įtampos nestabilumais, suma. Tokių dinaminių, lėtai kintančių paklaidų mažinimui ATS nuolat atlieka autokalibracijos procedūras; $\sigma_{\Sigma\text{mtd}}$ – visų metodinių atsitiktinių paklaidų, kurias įneša ATS valdymo programa, suma. Pvz., dėl mažo kompiuterio pajėgumo, kuriame vykdoma programa, generuojami nepastovūs, nuo AK procesoriaus apkrovos priklausantys, vėlinimai, kurie skirti temperatūrinio galios jutiklio matavimo inercijos įtakos mažinimui. Kelių prietaisų testavimo atveju, prie pateiktų atsitiktinių paklaidų prisideda ir sisteminio nuokrypio atsitiktinė dalis (apibudina ATS matavimų pakartojamumą). Ši atsitiktinė paklaida priklauso nuo stroboskopinių osciloskopų tam tikrų parametrų sklaidos. Pvz., kai yra bandoma nustatyti ATS signalų perdavimo traktų atspindžių koeficientus (tam tikruose signalo dažnio taškuose) ir panaudoti juos kaip DACH matavimų korekcijos koeficientus, atsiranda atsitiktinė klaida dėl skirtingų strobavimo grandinių, įėjimų skirtingų signalo atspindžių lygių.

Kadangi visų išmatuotų parametrų sklaidos skirstinys yra panašus į normalųjį skirstinį, sudaryto pasikliautino intervalo, kurio plotis yra $\pm 2\sigma$, rezultato patekimo į jį tikimybė yra 0,954. Toks pasikliautinas intervalas DACH matavimams yra pateiktas 5.1 pav. Grafike matyti, kad matavimų atsitiktinės paklaidos lygis yra santykinai mažas ir, kylant dažniui, jis didėja. Atsitiktinė paklaida yra kur kas mažesnė už sisteminę klaidą, kurios pagrindinis šaltinis yra signalų perdavimo traktuose atsirandantys sklindančių bangų atspindžiai.



5.1 pav. ATS atsitiktinės ir sisteminės paklaidos įvertis DACH matavimo atveju

ATS vieno prietaiso testavimo trukmė priklauso nuo valdymo programoje užduotų testavimo parametrų. ATS spartos tyrimas atliekamas naudojant numatytus nustatymus (5.4 lentelė). Matuojamo parametro pakartotinių matavimų skaičius kinta priklausomai nuo naudojamų signalų perdavimo traktų. Jeigu testavimo signalas sklinda per ATS traktų žemadažnę dalį, vidurkinamų imčių skaičius lygus 50, jeigu tik per aukštadažnę – 30. Triukšmo įtakai sumažinti renkamas beveik dvigubai didesnis imčių skaičius. Vidutinė kvadratinė, žemadažniame trakte generuojamo, triukšmo

vertė siekia ~ 4 mV, aukštadažniame – neviršija nuosavo triukšmo, kurį generuoja testuojamas osciloskopas. Apytiksliai minimali vertė siekia 0,6 mV.

ATS numatytų parametrų testavimo laikas lyginamas su tų pačių parametrų, matuotų rankiniu būdu, matavimo trukme. Iš 5.4 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad ATS vieno prietaiso pilną testavimo procesą atlieka per 22 minutes, tuo tarpu rankiniu būdu matuojant tuos pačius taškus vidutiniškai prireikia 1 valandos ir 34 minučių neskaitant laiko, kuris reikalingas matavimo rezultatus įrašyti į testavimo ataskaitą.

5.4 lentelė. ATS spartos ir pakartojamumo patikra

Matuojamas parametras	ATS matavimų nustatymai				Matavimo sparta (visų taškų)		Matavimų pakartojamumas	
	Imčių skaičius	Pirmas taškas	Paskutinis taškas	Žingsnis	ATS	Rankiniu būdu	Pasikliautiname ± 2σ intervale ?	Nuokrypis nuo vidurkio
Įėjimo varža (1 k. ¹)	50	–	–	–	25 s	43 s	Taip	0,05 Ω
Nuolatinės įtampos nuokrypis (1 k., 400 mV)	50	-1 V	1 V	0,1V	1 min 55 s	10 min	Taip	0,22 %
Įėjimo triukšmas (1 k., siauras režimas)	30	–	–	–	31 s	1 min 42 s	Taip	0,01 mV
Signalų perdavimo koeficientas (1 k., 20 GHz)	30	0,1 GHz	20 GHz	1 GHz	7 min	38 min	Taip	– 0,03
Žemadažnių signalų iškraipymas (1 k.)	50	–	–	–	22 s	1 min 57 s	Ne	0,21 %
Kanalų tarpusavio izoliacija (1k., 20 GHz)	30	1 GHz	20 GHz	2 GHz	1 min 30 s	18 min	Taip	0,11 dB
Kvarcinio rezonatoriaus stabilumas	30	–	–	–	32 s	2 min 10 s	Taip	0,15 μs
Delta intervalų trukmė. RL ² režimas (100 kHz)	30	2 Hz	200 kHz	×10	55 s	5 min	Taip	0,005 μs
Delta intervalų trukmė. AEL ³ režimas (5 MHz)	30	5 kHz	5 MHz	×10	36 s	4 min	Taip	0,12 ns
Delta intervalų trukmė. NEL ⁴ režimas (500 MHz, įrašo trukmė> 2ns)	30	100 Hz	500 MHz	×10	54 s	5 min	Taip	– 0,003 ns
Delta intervalų trukmė. NEL režimas (14 GHz, įrašo trukmė < 2ns)	30	1 GHz	14 GHz	1 GHz	1 min 40 s	11 min	Taip	– 0,62 ps
INSG ⁵ Synchronizacijos dažnis (14 GHz)	30	1 GHz	15 GHz	1 GHz	1 min 50 s	12 min	Taip	0,11 GHz
INSG Signalų drebinimas (14 GHz)	30	1 GHz	14 GHz	1 GHz	2 min	11 min	Taip	0,012 ps
INSG įėjimo varža	50	–	–	–	25 s	43 s	Taip	0,06 Ω
Kitų sinchronizacijos grandinių parametrų matavimas	30	Numatyti nustatymai			2 min 21 s	10 min	Taip	–
Galutinė įrenginio testavimo trukmė					22 min	1 h 34 min		

Pastaba: 1 – 1 kanalas
 2 – realaus laiko režimas
 3 – atsitiktinio ekvivalentinio laiko režimas
 4 – nuoseklaus ekvivalentinio laiko režimas

5 – Išorinė netiesioginė sinchronizacijos grandinė

ATS matavimų pakartojamumas priklauso nuo matavimo rezultatų atsitiktinės paklaidos dydžio pastovumo. Pakartojamumo tyrimui vieno ir to paties stroboskopinio osciloskopo testavimas buvo kartojamas kiekvieną dieną vienos darbo savaitės laikotarpyje, kiekvieną kartą iš naujo prijungiant prietaisą prie ATS, šiek tiek keičiant kitų sistemos įrangos padėtį (tikrinant ar koaksialinių kabelių lenkimo kampo pokytis įtakoja sistemos matavimų pakartojamumą) ir griežtai stebint įrangos temperatūrinį darbo režimą, siekiant sumažinti dinaminės paklaidos įtaką. Iš našumo tyrimo gautų duomenų sudarius $\pm 2\sigma$ pasikliautiną intervalą, buvo atrinktos labiausiai nutolusios nuo vidurkio pakartojamumo tyrimui matuotos reikšmės ir patikrinta, ar šios reikšmės patenka į sudarytus intervalus (5.4 lentelė). Iš visų tikrintų matavimų į pasikliautiną intervalą nepateko žemadažnių signalų iškraipymo parametro matavimo rezultatas, kuris blogiausiu atveju nuo vidurkio nukrypo per 0,22 %, kai pasikliautinas intervalas yra $\pm 0,16$ %.

5.2. Priklausomybės tarp strobavimo įtaiso DACH ir DFCh tyrimas

ATS praleidžiamųjų dažnių juostos matavimai atliekami taikant kintančio dažnio pastovios amplitudės harmoninio virpesio matavimo metodą. Kaip jau buvo minėta, šis metodas leidžia pasiekti geriausią matavimų tikslumą, kadangi stroboskopiniame osciloskope imtys kaupiamos atsitiktiniu režimu, esant išjungtai sinchronizacijos grandinei. Taip sukaupiti matavimo duomenys nėra paveikti stroboskopinio osciloskopo laiko bazės įnešamų atsitiktinių ir netiesinių nuokrypių. Pagrindinis metodo trūkumas – matuojama tik dažninės charakteristikos amplitudė neturint informacijos apie fazę. Šiame poskyryje siekiama nustatyti tiesioginės priklausomybės tarp testuojamo osciloskopo dažninės amplitudės ir dažninės fazės (DFCh) charakteristikų buvimą. Tai leistų vienareikšmiškai atstatyti DFCh iš DACH matavimų, taikant kintančio dažnio harmoninio virpesio matavimo metodą.

Tiesinės elektrinės grandinės yra skirstomos į dvį klases: minimalios fazės ir neminimalios fazės [25]. Tarp minimalios fazės grandinių, DACH ir DFCh yra vienareikšmė priklausomybė, pagal kurią vienos charakteristikos kitimo formą pilnai nusako antrosios charakteristikos kitimą. Neminimalios fazės grandinės nepasižymi tiesiogine dažninių charakteristikų priklausomybe.

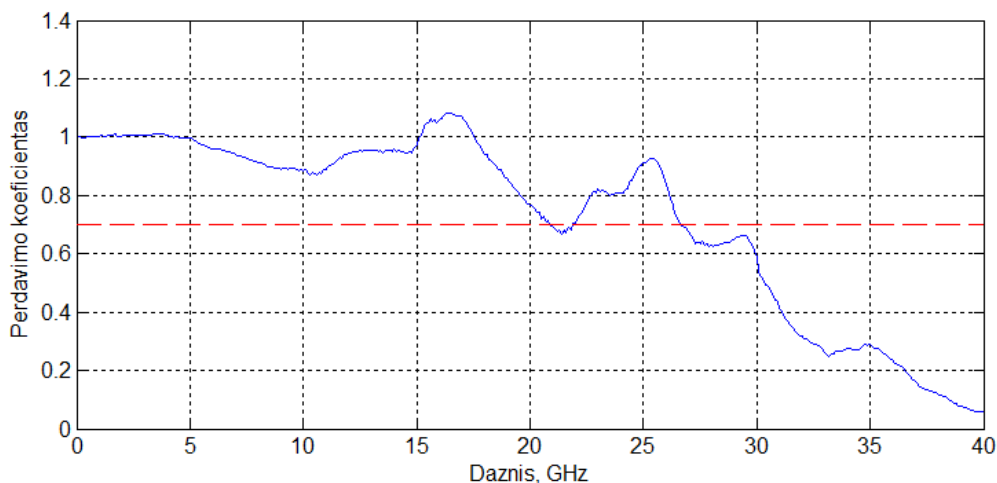
Minimalios fazės grandinių sąryšis tarp DACH ir DFCh yra išreikštas per Hilberto transformaciją [25]:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln[K(\lambda)]}{\lambda - \omega} d\lambda, \quad (5.3)$$

čia $\varphi(\omega)$ – dažninė fazės charakteristika; $K(\omega)$ – dažninė amplitudės charakteristika; ω – fiskuotas kampinis dažnis. Hilberto transformacija laiko srityje yra sąsūkos operacija tarp

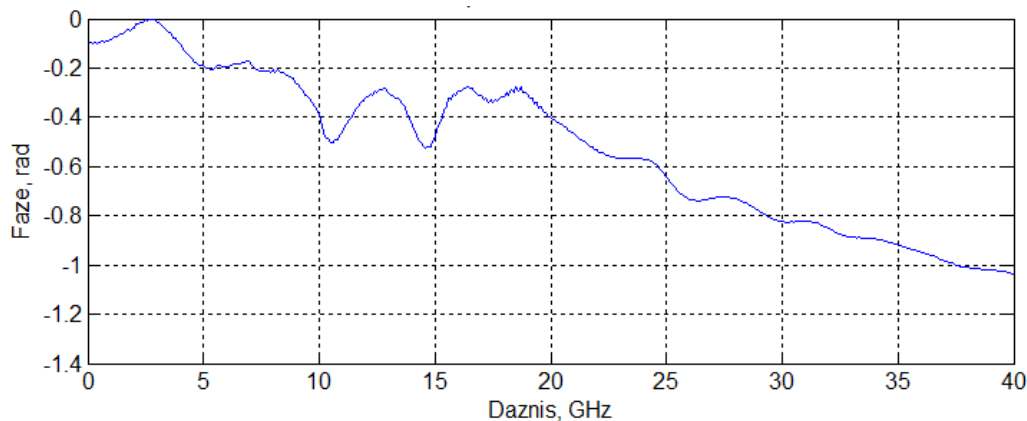
transformuojamo signalo ir $h(t)=1/(\pi \cdot t)$ funkcijos, kuri yra Hilberto filtro impulsinė charakteristika.

Darant prielaidą, kad testuojamo stroboskopinio osciloskopo strobavimo grandinė yra minimalios fazės grandis (fazės pokytis augant dažniui yra minimalus) iš ATS išmatuotos DACH, pritaikius jai diskretinę Hilberto transformaciją, gali būti atstatyta strobavimo grandies DFCh. Šiai tezei patikrinti tiriamam stroboskopiniam osciloskopui buvo išmatuota DACH 0,1 GHz žingsniu nuo 0,1 iki 40 GHz dažnio. Signalų atspindžiams sumažinimui perdavimo traktuose strobavimo grandinės įėjimas buvo tiesiogiai jungiamas prie generatoriaus, naudojant 40 GHz praleidžiamųjų dažnių juostos pločio koaksialinį kabelį ir 6 dB atiniuatorių daugiakartinių atspindžių, tarp grandinės apkrovos ir generatoriaus išėjimo, mažinimui. Tokiu būdu išmatuota DACH pateikta 5.2 pav.



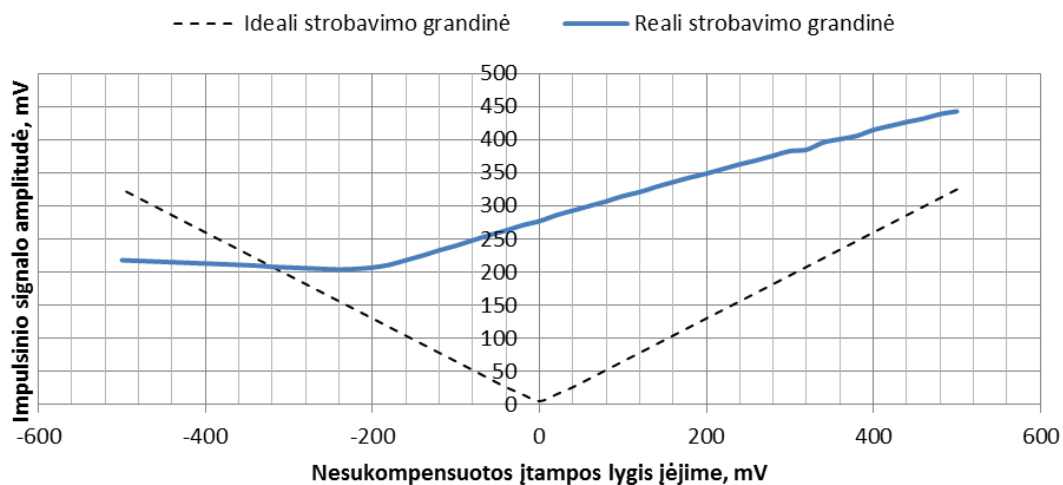
5.2 pav. Tiriamos strobavimo grandinės DACH matavimo rezultatai

Apkaičiuotam dažninės charakteristikos modulio logaritmui pritaikius Hilberto transformaciją yra gaunama dažninė fazės charakteristika, kuri yra pateikta 5.3 pav.



5.3 pav. Tiriamos strobavimo grandinės apskaičiuota DFCh taikant Hilberto transformaciją

Siekiant išmatuoti realiąją DFCh ir palyginti ją su apskaičiuota, yra naudojamas dviejų priešpriešai sujungtų strobavimo grandinių metodas. Strobavimo grandžių veikimo principas yra paaiškintas 1.1.5 poskyryje. Dėl strobavimo grandinės konstrukcijos ypatumų nesubalansuotoje būsenoje į grandinės įėjimą prasiskverbia strobavimo impulso dalis. Siauras strobavimo impulsas, prasklidęs per strobavimo grandinę, jos išėjime sugeneruoja tam tikrą impulsą, kuris pagal savo formą yra artimas grandinės impulsinei charakteristikai [9]. Priklausomai nuo veikiančios įėjime nesukompensuotos įtampos ženklo, atitinkamai gali būti mažiau užtvertas teigiamo arba neigiamo grandinės peties strobavimo diodas. Dėl to į grandinės įėjimą prasiskverbia atitinkamai teigiamas arba neigiamas strobavimo impulsas.

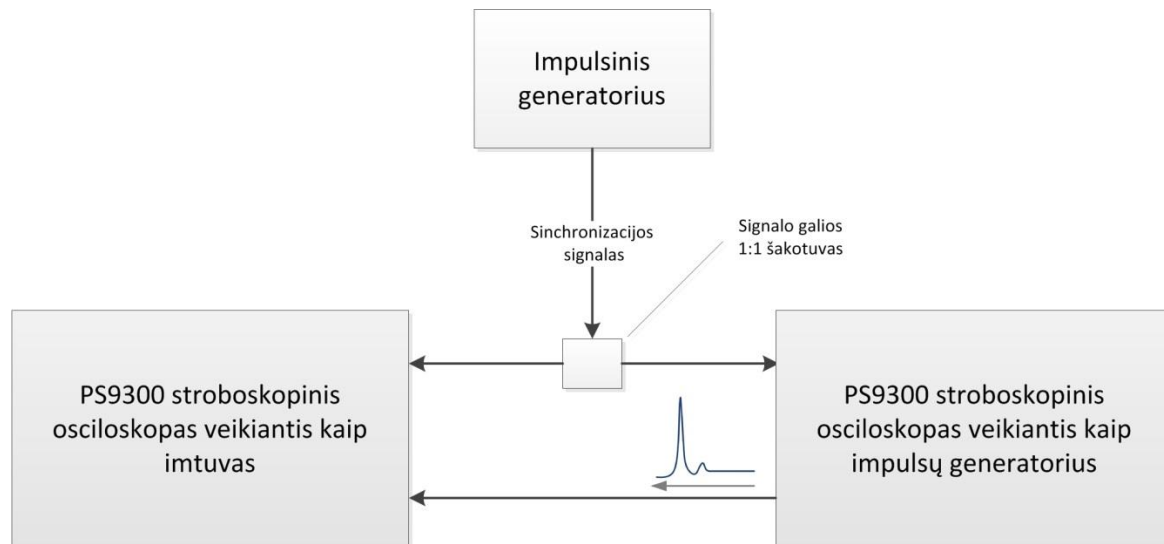


5.4 pav. Impulsinio signalo amplitudės priklausomybė nuo strobavimo grandinės įėjime veikiančios nesukompensuotos įtampos lygio

Tiriant praskverbų į grandinės įėjimą impulsinio signalo amplitudės priklausomybę nuo įėjime veikiančios nesukompensuotos įtampos lygio (5.4 pav.), buvo pastebėta, kad grandinės generuojami teigiamas ir neigiamas strobavimo impulsai nėra visiškai simetriški vienas kito atžvilgiu. Kaip pasekmės strobavimo grandinė įėjime nuolat generuoja labai iškraipytą impulsinį signalą, kuris šiuo atveju neneša jokios naudingos informacijos. Kadangi šis signalas beveik nepriklauso nuo nesukompensuotos veikiančios įtampos dydžio (jeigu grandinė dirba tiesiniame režime t. y. veikiančio įėjimo signalo amplitudė yra mažesnė už 300 mV), tai matuojant dvi, teigiamo ir neigiamo strobavimo impulsų sugeneruotas grandinės impulsines charakteristikas, galima apskaičiuoti šių charakteristikų skirtumą, tokių būdų eliminuojant parazitinio impulsinio signalo įtaką:

$$\hat{k}(t) = \frac{1}{2} \{ [k(t) + c(t)] * h(t) - [-k(t) + c(t)] * h(t) \}, \quad (5.4)$$

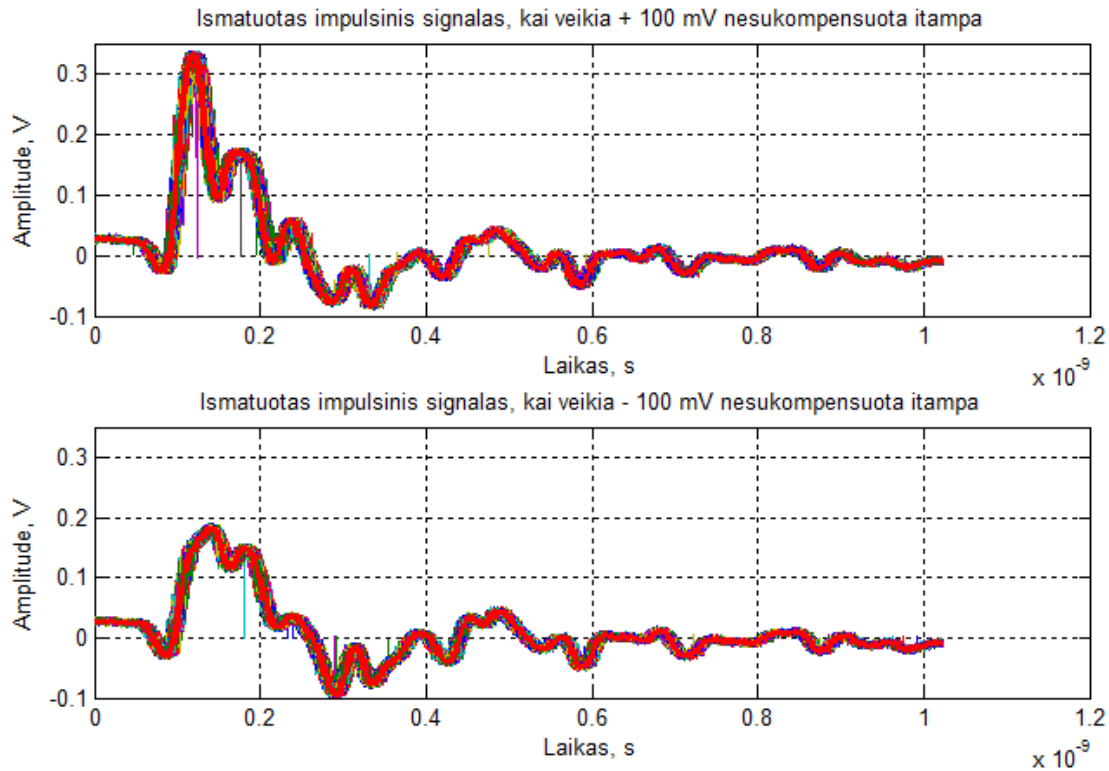
čia $k(t)$ – teigiamas arba neigiamas impulsinis signalas panašus į strobavimo grandinės impulsinę charakteristiką; $c(t)$ – atsirandantis parazitinis impulsinis signalas dėl grandinės asimetriškumo ir parazitinių talpų; $h(t)$ – antros strobavimo grandinės (imtuvo) impulsinė charakteristiką.



5.5 pav. Dviejų stroboskopinių osciloskopų ir impulsinio generatoriaus sujungimo schema osciloskopo impulsinei charakteristikai matuoti

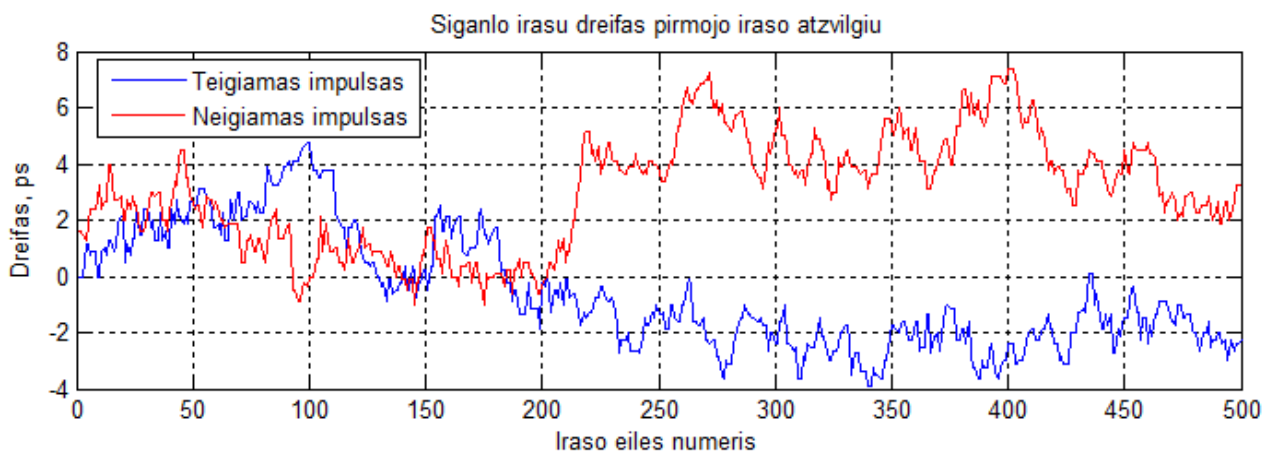
Stroboskopinio osciloskopo impulsinės charakteristikos matavimui yra panaudoti du vienodi stroboskopiniai osciloskopai ir impulsinis generatorius strobavimo grandinių sinchronizacijai (5.5 pav.). Generatorius turi mažą impulso fronto užaugimo trukmę (~ 15 ps), tačiau pasižymi 5 ps fronto drebjimu. Vienas, iš 5.5 pav. pavaizduotų osciloskopų, veikia įprastų režimu, kitas – kaip impulsinių signalų generatorius. Kadangi dviejų osciloskopų vienodų strobavimo grandinių parametrai yra beveik identiški, daroma prielaida, kad pirmojo osciloskopo išmatuotas impulsinis signalas yra dviejų strobavimo grandinių vienodų impulsinių charakteristikų sąsūkos operacijos rezultatas [9].

Teigiamas ir neigiamas osciloskopo impulsai generuojami grandinėje veikiant ± 100 mV nesukompensuotai įtampai. Toks įtampos dydis pasirinktas atsižvelgiant į 5.4 pav. išmatuotą charakteristiką (300 mV ribą), siekiant gauti geresnį signalo ir triukšmo santykį, bet kartu garantuoti ir mažą netiesinių iškraipymų lygį. Impulsinių signalų matavimo rezultatai pateikti 5.6 pav. Kiekvieno signalo matavimas buvo kartojamas 500 kartų, kaupiant 8000 imčių kiekviename 1 ns trukmės įrašė. Tokiu būdu pasiektas 8 THz ekvivalentinis strobavimo dažnis.



5.6 pav. Teigiamo ir neigiamo impulsinių signalų matavimo rezultatai veikiant strobavimo grandinės įėjime ± 100 mV didžio nesukompensuotai įtampai

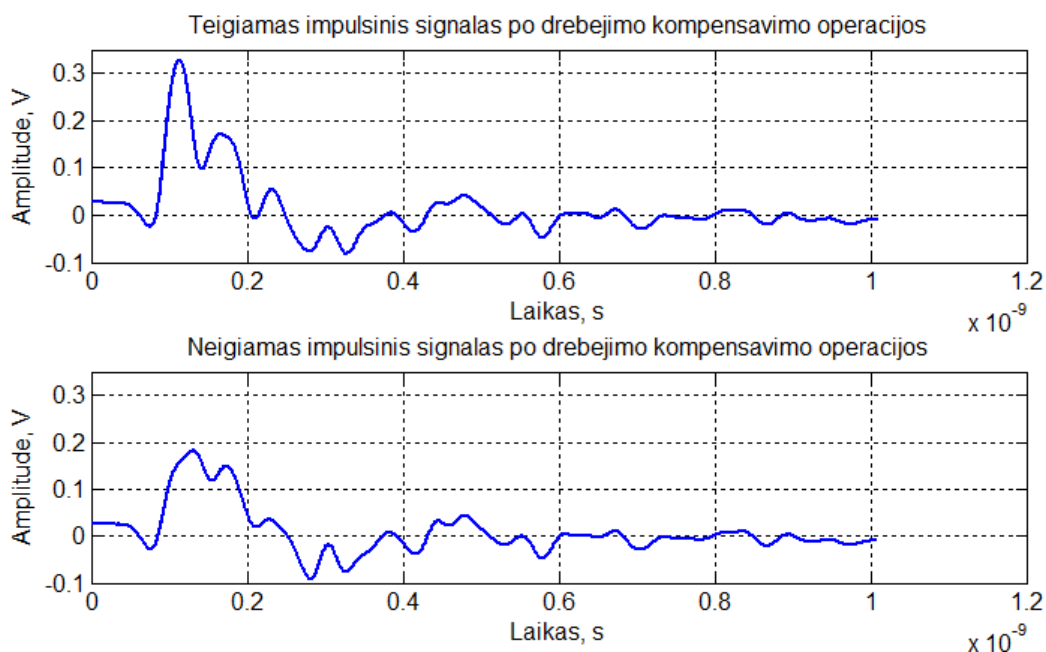
Be strobavimo grandinės generuojamų iškraipymų impulsinių signalų matavimo rezultatai taip pat yra paveikti strobavimo osciloskopo laiko bazės ir sinchronizacijos grandinės įnešamų atsitiktinių ir netiesioginių iškraipymų. Visos šios matavimo rezultatuose atsirandančios klaidos skirstomos į tris tipus: *a)* signalo imčių drebjimo, *b)* viso įrašo dreifo, *c)* laiko bazės netiesinių iškraipymų klaidos. Kiekvienai klaidai šalinti naudojamas tam tikras korekcijos metodas.



5.7 pav. Teigiamo ir neigiamo impulsinių signalų įrašų dreifo pirmojo įrašo atžvilgiu kompensavimo operacijos rezultatai

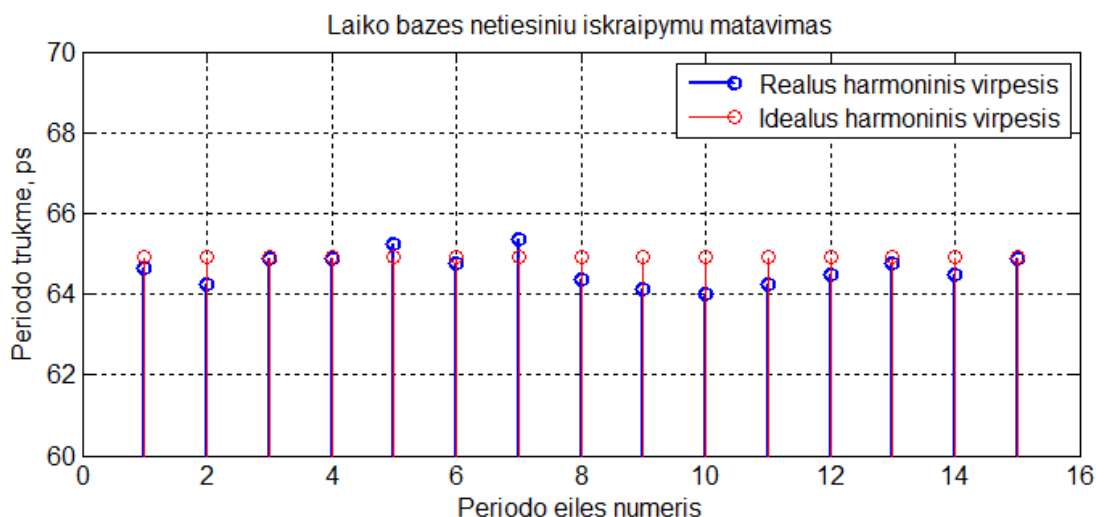
Dreifo matavimo duomenims įtakos kompensavimo procedūra atliekama pati pirmoji, prieš vidurkinant matavimo rezultatus. Vienas iš pagrindinių dreifo šaltinių yra temperatūrinis sinchronizacijos grandinės darbo nestabilumas. Stebimas signalo įrašo dreifas pagal savo pobūdį gali būti suskirstytas į du tipus: *a)* tolygus, lėtai kintantis laike, santykinai didelės amplitudės, priklausantis nuo prietaiso vidinės temperatūros ir *b)* chaotiškas, mažos amplitudės, sparčiai kintantis dreifas.

Dreifo kompensavimo algoritmas, paremtas signalo įrašų kryžminės koreliacijos skaičiavimo procedūra. Stumiant kiekvieną sekantį signalo įrašą nuo -60 iki 60 imčių intervale pirmojo įrašo atžvilgiu ir kaskart tarp jų skaičiuojant koreliacijos koeficientą, yra randamas dreifo įvertis kiekvienam signalo įrašui (5.7 pav.). Pagal gautus įverčius, pakoregavus kiekvieno signalo įrašo padėtį laiko ašies atžvilgiu, yra sukompensuojama dreifo proceso įnešta klaida.



5.8 pav. Teigiamo ir neigiamo impulsinių signalų įrašai po dreifo ir drebejimo kompensavimo operacijų

Pagrindiniai išmatuotų impulsinių signalų imčių drebejimų šaltiniai yra dviejų osciloskopų sinchronizacijos grandys, kurios kiekviena įneša 2 ps drebejimą. Dvėjus osciloskopus sinchronizuojantis impulsas, kurio fronto drebejimo pagal laiko ašį amplitudės vidutinė kvadratinė vertė siekia 5 ps, osciloskopus veikia vienodai ir mažai įtakoja matavimo rezultatus, kadangi impulso drebejimai amplitudės atžvilgiu yra minimalūs. Geometriškai susumavus triukšmo šaltinių vertes gaunama 2,8 ps triukšmo, laiko ašies atžvilgiu, vidutinė kvadratinė vertė (t. y. standartinis nuokrypis nuo vidurkio). Išmatuoti imčių drebejimai y ašies atžvilgiu siekia apytiksliai 1,8 mV. Kadangi šių triukšmų pasiskirstymas yra artimas normaliajam skirstiniui, kaupiant pakankamai didelį signalo įrašų kiekį atsitiktinio triukšmo standartinis nuokrypis sumažinamas $\sqrt{N}$ kartų (čia N – sukauptų įrašų skaičius kiekvienam impulsui), šiuo atveju $\sim 22,4$ kartus (5.8 pav.).



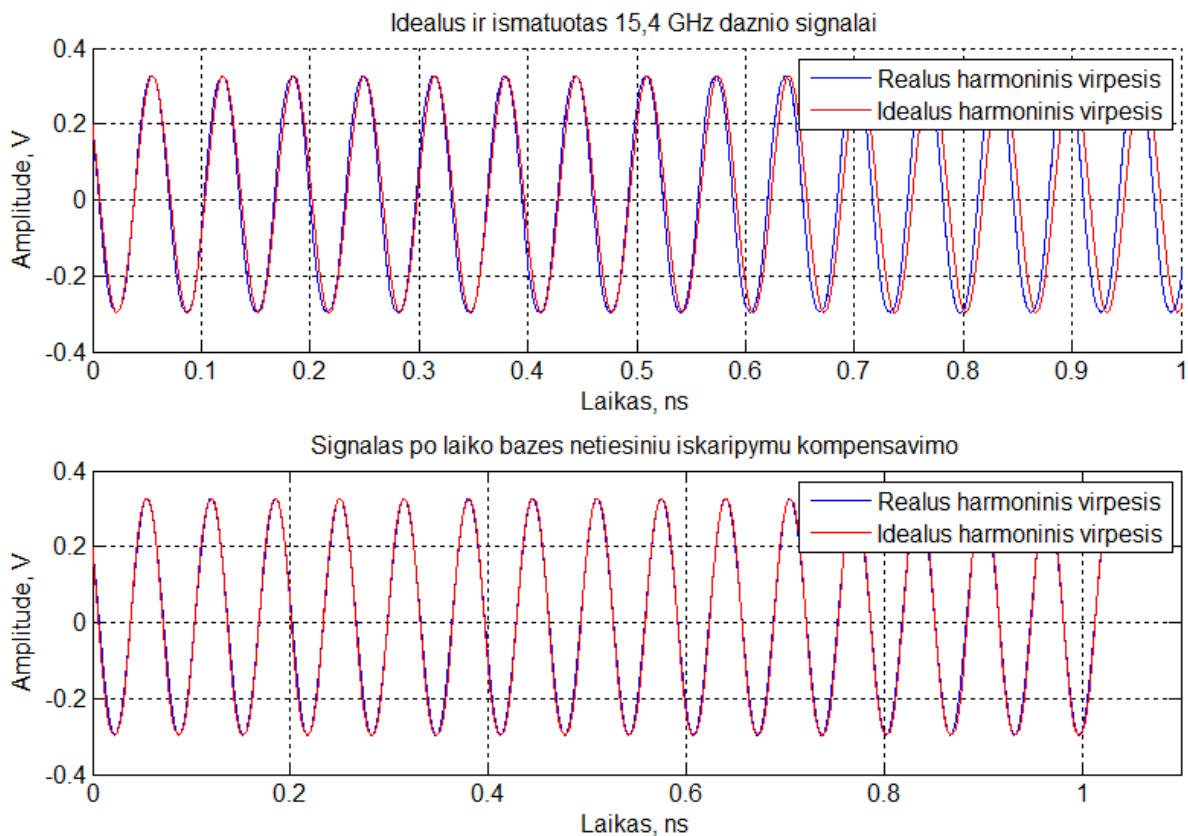
5.9 pav. Stroboskopinio osciloskopo laiko bazės netiesinių iškraipymų matavimo rezultatai

Stroboskopinio osciloskopo laiko bazės netiesiniai iškraipymai yra nuokrypiai nuo idealių generuojamų vėlinimo trukmių – delta intervalų. Netiesinių iškraipymų įvertinimui naudojamas stabilios fazės harmoninis virpesys su gerai nuslopintomis, iki -75 dBc šalutinėmis harmonikomis. Analizės metodas yra paremtas tuo, kad reikalingas įrašo lango plotis 1 ns užpildomas kuo didesnių harmoninio virpesio periodų skaičiumi ir paliginamas su idealu tokio pat dažnio ir imčių skaičiumi, signalu. Paėiliui analizuojant kiekvienos išmatuotos imties padėtį idealaus harmoninio virpesio atžvilgiu galima nustatyti kiekvieno delta intervalo nuokrypį. Tačiau be laiko bazės netiesinių nuokrypių išmatuotame signale atsiranda ir strobavimo grandinėje įnešti netiesiniai amplitudiniai iškraipymai, dėl ko tiksliai nustatyti delta intervalo nuokrypius yra neįmanoma. Norint atsikratyti šių iškraipymų įtakos analizuojamos išmatuotos signalo imtys esančios tik signalo su x ašimi susikirtimo vietose. Kadangi šiuo atveju imčių įtampos vertės yra artimos nuliui – amplitudiniai iškraipymai minimalūs. Pagal išrinktus taškus nustatius tikslų imčių kiekį, esantį kiekviename harmoninio virpesio periode, ir žinant idealaus delta intervalo trukmę (125 fs), apskaičiuojami visi harmoninio virpesio iškraipytų periodų ilgiai (5.9 pav.). Šiuo atveju maksimalus signalo periodų skaičius apribotas išorinės netiesioginės sinchronizacijos grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos pločio, kuris siekia $15,4$ GHz.

Kiekvienam virpesio periodui apskaičiuojama alternatyvi delta intervalo trukmė, kuriai esant analizuojamame intervale idealaus ir realaus signalo periodų ilgiai būtų vienodi, pagal formulę:

$$dt_p(n) = dt_i + \frac{T_i - T_p(n)}{N_p(n)}, \quad (5.5)$$

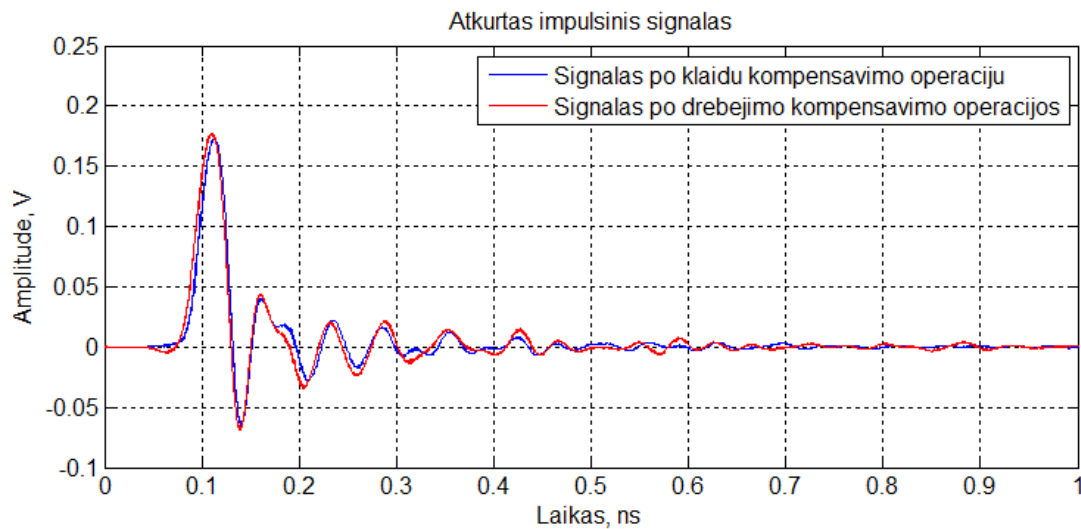
čia n – analizuojamo periodo eilės numeris; dt_i – idealus delta intervalo trukmė; T_i – idealus harmoninio virpesio periodo trukmė; $T_p(n)$ – analizuojamo n periodo trukmė; $N_p(n)$ – imčių skaičius analizuojamame periode.



5.10 pav. Idealaus ir išmatuoto harmoninių virpesių paliginimas prieš ir po laiko bazės netiesinių iškreipimų kompensavimo procedūros

Kai yra žinoma kiekvieno periodo alternatyvi delta trukmė dt_p to periodo ribose, taikant pirmos eilės daugianarį, atliekama tiesinė interpoliacija žingsnių $2dt_i - dt_p$. Tokiu būdu gaunami vienodo ilgio $L \approx F_s / F_{\text{sig}}$ duomenų masyvai, čia F_s – diskretizacijos dažnis (8 THz); F_{sig} – harmoninio virpesio dažnis (15,4 GHz). Sujungus visus masyvus ir pradžios ir pabaigos imčių sekomis, kurios nepatenka į pilną signalo periodo intervalą, yra atstatomas sukompensuotas išmatuotas signalas (5.10 pav.).

Atlikus visas tris išmatuotiems teigiamam ir neigiamam impulsiniams signalams, stroboskopinio osciloskopo laiko bazės, iškreipimų kompensavimo operacijas ir pritaikius (5.4) formulę yra atkuriamas 5.11 pav. pateiktas impulsinis signalas, kuris yra dviejų tiriamų osciloskopų strobavimo gaudinių impulsinių charakteristikų sąsūkos operacijos rezultatas.

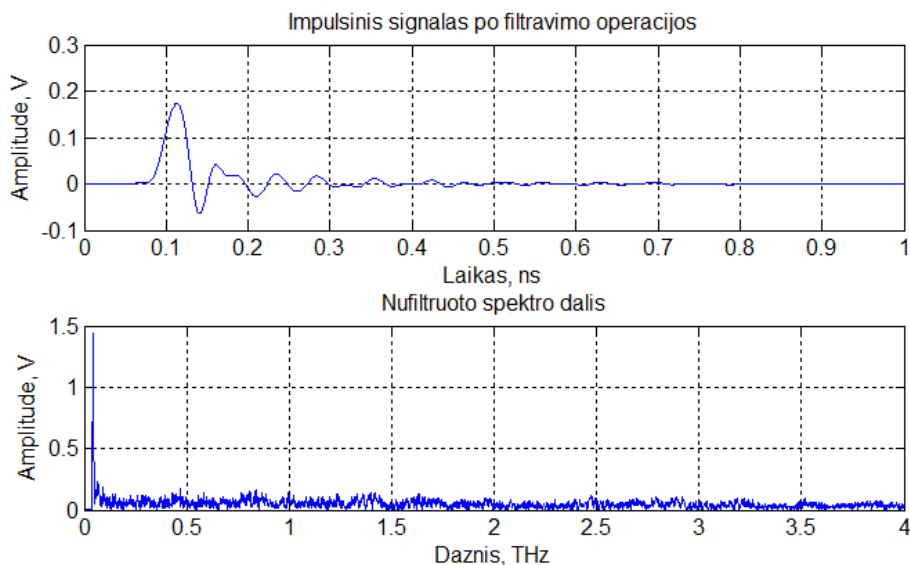


5.11 pav. Atkurtų impulsinių signalų grafikas, kai vienam yra pritaikytos visos laiko bazės klaidų kompensavimo operacijos, o antram – tik drebjimo kompensavimo

Paveiksle 5.11, kad apskaičiuojant iš teigiamo ir neigiamo impulsų skirtuminį signalą, galutiniame rezultate yra sustiprinamos aukštadažnio triukšmo dedamųjų amplitudžių vertės. Jų mažinimui signalo dažnių srityje yra pritaikoma slenksčio funkcija:

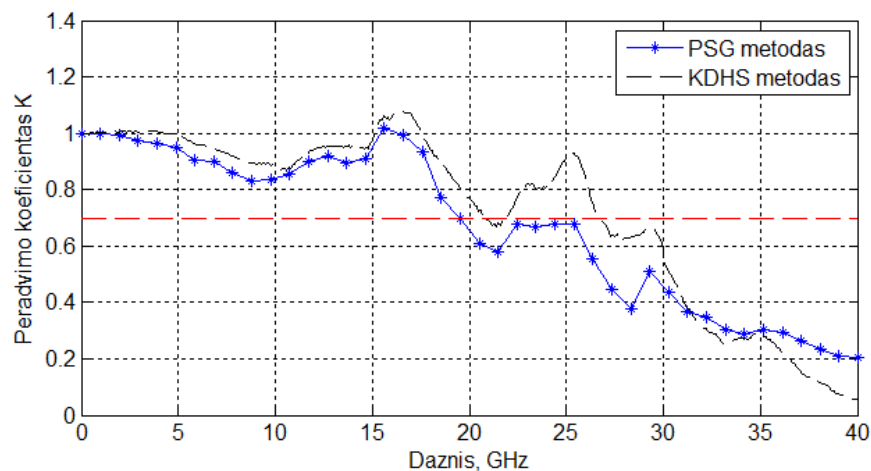
$$K(\omega) = \begin{cases} K(\omega), & \text{kai } |K(\omega) - \bar{K}| > \text{std}(K) \cdot d \\ 0, & \text{kai } |K(\omega) - \bar{K}| < \text{std}(K) \cdot d \end{cases}, \quad (5.6)$$

čia $\bar{K}$ – visų signalo spektro komponentų amplitudžių vidurkis; $\text{std}(K)$ – visų signalo spektro komponentų amplitudžių standartinio nuokrypio dydis; d – filtravimo koeficientas. Signalų filtravimo rezultatas (kai $d = 0,6$) yra pateiktas 5.12 pav.

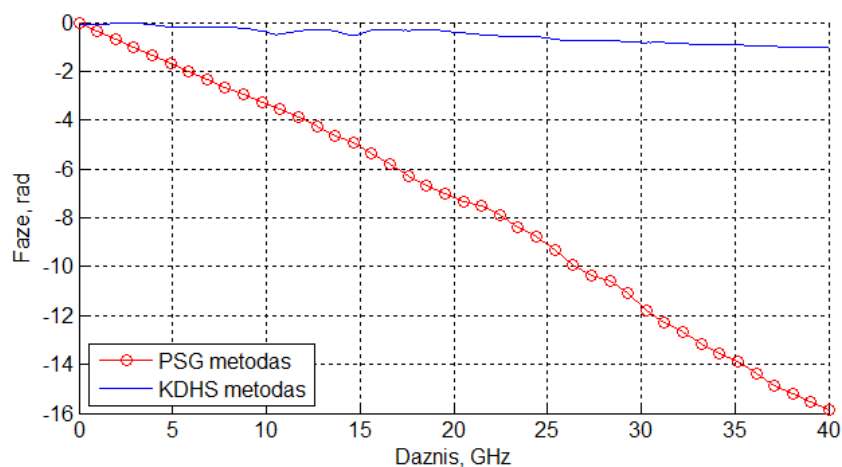


5.12 pav. Impulsinio signalo filtravimo procedūros rezultato ir nufiltruoto triukšmo spektro grafikai

Dažnių srityje, norint gauti strobavimo grandinės „tikrosios“ impulsinės charakteristikos kompleksinį spektrą, yra atliekama signalo savidekonvoliucijos operacija. Remiantis savybe, kad dviejų signalų vieno iš kito dekonvoliucijos operaciją laiko srityje atitinka tų signalų dalybos operacija dažnių srityje, iš 5.12 pav. pateikto impulsinio signalo spektro ištraukus šaknį yra gaunamas stroboskopinio osciloskopo impulsinės charakteristikos spektras.



5.13 pav. DACH išmatuotų, taikant priešpriešiais sujungtų grandinių ir kintančio harmoninio virpesio dažnio metodus, grafikai



5.14 pav. DFCh, išmatuota taikant priešpriešiais sujungtų grandinių metodą ir apskaičiuota taikant Hilberto transformaciją, grafikai

Pagal kompleksinį spektrą apskaičiuotos DACH ir DFCh yra pateiktos 5.13 ir 5.14 pav. atitinkamai. Iš DACH matavimo rezultatų (5.13 pav.) matyti kad, priešpriešiais sujungtų grandinių matavimo metodų išmatuota DACH, dominančiame 0–20 GHz intervale, pakankamai tiksliai atkartoja tikslios, išmatuotos kintančio dažnio harmoninio virpesio metodu DACH formą, nors ir egzistuoja sisteminė matavimo klaida, kurios maksimali santykinė vertė 20 GHz taške siekia 14 %. Dažnių amplitudės charakteristikų panašumas leidžia padaryti išvadą, kad DFCh matavimo rezultatai irgi yra pakankamai tikslūs. Šiuo atveju charakteristika atitinka vėlinimo ($\sim 0,05$ ns)

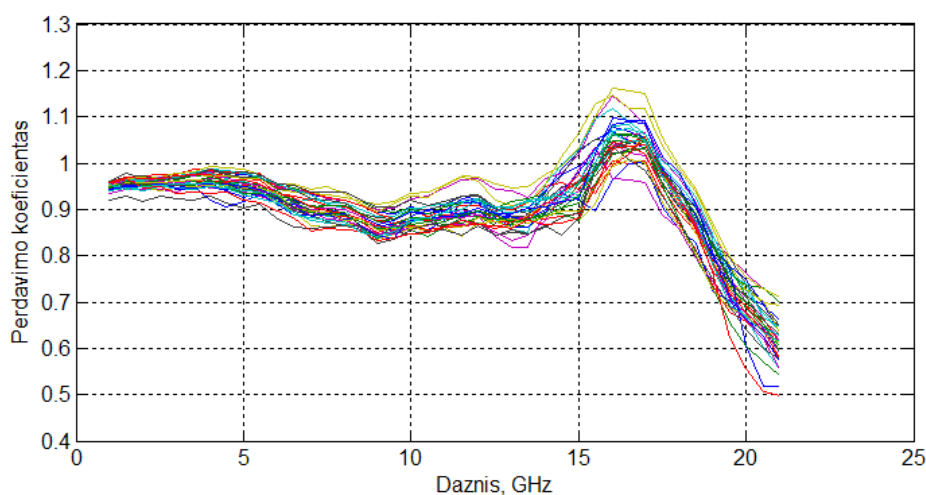
linijos charakteristiką su nedideliais faziniais iškraipymais ir skiriasi nuo DFCh, gautos taikant Hilberto transformaciją. Iš ko seka, kad stroboskopinio osciloskopo strobavimo grandinė nėra minimalios fazės grandinė ir tiesioginis ryšys tarp DACH ir DFCh neegzistuoja. ATS vienareikšmiškai negali nustatyti matuojamos strobavimo grandinės dažninės fazės charakteristikos kitimo formos iš dažninės amplitudės charakteristikos matavimo rezultatų.

5.3. Strobavimo įtaiso praleidžiamųjų dažnių juostos pločio prognozavimas taikant dirbtinių neuronų tinklus

Šiame poskyryje pateikta dirbtinių neuronų tinklų (DNT) teorija grįsta SĮ praleidžiamųjų dažnių juostos nustatymo metodika. Metodikos tikslas – sutrumpinti SĮ parametrų testavimo procesą, kuris įprastu atveju atliekamas trim etapais: *a)* pradinis, *b)* tarpinis ir *c)* galutinis testavimai. Žinoma, kad DNT teorija leidžia supaprastinti sudėtingų realių netiesinių sistemų priartinto sprendimo radimą. Pagal siūlomą metodiką, remiantis pradinio SĮ testavimo etapo surinktais duomenimis žemadažnių signalų srityje, prognozuojami antro testavimo etapo – praleidžiamųjų dažnių juostos nustatymo, rezultatai. Toks žingsnis leistu testavimo procesą sutrumpinti iki dviejų etapų taip mažinant SĮ gamybos kaštus.

5.3.1. Dirbtinių neuronų tinklo taikymas

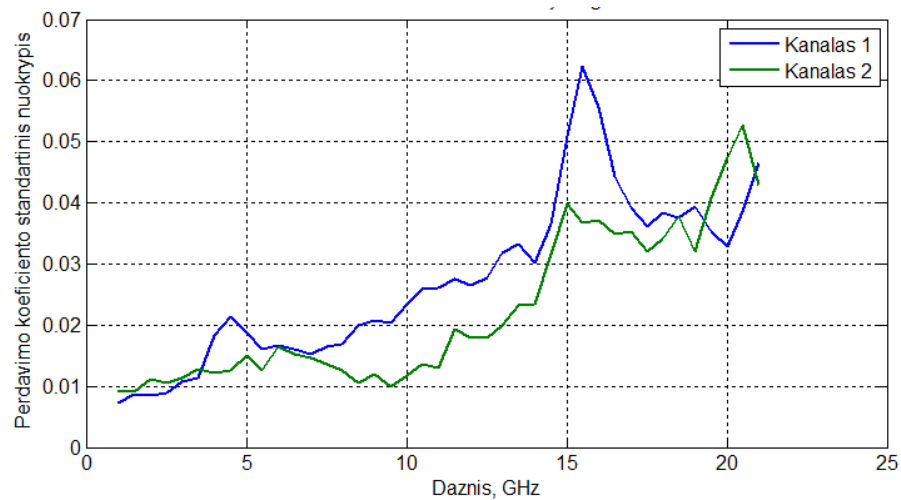
Siekiant sukaupti duomenis, reikalingus DNT apmokymui ir testavimui, buvo naudojama ATS automatizuotame režime matuojanti strobavimo įtaiso praleidžiamųjų dažnių juostos plotį ir jautrumą. ATS pagalba buvo ištestuoti ir surinkti duomenys apie šešiolika SĮ. Visų išmatuotų ir sunormuotų šešiolikos SĮ DACH yra pateiktos 5.15 pav.



5.15 pav. Šešiolikos strobavimo įtaisų praleidžiamųjų dažnių juostos matavimo rezultatai

Iš 5.15 pav. matyti, kad beveik visos išmatuotos charakteristikos atitinka tam tikrą bendrą kitimo tendenciją. Išmatuotos DACH pradžioje matavimo rezultatų išsibarstymas yra mažas ir palaipsniui didėja, didėjant testavimo harmoninio virpesio dažniui. Matavimų rezultatų išsibarstymo

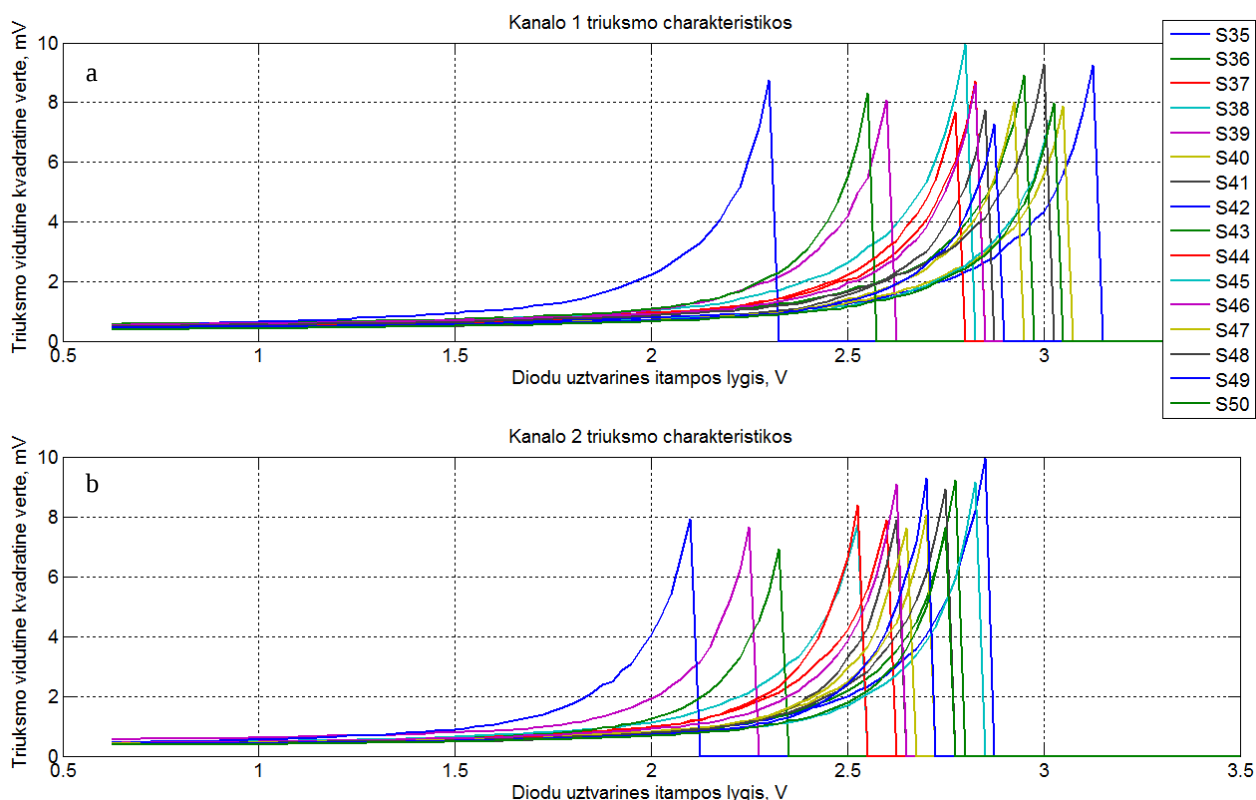
nuo signalo dažnio priklausomybė yra pateikta 5.16 pav. Iš perdavimo koeficientų matavimų rezultatų išsibarstymo grafiko matyti, kad labiausiai jie išsibarsto aukščiausiam dažnyje.



5.16 pav. Matavimo rezultatų standartinio nuokrypio nuo signalo dažnio priklausomybė

1.1.5 poskyryje buvo parodyta, kad strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis priklauso nuo diodų užtvarinės įtampos dydžio ir grandinės triukšmo charakteristikos, tuo tarpu pastarąją įtakoja labai didelis veiksnių skaičius: diodų ir kondensatorių parametrų sklaida, strobavimo įtaiso konstrukcijos surinkimo netikslumai, strobavimo impulso neideali forma ir t. t. Taigi visų veiksnių, kurie įtakoja įtaiso praleidžiamųjų dažnių juostą, yra pakankamai daug ir sukurti tikslų netiesinės sistemos matematinį modelį yra pakankamai sudėtinga. Tokių sudėtingų chaotinių sistemų identifikavimas, netiesinių sistemų modeliavimas ir pan. yra įmanomas taikant dirbtinių neuronų tinklus. DNT teorija siūlo pakankamai patogią sudėtingų netiesinių dinaminių sistemų sintezės bei analizės aplinką, kuri leidžia pažvelgti į ypač sudėtingą realios problemos (sistemos) sprendinį.

Kadangi tikslas yra prognozuoti SĮ praleidžiamųjų dažnių juostos plotį remiantis tik tais matavimo duomenimis, kurie buvo sukaupiti atliekant pirminį SĮ testavimą įtaiso konstrukcijos surinkimo etape, tai nebuvo atliekami jokie papildomi matavimai prognozavimo rezultatų tikslumui gerinti. Iš pirminių matavimo duomenų buvo prieinamos triukšmo charakteristikos, kurios pateiktos 5.17 pav. ir sukalibruoto (nustatyto tam tikram pastoviam užtvarinės įtampos lygiui) SĮ įėjimuose veikiančių triukšmo vidutinės kvadratinės vertės.



5.17 pav. Triukšmo S1 pirmo (a) ir antro (b) kanalų įėjimuose priklausomybė nuo diodų užtvarinės įtampos lygio

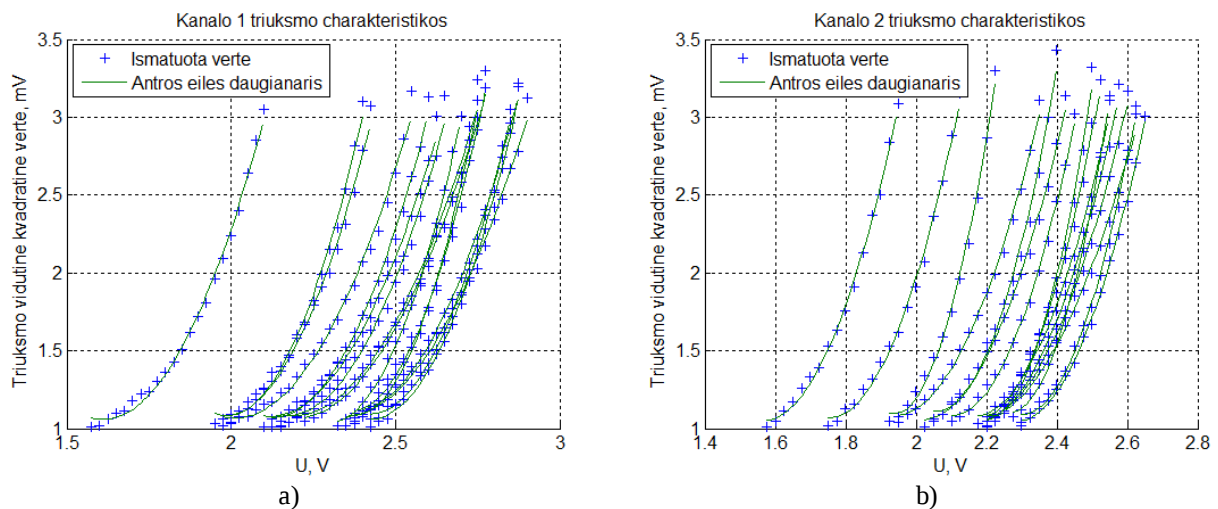
Triukšmo vidutinė kvadratinė vertė buvo matuojama kaupiant matavimus tam tikrą laiko tarpą. Išmatuotas S1 įėjimo jautrumo lygis, atsižvelgiant į to S1 triukšmo charakteristiką, netiesiogiai parodo suderinto S1 diodų užtvarinės įtampos vertę, kuri generuoja osciloskopo skaičius/analogas keitikliai. Šie matavimai būtų nereikalingi jeigu visi testuojami S1, prieš praleidžiamųjų dažnių juosto pločio matavimus, būtų suderinti vienodam triukšmo lygiui.

Kadangi pagal strobavimo įtaiso specifikaciją įtaiso triukšmo lygis neturi viršyti 2 mV vidutinės kvadratinės vertės lygio jo įėjime, derinimo metu diodų užtvarinės įtampos lygis yra parenkamas taip, kad strobavimo įtaiso jautrumas būtų intervale nuo 1,5 iki 1,9 mV priklausomai nuo praleidžiamųjų dažnių juostos pločio vertės pasirinktame užtvarinės įtampos taške.

Siekiant apibūdinti S1 triukšmo priklausomybės nuo užtvarinės įtampos kreivę tam tikrais požymiais, yra analizuojama darbinė šios kreivės dalis nuo 1 iki 3 mV. Šių kreivių atkarpų aproksimavimui yra pritaikytas antros eilės polinomas:

$$P(x) = ax^2 + bx + c. \quad (5.7)$$

Aproksimavus kreivę gaunamas trijų požymių rinkinys, kuris nusako triukšmo charakteristikos nagrinėjamos atkarpos kitimo pobūdį. 5.18 pav. grafikuose pateikti S1 pirmojo ir antrojo kanalų triukšmo charakteristikų išmatuoti taškai ir juos aproksimuojančios antros eilės polinomų kreivės.

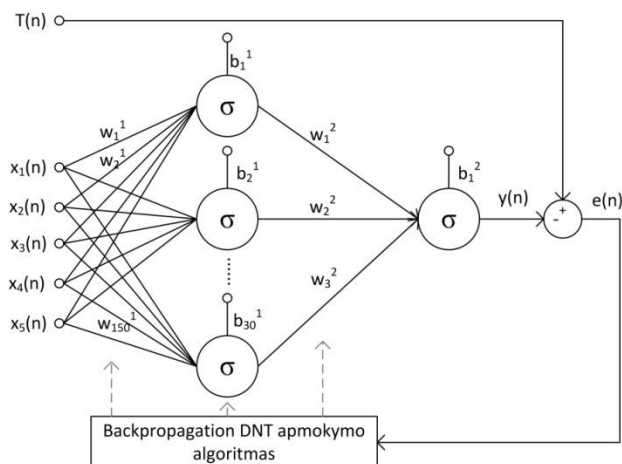


5.18 pav. Aproximuotos triukšmo charakteristikos, gautos taikant antros eilės polinomą, pirmojo (a) ir antrojo (b) kanalų

Taipogi išmatuotose triukšmo charakteristikose yra pateikta informacija ir apie strobavimo impulso amplitudę, kuri, kaip jau buvo išnagrinėta anksčiau, taip pat turi įtaką praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui. Triukšmo charakteristikose, strobavimo impulso amplitudė atitinka triukšmo kreivės nukirtimo tašką pagal x ašį (užtvarinės diodų įtampos dydį). Kylant užtvarinės įtampos lygiui yra pasiekiamas toks taškas, kai strobavimo impulso amplitudės nepakanka diodų nustatymui į mažos varžos būseną ir, kaip pasekmė, tampa neįmanoma SI įėjimo elektros krūvį pernešti į kaupimo kondensatorių. Tokio taško užtvarinės įtampos vertė atitinka strobavimo impulso vertę. Tokiu būdu iš pradinio testavimo etapo sukaupytų matavimo duomenų kiekvienas SI yra apibudinamas penkių požymių rinkiniu.

Dirbtinių neuronų tinklo, kuris buvo taikomas praleidžiamųjų dažnių juostos pločio prognozuoti, struktūra yra pateikta 5.19 pav. Tinklas turi penkis įėjimus, vieną paslėptąjį sluoksnį ir išėjimo sluoksnį su vienu išėjimu. Paslėptąjį sluoksnį sudaro 30 neuronų su sigmoidine aktyvavimo funkcija, tuo tarpu išėjimo neurono aktyvavimo funkcija yra tiesinė [29]. Bandant įvairias tinklo kombinacijas prieita išvados, kad tolesnis neuronų skaičiaus, paslėptajame sluoksnyje, didinimas neįtakuoja prognozavimo rezultatų tikslumo. DNT apmokymui yra taikomas *backpropagation* mokymo algoritmas [29]. Tai yra atgalinio klaidos sklaidimo metodas, kuris paremtas tuo, kad klaidos signalas sklinda nuo tinklo išėjimo link jo įėjimo. Šio metodo taikymas yra įmanomas tik tuo atveju, kai neuronų aktyvavimo funkcija yra diferencijuojama.

Tinklo apmokymo duomenys šiuo atveju yra SI praleidžiamųjų dažnių juostos pločio taškai išmatuoti 20 GHz dažnyje. Apmokymui parinkti pirmųjų aštuonių strobavimo įtaisų praleidžiamųjų dažnių juostos pločio matavimo rezultatai, likusieji naudojami prognozavimo klaidos įverčiui gauti.



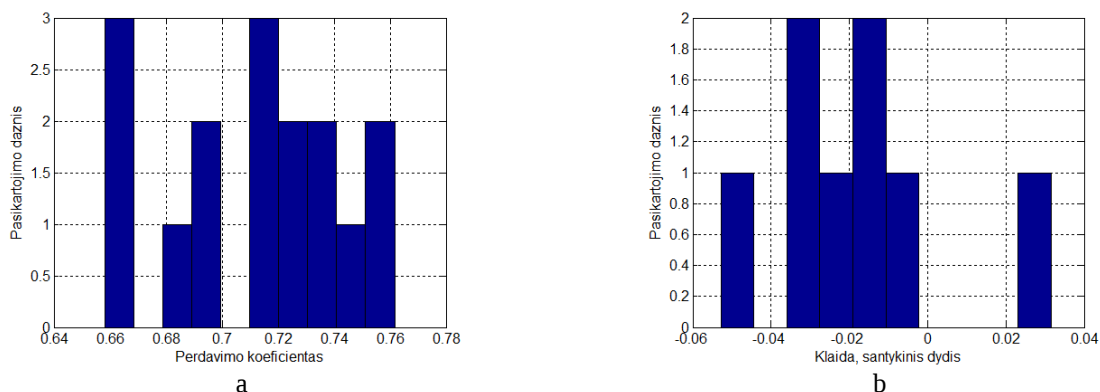
5.19 pav. Dirbtinių neuronų tinklo struktūrinė schema

Kadangi DNT struktūra yra pakankamai sudėtinga, o duomenų kiekis tinklo apmokymui yra per mažas, tinklo apmokymo sėkmingumą lemia pradinė sistemos padėtis klaidos paviršiuje. Tinklo klaidos paviršius yra išraižyta įdubomis ir pakilimais, kurioje pataikyti į globalų klaidos minimumą yra ganėtinai sudėtinga. Kartojant tinklo apmokymą buvo pasiekti geriausi rezultatai (t. y. iš visų bandymų surastas geriausias lokalus klaidos minimumas), kurie pateikti 5.21–5.24 pav.

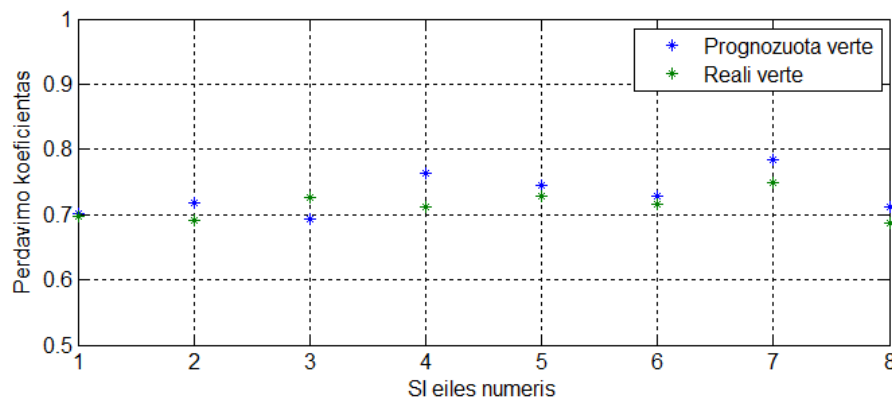
Paveiksle 5.20 pateiktos dvi histogramos. Histograma 5.21 pav. a vaizduoja SĮ pirmojo kanalo perdavimo koeficiento verčių, išmatuotų 20 GHz dažnio taške, pasiskirstymą. Matavimo rezultatų išsibarstymo nuo vidurkio įvertinimui buvo skaičiuojamas standartinis nuokrypis s :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (5.8)$$

čia x_i – i -tos imties elementas, n – imčių skaičius, $\bar{x}$ – imčių aritmetinis vidurkis. Pagal (5.8) apskaičiuotas standartinis nuokrypis pirmajai histogramai yra lygus 0,033. Histogramoje 5.21 pav. b yra vaizduojamas DNT prognozavimo klaidos pasiskirstymas. Šios histogramos duomenų standartinis nuokrypis lygus 0,029. Iš gautų rezultatų matyti, kad išmatuotų duomenų sklaida yra, nežymiai (0,004), bet didesne už prognozavimo klaidos rezultatų sklaidą.

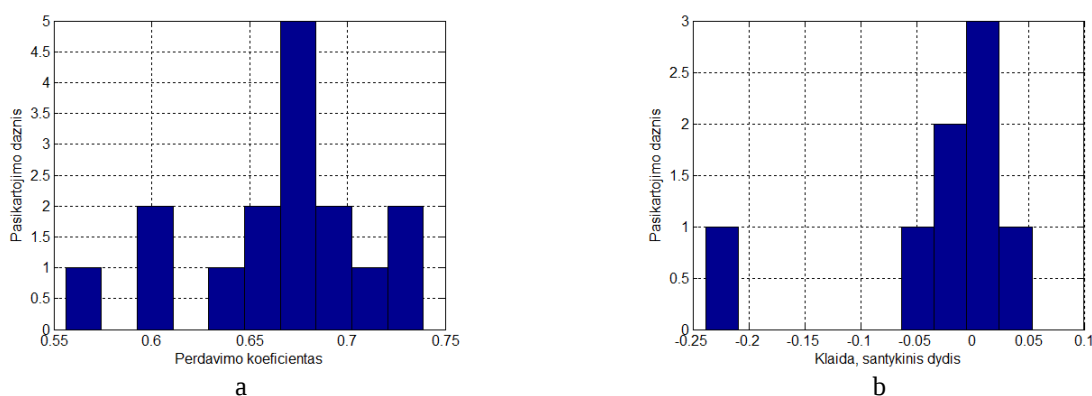


5.20 pav. Pirmojo kanalo perdavimo koeficiento (a) ir prognozavimo klaidos (b) histogramos taške 20 GHz

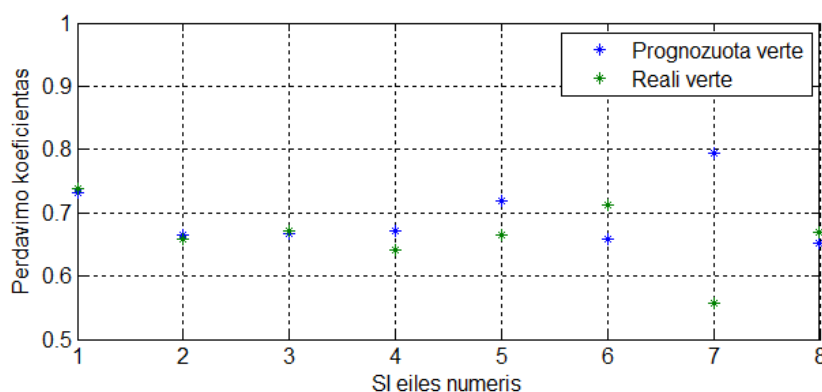


5.21 pav. Pirmojo kanalo perdavimo koeficiento prognozavimo rezultatai

Paveiksle 5.21 yra pateikti visų aštuonių strobavimo įtaisų, pirmojo kanalo perdavimo koeficiento matavimo rezultatai taške 20 GHz ir neuronų tinklo atitinkamos prognozuojamos vertės. Matoma, kad blogiausias prognozavimo atvejis iššaukia 5 % klaidą (4-as SI), geriausias – mažesnę už 0,5% (1-as SI).



5.22 pav. Perdavimo koeficiento (a) ir prognozavimo klaidos (b) histogramos taške 20 GHz, antrojo kanalo



5.23 pav. Antrojo kanalo perdavimo koeficiento prognozavimo rezultatai

Apskaičiavus SI antrojo kanalo matavimo duomenų standartinę nuokrypį gauta 0,054, o prognozavimo klaidos nuokrypis lygus 0,03. Iš 5.22, b pav. klaidos pasiskirstymo histogramos ir prognozavimo ir matavimo 5.23 pav. grafiko matyti, kad septinto strobavimo įtaiso prognozavimo klaida siekia net 25 %. Kadangi šio SI perdavimo koeficiento matavimo vertė yra ganėtinai nutolusi

nuo visų verčių aritmetinio vidurkio ir nepaklusta bendrajai tendencijai, tai šis rezultatas yra atmetamas.

5.3.2. Rezultatų apibendrinimas

Šiame poskyryje taikant dirbtinių neuronų tinklo teoriją buvo siekiama aptykti priklausomybę tarp strobavimo įtaiso triukšmo juo įėjime ir užtvarinės įtampos strobavimo grandinės dioduose lygio priklausomybės kreivių ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločio. Tokia priklausomybė leistų SĮ pradinio testavimo etape prognozuoti jo praleidžiamųjų dažnių juostos plotį, kai SĮ parametrų charakterizavimui nenaudojami aukštadažniai signalai. Priklausomybės įvertinimui buvo naudojamas DNT, kurio apmokymas buvo vykdomas taikant atgalinį klaidos sklidimo metodą. Kadangi sistema yra paveikta visos aibės pašalinių veiksnių, kurių visų įtakos neįmanoma tinkamai įvertinti, atsiranda tam tikra paklaida.

Iš gautų rezultatų matyti, kad įtaisų perdavimo koeficientų taške 20 GHz matavimo rezultatų standartinis nuokrypis yra didesnis už tinklo prognozavimo klaidos nuokrypį. Iš to seka išvadą, kad yra pastebima tam tikra priklausomybė tarp triukšmo charakteristikų ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločio, tačiau ji yra nepakankama, kad neuronų tinklas pakankamai tiksliai prognozuotų perdavimo koeficiento vertę. Gaunama vidutiniškai 2 % prognozavimo paklaida.

Ateityje, siekiant pagerinti prognozavimo tikslumą, triukšmo charakteristikų ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločio matavimus derėtų atlikti tuo pačiu metu, taip pašalinant neženklų elektronikos komponentų parametrų degradavimo efektą. Gautas sistemos tikslumas taip pat nukenčia nuo pernelyg mažo DNT apmokymo duomenų skaičiaus. Kadangi sistema yra įtakuoja didelių skaičiumi tam tikrų veiksnių, mažas duomenų kiekis nesuteikia galimybės juos tinkamai įvertinti.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Magistro baigiamojo darbo tikslas – sukurti ir ištirti *PicoScope 9300* stroboskopinio osciloskopo matavimo parametrų ir charakteristikų automatizuotą testavimo sistemą (ATS). ATS privalo be nuolatinės operatoriaus priežiūros matuoti pagrindinių, serijiniai išleidžiamų stroboskopinių osciloskopų, mazgų svarbiausius darbinis parametrus užtikrinant aukštą gaminamos produkcijos kokybę.

Analitinės apžvalgos skyriuje išnagrinėti ekvivalentinio laiko matavimo metodai, kurie yra naudojami tiriamame stroboskopiniame osciloskope. Osciloskope yra įgyvendinti: a) realaus laiko, b) atsitiktinio ekvivalentinio laiko ir c) nuoseklaus ekvivalentinio laiko matavimo metodai, kurie aparatiškai realizuojami skirtingai, taikant skirtingus schemotechninius sprendimus ir pasirenkami pagal atitinkamą osciloskopo darbo režimą. ATS ištestuoja kiekvieno režimo signalų matavimo tikslumą.

Darbe išanalizavus tirs aukštadažnės matavimo įrangos praleidžiamųjų dažnių juostos pločio matavimo metodus buvo pasirinktas kintančio dažnio harmoninio virpesio matavimo metodas, kadangi jis pasižymi aukščiausiu tikslumu lyginant su priešpriešiais sujungtų grandinių ir žinomos signalo formos matavimo metodais. Matavimo rezultatai, taikant pasirinktą metodą, silpniau įtakuoti signalų perdavimo trakto kokybės ir visiškai nepriklauso nuo stroboskopinio osciloskopo laiko bazės įnešamų iškraipymų.

ATS testinių signalų generavimo arba matavimo funkcijas atlieka aukštadažniai galios matuoklis ir harmoninių virpesių generatorius, žemadažnis funkcinis generatorius, valdomas nuolatinės įtampos šaltinis, multimetras ir impulsinių signalų generatorius. Automatiniam signalų perdavimo traktų tarp sistemos komponentų komutavimui buvo sukurtas komutuojantis įtaisas, kurio pagrindą sudaro kokybiškos, plačios praleidžiamųjų dažnių juostos, relės. Visų sistemos komponentų ir testuojamo osciloskopo valdymas atliekamas automatizuotos testavimo sistemos valdymo programa veikianti asmeniname kompiuteryje. Ryšis tarp sistemos komponentų realizuojamas USB arba *Ethernet* protokolų pagrindu.

Sistemos valdymo programa realizuota *LabView* programavimo aplinkoje. Naudojant modifikuotas matavimo įrangos ir komutavimo įtaisui ir stroboskopiniam osciloskopui skirtas *LabView* tvarkykles pasekamas aukštas visos sistemos lankstumas, realizuojant naujus testavimų scenarijus. ATS testuoja svarbiausius osciloskopo y ir x kanalų ir trijų sinchronizacijos grandinių darbo parametrus. Testavimo rezultatai programos vartotojo grafinėje sąsajoje atnaujinami realiu laiku vaizduojant duomenų lenteles, priklausomybių arba histogramų grafikus priklausomai nuo tuo metu testuojamo mazgo. Visi testavimo duomenys saugomi *.csv bylose, o atlikus pilną testavimo ciklą yra sukurama arba atnaujinama .doc formato testavimo ataskaitos byla.

ATS našumas įvertintas matuojant sistemos atsitiktinės paklaidos ir sisteminės klaidos, rankinių matavimų atžvilgiu, vertes. Statistiškai apdorojus ir išanalizavus surinktus duomenis prieita išvadų, kad sistemos matavimo duomenys mažai įtakuoti sistemoje vyraujančių atsitiktinių procesų užtikrinant gerą matavimo rezultatų pakartojamumą, tačiau dėl didelio koaksialinių kabelių jungčių skaičiaus ženkliai blogėja viso signalų perdavimo trakto kokybė aukštų dažnių 9–18,5 GHz diapazone. Dėl signalo atspindžių maksimali atsirandanti sisteminė matavimo klaida blogiausiu atveju siekia 5 %, tačiau dažnių 19–20 GHz diapazone, kuriame nustatomas osciloskopo praleidžiamųjų dažnių juostos plotis, maksimali santykinės klaidos vertė siekia 2,5 %. Kadangi sisteminė klaida yra pastovi ir nekinta kartojant matavimus vieno testuojamo prietaiso atveju, atsiradus galimybei išmatuoti atspindžių koeficientus visame testavimo dažnių diapazone, klaida gali būti sumažinta iki sudaryto pasikliautino intervalo didžio į praleidžiamųjų dažnių juostos pločio skaičiavimo formulę įtraukiant atspindžių koeficientų vertes.

Kadangi pasirinktas kintamo dažnio harmoninio virpesio DACH matavimo metodas nesuteikia galimybės išmatuoti osciloskopo dažninę fazės charakteristikos, darbo tiriamojoje dalyje buvo bandoma nustatyti ar osciloskopo strobavimo grandinė atitinka minimalios fazės grandinių klasę, nes šiuo atveju tarp dviejų charakteristikų egzistuotu tiesioginė priklausomybė, išreikšta Hilberto transformacija. Tikrajai DFCh išmatuoti buvo taikomas priešpriešiais sujungtų grandinių matavimo metodas. Lyginant dvį, skirtingais metodais išmatuotas DACH, prieita išvados, kad priešpriešiais sujungtų grandinių metodas garantuoja pakankamai tikslius matavimo rezultatus su beveik tolygiai didėjančia nuo 0 iki 12 % sistetine santykinė klaida. Šiuo atveju klaidos dydis priklauso nuo dviejų, dalyvaujančių matavimo procese, strobavimo grandinių DACH skirtumo, kadangi matavimo rezultatas faktiškai yra dviejų tokių DACH vidurkis. Paliginus tarpusavyje dvį DFCh, gautas taikant Hilberto transformaciją ir priešpriešiais sujungtų grandinių metodą, matoma, kad charakteristikos, lyginat su DACH skirtumu, skiriasi ženkliai, todėl daroma išvada, kad strobavimo grandinė neatitinka minimalios fazės grandinių klasę ir DFCh charakteristika priklauso netik nuo DACH formos, bet ir nuo kitų strobavimo grandinės tam tikrų parametrų.

Literatūros sąrašas

1. Nader, C.; Van Moer, W.; Björssell, N.; Händel, P. 2013. Wideband radio frequency measurements: From instrumentation to sampling theory, *IEEE Microwave Magazine* 14(1): 85–98.
2. *Samplig oscilloscope techniques* [interaktyvus]. 2005. Tektronix. [žiūrėta 2014 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cbtricks.com/miscellaneous/tech_publications/scope/sampling.pdf>
3. *Advanced Features of PicoScope Sampling Oscilloscopes* [interaktyvus]. 2012. Pico Technology [žiūrėta 2014 m. sausio 16d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.picotech.com/picoscope-9300-samplingoscilloscopes.html?col3=open#CollapsiblePanel3>>
4. *Global Digital Oscilloscope Market 2014-2018* [interaktyvus]. 2014. TechNavio [žiūrėta 2015 m. vasario 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.technavio.com/report/global-digital-oscilloscope-market-2014-2018>>
5. Kahrs, M. 2003. 50 years of RF and microwave sampling, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech* 51(6): 1787–1805.
6. Williams, D. F.; Hale, P.; Remley, K. A. 2007. The sampling oscilloscope as a microwave instrument, *IEEE Microwave Magazine* 8(4): 59–68.
7. Hints for Enhancing Measurement Integrity in RF/Microwave Test Systems [interaktyvus]. 2012. Agilent Technologies [žiūrėta 2014 m. sausio 18 d.]. Prieiga per internetą: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-3322N.pdf>>.
8. Lin, H.; Huang, Y. 2012. Measurement analysis and improvement technique of signal integrity for high-speed connectors, *Electromagnetic Compatibility, 2012 Asia-Pacific Symposium on, APEMC*, 609–612.
9. Hale, P. D.; Clement, T. S.; Coakley, K. J.; Wang C. M. 2000. Estimating the Magnitude and Phase Response of a 50 GHz Sampling Oscilloscope Using the "Nose-to-Nose" Method, *Conference Digest-Spring, ARFTG*, 37: 1–8.
10. Remley, K. A.; Williams, D. F. 2003. Sampling oscilloscope models and calibrations, *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*, 3: 1507–1510.
11. Larson, D. R.; Paulter, N. G. 2001. Using The Nose-To-Nose Sampler Calibration Method In Pulse Metrology, *Trends in Electrical Measurement and Instrumentation, 11th IMEKO TC-4 Symp.*, 461–465.
12. DeGroot, D. C.; Hale, P. D. 2000. Analysis of Interconnection Networks and Mismatch in the Nose-to-Nose Calibration, *Conference Digest-Spring, ARFTG*, 37: 116–121.

13. Williams, D. F.; Clement, T. S.; Remley, K. A.; Hale, P. D. 2007. Systematic Error of the Nose-to-Nose Sampling-Oscilloscope Calibration, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 55(9): 1951–1957.
14. Clement, T. S.; Hale, P. D.; Williams, D. F.; Wang, C. M. 2006. Calibration of sampling oscilloscopes with high-speed photodiodes, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 54(8): 3173–3181.
15. Hale, P. D.; Wang, C. M.; Williams, D. F.; Remley, K. A. 2005. Compensation of Random and Systematic Timing Errors in Sampling Oscilloscopes, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 55(6): 2146–2154.
16. Bitter, R.; Mohiuddin, T.; Nawrocki, M. 2007. LabView: Advanced Programming Techniques, Second Edition: vadovėlis. New York: CRC press. 500 p.
17. Jianguang J.; Jingming K.; Zunwen H. 2009. Design of Automated Test System Based on GPIB, *Electronic Measurement & Instruments, International Conference on, ICEMI'09* 1–948.
18. LabView programinės įrangos gamintojo puslapis [interaktyvus]. 2014. *National Instruments* [žiūrėta 2014 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ni.com/labview/>>
19. Agilent aukštadažnės matavimo įrangos gamintojo puslapis [interaktyvus]. 2014. *Keysight Technologies* [žiūrėta 2014 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.keysight.com/main/home/>>
20. Fluke, Tektronix, Keithley aukštadažnės matavimo įrangos gamintojo puslapis [interaktyvus]. 2014. *Danaher Corporation* [žiūrėta 2014 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.danaher.com/test-measurement>>
21. LeCroy aukštadažnės matavimo įrangos gamintojo puslapis [interaktyvus]. 2014. *LeCroy Corporation* [žiūrėta 2014 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://teledynelecroy.com/>>
22. Relės CCR-33S serijos techninė dokumentacija [interaktyvus]. 2013. *Teledyne relays* [žiūrėta 2014 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.teledynecoax.com/pdf/coaxialswitches/ccr-33s_cr-33s%20failsafe.pdf>
23. Mikroschemas ATmega 328P techninė dokumentacija [interaktyvus]. 2014. *Atmel* [žiūrėta 2014 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf>
24. Calibration of Measuring Devices for Electrical Quantities, Calibration of Oscilloscopes [interaktyvus]. 2011. *EURAMET* [žiūrėta 2015 m. vasario 21 d.]. Prieiga per internetą:

<https://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg-7__v_1.0_Calibration_of_Oscilloscopes_01.pdf>

25. Cassioli, D.; Mecozzi, A. 2009. Minimum-phase impulse response channels *Communications, IEEE Transactions on* 57(12): 3529–3532.
26. Grove, W. M. 1966. Sampling for Oscilloscopes and Other RF Systems: Dc Through X-Band, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 14(12): 629–635.
27. Navakauskas, D.; Serackis, A. 2013. Skaitmeninis signalų apdorojimas taikant MATLAB: vadovėlis. Vilnius: Technika. 400 p.
28. SEILIUS A. 2001. Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai: vadovėlis. Vilnius: Technika. 269 p.
29. Haykin. S. 1998. Neural Networks: A Comprehensive Foundation: vadovėlis. Delhi: Pearson Education. 823 p.
30. Bell, S. 2001. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, *Measurement Good Practice Guide* 11(2): 2–42.
31. Rutkauskas, A. V.; Plakys, V.; Sūdžius, V. 2011. Magistro mokslinis darbas: forma, struktūra ir procesas. Vilnius: Technika. 100 p.

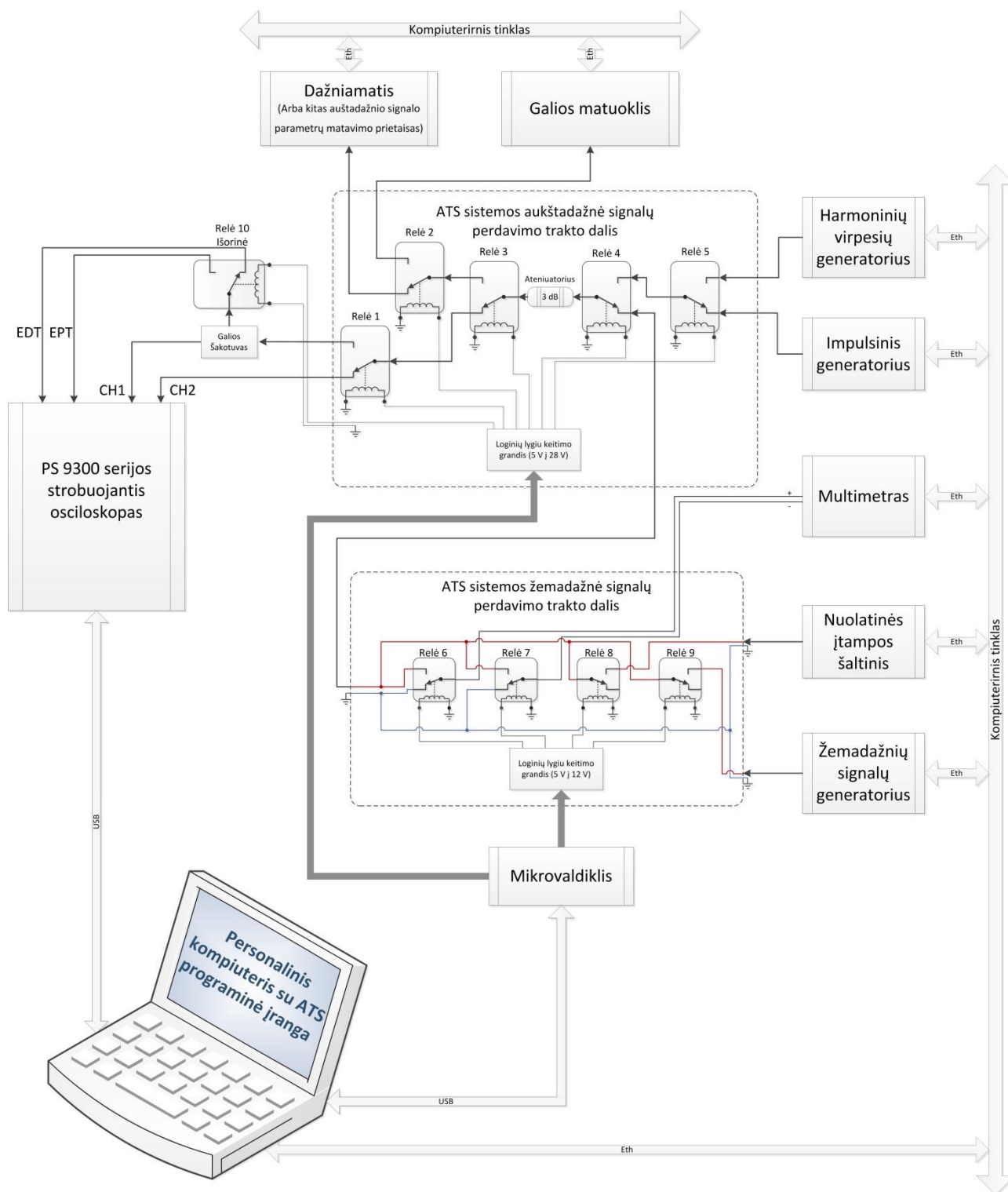
Priedai

A priedas. CD su pirminiu programos kodu

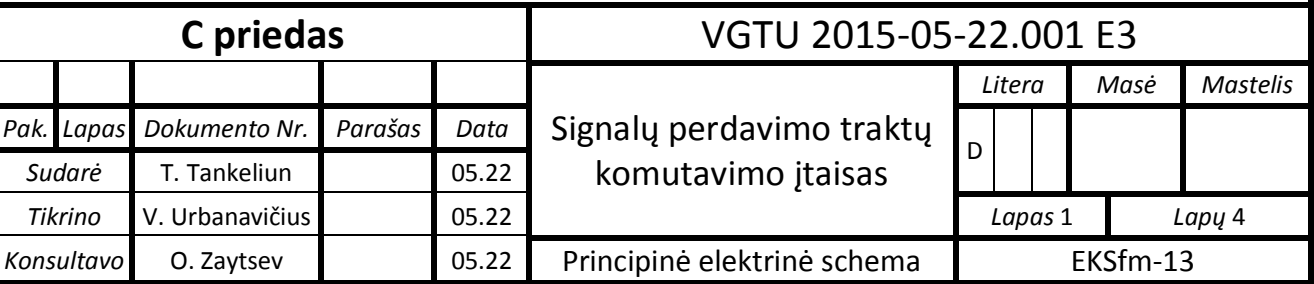
Kompaktiniame diske pateikti ATS valdymo programos *LabView*, *PS9300* stroboskopinio osciloskopo tvarkyklės *LabView* ir darbo tiriamoje dalyje įgyvendintų algoritmų (Matlab skriptų) išeities kodai, kurie sugrupuoti atitinkamuose aplankuose:

- *ATS software*
- *PicoScope 9300 LabView Plug and Play Instrument Driver*
- *Matlab scripts*

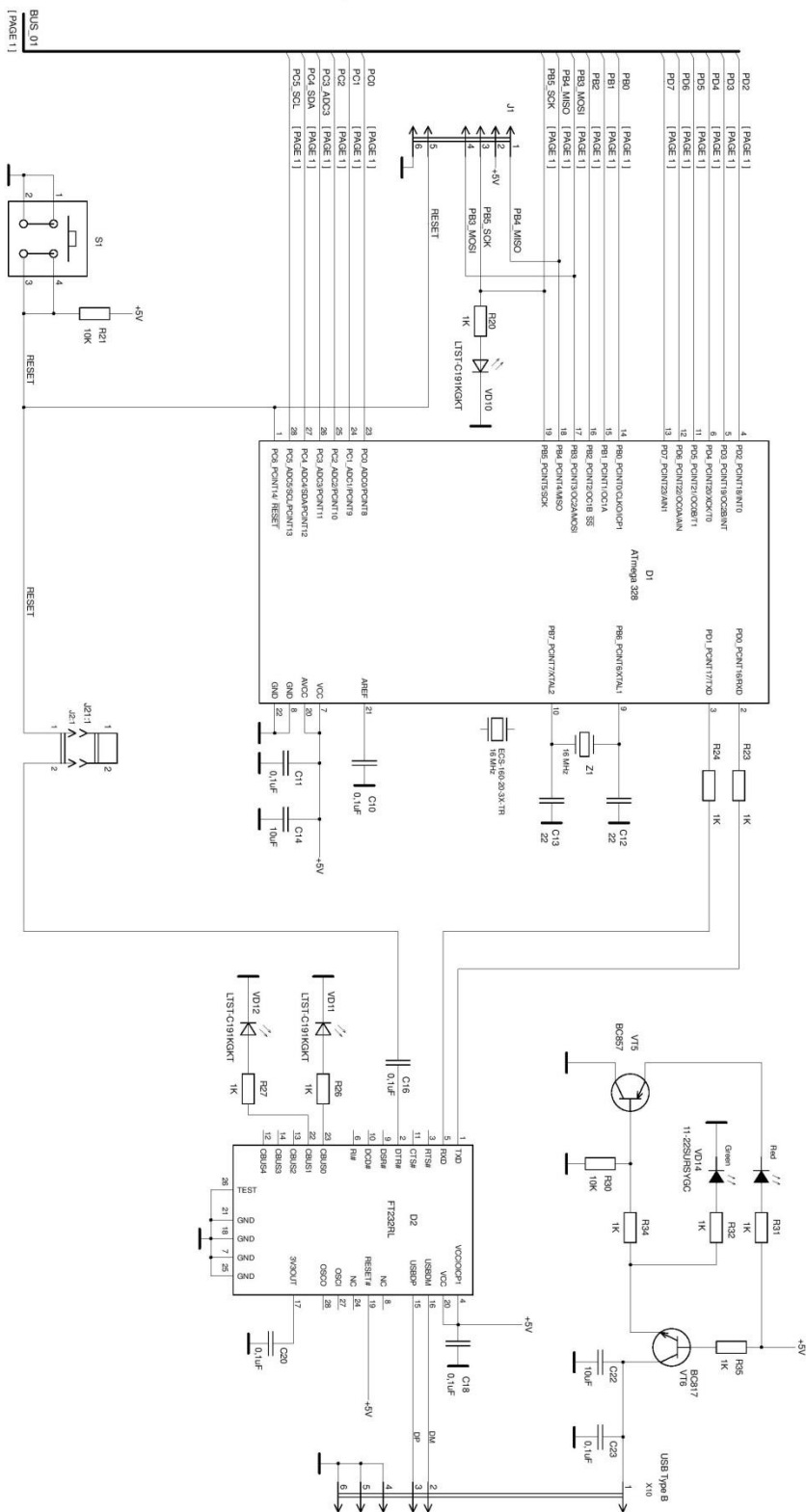
B priedas. Struktūrinė automatizuotos testavimo sistemos schema



C priedas. Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaiso principinė elektrinė schema



VGTV 2015-05-22.012 E3

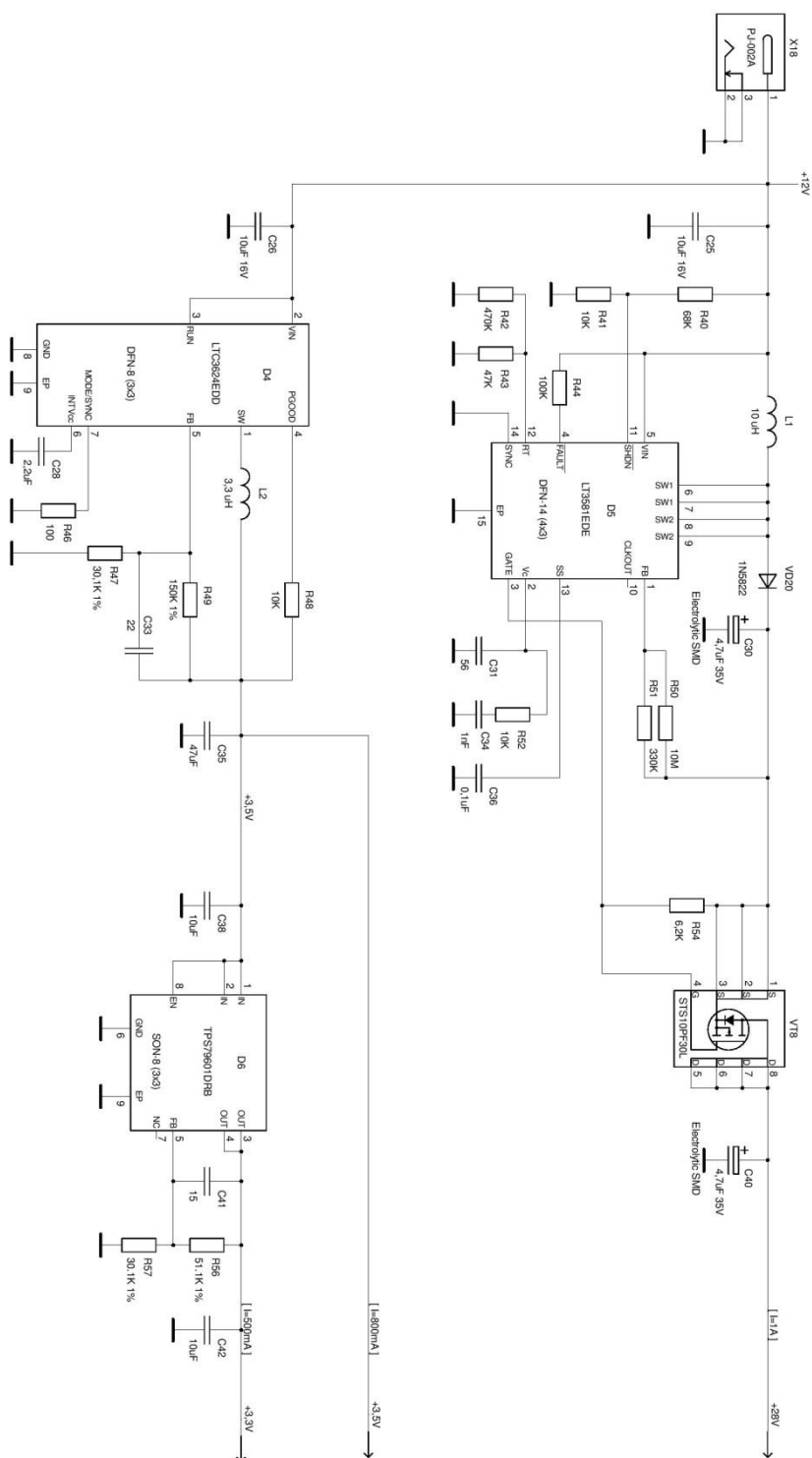


C priedas

VGTV 2015-05-22.001 E3

					Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaisas	Litera			Masė	Mastelis
Pak.	Lapas	Dokumento Nr.	Parašas	Data		D				
Sudarė		T. Tankeliun		05.22						
Tikrino		V. Urbanavičius		05.22			Lapas 2	Lapų 4		
Konsultavo		O. Zaytsev		05.22	Principinė elektrinė schema	EKSfm-13				

VGTU 2015-05-22.012 E3

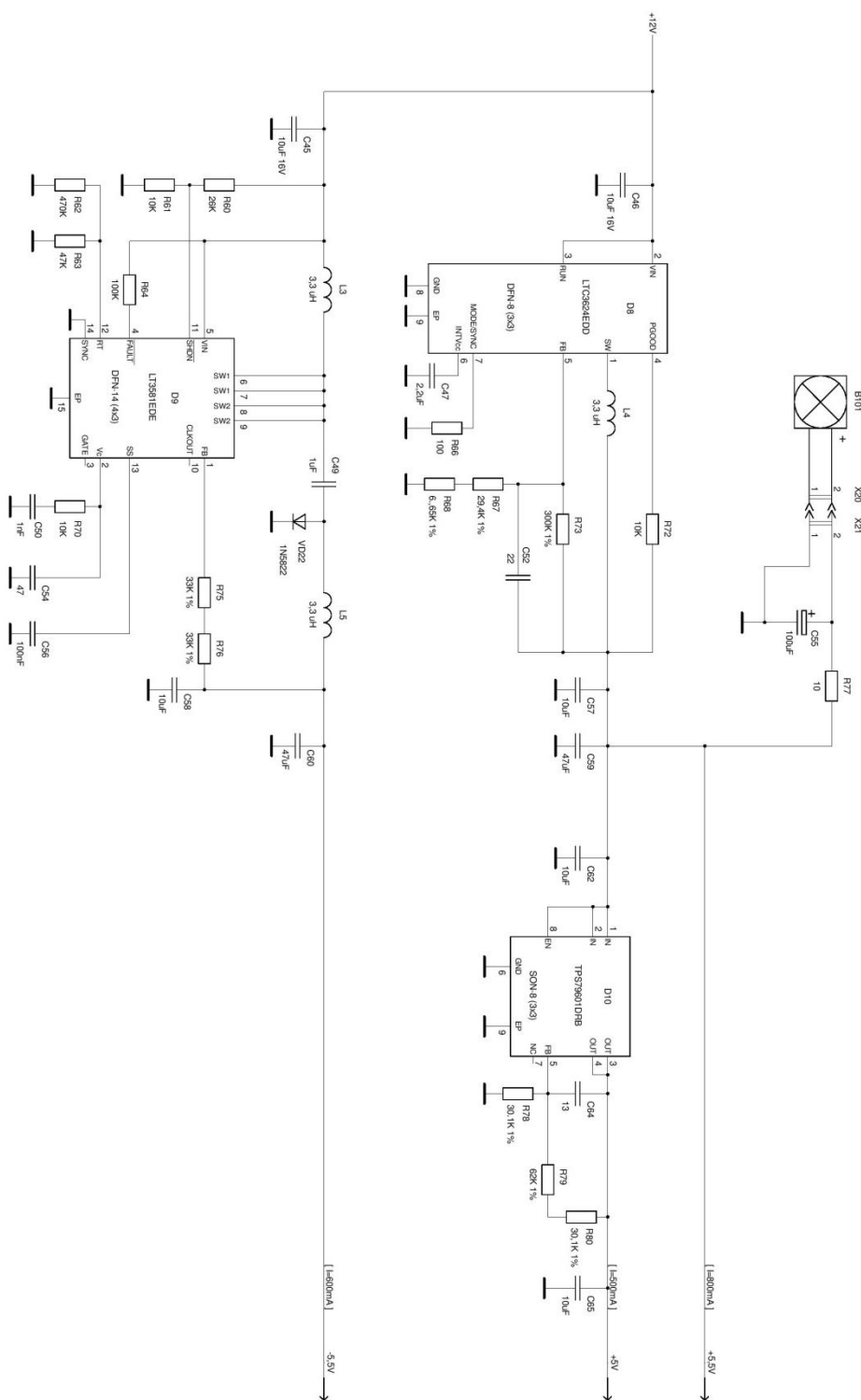


C priedas

VGTU 2015-05-22.001 E3

					Litera			Masė	Mastelis
Pak.	Lapas	Dokumento Nr.	Parašas	Data	Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaisas			D	
Sudarė	T. Tankeliun			05.22					
Tikrino	V. Urbanavičius			05.22	Principinė elektrinė schema			Lapas 3	Lapy 4
Konsultavo	O. Zaytsev			05.22				EKSfm-13	

VGTV 2015-05-22.012 E3



C priedas

VGTV 2015-05-22.001 E3

Litera			Masė	Mastelis
D				
Lapas 4			Lapy 4	
EKSfm-13				

Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaisas

Principinė elektrinė schema

D priedas. PicoScope 9300 stroboskopinio osciloskopo įvykdyto testavimo scenarijaus galutinė ataskaita



PicoScope 9313 Sampling Oscilloscopes

Performance Test Record

Instrument Serial Number: PicoScope 9313 A4-025
Date of Calibration: 2015.05.08
Technicians: Jakovas Rososkis, Oleg Zaytsev

DO196-1
Pico Technology 2015

1

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
Bandwidth	Full bandwidth DC to 20 GHz				
	Narrow bandwidth DC to 10 GHz				
Channel 1, Full Bandwidth					
	Frequency: 100 MHz, Input: 100 uW		1.00		
	Frequency: 4 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.94	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 6 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.91	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 8 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.89	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 10 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.82	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 12 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.98	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 14 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.95	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 16 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	1.09	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 17 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	1.07	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 18 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	1.01	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 19 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.86	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 20 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.76	+ 3 dB	Yes
Channel 1, Narrow Bandwidth					
	Frequency: 100 MHz, Input: 100 uW		1.00		
	Frequency: 4 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.93	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 6 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.85	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 8 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.81	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 9 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.72	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 10 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.71	+ 3 dB	Yes

DO196-1
Pico Technology 2015

3

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
VERTICAL, CH1&CH2					
Nominal Input Impedance	(50 ± 1) Ohm				
	Channel 1	49 Ohm	49.6 Ohm	51 Ohm	Yes
	Channel 2	49 Ohm	49.7 Ohm	51 Ohm	Yes
DC Voltage Accuracy					
	± 2% of full vertical scale ± 2 mV				
Channel 1, Without Digital Feedback, Multi-valued acquisition					
	Scale: 5 mV/div, Input: 0 mV, Offset: 0 mV	-2.8 mV	-0.4 mV	2.8 mV	Yes
	Scale: 200 mV/div, Input: 400 mV, Offset: 0 mV	366 mV	393.0 mV	434 mV	Yes
	Scale: 200 mV/div, Input: -400 mV, Offset: 0 mV	-434 mV	-398.3 mV	-366 mV	Yes
Channel 1, With Digital Feedback, Single-valued acquisition					
	Scale: 5 mV/div, Input: 0 mV, Offset: 0 mV	-2.8 mV	0.8 mV	2.8 mV	Yes
	Scale: 500 mV/div, Input: 0 mV, Offset: 0 mV	868 mV	940.4 mV	1032 mV	Yes
	Scale: 500 mV/div, Input: 950 mV, Offset: 0 mV	-1032 mV	-943.2 mV	-868 mV	Yes
	Scale: 500 mV/div, Input: -950 mV, Offset: 0 mV				
Channel 2, Without Digital Feedback, Multi-valued acquisition					
	Scale: 5 mV/div, Input: 0 mV, Offset: 0 mV	-2.8 mV	-0.8 mV	2.8 mV	Yes
	Scale: 200 mV/div, Input: 400 mV, Offset: 0 mV	366 mV	393.6 mV	434 mV	Yes
	Scale: 200 mV/div, Input: -400 mV, Offset: 0 mV	-434 mV	-400.0 mV	-366 mV	Yes
Channel 2, With Digital Feedback, Single-valued acquisition					
	Scale: 5 mV/div, Input: 0 mV, Offset: 0 mV	-2.8 mV	-0.2 mV	2.8 mV	Yes
	Scale: 500 mV/div, Input: 0 mV, Offset: 0 mV	868 mV	939.2 mV	1032 mV	Yes
	Scale: 500 mV/div, Input: 950 mV, Offset: 0 mV	-1032 mV	-946.1 mV	-868 mV	Yes
	Scale: 500 mV/div, Input: -950 mV, Offset: 0 mV				
RMS Noise					
	Full Bandwidth < 2 mV, Narrow Bandwidth < 1.5 mV				
	Channel 1				
	Full Bandwidth	None	1.75 mV	2 mV	Yes
	Narrow Bandwidth	None	0.75 mV	1.5 mV	Yes
	Channel 2				
	Full Bandwidth	None	1.72 mV	2 mV	Yes
	Narrow Bandwidth	None	0.76 mV	1.5 mV	Yes

2

DO196-1
Pico Technology 2015

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
Bandwidth	Full bandwidth DC to 20 GHz				
	Narrow bandwidth DC to 10 GHz				
Channel 2, Full Bandwidth					
	Frequency: 100 MHz, Input: 100 uW		1.00		
	Frequency: 4 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	1.08	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 6 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.97	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 8 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.87	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 10 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.87	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 12 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.87	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 14 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.90	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 16 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	1.07	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 17 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.99	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 18 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.86	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 19 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.74	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 20 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.71	+ 3 dB	Yes
Channel 2, Narrow Bandwidth					
	Frequency: 100 MHz, Input: 100 uW		1.00		
	Frequency: 4 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	1.09	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 6 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.93	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 8 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.78	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 9 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.77	+ 3 dB	Yes
	Frequency: 10 GHz, Input: 100 uW	- 3 dB	0.73	+ 3 dB	Yes

4

DO196-1
Pico Technology 2015

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
HORIZONTAL					
Time Base Accuracy	± 100 ppm (± 0.01%)				
	Frequency: 10 kHz. Delay: 0 ms and 100 ms Delta Delay	-10 µs	0.9 µs	10 µs	Yes
Delta Time Interval Accuracy. Real Time Sampling	± 0.2% of Delta Time Interval or Full Horizontal Scale, whichever is greater				
	Frequency: 2 Hz Scale: 100 ms/div Period	499 ns		501 ns	Yes
	Frequency: 20 Hz Scale: 10 ms/div Period	49.9 ms		50.1 ms	Yes
	Frequency: 200 Hz Scale: 1 ms/div Period	4.99 ms		5.01 ms	Yes
	Frequency: 2 kHz Scale: 100 µs/div Period	499 µs		501 µs	Yes
	Frequency: 20 kHz Scale: 10 µs/div Period	49.9 µs		50.1 µs	Yes
	Frequency: 100 kHz Scale: 2 µs/div Period	9.98 µs	10 µs	10.02 µs	Yes
Delta Time Interval Accuracy. Random Equivalent Time Sampling.	± 4 ns ± 0.2% of Delta Time Interval or Full Horizontal Scale, whichever is greater				
	Frequency: 2 kHz Scale: 100 µs/div Period	499 µs		501 µs	Yes
	Frequency: 50 kHz Scale: 5 µs/div Period	19.956 µs		20.044 µs	Yes
	Frequency: 500 kHz Scale: 500 ns/div Period	1.992 µs		2.008 µs	Yes
	Frequency: 5 MHz Scale: 50 ns/div Period	195.6 ns		204.4 ns	Yes
Delta Time Interval Accuracy (>200 ps/div). Sequential Equivalent Time Sampling.	± 10 ps ± 0.2% of Delta Time Interval				
	Frequency: 100 Hz Scale: 3.2 ms/div Period	9.98 ms		10.02 ms	Yes
	Frequency: 1 kHz Scale: 200 µs/div Period	0.998 ms		1.002 ms	Yes
	Frequency: 10 kHz Scale: 20 µs/div Period	99.8 µs		100.2 µs	Yes
	Frequency: 100 kHz Scale: 2 µs/div Period	9.98 µs		10.02 µs	Yes
	Frequency: 1 MHz Scale: 200 ns/div Period	0.998 µs		1.002 ns	Yes

DO196-1
Pico Technology 2015

5

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
	Frequency: 2 MHz Scale: 100 ns/div Period	499 ns		501 ns	Yes
	Frequency: 5 MHz Scale: 50 ns/div Period	199.59 ns		200.41 ns	Yes
	Frequency: 10 MHz. Scale: 20 ns/div Period	99.79 ns		100.21 ns	Yes
	Frequency: 20 MHz Scale: 10 ns/div Period	49.89 ns		50.11 ns	Yes
	Frequency: 50 MHz Scale: 5 ns/div Period	19.95 ns		20.05 ns	Yes
	Frequency: 100 MHz Scale: 2 ns/div Period	9.97 ns		10.03 ns	Yes
	Frequency: 200 MHz Scale: 1 ns/div Period	4.98 ns		5.02 ns	Yes
	Frequency: 500 MHz Scale: 500 ps/div Period	1.986 ns		2.014 ns	Yes
Delta Time Interval Accuracy (<200 ps/div). Sequential Equivalent Time Sampling.	± 10 ps or ± 3 ps ± 1% of Delta Time Interval, whichever is smaller				
	Frequency: 1 GHz Scale: 200 ps/div Period	0.990 ns		1.010 ns	Yes
	Frequency: 2 GHz Scale: 100 ps/div Period	492 ps		508 ps	Yes
	Frequency: 5 GHz Scale: 50 ps/div Period	195 ps		205 ps	Yes
	Frequency: 10 GHz Scale: 20 ps/div Period	96 ps		104 ps	Yes
	Frequency: 14 GHz Scale: 200 ps/div Trend: On Maximum Minimum	67.7 ps 67.7 ps		75.1 ps 75.1 ps	Yes Yes

DO196-1
Pico Technology 2015

6

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
EXTERNAL DIRECT TRIGGER					
External Direct Trigger Bandwidth and Sensitivity	100 mV p-p DC to 100 MHz. Increasing linearly from 100 mV p-p at 100 MHz to 200 mV p-p at 2.5 GHz				
	Frequency: 100 MHz. Input: 100 mV p-p. Frequency	99 MHz		101 MHz	Yes
	Frequency: 2.5 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	2.475 GHz		2.525 GHz	Yes
RMS External Direct Trigger Jitter	2.0 ps + 20 ppm of delay setting				
	Frequency: 2.5 GHz Input: 600 mV p-p Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 2.5 GHz Input: 600 mV p-p Delay: 100 ns RMS Jitter	None		4 ps	Yes
	Frequency: 2.5 GHz Input: 600 mV p-p Delay: 1 µs RMS Jitter	None		22 ps	Yes
External Direct Trigger Nominal Input Impedance	(50 ± 3) Ohm				
	Input Impedance	47 Ohm		53 Ohm	Yes
INTERNAL DIRECT TRIGGER					
Internal Direct Trigger Bandwidth and Sensitivity	100 mV p-p DC to 10 MHz. Increasing linearly from 100 mV p-p at 10 MHz to 400 mV p-p at 100 MHz				
	Channel 1 Frequency: 10 MHz. Input: 100 mV p-p. Frequency	9.9 MHz		10.1 MHz	Yes
	Channel 2 Frequency: 100 MHz. Input: 400 mV p-p. Frequency	99 MHz		101 MHz	Yes
	Channel 1 Frequency: 10 MHz. Input: 100 mV p-p. Frequency	9.9 MHz		10.1 MHz	Yes
	Channel 2 Frequency: 100 MHz. Input: 400 mV p-p. Frequency	99 MHz		101 MHz	Yes
RMS Internal Direct Trigger Jitter	30 ps + 20 ppm of delay setting				
	Channel 1 Frequency: 100 MHz Input: 600 mV p-p Delay: 0 ns RMS Jitter	None		30 ps	Yes
	Channel 2 Frequency: 100 MHz Input: 600 mV p-p Delay: 0 ns RMS Jitter	None		30 ps	Yes

DO196-1
Pico Technology 2015

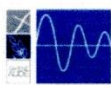
7

Performance Test	Test Conditions	Minimum	Actual	Maximum	Performance Results
EXTERNAL PRESCALED TRIGGER					
External Prescaled Trigger Bandwidth and Sensitivity	200 mV p-p to 2 V p-p from 1 GHz to 14 GHz (sine wave input)				
	Frequency: 1 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	990 MHz		1010 MHz	Yes
	Frequency: 2 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	1980 MHz		2020 MHz	Yes
	Frequency: 4 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	3960 MHz		4040 MHz	Yes
	Frequency: 8 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	7920 MHz		8080 MHz	Yes
	Frequency: 10 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	9090 MHz		10100 MHz	Yes
	Frequency: 12 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	11880 MHz		12120 MHz	Yes
	Frequency: 14 GHz. Input: 200 mV p-p. Frequency	13860 MHz		14140 MHz	Yes
RMS External Prescaled Trigger Jitter	2.0 ps + 20 ppm of delay setting				
	Frequency: 1 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 2 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 4 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 8 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 10 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 12 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes
	Frequency: 14 GHz Input: 600 mV p-p. Delay: 0 ns RMS Jitter	None		2 ps	Yes

DO196-1
Pico Technology 2015

8

E priedas. Pranešimo 18-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XVIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA
Tomaš Tankeliun

*Sistemų inžinerijos ir kompiuterių technologijų (T120),
Signalų technologijų (T121), Aukštų dažnių technologijų
(T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

***LAIKO MASTELIO KEITIMO MATAVIMO
METODAS***

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

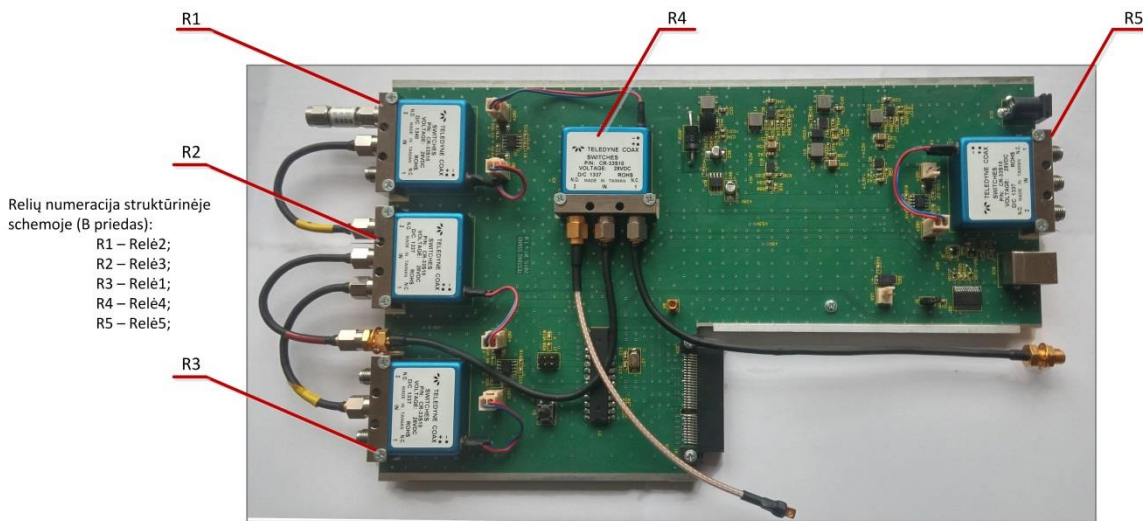
Sekcijos pirmininkas

dr. Darius Plonis

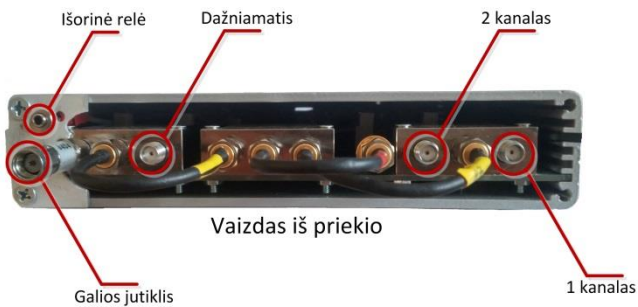
2015 m. kovo 20 d.
Vilnius

F priedas. Signalų perdavimo traktų komutavimo įtaiso spausdintinės plokštės ir surinktos konstrukcijos vaizdai

Spausdintinė plokštė



Komutavimo įtaiso jungčių paskirtys



Komutavimo įtaiso vaizdas iš viršaus

