

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Karolis Kaminskas

**AUTOMATIZUOTOS ELEKTRONIKOS GAMINIŲ
TESTAVIMO SISTEMOS METROLOGINIŲ CHARAKTERISTIKŲ
TYRIMAS**

BAIGIAMASIS MAGISTRO PROJEKTAS

Vadovas

Prof. dr. D. Gailius

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJA KATEDRA

AUTOMATIZUOTOS ELEKTRONIKOS GAMINIŲ TESTAVIMO
SISTEMOS METROLOGINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Baigiamasis Magistro projektas
Elektronikos inžinerija (621H61002)

Vadovas

_____ Prof. dr. Darius Gailius

Recenzentas

_____ Doc. dr. Paulius Kaškonas

Projektą atliko

_____ stud. Karolis Kaminskas

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS

(Fakultetas)

Karolis Kaminskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. Gegužės 18 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Karolio Kaminskas** baigiamasis projektas tema „**Automatizuotos elektronikos gaminių testavimo sistemos metrologinių charakteristikų tyrimas**“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Kaminskas, Karolis. Automatizuotos elektronikos gaminių testavimo sistemos metrologinių charakteristikų tyrimas. Magistrinis baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Darius Gailius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir Elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 53psl.

SANTRAUKA

Šio tiriamojo darbo tikslas yra ištirti automatizuotos testavimo stoties metrologines dinamines charakteristikas ir kokios jos yra testavimo stoties lygyje.

Pirmoje dalyje apžvelgiama kaip yra skirstomos testavimo stotys. Susipažįstama su SATS stoties vidine struktūra, architektūra, bei savipatikros testo algoritmu. Išanalizuojamas tiriamasis analoginių matavimo, bei stimuliavimo modulis.

Sudaroma tyrimų metodika. Tyrimuose atliekama analoginių įėjimų ir išėjimų dažninių charakteristikų, analoginių išėjimų srovės apsaugos, kanalų tarpusavo ryšių, bei efektyvaus skilčių skaičiaus analizė. Analizuojant santykio signalas ir trikdžiai rezultatus pastebimas neatsitiktinio pobūdžio trikdžių atsiradimas.

Paskutinėje dalyje aptariami tyrimų rezultatai, iš jų daromos išvados apie testavimo stoties matuojamų dinaminių charakteristikų galimybes. Taip pat pateikiami pasiūlymai naudojant testavimo stotį matavimuose.

Reikšminiai žodžiai

Automatizuotas testavimas, analoginiai įėjimai išėjimai, savipatikros testas, matavimai

Kaminskas, Karolis. Investigation of Metrological Characteristics of Automated Printed Circuit Assemblies Testing System. Final project of master degree. Supervisor prof. dr. Darius Gailius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics engineering.

Kaunas, 2015. 53 pages.

SUMMARY

The main purpose of this investigation is to check and analyze measurement dynamic characteristics of automated test system.

At the first part is literature analysis about automated test systems and how they are defined. Getting familiar with SATS automated test system, its architecture and self-test. Also analog input and output module discussed.

After analysis methodology of investigation is defined. Analysis of analog inputs and output frequency characteristics, analog outputs overcurrent protection characteristics, channels crosstalk relations and effective number of bits were performed. During signal and noise ratio analysis nonrandom noises were found on captured waveforms.

At last part of thesis there are comments about the results of investigation. From results conclusions about test systems dynamic measurements capabilities and proposal of further test systems investigation were discussed.

Keywords

Automated testing, analog input outputs, self-test, metrology

TURINYS

Santrauka.....	4
Summary	5
Turinys	6
Trumpinių sąrašas	7
Įvadas	8
1 Elektronikos gaminių automatizuoto testavimo sistemos	9
1.1 Elektronikos gaminių testavimas	9
1.2 Automatizuotos testavimo sistemos.....	10
1.3 SATS sistemos apžvalga.....	12
1.4 Savipatikros adapterio apžvalga	14
2 Problemų hipotezės automatizuotam testavimui.....	16
3 Testavimo sistemos tyrimuose naudojama įranga	17
3.1 Analoginių įėjimų struktūra	17
3.2 Analoginių išėjimų struktūra	19
3.3 Skaitmeninis multimetras	20
3.4 Signalų generatorius	21
3.5 Matavimo prietaisų įnešama įtaka matavimams	22
4 Testavimo sistemos tyrimų metodika.....	24
4.1 Testavimo platformos bendra tyrimo metodika.....	24
4.2 Testavimo stoties analoginių įėjimų dažninės charakteristikos	25
4.3 Testavimo stoties analoginių išėjimų dažninės charakteristikos	26
4.4 Testavimo stoties analoginio išėjimo srovės apsauga.....	27
4.5 Matavimo kanalų tarpusavio ryšiai.....	28
4.6 Testavimo sistemos efektyvus skilčių skaičius.....	30
4.7 Apibendrintos užduotys testavimo stočiai	32
5 testavimo sistemos tyrimų rezultatai	33
5.1 Analoginių įėjimų dažninės charakteristikos	33
5.2 Analoginių išėjimų keitiklių dažninių charakteristikų rezultatai	35
5.3 Analoginio išėjimo srovės apsaugos tyrimo rezultatai	38
5.4 Matavimo kanalų tarpusavio ryšių rezultatai	40
5.5 Efektyvaus skilčių skaičiaus paieška	43
6 Apibendrinimas	47
7 Automatizuotos elektronikos gaminių testavimo sistemos metrologinių charakteristikų tyrimo išvados	48
Literatūros sąrašas.....	49
Priedas 1. AI absoliutinio tikslumo lentelė	50
Priedas 2. AO absoliutinio tikslumo lentelė.....	51
Priedas 3. Išmatuotos talpumo vertės.....	52
Priedas 4. AO ir AI tyrimų programos algoritmas	53

TRUMPINIŲ SĄRAŠAS

FT – Funkcinis testas

AC – kintama srovė (angl. alternating current)

ATS – Automatizuota testavimo sistema

SATS – Standartinė automatizuota testavimo sistema

AKK – analogas į kodą keitiklis

AI – analoginis įėjimas

KAK – kodas į analogą keitiklis

AO – analoginis išėjimas

ESS – Efektyvus skilčių skaičius (angl. Effective Number of Bits)

ŽDF – žemų dažnių filtras

IVADAS

Elektronikos gaminių gamybos ir surinkimo procese produktų testavimas atlieka vieną iš svarbiausių kokybės užtikrinimo žingsnių. Identifikuojant ir neleidžiant užsakovui išsiųsti brokuoto gaminio. Vienas iš galimų testų yra funkcinis testas. Šis skirtas patikrinti surinkto gaminio funkcionalumą t.y. ar gaminys veikia prie gaminio specifiкуotų ribų ir atlieka savo funkciją imituojant išorinius teisingus ar neteisingus stimulus, bei stebint gaminio reakciją į juos.

Sumažinti žmogiškojo faktoriaus įtaką funkcinio testavimo metu, sutrumpinti testavimo laiką, bei padidinti matavimo sistemos atkartojamumą yra naudojamos automatizuoto testavimo sistemos. Kitron įmonės testo kūrimo inžinieriai sukūrė vieną jų – SATS. Atskirų šios sistemos modulių specifikacijos yra dokumentuotos, tačiau kiek įtakos analoginiams matavimams turi pilnai surinkta sistema nėra iširta. Kadangi ši sistema yra platforma, todėl ši turi būti kaip įmanoma plačiau dokumentuota. SATS sistemos jau įdiegtos keturiuose Kitron fabrikuose. UAB Kitron suinteresuota atlikti SATS sistemos metrologinių charakteristikų tyrimą ir sukurti įrankius ir procedūras, kurios leistų patikimai užtikrinti visų SATS sistemų vienodą veikimą visuose fabrikuose

Keliami uždaviniai:

1. Eksperimentiniais tyrimais išanalizuoti funkcionuojančios SATS sistemos metrologines charakteristikas ir parinkti kurias iš jų būtų prasminga stebėti periodiškai;
2. Sukurti algoritmą ir įrankius, kuriais ši sistema gebėtų save patikrinti (schemos sudarymas, etaloninių elementų sukūrimas/surinkimas);
3. Sukurti sistemą ar metodą, kuria būtų galima sekti, bei palyginti visas esamas SATS sistemas.

1 ELEKTRONIKOS GAMINIŲ AUTOMATIZUOTO TESTAVIMO SISTEMOS

Elektronikos gaminių funkcinio testo (FT) automatizuotą testavimo sistemą (ATS) sudaro programuojamų matavimo, bei stimuliacijos prietaisų rinkinys. Šios testavimo sistemos skirtos gaminio funkcionalumui po surinkimo patikrinti. Tokios sistemos įdiegiamos siekiant:

- Padidinti testavimo kokybę (greitis ir patikimumas);
- Užtikrinti matavimų atkartojamumą;
- Sumažinti testavimo įrangos palaikymo kaštus,

Šiame skyriuje apžvelgiamos FT ATS kategorijos. Tai pat susipažįstama su universalia SATS sistema, jos architektūra, bei savi-patikros testo struktūra. Apžvelgiamas adapterio testavimo algoritmas ir testuojamos funkcijos. Bei iškeliamos galimų problemų hipotezės ATS.

1.1 Elektronikos gaminių testavimas

Teisingai surinkus ir sulitavus elektronikos gaminį visos gaminio funkcijos, turi veikti kaip numatyta jį projektavusių inžinierių komandos. Tačiau serijinės gamybos metu gali pasitaikyti sugedusių komponentų ar gaminio surinkimo klaidų, kurios įtakoja elektronikos gaminio funkcionalumą. Pagal funkcionalumo gedimą galima numanyti elektrinės grandinės defekto vietą. Taip jį randant, bei sutvarkant gaminius. Didėjant elektronikos gaminių sudėtingumui ir komponentų integracijos laipsniui, rankinio testavimo būdu, patikrinti elektronikos gaminius, serijinės gamybos metu, tampa vis sudėtingiau ir atima vis daugiau laiko. Todėl rankinio FT metodai ne visada yra priimtini todėl reikalaujama sudėtingesnių gaminio FT sistemų, viena jų atvaizduota 1.1 pav.



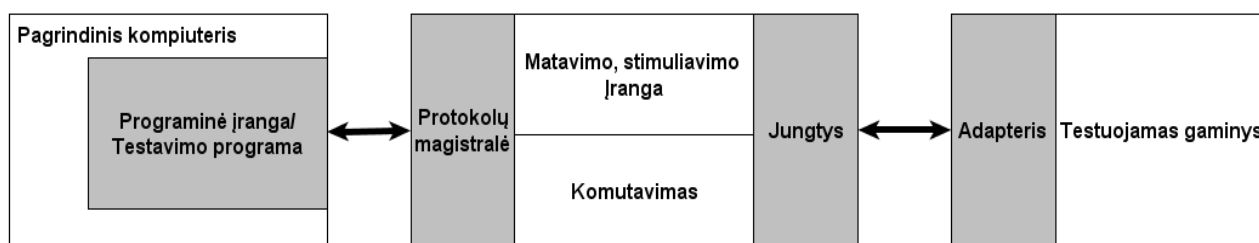
1.1 pav. Pusiau automatizuota arba visai automatizuota testavimo struktūra

Tokią pusiau automatizuotą arba pilnai automatizuotą FT sistemą dažnai sudaro elektronikos gaminiui specifinis adatinis adapteris, kuriuo prisijungiama prie testuojamo gaminio jungčių arba suprojektuotų testavimo taškų. Adapteris jungiasi su testavimo stotimi, kuria yra matuojami

elektriniai dydžiai, bei stimuliuojamos elektronikos gaminio funkcijos. Dažnai testavimo operatorius atlieka tik gaminio įdėjimo ar išėmimo iš testavimo adapterio operacijas, bei paleidžia testavimo programą. Kartais testavimo programa paprašo operatoriaus atlikti tam tikras operacijas, kaip mygtukų paspaudimas, šviesos diodų veikimo patikrinimas ar kitų nesudėtingų veiksmų. Tokiu metodu stengiamasi kuo labiau sumažinti testavimo operatoriaus įtaką testavimo procesui.

1.2 Automatizuotos testavimo sistemos

Universalių automatizuoto testavimo sistemų dizainas dažnai priklauso nuo serijinės gamybos produkcijos, bei galimų įmonėje gaminamų elektronikos gaminių spektro. Tai lieka įmonės strateginis klausimas. Skirtingų ATS blokinė schema išlieka panaši (1.2 pav.). Dažnai ATS stengiamasi surinkti iš komerciškai parduodamų (angl. off-the-shelf) modulių. Kainos ir palaikymo atžvilgiu tai yra pigiau, nes projektavimo ir gamybos kaštai tenka įrangos gamintojui [3]. Taip gaunama prietaisų modulinė sistema, kurių standartinių modulių jungtys ir programinis suderinamumas numatytas standartų [4][5]. Modulių gamintojas užtikrina modulių ilgojo laikotarpio įsigijimo ar pakeičiamumo klausimais. Programinė įranga dažnai siekia aukštą abstrakcijos laipsnį paspartinant testavimo programų kūrimą, o instrumentai parenkami su standartinėmis tvarkyklėmis, kaip IVI [6]. Testavimo sistemose pagrindinis kompiuteris testavimo programos pagalba surenka, bei apdoroja elektronikos gaminio išduodamus parametrus. Jis taip pat valdo, bei komutuoja su testuojamu elektronikos gaminiu, matavimo arba kitą stimuliavimo įrangą. Per specifinę elektronikos gaminiui adapterį (gali būti jungtys arba adatinis adapteris) yra prisijungiama prie testuojamo gaminio. Šie adapteriai skirtingiems gaminiams būna specifiniai. Kadangi testavimo taškų ant gaminio išsidėstymas retai kada būna vienodas.

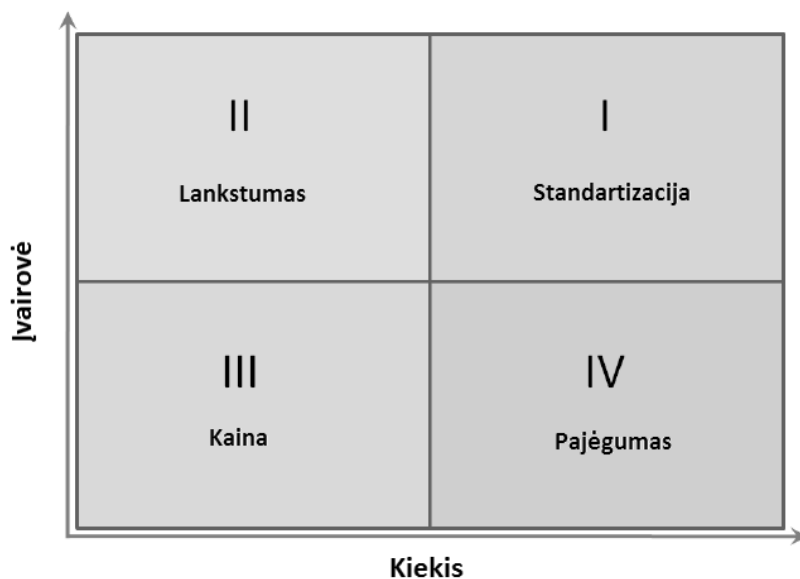


1.2 pav. ATS blokinė schema [1, p. 31]

Universalios ATS dizainą lemiantys, serijinės produkcijos, parametrai yra testuojamų gaminių kiekis ir jų įvairovė. Kadangi testuojami elektronikos gaminiai gali būti įvairios paskirties, tiek galios elektronikos, radijo ryšio, ar mažos suvartojamos galios todėl reikalinga įranga jiems

patikrinti gali būti skirtinga. Atsižvelgiant į testuojamų gaminių strategiją ATS būna skirstomos į keturias dideles kategorijas [2, p. 5], tai standartizacija, lankstumas, kaina ir pajėgumas (1.3 pav.):

- I. **Standartizacija.** Elektronikos gaminių įvairovė, bei serijinės gamybos kiekiai gali būti itin dideli. Sistemos mechaninės, bei programinės įrangos patikimumas aukštas, kad atlaikytų didelius serijinės produkcijos kiekius. Sistema geba testuoti įvairius produktus su minimaliomis modifikacijomis.
- II. **Lankstumas.** Sistema pritaikyta testuoti įvairius elektronikos gaminius. Mažais kaštais galima pritaikyti kitam elektronikos gaminiui testuoti, tačiau dideliems serijinės produkcijos kiekiams ši nepritaikyta.
- III. **Kaina.** Principas panašus į standartizuotą testavimo sistemą, tačiau sistema surinkta ir projektuota taupant kaštus, taip prarandant įrangos mechaninį patikimumą ir matavimo ar stimuliavimo įrangos funkcionalumą.
- IV. **Pajėgumas.** Testavimo sistema optimizuota dideliems serijinės produkcijos gaminių testavimo, bei darbo valandų kiekiams. Šios sistemos būna dedikuotos vienam produktui ar jų šeimai, dažniausiai testuojami keli gaminiai lygiagrečiai. Todėl įrangos modifikavimas kitiems elektronikos gaminiams gali būti brangus.



1.3 pav. ATS skirstymas pagal testuojamų produktų įvairovės ir kiekio santykį [2, p.5]

Testavimo stočiai galima atlikti savipatikros testavimą su tam specialiai skirtu adapteriu. Savipatikros teste tarpusavyje elektriškai sujungiami stoties matavimo ir stimuliavimo įtaisai. Funkcionalumas tikrinamas iš vieno įtaiso į kitą stimuliuojant bei priimant elektrinius signalus. Ši testo forma neatleidžia ATS įrangos nuo kalibravimo, tačiau patikina, kad elektronikos gaminių produkcijos testo metu įtaką rezultatams turi tik testuojami gaminiai [7.p.15].

1.3 SATS sistemos apžvalga

Standartizuota automatizuota testavimo sistema SATS (1.4 pav.) buvo surinkta Kitron kaip FT platforma. Šiuo metu SATS yra 4 kopijos. SATS sistemą palaiko National Instruments PXI modulinė platforma. Į specialų šasi galima dėti skirtingo funkcionalumo modulius su standartinėmis jungtimis [8]. PXI platforma sukurta atlaikyti didelius darbo tempus, dirbant prie 55 C aplinkos temperatūros ar esant apkrautai 24/7 [9]. Todėl SATS sistema priskiriama III „standartizacijos kategorijai. Kur naudojamas patikimas pagrindinis modulis, tačiau stengiamasi sutaupyti išleidžiamus kaštus ant kitos įrangos. Pati SATS stotis padengta įžemintu laidininku, todėl trikdžiai iš aplinkos neturėtų įtakoti prietaisų veikimo. Tai aktualu kadangi gamybinėse ir testavimo patalpose gausu įvairių elektromagnetinių trikdžių, pradedant litavimo mašinomis, įvairiausiais elektronikos gaminių trikdžiais ar elektronikos gaminių gedimo metu sukeltais elektros išlydžiais.



a

b

1.4 pav. SATS. a – SATS iš priekio, b – SATS iš šono be ekranuojančio dangčio

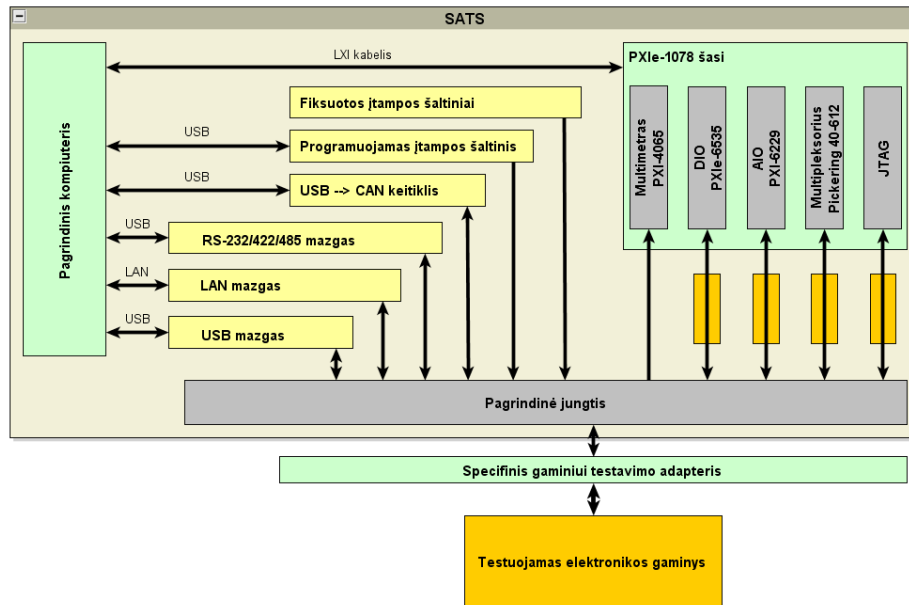
Kaip platforma stotis turi likti universali ir projektams reikėtų tik minimalių pakeitimų, ar papildomų modulių, neskaitant specifinio projektui testavimo adapterio.

Atsirandantys privalumai įdiegus universalią ATS platformą:

- Sumažinamas produkto patekimo į rinką laikas (angl. time to market), dėl sutrumpinamo testo kūrimo laiko;
- Sumažinami inžineriniai kaštai atsirandantys programinę įrangą ruošiant ant skirtingų platformų. Panaudojama sistemoje esanti programinė ir techninė įranga;

- Papildomų galimybių įdiegimas į esamą ATS su minimaliais investiciniais kaštais, kadangi, sistema suderinama su standartiniais industrijoje moduliais;
- Paprastas ATS dubliavimas ir projekto perkėlimas iš esamos ATS į kitą;

Pagrindinis motyvas kurti universalią testavimo sistemą yra kaštų taupymas. Testuojamo gaminio struktūra naudojant SATS pavaizduota 1.5 pav.



1.5 pav. SATS sistemos struktūra [10]

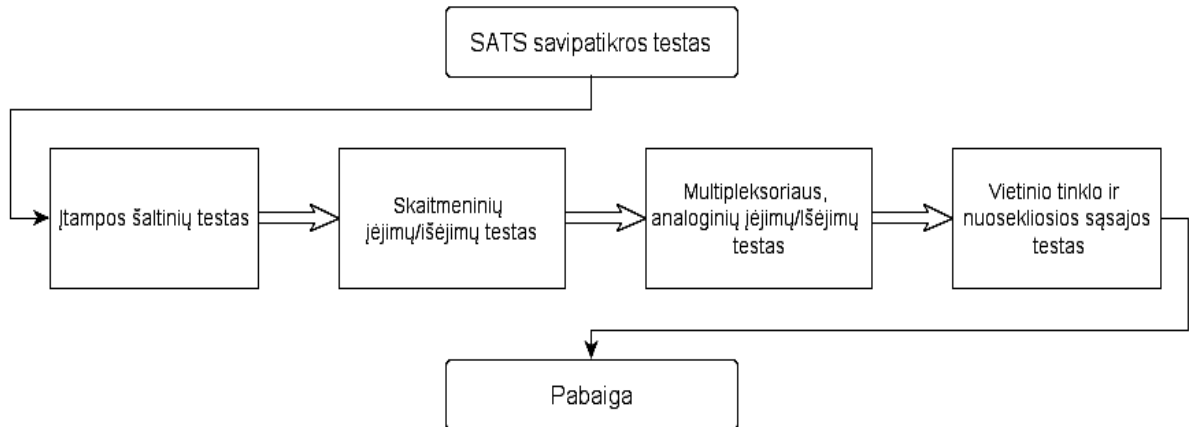
Pagal Kitron testuojamą produkciją surinkta SATS komplektacija spėjama turėtų padengti apie 80% testavimo įrangos kūrimo projektų reikalavimų. Testavimo sistemą sudarantys instrumentai:

- Programuojamas įtampos šaltinis keturi kanalai, 384W;
- Fiksuotos įtampos impulsiniai šaltiniai: 5V, 12V, 24V;
- Nuosekliosios sąsajos: 16 kanalų RS232/485/485;
- Protokolų palaikymas CAN ir LIN;
- 9 modulių PXI šasi:
 - Modulis su 48 skaitmeniniais įėjimais/išėjimais;
 - 6 ½ skaičių skaitmeninis multimetras;
 - Modulis su 4 analoginiais išėjimais ir 32 analoginiais įėjimais;
 - 128 kanalų 300 V multiplexorius;
 - 3 vietinio tinklo kanalai;
 - JTAG modulis skaitmeninės dalies testavimui;

Pačioje PXI šasi dar palikta vietos papildomiems moduliams jeigu testo kūrimo projektui prireiktų funkcionalumo.

1.4 Savipatikros adapterio apžvalga

Testuojant elektronikos gaminius patikrinti SATS stendo funkcionalumą, kuomet testavimo operatoriui kyla abejonių, yra naudojamas savipatikros adapteris. Šis adapteris prijungiamas prie SATS stoties pagrindinės jungties. Jo viduje grįžtamaisiais ryšiais sujungiama įranga, kad ji galėtų pagal 1.6 pav. algoritmą patikrinti savo funkcionalumą.



1.6 pav. Savipatikros testo struktūra

Testas dalinamas į keturias dalis, tikrinant įtampos šaltinių, skaitmeninės dalies, multiplexoriaus, bei analoginių matavimo ir komunikacijų funkcionalumą:

a) Įtampos šaltinių testas:

- Kiekvienam įtampos šaltinio išėjimo kanalui nustatomos 1,5; 2,5; 3,5 ir 4,5V įtampos;
- Su multiplexoriumi komutuojamas skaitmeninis SATS multimetras su maitinimo šaltinio kanalais, tuomet pamatuojamos kiekvieno kanalo įtampos.
- Pamatuojamos 5; 12 ir 24V fiksuotų įtampų šaltinių vertės;
- Tenkinant įtampos vertes – testuojamas kitas žingsnis.

b) Skaitmeninių jėjimų/išėjimų testas:

- Sukonfigūruojami kanalai, kad vieni veiktų kaip generuojantys įtampas, o kiti priimančios. Skaitmeniniai išėjimai generuoja skirtingas bitų sekas ($0xAA$; $0x55$; $0x00$; $0xFF$) iš vienos skaitmeninių išėjimų serijos į kitą priimančiųjų jėjimų seriją.
- Sukonfigūruojami kanalai taip, kad sukeičiami generuojančios ir priimančios kanalų serijos. Loginio „1“ įtampos lygiai paeiliui nustatomi į 2,5V; 3,3V ir 5,0V įtampos lygius ir generuojama ta pati bitų seka.
- Generuojančiųjų ir priimančiųjų kanalų serijoms atitikus bitų sekas testuojamas kitas žingsnis.

- c) Multiplexoriaus, analoginių įėjimų/išėjimų testas:
- Su multiplexoriumi komutuojami analoginiai išėjimai su įėjimais. Išėjimai generuoja 7,5V nuolatinę įtampą. Su analoginiais įėjimais matuojama įtampa komutuojant vis skirtingus multiplexoriaus kelius.
 - Tenkinant įtampos vertes – testuojamas kitas žingsnis.
- d) Vietinio tinklo ir nuosekliosios sąsajos testas:
- Nuosekloji sąsaja tikrinama siunčiant iš vienos sąsajos užklausą ir su kita sąsaja priimant užklausą. Siunčiamos ir priimančiosios užklausoms sutampant testuojamas kitas žingsnis.
 - Siunčiama užklausa tam tikrais IP adresais ir laukiami atsakymai. Atsakymams sutapus su kompiuteryje saugomais – testas išlaikomas.

Savipatikros testas (1.7 pav.) komutuoja prietaisus visais multiplexoriaus elektriniais keliais, taip patikrinant jo funkcionalumą. Sudaromi grįžtamieji ryšiai tarp skaitmeninių ir analoginių įėjimų ir išėjimų. Šis patikrinimas leidžia be didelio vargo patikrinti SATS funkcionalumą.



1.7 pav. SATS savipatikros testo adapteris (kairėje - vaizdas iš priekio, dešinėje - vaizdas iš jungties pusės)

2 PROBLEMŲ HIPOTEZĖS AUTOMATIZUOTAM TESTAVIMUI

SATS testavimo platformai iškeliamos šios problemų hipotezės:

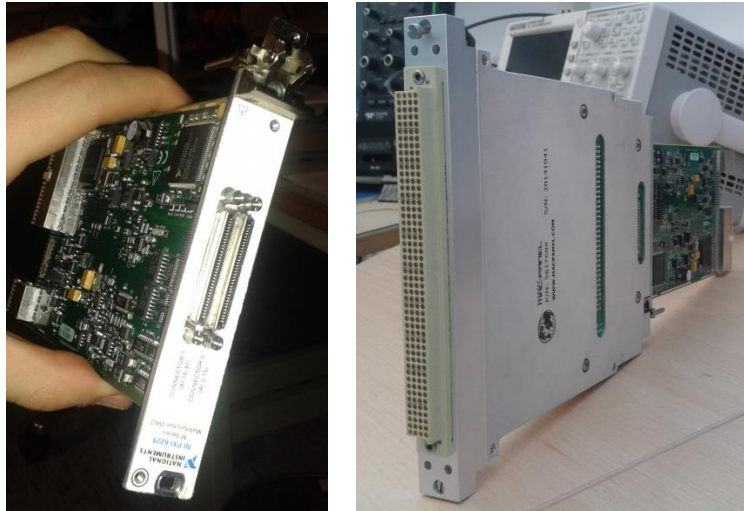
- Kaip iš SATS struktūros matoma (1.5 pav.) sistemą sudaro ne tik plačiai industrijoje naudojami National Instruments prietaisai, bet ir impulsiniai įtampos šaltiniai, nuosekliųjų sąsajų, LAN ir USB mazgai ir kiti įrenginiai. Gali būti, kad šie instrumentai skleidžia elektromagnetinius trukdžius ir jautresniems matavimo prietaisams šie trikdžiai gali interferuoti. Dabartiniai stoties parametrai yra įvertinami pagal matavimų modulių specifikuojamus duomenis. Todėl bus tikrinamos AI ir AO, bei efektyvaus skilčių skaičiaus ar šios charakteristikos lieka nepakitusios sistemos lygiu.
- Dažniausiai elektronikos gaminys testuojamas parenkant „blogiausio scenarijaus“ sąlygas. Todėl gamybos brokas kartais gali elgtis neprognozuojamai, galimi trumpi jungimai ant testuojamo gaminio ar sugedę komponentai. Taip iš analoginių išėjimų pareikalaujant daugiau srovės, nei jis gali išduoti. Viršijus atiduodamą srovę galima pažeisti testavimo stoties signalų generatoriaus modulį. Todėl svarbu, kad analoginių išėjimų apsaugos nuo viršsrovių charakteristikos dažnių srityje prie skirtingų apkrovų būtų ištirtos.
- Dėl didelio kontaktų tankio galimi kondukuoti tarpusavio ryšiai, kurie atitikę kondukuotų tarpusavio ryšių sąlygas gali įtakoti matavimus. Kondukuotų trikdžių tyrimas yra aktualus mažos suvartojamos galios elektronikoms gaminių testavimui, kurie turi dideles įėjimo varžas. Kadangi šie trikdžiai priklauso nuo vieno laidininko impedanso, kuomet greta esančiame laidininke teka AC signalas. Todėl išmatuojami susidarę talpumai tarp kontaktų ir simuliuojant tarpusavio ryšių sąlygas stebimos kondukuotų trikdžių vertės.

Viena iš galimų pasekmių:

- Esant neprognozuojamai veikiančiai testavimo stotiai serijinės produkcijos elektronikos gaminiai gali būti blogai pratestuoti. Tai yra pas klientą išvežami blogai veikiantys gaminiai arba gerai veikiantys gaminiai laikomi broku. Pirmu atveju klientas nepatikrinęs į prekybą gali paleisti brokuotą produkciją, kur galų gale viskas susideda į finansinį nuostolį, bei krenta gaminančios įmonės kokybės indeksas. Antru atveju skaičiuojamos sugaištos inžinerinės darbo valandos ieškant klaidos teisingai veikiančioje plokštėje.

3 TESTAVIMO SISTEMOS TYRIMUOSE NAUDOJAMA ĮRANGA

Siekiant ištirti metrologines charakteristikas susipažįstama su modulio analoginių įėjimų ir išėjimų vidine struktūra. Už analoginių signalų matavimus ir generavimą SATS yra atsakingas daugiavandinis PXI 6229 modulis. Šis modulį sudaro 32 analoginiai įėjimai ir 4 analoginiai išėjimai. Į SATS stotį šis modulis įdedamas pritvirtinus perėjimą, kuris iš mažos modulio jungties paskirsto analoginius įėjimus ir išėjimus po didesnę standartinę jungtį (3.1 pav.). Prie kurios jungiamasi su testuojamo gaminio adapteriu.



3.1 pav. Multifunkcinis duomenų surinkimo prietaisas PXIe-6229

Išmatuoti PXIe-6229 metrologinius parametrus naudojamas signalų generatorius ir voltmetras. Signalų generatorius, kuris gali generuoti 16 skilčių iki 20 MHz dažnio įvairios formos signalus (angl. arbitrary). Kaip voltmetras naudojamas 6½ skaitmenų skaitmeninis multimetras, kurio matavimo diapazonas iki 300 kHz AC efektinės įtampos matavimams. Šiame skyriuje aptariamos paminėtų instrumentų charakteristikos ir daroma įtaka matavimams.

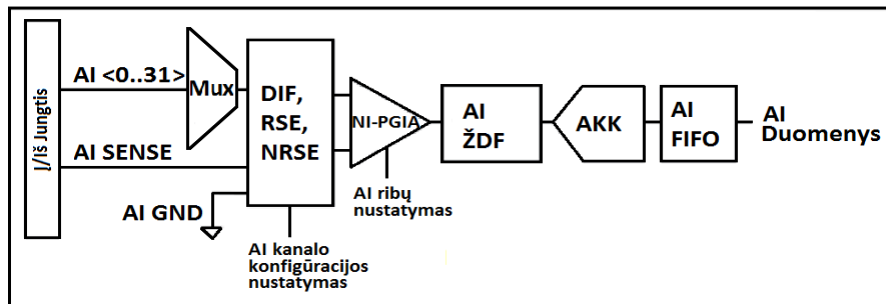
3.1 Analoginių įėjimų struktūra

Daugiavandinis duomenų surinkimo prietaisas PXIe-6229 turi 16 bitų 32 analoginės įtampos nuskaitymo kanalus. Šie skirti įtampos verčių nuskaitymui ± 10 V ribose. AI vidinė struktūra atvaizduota paveiksle 3.2 pav. Struktūrinėje schemoje:

- *I/Iš jungtis* – Kontaktai prisijungti prie AI kanalų;
- *MUX* – Multiplexorius komutuojantis AI kanalus, kadangi duomenų surinkimo prietaisas turi tik vieną AKK. Kanalų nuskaitytos vertės multipleksuojamos laike;
- *AI kanalo konfigūracijos nustatymas* – programiškai nustatomas režimas, kuriuo bus atliekamas matavimas (DIF, RSE ar NRSE). Tyrimo metu bus naudojamas RSE

(matavimo žemės atžvilgiu – AI GND) konfigūracija. DIF – matavimas atliekamas tarp gretimų analoginių įėjimų, NRSE – matavimas atliekamas AI Sense atžvilgiu.

- *NIPGIA* – programuojamas stiprintuvas, kuris stiprina arba slopina įėjimo signalą pagal užduodamas AI matavimo ribas. Tikslas – išnaudoti pilną AKK rezoliuciją;
- *AI ŽDF* – AI žemų dažnių filtras, slopinti aukšto dažnio dedamosios, filtro kirtimo dažnis ties 700 kHz (-3 dB lygis);
- *AKK* – 16 skilčių analogas į kodą keitiklis;
- *AI FIFO* – Buferis kaupiantis ir atiduodantis kompiuteriui nuskaitytus duomenis.



3.2 pav. AI struktūrinė schema [12.psl 47]

NI-PGIA stiprina arba slopina AI signalą priklausomai nuo nustatymų matavimo ribų. Pagal išstatytas ribas yra nustatoma ir AKK matavimo rezoliucija. Todėl 16 skilčių $\pm 5V$ režijų rezoliucija yra apskaičiuojama pagal (1) lygtį.

$$u_r = \frac{(+R) - (-R)}{2^N} \quad (1)$$

,čia u_r – rezoliucija, $(+R)$ ir $(-R)$ matavimo režijų ribos, N – skilčių skaičius.

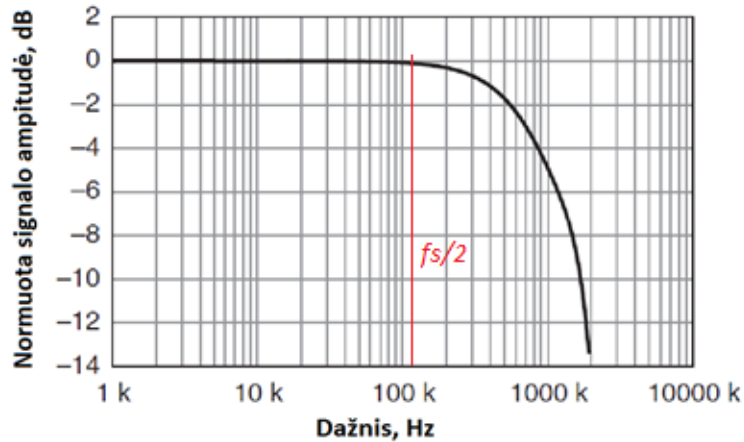
Tačiau prietaisas naudoja specifinį kalibracijos metodą, kuris rezoliucijos laiptelio reikšmę padidina 5% ($152,5\mu V \rightarrow 160\mu V$).

AI diskretizacijos dažnis vieno kanalo nuskaitymui yra 250 kS/s. Pagal modulio specifikuotą AKK perdavimo charakteristiką (3.3 pav.) matoma, kad signalas yra slopinimas -3 dB ties 700 kHz, tai yra ŽDF kirtimo dažnis. Kadangi AKK diskretizavimo dažnis yra žemesnis, nei ŽDF kirtimo dažnis yra pavojus spektro persidengimo efektui. Tuomet šiame dažnių ruože esančios signalų dedamosios bus matomos diskretizuotame signale kaip žemesnio dažnio dedamosios ir sukels papildomus trikdžius. Šios dažnio dedamosios persikels į žemesnius dažnius pagal 2 lygtį.

$$f_1 = f_{diskr} - f_{signalo} \quad (2)$$

,čia f_1 – persikėlusio signalo dažnis, f_{diskr} – diskretizavimo dažnis, $f_{signalo}$ – signalo dažnis.

Spektrų persidengimo efekto galima išvengti papildomai filtruojant apdorojamą signalą iki $f_s/2$.



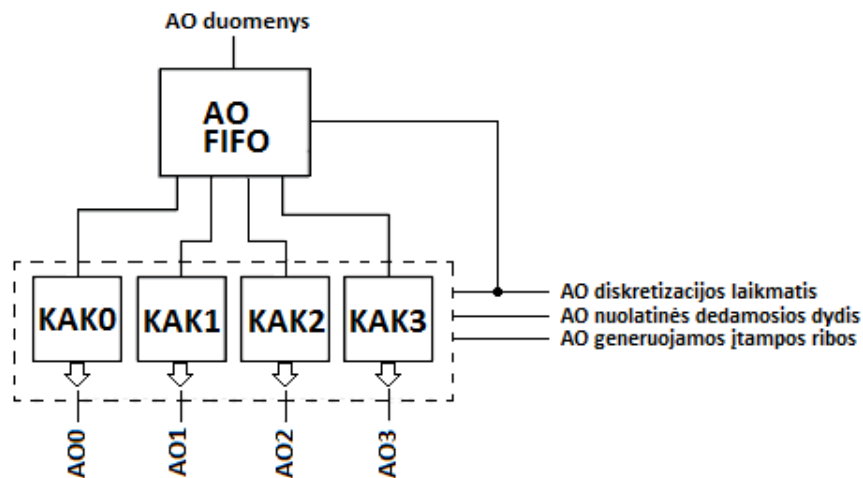
3.3 pav. AI dažninė charakteristika [11.psl 2], $f_s/2$ – pusė diskretizacijos dažnio

Kiekvieno AI įėjimo impedansas siekia $>10\text{ G}\Omega$, šis šuntuojamas 100 pF talpumu. Toks įėjimo impedansas turi didelę įtaką kondukuotiems ryšiams tarp laidininkų, kuomet AI nėra apkrautas.

Šio AKK absoliutinė tikslumo paklaida (žr. Priedas 1. AI absoliutinio tikslumo lentelė) $\pm 5\text{ V}$ režiuose pateikiama $\pm 1,62\text{ mV}$ matuojant pilnos skalės amplitudės dydį. Priede taip pat pateikiami koeficientai ir formulė tikslumo paklaidos skaičiavimui.

3.2 Analoginių išėjimų struktūra

Daugiafunkcinis duomenų surinkimo prietaisas PXIe-6229 turi 4 kodas į analogą 16 skilčių keitiklius, kurie gali generuoti tiek periodinius, tiek neperiodinius signalus. Specifikuojamas diskretizacijos dažnis siekia 833 kS/s vienam išėjimo kanalui. Generuojamo signalo amplitudė gali būti iki $\pm 10\text{ V}$. Išėjimo impedansas $0,2\ \Omega$, bei maksimali išduodama signalo srovė $\pm 5\text{ mA}$. AO vidinė struktūra atvaizduota 3.4 pav.



3.4 pav. AO struktūrinė schema [12.psl 85]

Struktūrinėje schemoje:

- *KAK* – keičia skaitmeninį į kodą į analoginę įtampos vertę;
- *AO FIFO* – buferis, kuris laiko iš kompiuterio perduotus duomenis ir juo perduoda į *KAK* keitiklius;
- *AO diskretizacijos laikmatis* – dydis apsprendžiantis diskretizacijos dažnį;
- *AO nuolatinės dedamosios dydis* – į signalą įvedama nuolatinės dedamosios vertė;
- *AO generuojamos įtampo ribos* – režiai kuriuose generuojama įtampa.

Kadangi modulis keturi *KAK* keitiklius, todėl gali būti, kad keitiklių charakteristikos skirsis viena nuo kitos. Taip pat pagal *AO* struktūrą matome, kad *KAK* neturi išėjimo filtro, kuris glotintų signalą. Todėl išėjimo signalo spektre gali atsirasti papildomų harmonikų. Šio *KAK* generuojamos įtampos absoliutinė tikslumo paklaida (žr. Priedas 2. *AO* absoliutinio tikslumo lentelė) ± 10 V režiuose pateikiama $\pm 3,23$ mV generuojant pilnos skalės amplitudės dydį. Priede taip pat pateikiami koeficientai ir formulė tikslumo paklaidos skaičiavimui.

3.3 Skaitmeninis multimetras

Išorinis matavimo prietaisas *Fluke 8846A* 6,5 skaitmenų skaitmeninis multimetras (3.5 pav.). Tyrimo metu bus matuojamos AC efektinės įtampų vertės dažnių diapazone 500 Hz – 100 kHz. Prietaiso specifikacijoje pateikiamos kintančios srovės įtampai matuoti charakteristikos [13]:

- Rezoliucija $10 \mu\text{V}$ [± 10 V režiuose];
- Dažnių juosta $3 \text{ Hz} - 300 \text{ kHz}$;
- Įėjimo impedansas $1 \text{ M}\Omega$, šuntuojamas 100 pF talpumu;



3.5 pav. Fluke 8846A skaitmeninis multimetras [13]

Absoliutinis tikslumas paskaičiuojamas pagal prietaiso specifikacijoje esančiais duomenimis [13.p.4]. pagal jas AC signalo maksimalios amplitudės absoliutus tikslumas 10 V režiuose. Siekia ± 9 mV (10 Hz-20 kHz), ± 17 mV (20 kHz-50 kHz), ± 68 mV (50 kHz-100 kHz). Kadangi rezultatai bus lyginami tarpusavyje, todėl atsižvelgiama į matavimų standartinius nuokrypius.

Skaitmeninis multimetras su 10 μV rezoliucija ir 300 kHz dažnių juosta yra tinkamas pagal jį lyginti analoginių matavimų modulio parametrus, kurių AI rezoliucija siekia 160 μV , o AO rezoliucija – 305 μV iki 100 kHz dažnio.

3.4 Signalų generatorius

Programuojamas signalų generatorius *Keysight Technologies 33511B* (3.6 pav.). Signalų generatorius suderinamas su Matlab ir kitais programiniais paketais (Excel), kurių duomenis galima perduoti ir generuoti naudojant šį signalų generatorių. Prietaiso specifikacijoje pateikiami harmoninių signalų generavimo parametrai [14]:

- Dažnio rezoliucija 1 μHz iki 20 MHz juostoje;
- Amplitudės rezoliucija 16 skilčių, 160 MSa/s;
- Išėjimo impedansas 50 Ω ;



3.6 pav. Keysight 33511B signalų generatorius [14]

Generuojamo signalo tikslumo neapibrėžtys pateikiamos 3.1 lentelėje.

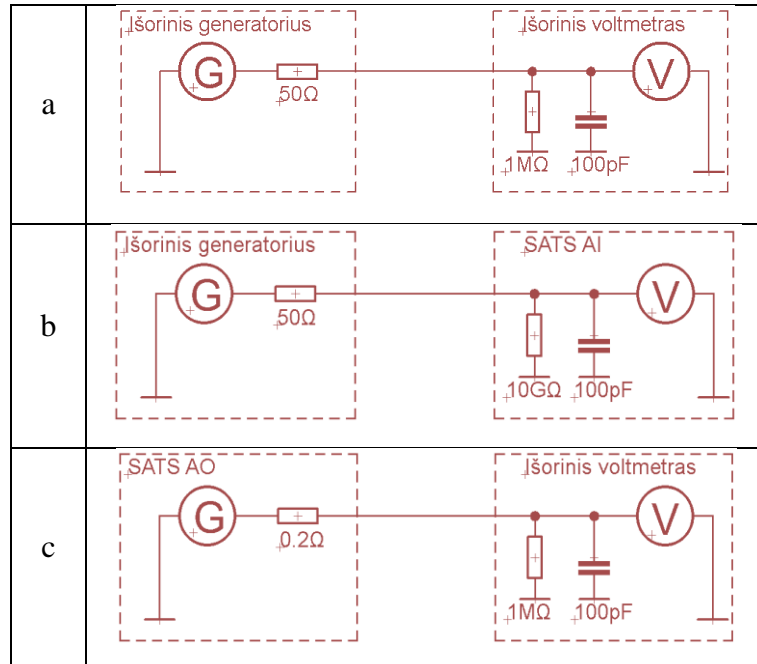
3.1 lentelė. Generatoriaus 33511B generuojamo signalo neapibrėžtys [14.p.14]

	Dažnis	Neapibrėžtis
Netiesiniai iškraipymai	<20kHz	-70dBc
	20kHz - 100kHz	-65dBc
Amplitudės svyravimai	<100kHz	± 0.10 dB

3.5 Matavimo prietaisų įnešama įtaka matavimams

Tyrimo metu įranga jungiama viena su kita ir įėjimo su išėjimo impedansais gali sudaryti įtampos daliklius, kurie gali įtakoti matavimo rezultatus. Pagal lentelę 3.2 matome tris galimas jungimo schemas. Atveju a – jungiamas išorinis generatorius su išoriniu voltmetru, b – kuomet išorinis generatorius jungiamas prie analoginio įėjimo ir c - analoginis išėjimas jungiamas su išoriniu voltmetru.

3.2 lentelė. Prietaisų galimos jungimo schemas



Apskaičiuoti įtampos daliklių reikšmėms 500 Hz – 100 kHz dažnių diapazone naudojamos (3)(4)(5 lygtys. Lygtis (3) įvertina analoginio įėjimo arba išorinio voltmetro talpumo sudaromą impedansą. Lygtis 4 įvertina sudaromą įėjimo impedanso daliklį su talpumo impedansu ir lygtis 5 įvertina daliklio įtaką matavimams.

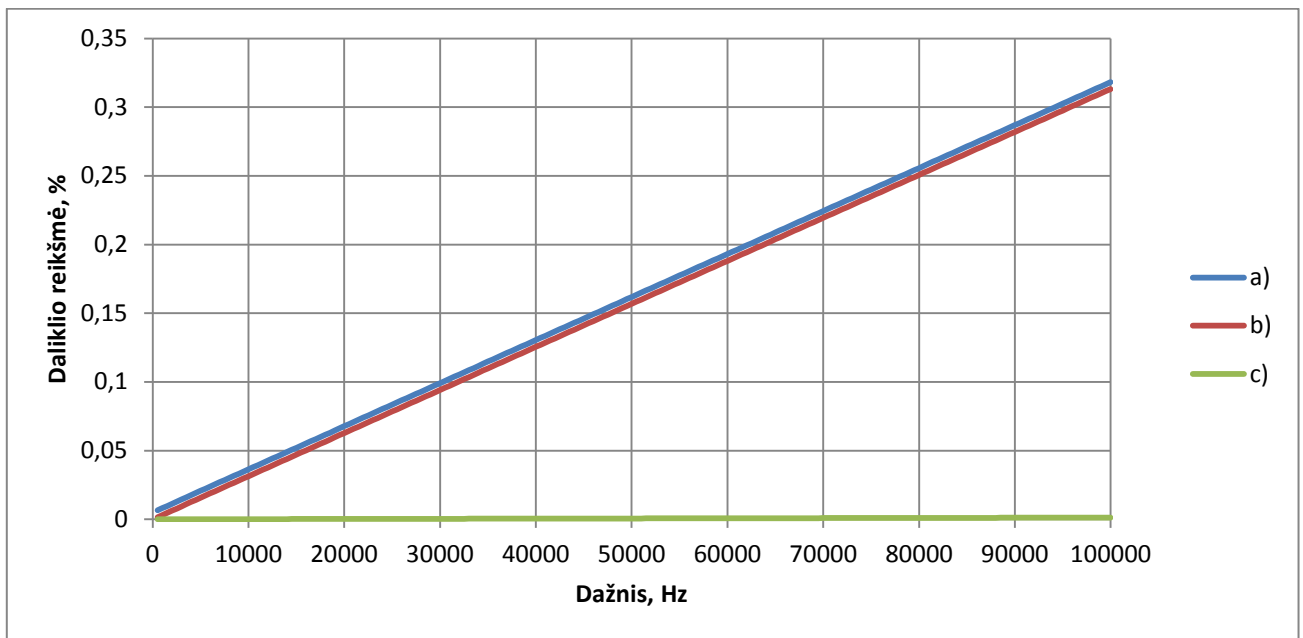
$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (3)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (5)$$

čia Z_c – talpumo impedansas, ω – signalo dažnis ($2\pi f$), C – įėjimo talpumas, R_1 – išorinio generatoriaus arba AO išėjimo impedansas, R_2 – matuojančio prietaiso įėjimo impedansas, V_{in} – generatoriaus įtampos lygis, V_{out} – matuojamas dydis po įtampos daliklio.

Apskaičiuotos įtampos daliklių reikšmės pateiktos 3.7 pav.



3.7 pav. Įtampos daliklių įtaka matavimams

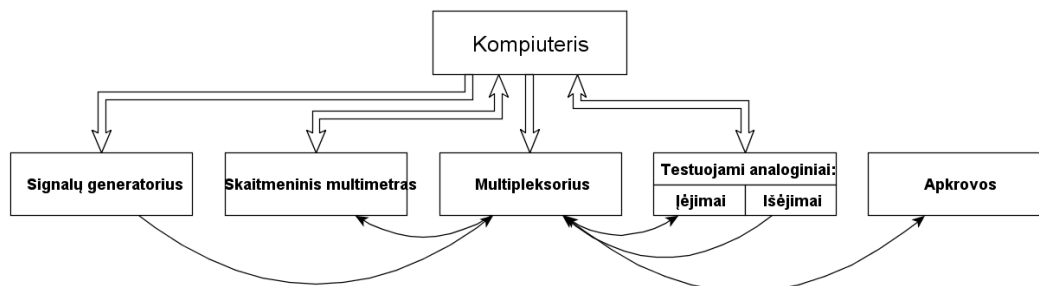
Atvejais a) ir b) amplitudė dažniui kylant mažėja iki 0,32 %, todėl į šią įtaką reikėtų atsižvelgti. Atveju c) daliklio įtaka matavimams ties 100 kHz yra mažesnė nei 0,001 %, dėl mažos įtakos matavimams ši įtaka nėra įtraukiama į skaičiavimus.

4 TESTAVIMO SISTEMOS TYRIMŲ METODIKA

Šiame skyriuje aptariamos SATS dinaminių metrologinių tyrimų struktūrinės schemos ir metodika. AI ir AO tiriamasis dažnių ruožas $500\text{ Hz} - 100\text{ kHz}$. Tiriamos AI ir AO dažninės charakteristikos, AO generuojamos srovės apsaugos dažninės charakteristikos, bei efektyvaus bitų skaičiaus ir kondukuotų trikdžių tyrimų modeliai. Skyriaus gale reziumuojami metodikoje keliami uždaviniai ir apibrėžiami ATS ribiniai parametrai.

4.1 Testavimo platformos bendra tyrimo metodika

Atliekant tyrimus naudojamos dvi įrangos jungimo schemos. Viena jų (4.1 pav.) kuomet naudojamas pagrindinis kompiuteris valdyti PXI šasi, kurioje yra multipleksorius, bei tiriamųjų analoginių įėjimų ir išėjimų modulis, bei signalų generatoriaus ir multimetro instrumentus. AI ir AO kanalų tyrimams signalų komutavimui naudojamas SATS esantis multipleksorius. Prie multipleksoriaus kontaktų prijungiama stimuliavimo ir matavimo įranga, testuojami kanalai ir apkrovos. Tyrimo programos algoritmas AI ir AO charakteristikoms tirti prisegtas prieduose (Priedas 4. AO ir AI tyrimų programos algoritmas).



4.1 pav. Blokinė AI ir AO tyrimo schema

Išorinis generatorius generuoja sinuso formos signalą. Signalų dažnis keliamas 500 Hz žingsniu iki 100 kHz . Prietaiso AI matavimo režiai nustatomi į $\pm 5\text{ V}$, kanalo konfigūracija nustatoma į matavimą žemės atžvilgiu (RSE). Išorinis voltmetras matuoja generatoriaus išduodamą įtampą. Užtikrinant įrangos stabilų darbą ir tyrimo pakartojamumą laikomasi šių reikalavimų:

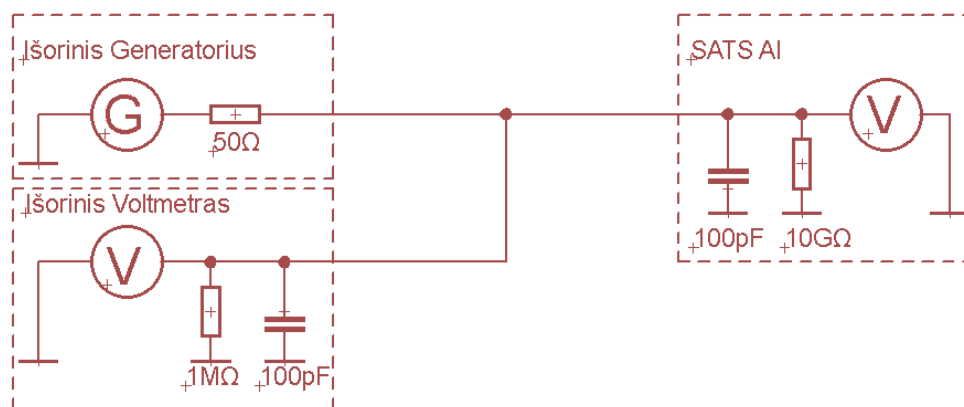
- Įjungžiama įranga ir palaukiama 1 valanda, kol įranga sušils;
- Laidai nuo generatoriaus ir voltmetro iki multipleksoriaus ar SATS pagrindinės jungties parenkami kuo trumpesni ($< 15\text{ cm}$);
- Kiekviena reikšmė matuojama po 5 kartus ir išvedamas tos reikšmės vidurkis;
- Dažnis keičiamas kas 500 Hz iki 100 kHz ir kiekvieno dažnio signalą su voltmetru matuojama vidutinė kvadratinė įtampos reikšmė;

- AI diskretizavimo dažnis parenkamas kuo arčiau maksimumo 251001 Hz
- AI išsaugo kiekvieno dažnio signalo 0.6 s trukmės duomenis ir iš jų išskaičiuojama vidutinė kvadratinė įtampos reikšmė;
- AO diskretizavimo dažnis parenkamas 451001 Hz (tai aukščiausias dažnis pavykęs išgauti su SATS platforma.

Laikantis procedūros ir aprašytos tyrimų metodikos turėtų būti gaunami tokie patys arba panašūs rezultatai gauti šiame darbe.

4.2 Testavimo stoties analoginių įėjimų dažninės charakteristikos

Analoginių matavimų modulio specifikacijoje [11] nėra tiksliai aprašyti leistini AKK amplitudės svyravimai, bei charakteristikos. Dažninėje charakteristikoje parodyta, kad signalas po truputį pradeda slopti nuo 100 kHz dažnio. Atsižvelgiant į tai atliekamas testavimo stoties analoginių įėjimų AKK keitiklio dažninės charakteristikos tyrimas. Nutariama, kad šios dažninės charakteristikos svyravimai tiesinėje dalyje negali viršyti $\pm 0,1$ dB. Analizuojama AI kanalų dažnines charakteristikas įranga sujungiama pagal 4.2 pav. esančią struktūrinę schemą.



4.2 pav. AI kanalų dažninės amplitudės charakteristikos tyrimo struktūrinė schema

Struktūrinėje schemeje išorinis voltmetras prijungiamas matuoti generatoriaus generuojamą įtampą, siekiant žinoti realias generatoriaus išduodamas įtampas. Tai gali būti reikšmingas pokytis tyrimų rezultatams. Analoginiu įėjimu nuskaičius signalą yra gaunamas duomenų masyvas. Iš šio masyvo skaičiuojama vidutinė kvadratinė reikšmė – efektinė įtampos vertė pagal (6 lygtį.

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}} \quad (6)$$

,čia U_{ef} – efektinė įtampos vertė, U – diskretizuoto signalo atskaitos vertė, N – matavimų kiekis

Kadangi prietaisas turi tik vieną AKK, tai apskaičiavus 32 kanalų dažninių charakteristikų vidurkį galima gauti realią AKK charakteristiką. Pagal lygtį (7) gaunama AKK charakteristika. Vidurkinamos AI efektinės įtampos vertės ir dalinamos iš išorinio voltmetro išmatuotų reikšmių vidurkio. Šis santykis perskaičiuojamas logaritminėje skalėje.

$$U_{AKK}(f) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{AI}(f)_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{GEN}(f)_i} \right) \quad (7)$$

,čia U_{AKK} – gauta AKK charakteristika, U_{GEN} – su išoriniu voltmetru išmatuota įtampos vertė, U_{AI} – analoginiu jėjimu išmatuota įtampos vertė, N – signalų matavimų kiekis.

Standartinis nuokrypis dažnio dedamajai nuo vidurkio apskaičiuojamas pagal (8) lygtį:

$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i(f) - \mu(f))^2}{N}} \quad (8)$$

,čia σ – standartinis nuokrypis nuo vidurkio, u_i – išmatuota signalo vertė, μ - signalo verčių vidurkis. Analizuojant dažnines charakteristikas taip pat apskaičiuojamos kiekvieno kanalo ir standartiniai nuokrypiai nuo vidurkio. Šio tyrimo tikslas identifikuoti pačią AI kanalų AKK charakteristiką ir patikrinti ar yra trikdoma ši charakteristika.

4.3 Testavimo stoties analoginių išėjimų dažninės charakteristikos

Analoginiai išėjimai naudojami tiek harmoninių, tiek kintamos signalų formos ar nuolatinės dedamosios signalų formavimui. Testavimo metu analoginiai išėjimai dažnai atlieka elektromechaninių relių valdymo, signalų generavimo - filtrų testavimui, bei panašioms užduotims vykdyti. SATS AO [0..3] signalų generatorių dažninės charakteristikos tiriamos pagal 4.3 pav. struktūrinę schemą. Kaip bebūtų keista, tačiau AO dažninės charakteristikos modulio gamintojo dokumentacijoje nepateikiamos. Vienas iš pateikiamų parametų, tai maksimalus diskretizavimo dažnis, kuris vienam kanalui gali būti 833 kSa/s, bei mažėja, jei naudojami keli išėjimo kanalai.



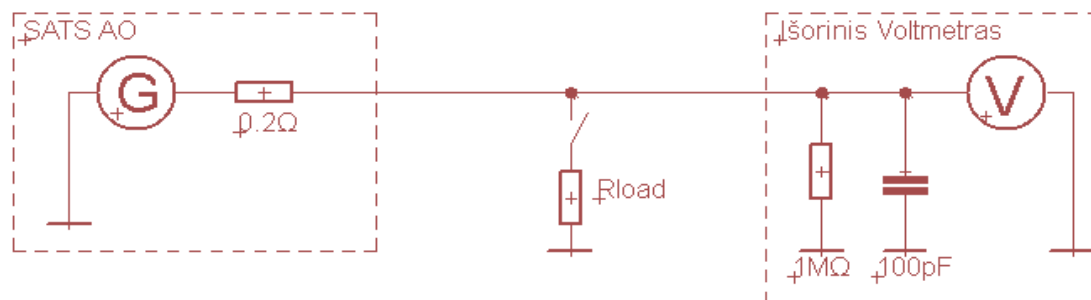
4.3 pav. AO kanalų dažninės amplitudės charakteristikos tyrimo struktūrinė schema

Kadangi analoginius išėjimus sudaro skirtingi KAK, todėl gali būti, kad jų dažninės charakteristikos yra skirtingos. Tai yra nukrypusios viena nuo kitos per tam tikrą įtampos vertę. Svarbu žinoti koks nuokrypis tarp kanalų vis dar toleruojamas. Tuomet apibrėžiamas toleruotinas nuokrypis tarp generuojamų AO charakteristikų. Toks nuokrypis galėtų būti pusė jauniausio baito dydžio. Kadangi esant tokiam nuokrypiui kanalų reikšmės nesiskirtų 1 jauniausio baito reikšme. Tuomet 16 skilčių, ± 10 V režiuose reikšmė 0,152 mV bus lygi pusei pagal (1 lygtį apskaičiuotos reikšmės. Su kiekvienu KAK paeiliui generuojamas sinuso formos signalas. Išorinis voltmetras matuoja generuojamą efektingą įtampos vertes. Surinkus kiekvieno AO dažninių charakteristikų duomenis, kiekvieno AO išmatuotos reikšmės vidurkinamos. Taip gaunant kiekvieno KAK charakteristikas. Kiekvieno kanalo standartinis nuokrypis nuo vidurkio taip pat privalo būti įvertinamas (lygtis (8)). Šis apskaičiuojamas ištraukus kvadratinę šaknį iš nuokrypių nuo vidurkio kvadratų sumos, bei įvertinama Stjudento pataisa.

Įvertinant kiekvieno analoginio išėjimo nuokrypį nuo vienas kito, imamas šių kanalų vidurkis ir jo atžvilgiu sulyginamos AO kanalų generuojamos vertės.

4.4 Testavimo stoties analoginio išėjimo srovės apsauga

Testuojant elektronikos gaminius gali pasitaikyti momentų kuomet testuojamo gaminio komponentas gali sugesti ir šis sudaro trumpą jungimą žemės atžvilgiu. Dažnai testavimo sistemose analoginio išėjimo kanalas nėra tiesiogiai jungiamas su gaminiu, tai yra atliekama panaudojant reles, opto-poras arba tranzistorius. Tačiau gali būti, kad šios apsaugos nėra. Tuomet jei testą pasiekia blogai veikiantis elektronikos gaminys iš generuojančio kanalo pareikalaujant daugiau srovės nei įprastai. Įrenginio dokumentacijoje parašyta, kad generatoriaus kanalas gali išduoti iki ± 5 mA srovės [11.p.3]. Tačiau, šis dydis apibrėžiamas tik nuolatinės srovės signalams. Todėl svarbu išsiaiškinti kaip elgiasi AO prie skirtingų apkrovų ir koks šios charakteristikos teisiškumas dažnių srityje. Struktūrinė tyrimo schema atvaizduota 4.4 pav.



4.4 pav. AO kanalų viršsrovio apsaugos tyrimo struktūrinė schema

SATS generuojantis kanalas prijungiamas prie išorinio voltmetro, kuris matuoja efektinę įtampos vertę. AO apkraunamas (R_{load}) pasirinktomis 5 mA , 7 mA , 10 mA , 18 mA ir 350 mA apkrovomis. Generuojamas AC signalas nuo 500 Hz iki 100 kHz dažnių ruože. Išmatuotos signalo vertės lyginamos su išmatuota AO dažnine charakteristika (lygtis (9)).

$$U_{R,dB}(f) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_R(f)}{U_{KAK}(f)} \right) \quad (9)$$

, čia $U_{R,dB}$ – įtampos lygis decibelais apkrovus AO kanalą, U_R – išmatuotas efektinės įtampos lygis apkrovus AO kanalą, U_{KAK} – kodas į analogą keitiklio įtampos vertė.

Pagal šią išmatuotą charakteristiką galima matyti ties kokia apkrova srovės apsauga yra efektyvi. Efektyvia apsauga laikysime kuomet slopinamos įtampos lygis pasiekia -3 dB lygį nuo neapkrauto analoginio išėjimo signalo lygio.

4.5 Matavimo kanalų tarpusavio ryšiai

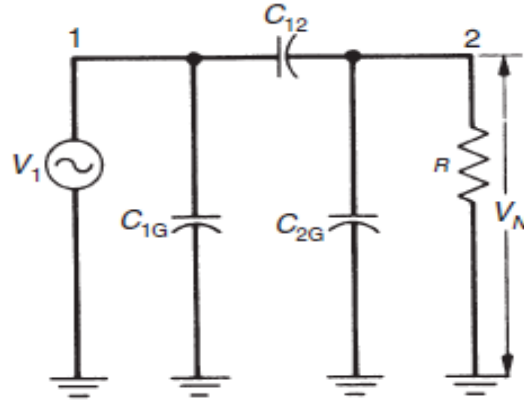
Bet kokie laidininkai, kurių laidai ar takeliai yra vienas šalia kito turi tam tikro dydžio kondukuotus tarpusavio ryšius. Šis didėja mažinant atstumą tarp laidininkų. Todėl testavimo stotyje dėl didelio kontaktų tankio galimi tarpusavio ryšiai (4.5 pav.).



4.5 pav. SATS analoginių matavimų ir multiplexeri jungtyss

Atsiradę trikdžiai gali įtakoti matuojamų dydžių vertes, ar jautraus prijungto elektrinio grandyno funkcionalumą (logikos, tranzistoriai). Paveiksle (4.6 pav.) skaičiais „1“ ir „2“ yra pažymėti tiriamieji laidininkai Ekvivalentinėje kondukuotų trikdžių schemoje didžiausią įtaką turi

C_{12} (talpumas tarp laidininkų) ir C_{2G} (laidininko 2 talpumas žemės atžvilgiu) talpumai. Laidininku 1 teka tam tikro dažnio AC signalas, o laidininkas 2 yra apkrautas impedansu R . Talpumas C_{1G} (laidininko 1 talpumas žemės atžvilgiu) tarpusavio ryšiams įtakos neturi. Impedansas R gali būti apkrova arba prie laidininko prijungto grandyno impedansas.



4.6 pav. Kondukuotų trikdžių ekvivalentinė schema [15.psl 45]

Teoriškai nagrinėjant kondukuotus tarpusavio ryšius galima trikdžių amplitudės skaičiavimus skirti į dvi dalis. Laikomasi pirmosios dalies kuomet tenkinama **(10)** lygties sąlyga. Kuomet esantis impedansas R ant laidininko 2 yra daug mažesnis, nei C_{12} ir C_{2G} sudaromas impedansas.

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})} \quad (10)$$

,čia ω –laidininko 1 signalo dažnis ($\omega = 2\pi f$)

Tuomet kondukuotų trikdžių amplitudės dydis aiškinamas **(11)** lygtimi. Pastebima, kad trikdžių dydis apsprendžiamas laidininko 1 signalo dažnio (ω) ir amplitudės dydžiu (V_1), susidariusiu talpumu tarp pačių laidininkų (C_{12}), bei impedanso verte (R) esančio prie laidininkas 2. Didėjant bet kuriai iš šių kintamųjų verčių tuo pačiu kyla ir kondukuotų trikdžių amplitudė laidininke 2.

$$V_N = j\omega RC_{12} V_1 \quad (11)$$

,čia V_N – kondukuotų trikdžių amplitudės dydis.

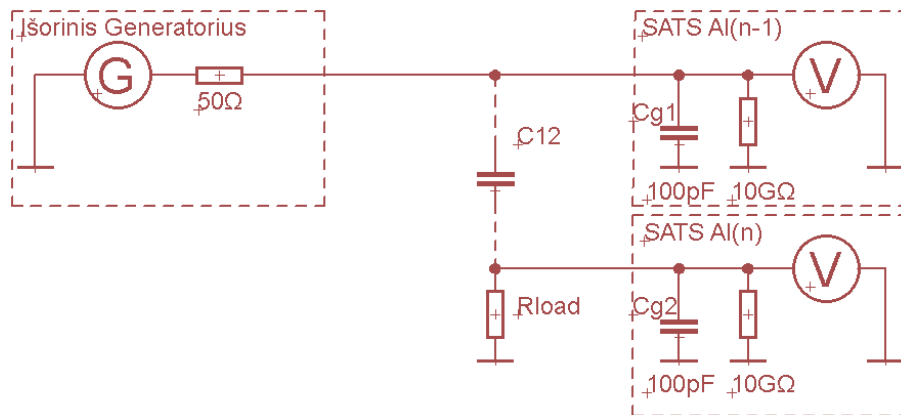
Ties signalo dažniu, kuomet **(10)** lygties sąlyga nebetenkinama, tai yra impedanso R vertė didėja bendro C_{12} ir C_{2G} talpumų impedanso atžvilgiu. Arba numatant tiksliau šį kirtimo dažnį pagal **12** lygtį. Tuomet kondukuotų trikdžių dydis apsprendžiamas pagal lygtį **(13)**.

$$\omega = \frac{1}{R \cdot (C_{12} + C_{2G})} \quad (12)$$

Dažnis ties, kuriuo keičiasi kondukuotų trikdžių pobūdis priklauso nuo impedanso R, bei įtaką darančių talpumų reikšmių. Kylant bent vienai iš šių verčių dažnis, ties kuriuo keičiasi trikdžių pobūdis, mažėja.

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right) \cdot V_1 \quad (13)$$

Pastebima, kad kondukuotų trikdžių amplitudės reikšmė tiesiogiai nepriklauso nuo dažnio. Teoriškai aprašytos formulės turėtų parodyti kokių rezultatų galima tikėtis tarp laidininkų. Tačiau keičiantis dažniui keičiasi ir talpumo reikšmės, kadangi pradeda reikštis parazitiniai laidininko ar elektrinio grandyno talpumai. Todėl teoriškai apskaičiuotos reikšmės gali skirtis nuo gautų išmatavus. Tyrimas atliekamas pagal 4.7 pav. esančią struktūrinę schemą, siekiant įvertinti tarpusavio ryšius tarp laidininkų.



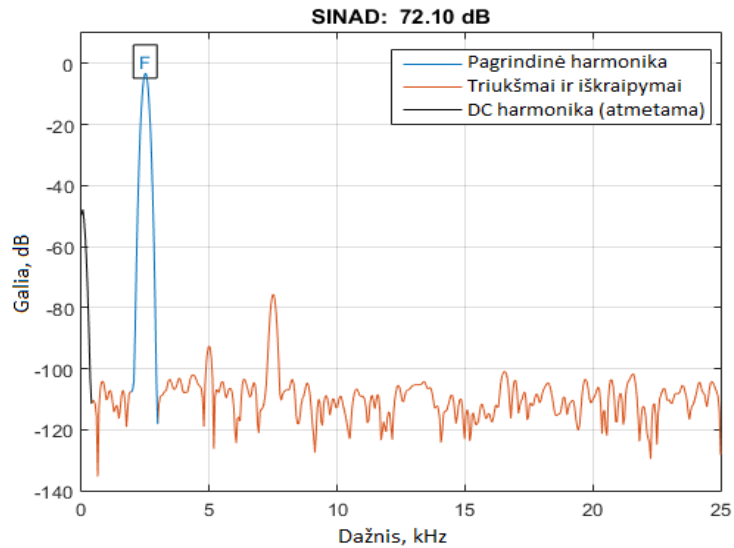
4.7 pav. Tarpusavio ryšių tyrimo struktūrinė schema

Išorinio generatoriaus išduodamas sinuso formos (500 Hz iki 100 kHz) signalas į vieną iš SATS AI kanalų (AI(n-1)). Prie kito AI(n) kanalo keičiamos apkrovos vertės. Signalų duomenys nuskaitomi abiem kanalais. Taip įvertinant kondukuotų trikdžių dydį nuo laidininko 2 apkrovos. Taip pat atliekamas tyrimas kuomet stebimi kondukuoti trikdžiai matuojant su vis toliau esančiais AI kanalais. Gauti rezultatai palyginami su AI(n-1) išmatuota verte.

4.6 Testavimo sistemos efektyvus skilčių skaičius

Prietaiso dinaminės metrologinės charakteristikos gali būti įvertinamos signalas/triukšmas ir iškraipymai (SINAD) santykiu, bei efektyviu skilčių skaičiumi (ESS). Šie dydžiai apskaičiuojami analizuojant signalo spektrą. SINAD apskaičiuojamas pagal efektinės signalo įtampos santykį su

sumine spektro dedamųjų efektine verte, įskaitant ir harmonikas [20]. Tai reiškia, kad įvertinami ne tik harmoniniai, bei atsitiktinio pobūdžio trikdžiai, bet ir intermoduliaciniai iškreipimai, bei elektromagnetiniai trikdžiai. Paveiksle 4.8 pav. pažymėtos signalo dalys, kurios naudojamos skaičiuojant SINAD. Paveiksle parodyta, kad į skaičiavimus nėra įtraukiama nuolatinė dedamoji.



4.8 pav. SINAD skaičiavimo elementai: pagrindinė harmonika ir triukšmai + iškreipimai [17]

SINAD apskaičiuojamas pagal (14) lygtį.

$$SINAD = 20 * \log_{10} \left(\frac{V_s}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |V_n|^2}} \right) \quad (14)$$

,čia N – spektrinių atskaitų kiekis, n – spektrinės atskaitos numeris, V_n – spektrinės atskaitos įtampos vertė, V_s - signalo efektinė įtampa.

SINAD yra geras bendrų dinaminųjų AKK charakteristikų indikatorius, kadangi įtraukiami visi komponentai, kurie gali įtakoti matavimus. Skaičiavimai atliekami iki pusės diskretizavimo dažnio. SINAD dažnai išreiškiamas efektyviu skilčių skaičiumi ESS. Šis apskaičiuojamas pagal (15) lygtį.

$$ESS = \frac{SINAD - 1,76}{6,02} \quad (15)$$

,čia ESS – efektyvus skilčių skaičius, SINAD – santykis signalas su triukšmu ir iškreipimais.

Lygtis (15) taikoma su sąlyga, kad signalo amplitudė yra maksimali matavimo režimuose. Jei signalo vertė mažesnė, tuomet triukšmų lygis kyla ir ESS mažėja. Todėl reikia pridėti korekcijos faktorių, kuris įvertina, kad amplitudė nėra maksimali matavimo režimuose. Korekcija normuoja ESS vertę pagal pilnos skalės vertę. Tuomet ESS apskaičiuojamas pagal (16) lygtį.

$$ESS = \frac{SINAD - 1,76 + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_r}{V_s} \right)}{6,02} \quad (16)$$

,čia V_r – matavimų režimų maksimali amplitudė, V_s – signalo maksimali amplitudė.

Analizei signalų duomenys panaudojami iš SATS AI dažninių charakteristikų tyrimo nuskaitytų signalų verčių. ESS analizė turi būti atliekama skirtingo dažnio signalams, kad išsiaiškinti esančio AKK charakteristikas sistemos lygyje.

4.7 Apibendrintos užduotys testavimo stotiai

Iš tyrimų metodikos automatizuotos testavimo stoties analizei keliamos šios uždaviniai:

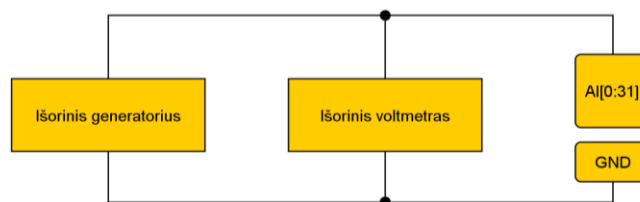
- Eksperimentiškai ištirti testavimo stoties analoginių įėjimų dažninės charakteristikos;
- Apsprendžiame, kad išmatuota AI dažninė charakteristika negali viršyti $\pm 0,1$ dB nuokrypio;
- Eksperimentiškai ištirti analoginių išėjimų dažnines charakteristikas, kadangi šios nežinomos;
- Apsprendžiama, kad skirtingų analoginių išėjimų generuojamos efektinės įtampos lygis negali viršyti 0,152 mV (esant 16 skilčių keitikliui, ± 10 V režiuose);
- Eksperimentiškai ištirti analoginių išėjimų srovės apsaugos charakteristikas;
- Apsprendžiama, kad srovės apsaugos slopinimas skaitomas efektyviu nuo -3 dB lygio;
- Eksperimentiškai ištirti kondukuotų tarpusavio ryšių įtaką nuo apkrovos laidininke;
- Eksperimentiškai ištirti kondukuotų tarpusavio ryšių įtaką tolstant nuo signalo šaltinio;
- Sistemos lygio AKK įvertinimas naudojant efektyvų skilčių skaičių.

5 TESTAVIMO SISTEMOS TYRIMŲ REZULTATAI

Šiame skyriuje pateikiami dinaminių metrologinių charakteristikų tyrimų rezultatai. Pradedant analoginių įėjimų ir išėjimų charakteristikų matavimais, bei jų nuokrypių tyrimu. Taip pat keitiklio atiduodamos srovės apsaugos charakteristikas. Įvertinami tarpusavio talpumo ryšių daroma įtaka gretimiems kanalams. Bei efektyvaus skilčių skaičiaus tyrimas, kuris parodo sistemoje esančio analogas kodas keitiklio efektyvumą. Skyriaus gale aptariami rezultatai, sudaroma rekomenduojamų matavimų SATS platformai sąrašas, kuriuos ji galėtų patikimai tikrinti.

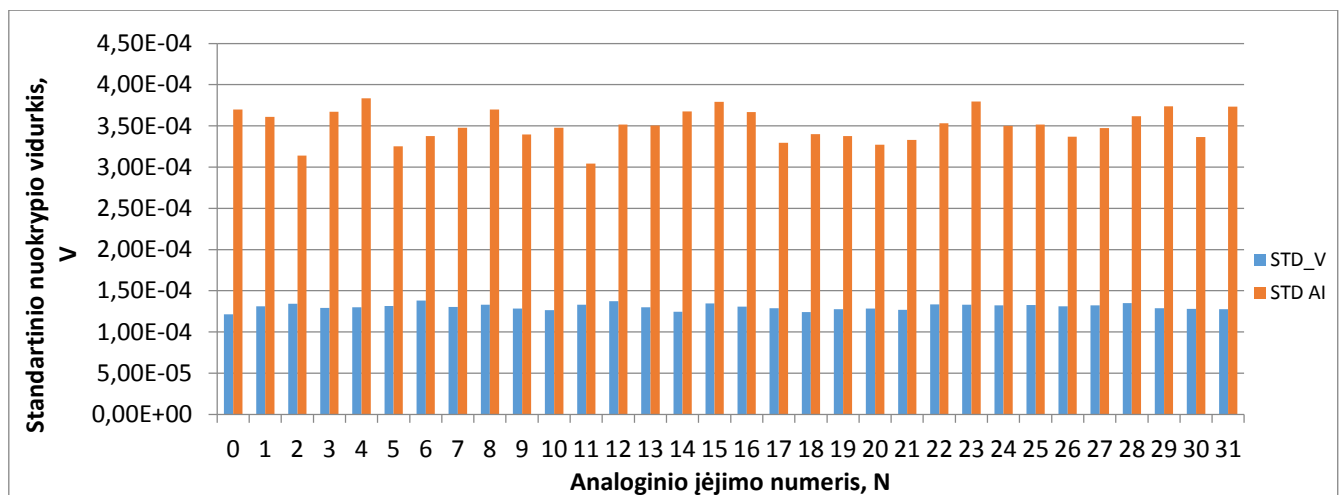
5.1 Analoginių įėjimų dažninės charakteristikos

Tyrimo supaprastinta struktūrinė jungimo schema atvaizduota 5.1 pav. Matoma, kad iš išorinio generatoriaus yra generuojamas signalas. Šis signalas nuskaitomas išoriniu voltmetru, pagal kurio rezultatus bus atliekamas palyginimas su AI kanalų rezultatais. AI kanalai paeiliui priima generatoriaus stimuliuojamus signalus. Programos algoritmas Priedas 4.



5.1 pav. Analoginių įėjimų charakteristikų tyrimo struktūrinė schema

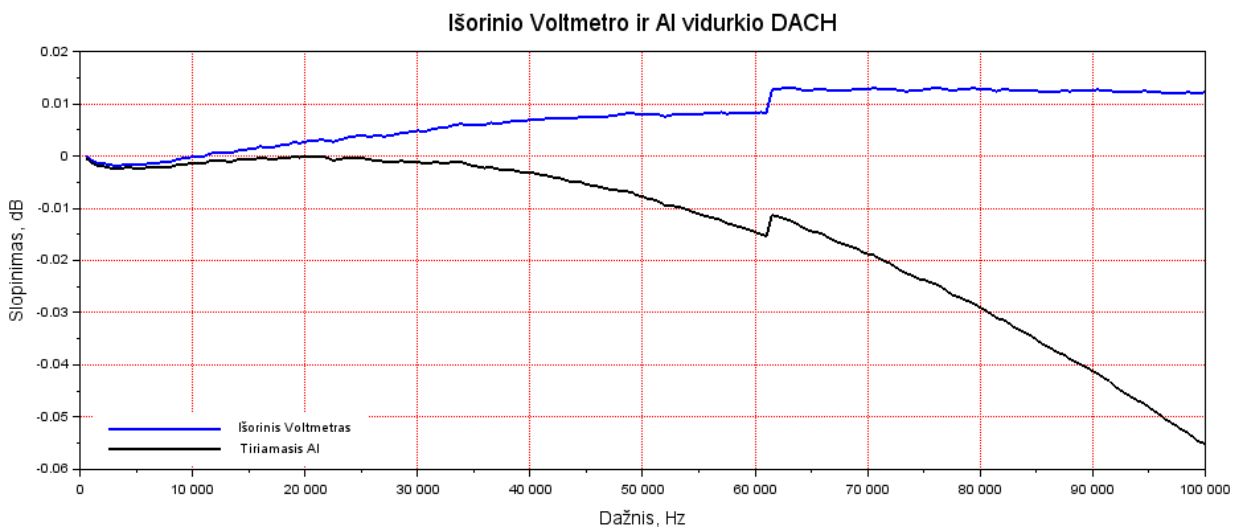
Nuskaitant su kiekvienu AI kanalu išorinio generatoriaus generuojamą signalą apskaičiuojamas verčių standartiniai nuokrypiai nuo vidurkio (lygtis (8)) pateiktos analoginių kanalų standartinės deviacijos vidutinės reikšmės, tiek matuojant su analoginių matavimų modulių, tiek išoriniu voltmetru. Įvedamas Stjudento pataisos koeficientas 95 %.



5.2 pav. Analoginių įėjimų standartinis nuokrypis nuo vidurkio įvertinus Stjudento pataisa 95 %

Rezultatai rodo, kad analoginių įėjimų išmatuotos matavimų vertės nuo vidurkio nukrypsta panašiai. Išorinio voltmetro standartinis nuokrypis (STD V) kinta nuo 121 μV iki 138 μV visuose kanaluose. Kuomet analoginių matavimų modulio nuokrypiai (STD AI) pasiskirto ribose nuo 340 μV iki 383 μV . Šios reikšmės apskaičiuotos su įvertinus Stjudento pataisą su 95 % patikimumu.

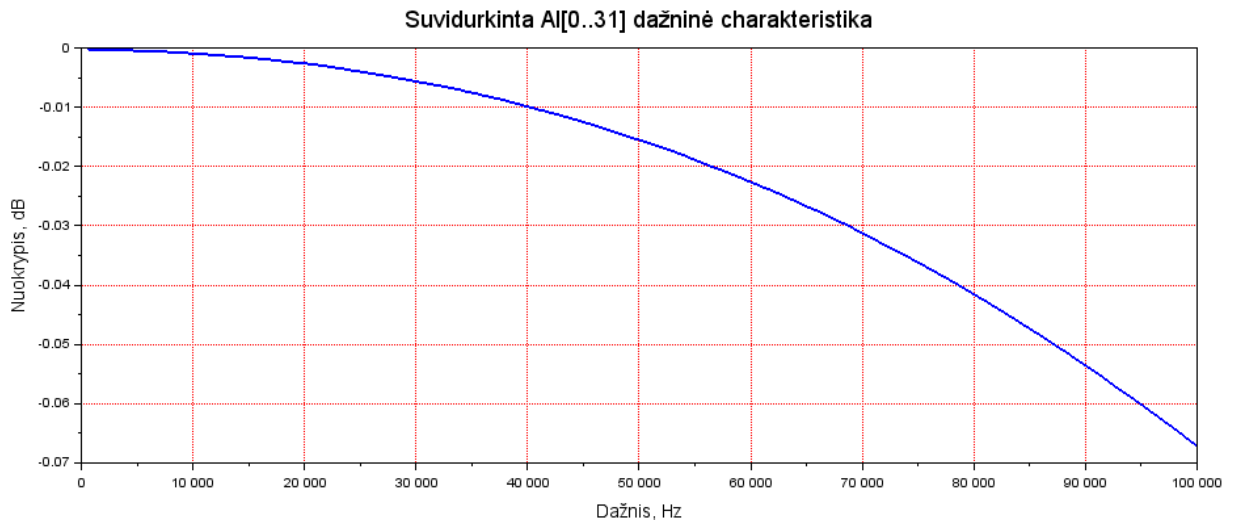
Suvidurkinus kanalų gautas charakteristikas gauname dvi, išorinio voltmetro išmatuotą ir AI kanalų išmatuotą, dažnines charakteristikas (5.3 pav.). Viena jų parodo išorinio voltmetro užfiksuotą įėjimo signalo kitimą, o kita AKK užfiksuotą to paties įėjimo signalo dažninę charakteristiką. Gautose charakteristikose galima matyti trūkį ties 62 kHz dažniu. Kadangi šis trūkis atsirado ant abiejų matuojamų charakteristikų gali būti, kad šis sklinda iš signalų generatoriaus. Panašu, kad šis atsiranda, kuomet generatorius keičia generuojamo signalo diapazoną. Pagal išorinio voltmetro charakteristiką galima matyti kaip netiesiškai signalų generatorius atkuria signalų amplitudes.



5.3 pav. Išorinio voltmetro ir AI vidurkių funkcijos

Trūkio ir kitų išorinių trikdžių įtaka tiriamojo AI charakteristikai pašalinama laikant išorinio voltmetro charakteristiką kaip atraminę ir pagal (7 lygtį) apskaičiuojamas santykis tarp išorinio voltmetro rezultatų ir AI vidurkių verčių.

Gautoje bendroje AI kanalų charakteristikoje (5.4 pav.) matoma, kad charakteristika dažniui kylant po truputį slopsta. Ties 100 kHz gaunamas -0,066 dB signalo slopinimas. Nors įrenginio specifikacijoje neaprašomas leistinas amplitudės nuokrypis, laikome, kad šis nuokrypis tenkinamas. Kadangi sudarant tyrimo metodą buvo nuspręsta maksimalų nuokrypį laikyti $\pm 0,1$ dB.

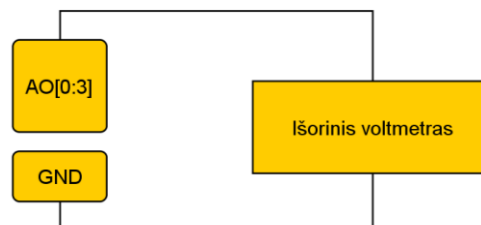


5.4 pav. Tiriomojo AI kanalų charakteristika

Išmatuota analoginių įėjimų AKK dažninė charakteristika. Gautas $-0,066$ dB slopinimas tenkina $\pm 0,1$ dB leistiną nuokrypio ribą. Skirtingų kanalų standartinės deviacijų reikšmės gana artimos, tarp mažiausios ir didžiausios reikšmių skirtumas yra $\Delta\text{STD AI} = 40 \mu\text{V}$.

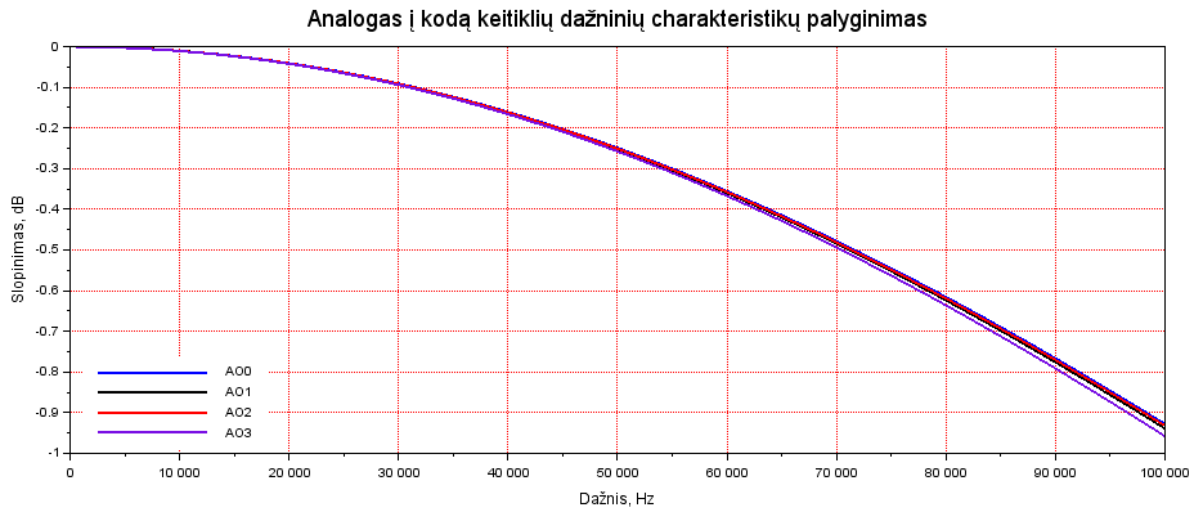
5.2 Analoginių išėjimų keitiklių dažnių charakteristikų rezultatai

Testavimo stoties analoginių išėjimų tyrimo supaprastinta jungimo schema pateikta 5.5 pav. Čia skirtingi AO paeiliui generuoja sinuso formos harmoninį signalą ir išorinis voltmetras išmatuoja efektines įtampos vertes. Išorinio voltmetro matavimo rezultatai apdorojami. Duomenų surinkimo algoritmas pateiktas Priedas 4.



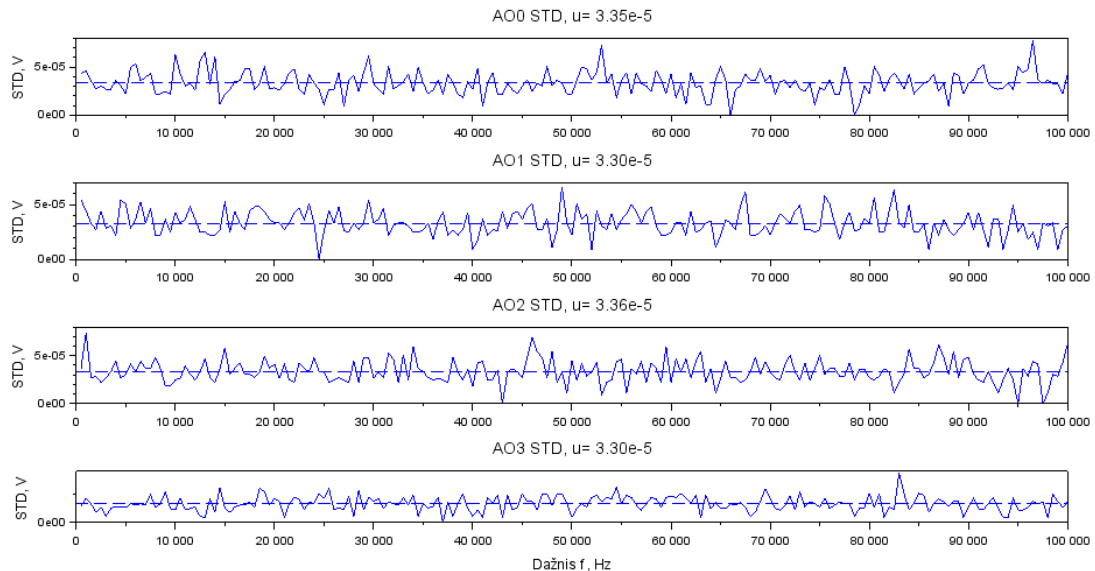
5.5 pav. Analoginių išėjimų charakteristikų tyrimo struktūrinė schema

Gautos visų SATS AO dažinės amplitudžių charakteristikos (5.6 pav.). Pastebima, kad efektinės įtampos vertė slopsta ir artėja iki -1 dB (prie 100 kHz) lyginant su įtampos verte ties 500 Hz (3,49 V). Palyginus su naudojamu išoriniu generatoriumi amplitudės leidžiamu slopinimu ($-0,1$ dB) AO modulis šį pasiekia ties 30 kHz dažniu. Taip pat iš AO kanalų charakteristikų matoma, kad generuojamos charakteristikos išsišakoja.



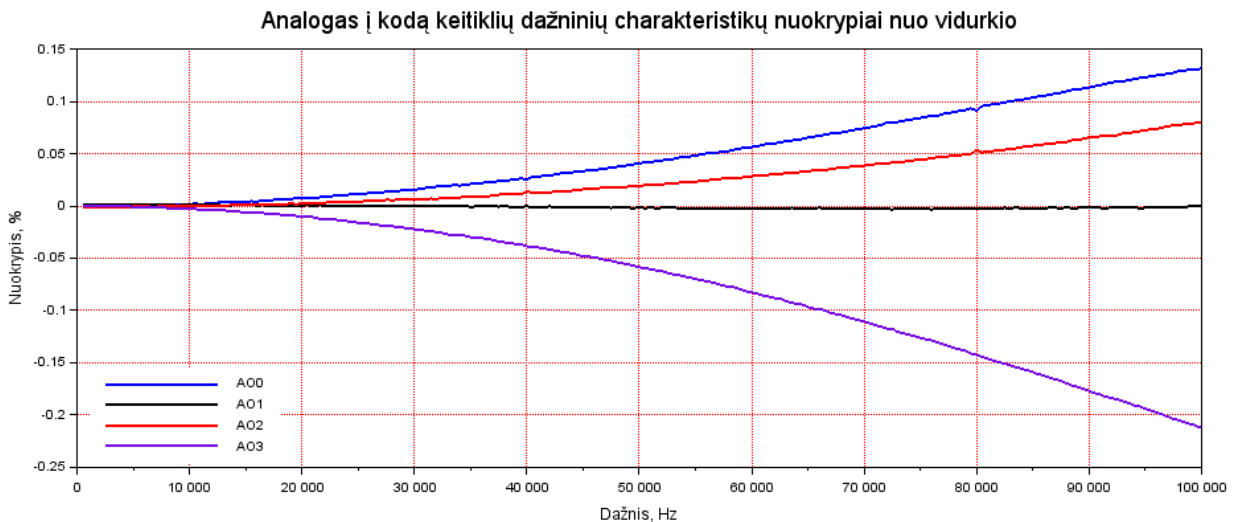
5.6 pav. SATS AO dažninė amplitudžių charakteristika

Kadangi analoginių išėjimų signalai buvo nuskaitymi po penkias vertes, todėl įvertinamas kiekvieno kanalo matavimo standartinis nuokrypis nuo vidurkio. Standartinių nuokrypių vertės dažnių srityje atvaizduotos 5.7 pav. Kaip pastebima šios kinta, tačiau vidutinės vertės išlieka panašaus lygio. Kuomet AO0 – $\pm 33,5 \mu\text{V}$; AO1 - $\pm 33,0 \mu\text{V}$; AO2 - $\pm 33,6 \mu\text{V}$; AO3 - $\pm 33,0 \mu\text{V}$. Todėl galima teigti, kad analoginiai išėjimų generuojami signalai panašūs.



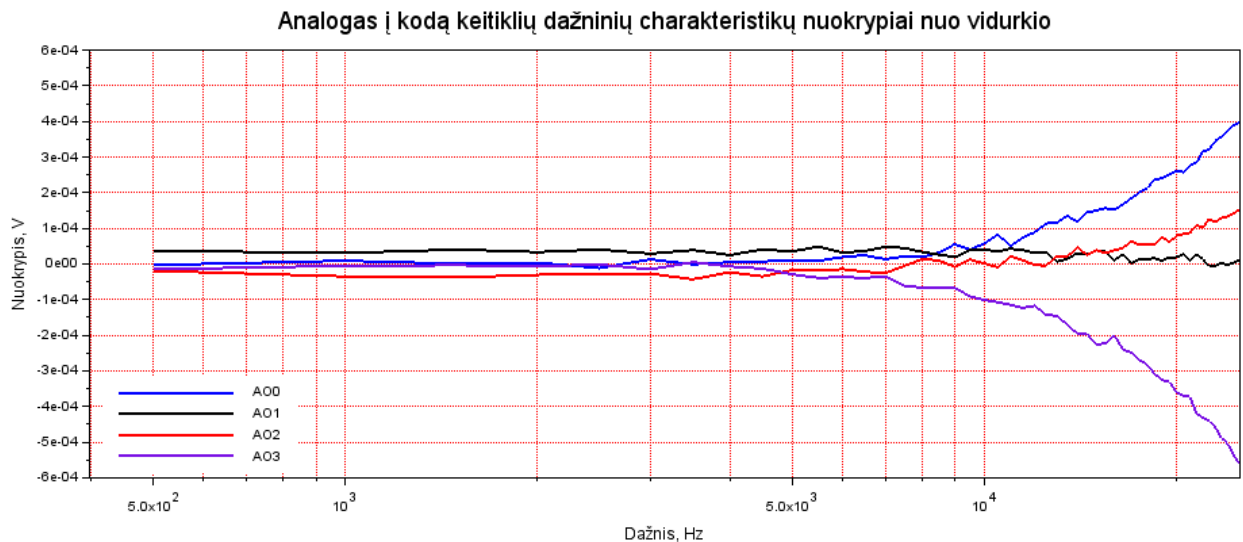
5.7 pav. AO[0:3] standartiniai nuokrypiai nuo vidurkio, įvertinus Stjudento pataisa 95 %

Vidurkio atžvilgiu AO kanalų išsišakojimas atvaizduotas 5.8 pav. AO3 nukrypsta labiausiai iki -0,22 % (ties 100 kHz), o AO0 nukrypsta iki 0,16 % (ties 100 kHz), tarp šių verčių skirtumas gaunamas 12 mV. Kiekvienas KAK turi savo dažnines charakteristikas. Jų nevienodumą galima išspėsti kompensuojant ir paderinant, nukrypusias charakteristikas koeficientais.



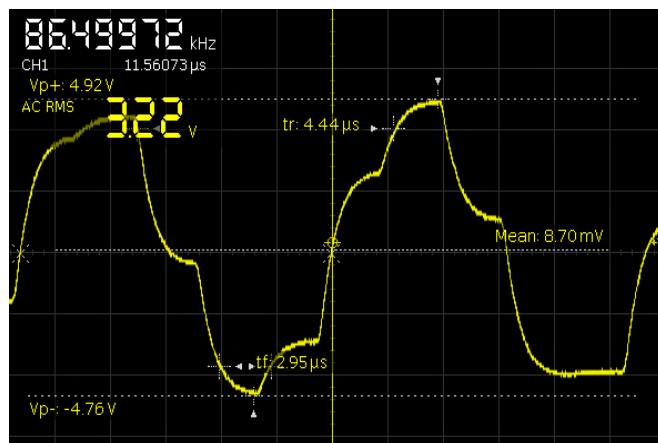
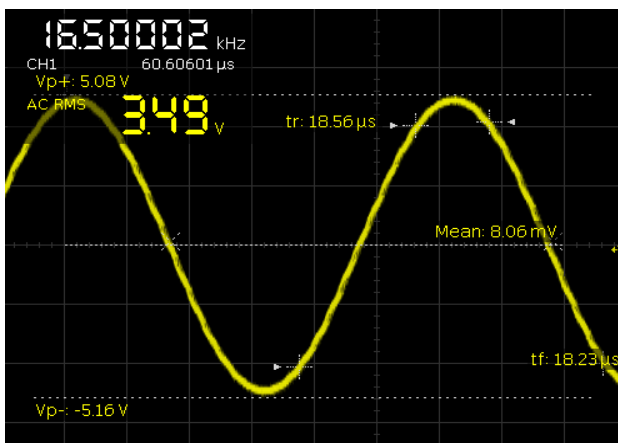
5.8 pav. AO [0..3] kanalų generuojamos įtampos nuokrypis nuo vidurkio

Rezultatai rodo, kad visi KAK iki 10 kHz generuojamos įtampos nuokrypis nuo vidurkio nesiekia 0,1 mV (5.9 pav.). O siekiamas $\pm 0,152$ mV nuokrypis tarp kanalų neviršijamas iki 13 kHz.



5.9 pav. AO [0..3] kanalų generuojamos įtampos nuokrypis iki 13 kHz neviršija 0,152 mV

Išmatuota efektinės įtampos vertė neneša informacijos apie pačią generuojamo signalo formą. Dėl žemo diskretizacijos dažnio (451 kS/s) signalai nėra pilnai atkuriami. Kuomet 86,5 kHz signalo periodui tenka ~ 5 atskaitos jam atvaizduoti. Paveiksle 5.10 pav. matome kaip atrodo nefiltruotas AO išėjimo signalas. Taip tarp atskaitų sugeneruojant mažesnės energijos signalus. Signalui formai jautriose aplikacijose nereikėtų naudoti signalų, kurie neužtikrina tolygios signalo formos. Testavimo metu tokiu signalu stimuliuojant elektronikos gaminį galimos netinkamai veikiančios testuojamos funkcijos [18].

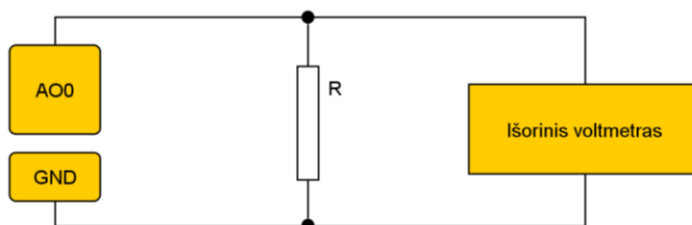


5.10 pav. 16.5 kHz (kairėje) ir 86.5 kHz (dešinėje) sugeneruotų signalų formos

Išmatavus AO dažnines charakteristikas pastebėta, kad slopinimas siekia -1 dB (prie 100 kHz). Slopinimas iki -0,1 dB pasiekiamas ties 30 kHz. Taip pat randama dažnių juosta (500 Hz – 13 kHz) iki kurios leistinas skirtingų AO nuokrypis yra $\pm 0,152$ mV. Taip pat pastebėta, kad analoginių matavimų/stimuliavimo modulio AO neturi žemų dažnių filtro, todėl signalo formai jautresniuose sprendimuose reikia projektuoti išėjimo signalų filtrą.

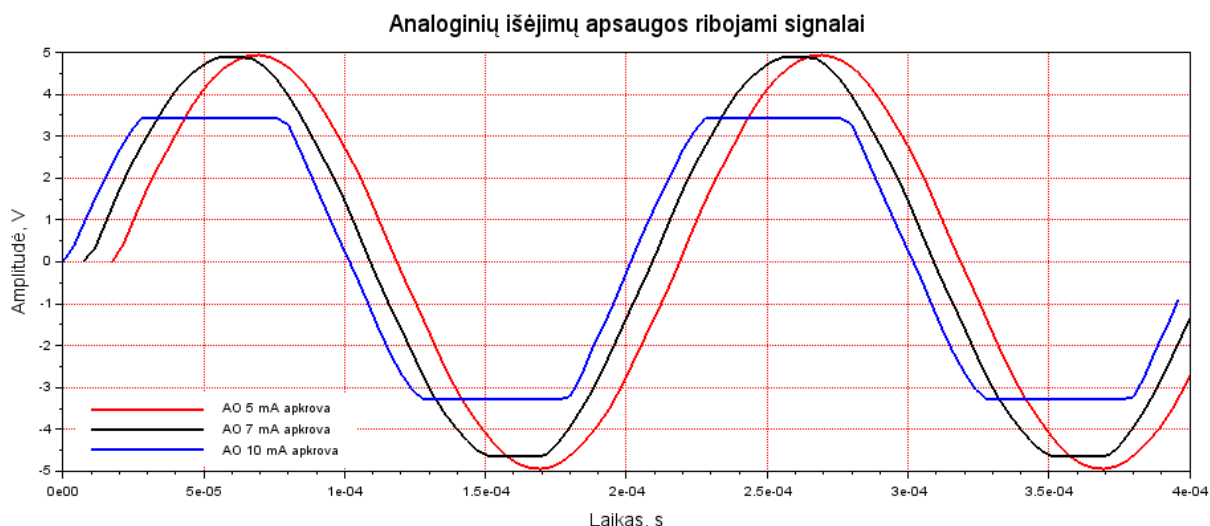
5.3 Analoginio išėjimo srovės apsaugos tyrimo rezultatai

Generuojamos signalo viršsrovių charakteristikos tyrimo supaprastinta jungimo schema atvaizduota 5.11 pav. Tyrimas atliekamas panaudojus vieną analoginį išėjimą, tariama, kad kitų analoginių išėjimų charakteristikos yra vienodos. Su analoginiu išėjimu generuojamas sinuso formos signalas. Šis išėjimas apkraunamas apkrova R. Išoriniu voltmetru atliekami generuojamos efektinės įtampos matavimai.



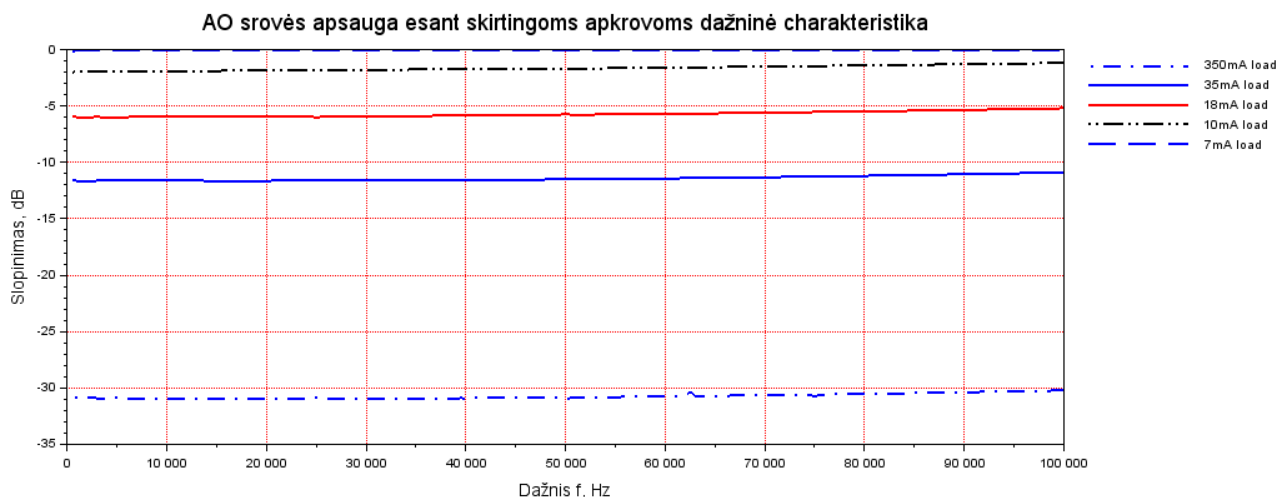
5.11 pav. Analoginio išėjimo srovės apsaugos tyrimo struktūrinė schema

Stebint signalus laikinėje skalėje (5.12 pav.) pastebima, kad 5 kHz signalas apkrautas 5 mA apkrova nėra ribojamas. Tai turėtų būti maksimalus atiduodamas neapribotas signalas. Stebint 7 mA apkrauto signalo formą, pastebima, kad šis pradeda riboti. Tačiau ribojimas nėra žymus, šis siekia -0,05 dB. Viršijus dvigubai atiduodamos srovės dydį, esant 10 mA apkrovai, signalo amplitudė ribojama apie -2 dB lygyje. Tai reiškia, kad ties 5 kHz signalu apkrova turi būti didesnė, nei 10 mA, kad signalas būtų ribojamas -3 dB lygiu.



5.12 pav. Apkrautų signalų 7 mA ir 10 mA apkrovomis ribojamos dalys

Signalų charakteristikas analizuojant dažninėje skalėje (5.13 pav.) pastebima, kad srovės apsauga išlieka pastovi matuojamame 500 Hz–100 kHz visame dažnių diapazone. Efektyvus signalo slopinimas (-3 dB) yra pasiekiamas esant apkrovos dydžiui 10 mA ir 18 mA ruože.

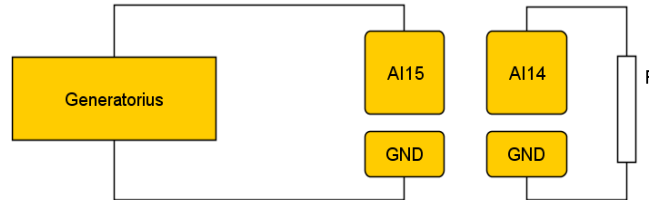


5.13 pav. AO apsaugos nuo viršytos srovės dažninė charakteristika ties skirtingomis apkrovomis

Išmatavus AO srovės apsaugos charakteristikas pastebima, kad specifiukuota apkrautas signalas didesne nei 5 mA srove dažnių diapazone slopina tiesiškai. Tyrimais surasta, kad -3 dB slopinimas pasiekiamas apkrovus generuojantį išėjimą 10-18 mA ribose. Tuomet signalas netenka pusės efektinės įtampos lygio.

5.4 Matavimo kanalų tarpusavio ryšių rezultatai

Supaprastinta tyrimo jungimo schema pateikta 5.14 pav. Tyrimas atliekamas su išoriniu generatoriumi į vieną iš analoginių kanalų generuojant AC signalą. Prie greta esamo AI yra keičiamos apkrovos vertės. Taip stebint tarpusavio ryšių generuojamus trikdžius.



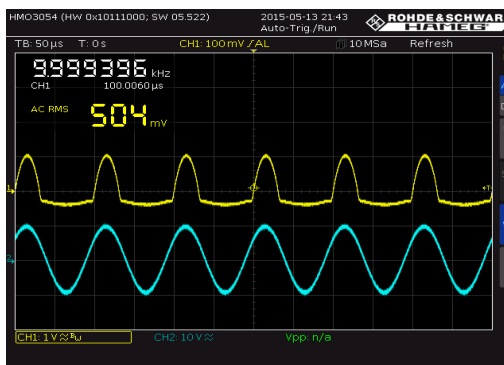
5.14 pav. Tarpusavio kondukuotų ryšių tyrimo struktūrinė schema, čia R - apkrova

Kadangi analoginių matavimų modulio kontaktų talpumas yra reikšmingas kondukuotiems ryšiams, siekiant įsitikinti kokios talpumo reikšmės jungtyje LCR matuokliu [19] išmatuojami AI talpumai žemės atžvilgiu (žr. Priedas 3. Išmatuotos talpumo vertės). Talpumo reikšmės matuojamos 10 kHz ir 100 kHz dažniais jos pasiskirsčiusios 109 pF – 149 pF ($\pm 0,05\%$) ir 92 pF – 116 pF ($\pm 0,05\%$) režiuose. Kuomet dokumentacijoje specifikuojamas 100 pF talpumas.

Prenkami gretimi AI kanalai. Pasirenkami $AI15 - 111\text{ pF}$ ir $AI14 - 112\text{ pF}$ įėjimai. Tyrimo įranga sujungiama pagal 4.7 pav. laidininkų tarpusavio ryšių struktūrinę schemą.

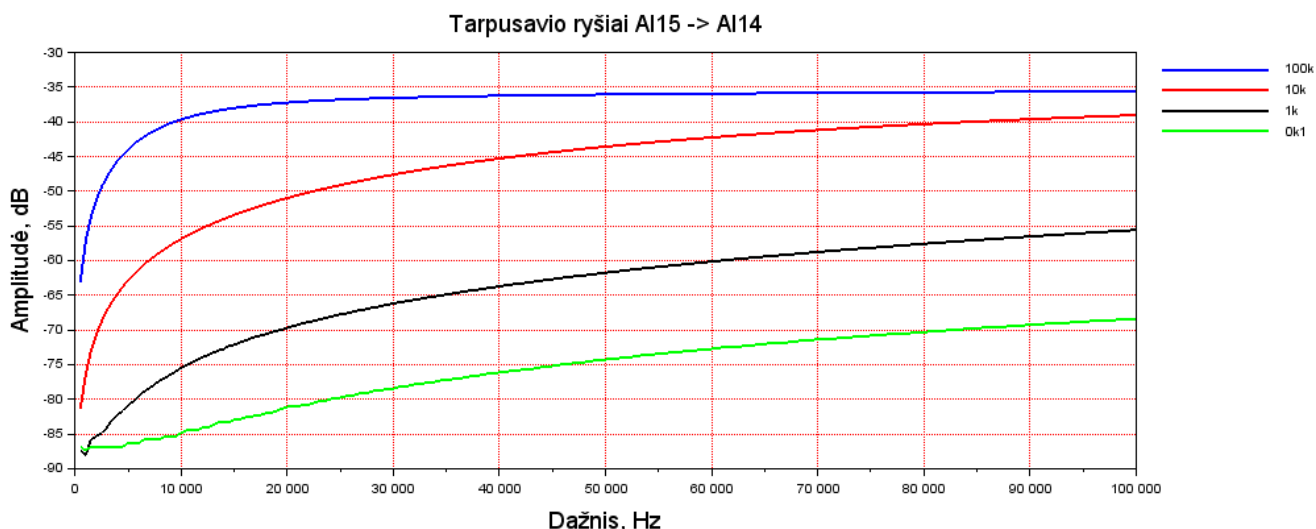
Pirmojo tyrimo metu į laidininką 1 ($AI15$) iš išorinio generatoriaus generuojamas AC signalas. Išorine varža apkrautas esantis antrasis laidininkas $AI14$. Iš abiejų AI yra nuskaitomi įtampos lygiai. Prenkami varžų R dydžiai - 100 Ω ; 1 k Ω ; 10 k Ω ir 100 k Ω . Iš generatoriaus palaipsniui generuojamas 500 Hz- 100 kHz dažnių sinuso formos signalas.

Prie laidininkų prisijungiama su osciloskopu (5.15 pav.) ir stebimas kondukuotas trikdys laidininke 2. Oscilogramoje apatinis signalas yra generatoriaus generuojamas signalas (trikdžių šaltinis), o viršutinis signalas, tai kondukuotas trikdys. Pastebima, kad trikdys yra tokio paties dažnio kaip ir signalas, tačiau trikdžio signalo forma yra iškreipta.



5.15 pav. Oscilogramoje matomas trikdžių šaltinis (apačioje) ir kondukuotas trikdys gretimame laidininke (viršuje)

Iš AI15 į AI14 kondukuotų trikdžių lygis atvaizduotas 5.16 pav. Kaip ir pagal lygtį (11, pastebimas santykis didėjant apkrovai, didėja ir kondukuoti trikdžiai. Esant 100 kΩ apkrovai ties 10 kHz dažniu šis lygis jau būna pasiekęs -40 dB lygį, o ties 100 kHz nusistovi iki -35 dB.



5.16 pav. Kondukuoti trikdžiai laidininke 2

Apskaičiavus nuo kuriuo dažnio turėtų nusistovėti kondukuotų trikdžių amplitudė pastebima, kad matuojamame diapazone esant 100 kΩ apkrovai trikdžiai turėtų nusistovėti ties 13,9 kHz dažniu (lentelė 5.1). Esant 1 kΩ apkrovai dažnis viršija 1 MHz.

5.1 lentelė. Apskaičiuoti dažniai nuo kurių trikdžių amplitudės pradeda nusistovi

Apkrova, R	100 kΩ	10 kΩ	1 kΩ	100 Ω
Dažnis, kHz	13,9	139,5	1394,9	13949,9

Siekiant įsitikinti kokia kondukuotų trikdžių įtaka kitiems AI kanalams. Šalia AI15 100 kΩ varža apkraunami AI14, AI6, AI13, AI5, AI12 ir AI14. Tokia varža pasirenkama, dėl matomos kondukuotų trikdžių amplitudės nusistovėjimo. Šių įėjimų išsidėstymas jungtyje parodytas 5.17 pav. paveiksle. Norint pilnai įvertinti reikėtų komutuoti visus jungties kontaktų apkrovomis ir paeiliui tikrinti kiekvieną. Tačiau pirminiam įvertinimui stebima AI15 analoginių įėjimų grupė.

Alsense	AI4
AI12	GND
AI5	AI13
GND	AI6
AI14	GND
AI7	AI15
GND	AO0

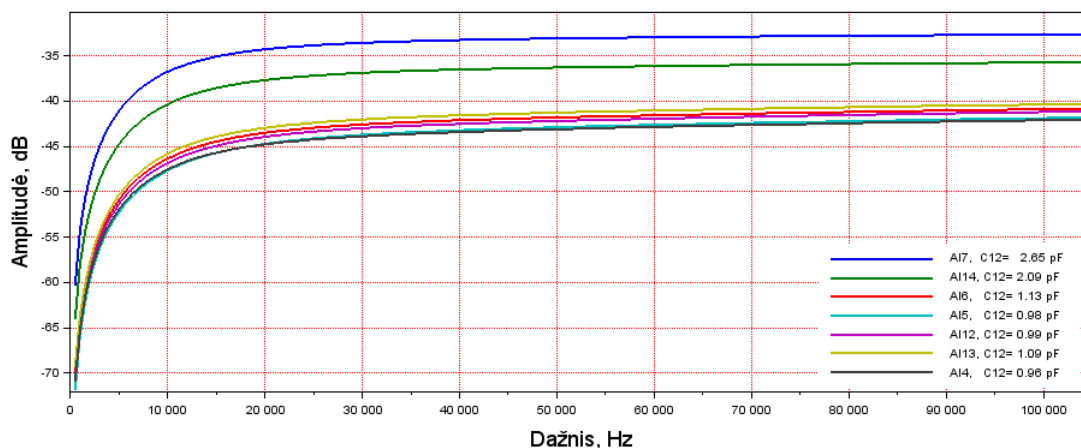
5.17 pav. AI kontaktų išdėstymas jungtyje

Siekiant teoriškai įvertinti kondukuotų trikdžių padidėjimą pasikeitus talpumui pagal (13) lygtį apskaičiuojamas kondukuotų trikdžių amplitudės pokytis. Lentelėje 5.2 pateikti išmatuotos talpumu tarp analoginių įėjimų tolstant nuo AI15 kontakto, AI15 analoginio įėjimo atžvilgiu, vertės. Talpumai išmatuojami esant 10 kHz ir 100 kHz matuoklio dažniams. Skaičiavimai ir matavimai atliekami esant 100 kΩ apkrovai ir laikantis sąlygos, kad talpumas C₁₂ dažnių ruože nekinta.

5.2 lentelė. Kondukuotų trikdžių skaičiavimai keičiantis talpumui

AI	10kHz				100kHz		
	C12, pF	C2G, pF	f, kHz	Vn, dB	C2G, pF	f, kHz	Vn, dB
7	2,65	139	11,24	-34,6	101	15,36	-31,8
14	2,09	112	13,95	-34,7	103	15,14	-34,0
6	1,13	149	10,60	-42,5	102	15,43	-39,2
13	1,09	113	13,95	-40,4	96	16,39	-39,0
5	0,98	131	12,06	-42,6	101	15,61	-40,3
12	0,99	116	13,60	-41,5	97	16,24	-39,9
4	0,96	138	11,45	-43,2	103	15,31	-40,7

Apskaičiuotas Vn lygis yra nusistovėjusių trikdžių lygis, kurio reikšmė nepriklauso nuo dažnio kitimo. Išmatuoti ir apskaičiuoti rezultatai yra panašūs, kuomet kondukuoti trikdžiai nusistovi (nuo ~40 khz) ir išmatuoti rezultatai telpa į apskaičiuotas ribas. Ribos, tai Vn reikšmių ruožas esant išmatuotoms 10kHz ir 100kHz talpumo reikšmėms. Skirtumas atsiranda dėl talpumo reikšmių pokyčio kintant dažniui. Bet koku atveju kondukuoti tarpusavio ryšiai stipresni ar silpnesni tolstant nuo trikdžių šaltinio išlieka (5.18 pav.). Šie turi įtakos matuojamiems dydžiams. Apytiksliai įvertinti kondukuotų trikdžių dydį galima pasitelkus (11 ir (13) lygtis. AI15 gretimame laidininke (AI7) trikdis nusistovi ~33dB lygyje, tolstant nuo šio kontakto laidininkų tarpusavio talpumas mažėja, todėl ir mažėja tarpusavio ryšiai. Esant tolimiausiam analoginiam įėjimui šis (AI4) siekia ~43dB.



5.18 pav. Išmatuoti kondukuoti trikdžiai laidininkui tolstant nuo trikdžių šaltinio

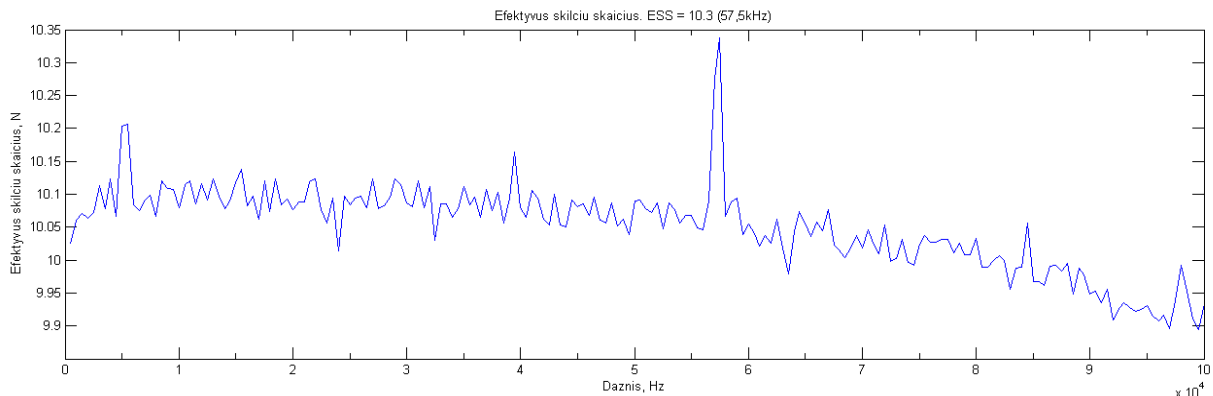
Keletas metodų kaip su tuo kovoti:

- a. Stengtis kuo mažiau palikti elektriškai atvirus kontaktus;
- b. Ilginti signalų kylančių ir besileidžiančių frontų laikus;
- c. Signalų perdavimas diferencijuojant;
- d. Vengti tiesti ilgus laidus kartu;
- e. Ekranuoti laidus;
- f. Naudoti ekranavimo sluoksnį trasuojant plokštes ar laiduose;

Potencialius tarpusavio ryšius galima įvertinti išmatavus talpumus tarp dviejų galimai susietų laidininkų ir apskaičiavus šių ryšių stiprumą, ties skirtingais dažniais. Tačiau pastebėta, kad esant kondukuotiems trikdžiams šalia esantys kontaktai (ne vien gretimi) yra stipriau ar silpniau paveikiami. Todėl jei šie trikdžiai pastebimi ant pagrindinės SATS jungties, tuomet šių trikdžių išvengti sunkiau bendroje testavimo sistemoje su gaminio adapteriu. Kadangi, kad ir bus užtikrintas ekranavimas iki jungties, bet sąlygos nuo jungties iki AKK tarpusavio ryšiams bus sudarytos. Tai vienas iš modulinės sistemos minusų. Todėl projektuojant testavimo sistemą reikėtų atsižvelgti į šių trikdžių dydį ir jei gaunamą rezoliuciją galima toleruoti tuomet kompensuojama trikdžių įtaka matavimams.

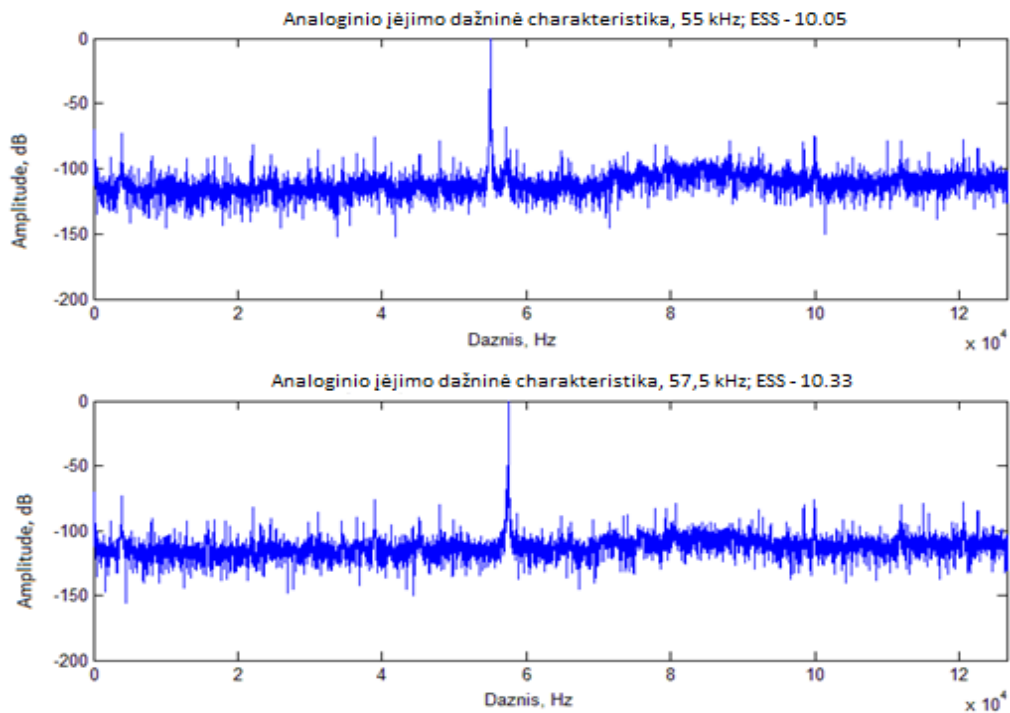
5.5 Efektyvaus skilčių skaičiaus paieška

Paveiksle 5.19 pav. atvaizduotas gautas efektyvus skilčių skaičius. Iš nuskaitytų signalų apskaičiuojama, kad efektyvus skilčių skaičius vietoje 16 skilčių gautas netolygus dažnio srityje apie ~10,1 skilčių. Pagal apskaičiuotą (naudojant **(14)** ir **(16)** lygtis) charakteristiką pastebimas ESS padidėjimas ties 57,5 kHz dažniu. Skaičiuojant SINAD ties šiuo dažniu pagrindinė harmonika uždengia trikdžio harmoniką ir trikdis neįtakojo rezultato (5.20 pav.).



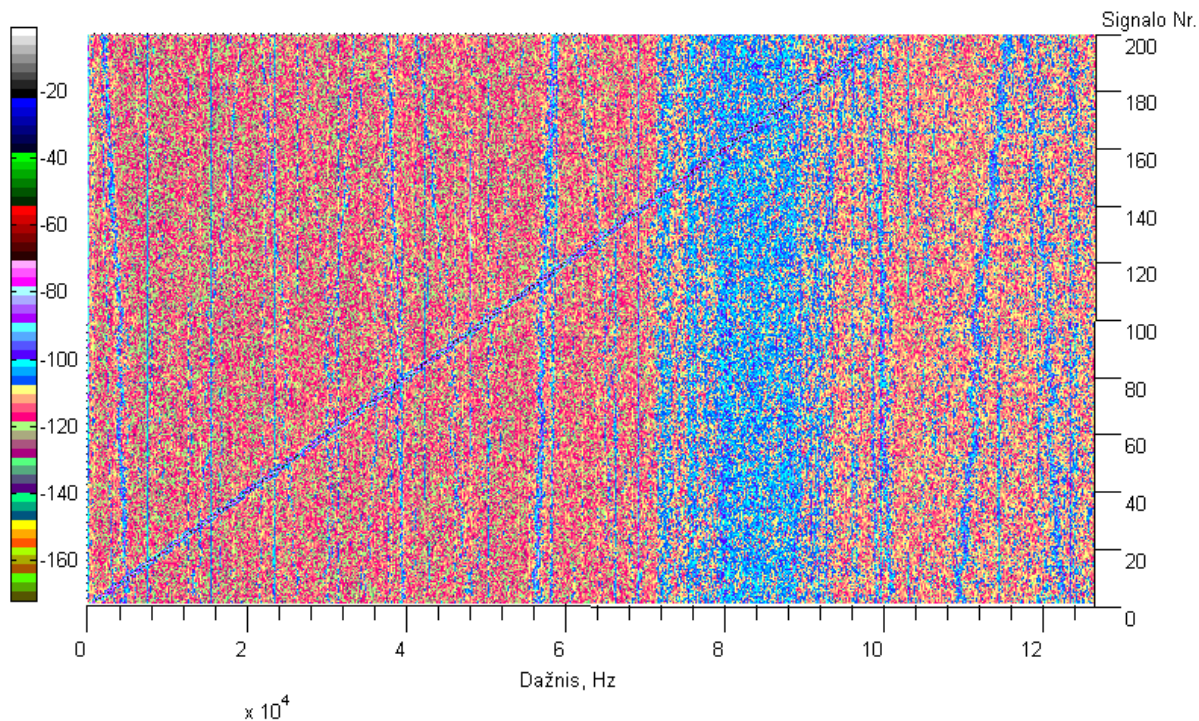
5.19 pav. AIO efektyvus skilčių skaičius

Galima teigti, kad pagrindinis trikdžių šaltinis yra būtent ties 57,5 kHz. Šis trikdys gali būti persikėlusį dažnio dedamoji dėl spektrų persikėlimo efekto.



5.20 pav. 55 kHz ir 57.5 kHz signalų spektrai

Siekiant įvertinti trikdžių pasiskirstymą signaluose yra imami 200 signalų su skirtingais dažniais, bei nuskaityti skirtingu metu, tuomet jie atvaizduojami dažnių srityje (5.21 pav.).



5.21 pav. Generatoriaus generuojamų signalų spektrai (500 Hz – 100 kHz)

Paveiksle matomi skirtingų dažnių signalai ir jų spektrai. Signalo numeris parodo kokio, tai signalo dažnio spektras (lygtis (17))

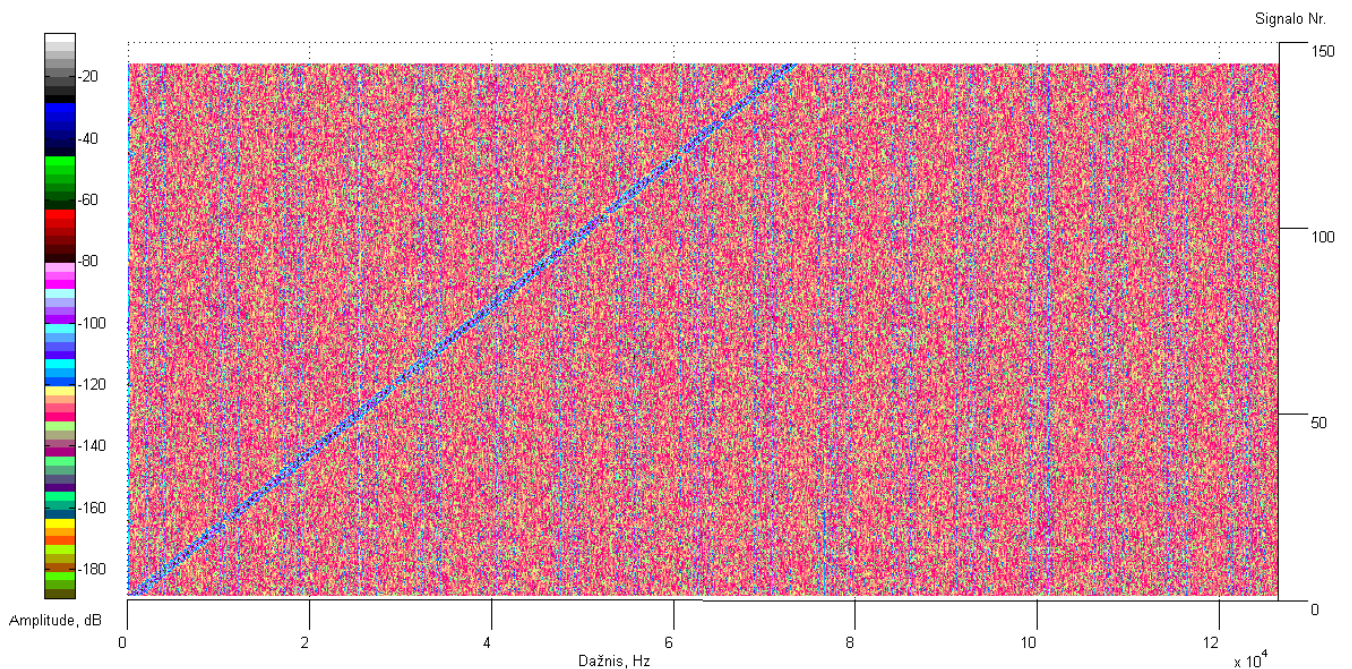
$$f_{\text{signalo}} = \text{SignaloNr} \cdot 500 \quad (17)$$

, čia f_{signalo} – signalo dažnis, SignaloNr – signalo numeris, 500 – žingsnis tarp signalų dažnio.

Pagal šių signalų spektrus galima stebėti trikdžių elgseną kintant pagrindiniam signalo dažniui. Paveiksle matoma, kaip signalo dažnio dedamoji tolygiai kyla iki 100 kHz vertės. Taip pat matoma, kad yra trikdžių, kurie nėra atsitiktinio pobūdžio. Esamų trikdžių keistas pobūdis, kadangi pagrindinės harmonikos signalo dažniui kylant truputį slenkasi ir atsiradę trikdžiai. Taip pat prie šių trikdžių prisidėjo ir spektrų persidengimo efektas, kadangi matosi veidrodinio efekto charakteristikos. Trikdis esant 500 Hz signalui prasideda ties 110 kHz ir kylant dažniui šis trikdys nusislenka iki 115 kHz, jo veidrodinis atspindys panašu būtų prasideda ties 118 kHz (100 kHz signalas) ir nusislenka iki 124 kHz. Stipriausios trikdžių dedamosios gaunamos ties $f \sim 57,5$ kHz dažniu. Didžiausia tokių trikdžių sankloda gaunama ties 70 kHz – 90 kHz dažnių ruože.

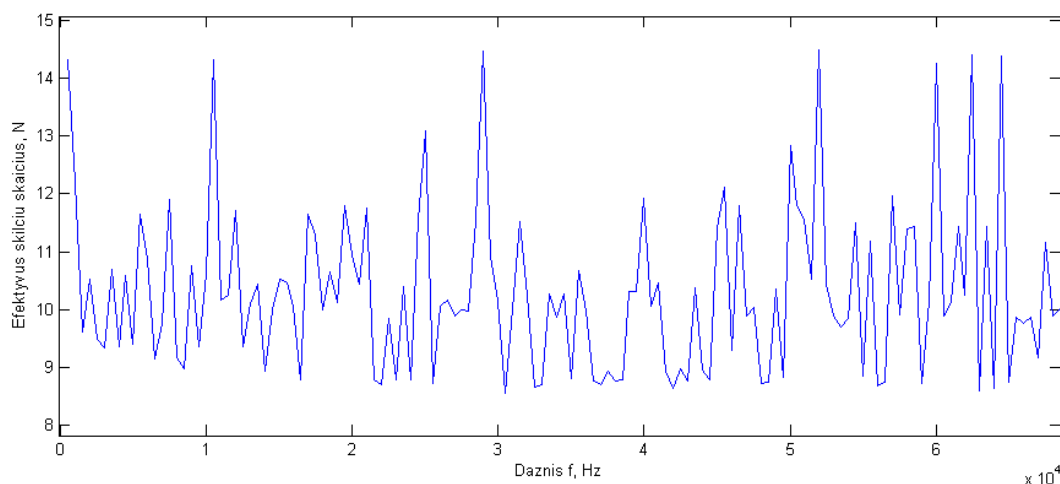
Vienas iš įtariamųjų, kad dalis šių trikdžių yra išorinio signalų generatoriaus darbas. Todėl analizė panaudojus kitus signalų generavimo prietaisus būtų vienas iš pirmųjų žingsnių.

Įsitikinimui ar pagrindinis trikdžių šaltinis yra signalų generatorius analoginių matavimų modulis sujungiamas su grįžtamoju ryšiu. Tai yra analoginiai išėjimai sujungiami su analoginiais įėjimais. Su AO generuojamas sinuso formos signalas ir su AI jis priimamas. Signalų dažnis keliamas iki 72 kHz. Apdorotų signalų spektrai atvaizduoti 5.22 pav.



5.22 pav. analoginių išėjimų generuojamų signalų spektrai (500 Hz – 100 kHz)

Signalų spektre matoma, kad nebėra tokio trikdžių lygio. Tuomet galima daryti išvadą, kad spektro trikdžių šaltinis yra 16 skilčių, 20 MHz signalų generatorius. Naujai gautas spektras parodo, kad galima išmatuoti ESS skaičių grįžtamoju ryšiu tarp analoginių įėjimų ir išėjimų gautų charakteristikų ir panašu, kad efektyvus skilčių skaičius turi būti didesnis (5.23 pav.).



5.23 pav. Efektyvus skilčių skaičius naudojant analoginių įėjimų – išėjimų grįžtamąjį ryšį

Kaip matoma iš gautos charakteristikos efektyvus skilčių skaičius šokteli iki 14,48 skilčių, o žemiausia gautas rezultatas yra 8,54 skilties. Tokią gautą charakteristiką galima paaiškinti:

1. Kuomet AI diskretizavimo dažnis (250 kHz) nėra suderintas su nuskaitymo signalo dažniu, tai yra AI nuskaitymų atskaitų kiekis ir nuskaitymo signalo fazė per periodą sutampa, taip nuskaitytą ribotą kiekį informacijos apie signalą, kurios nepakanka. Iš nuskaityto signalo spektre galima matyti atsiradusių harmonikų;
2. Kadangi AO diskretizavimo dažnis siekia 450 kHz, generuojant aukštesnius dažnius atskaitų kiekis periode mažėja. Kaip ir 5.10 pav. atvaizduotoje oscilogramoje matomas 85 kHz signalas su ~5 atskaitomis. Iš tokio signalo nustatyti AI charakteristikas reikia atitinkamos procedūros;

Nors ir negauta tolygi ESS charakteristika galima daryti išvadą, kad AKK efektyvus skilčių skaičius gali siekti iki 14,48 skilčių rezoliucijos. Žemas AI diskretizavimo dažnis filtro kirtimo dažnio atžvilgiu įtakoja spektrų persidengimo efektą. Kas reikalauja papildomų filtrų dizaino prieš AI, kad dažnių dedamosios esančios aukščiau pusės diskretizavimo dažnio būtų nuslopintos. Bei daroma išvada, kad atsargus diskretizavimo dažnio parinkimas prieš matuojant signalą turi būti pirmoje vietoje.

6 APIBENDRINIMAS

Gautos automatizuotos testavimo stoties charakteristikos:

- a) Analoginių įėjimų slopinimo lygis žemesnis, nei 0,1 dB. Rezultatas 0,066 dB (ties 100 kHz).
- b) Analoginių išėjimų charakteristikų nuokrypis iki 13 kHz dažnio nesiekia 0,152 mV;
- c) Analoginiai išėjimai ties 100 kHz slopina signalą -1 dB lygiu. Signalo slopinimas 0,1 dB pasiekiamas ties 30 kHz;
- d) Nustatyta, kad kintamos sinuso formos signalas analoginio išėjimo yra slopinamas -3 dB, kuomet apkrovos dydis yra 10-18 mA tarpe.
- e) Efektyvi matavimo rezoliucija gaunama iki ~14,5 bitų. Tai ± 5 V skalėje atitinka 437 μ V jauniausio baido reikšmės.

Tyrimo metu pastebėta:

- a) Didžiausios amplitudės trikdys pastebėtas ties 57.5kHz dedamąja. Tokių dedamųjų pastebima visuose signalų spektruose. Ypač 70 kHz- 90 kHz dažnių ruože. Įtarimas, kad tai spektrų persidengimo efektas dėl aukštesnio dažnių trikdžių. Trikdžio šaltinis gali būti iki 700kHz diapazone. Nustatyta, kad šiuos trikdžius kuria išorinis signalų generatorius;
- b) Pradinis efektyvaus skilčių skaičiaus įvertinimas atliktas, tačiau siekiant tiksliau įvertinti AKK dinamines charakteristikas reikia mažų iškraipymų ir triukšmų signalų generatoriaus;
- c) Kondukuoti trikdžiai esant 100 k Ω apkrovai ir tostant nuo signalo šaltinio kontakto išlaiko -40 dB trikdžių lygį.

Siūlymai, tolimesni veiksmai:

- a) Dažninių tyrimų analizė su tikslesne ir mažiau trikdžių turinčia įranga;
- b) Prevencija prieš kondukuotus trikdžius;
- c) SATS sistema yra platforma, tačiau atskirų stočių parametrai nėra stebimi ar lyginami. Vienas iš metodų galėtų būti įvedamas procesas, po kiekvienos stoties surinkimo, jas metrologiškai ištirti su tais pačiais instrumentais. Taip būtų žinomas ryšys tarp atskirų SATS sistemų. Metrologinė analizė įtrauktų ne tik dinamines, bet ir statines charakteristikas.

7 AUTOMATIZUOTOS ELEKTRONIKOS GAMINIŲ TESTAVIMO SISTEMOS METROLOGINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMO IŠVADOS

- Tyrimo metu išanalizuotos SATS dinaminės metrologinės charakteristikos ir sudarytas tikrinamų dydžių ir jų verčių sąrašas. Tyrimo metu pastebėta, kad turimos įrangos metrologiniai parametrai yra riboti tiriamojo objekto atžvilgiu ir tolimesnei charakteristikų analizei reikia naudoti metrologiškai patikimesnę įrangą.
- Tarpusavio ryšių tyrimo rezultatai parodė, kad šie įneša reikšmingą rezultatą į matavimus. Todėl atsargus įvertinimas ir papildoma analizė prieš eksploatuojant testavimo sistemą yra būtina.
- Nustatyta, kad analoginių matavimo ir signalų generavimo modulis reikalauja papildomos schemotechninės dalies (filtrų) siekiant, kad įranga patikimai matuotų arba generuotų atsakingose vietose, kur reikia didesnio nei įprastai tikslumo. Tai yra elektromagnetiškai triukšmingose zonose ar apdorojant signalą su aukštesnio dažnio signalu, nei matavimų modulio diskretizavimo dažnis.
- Sudarytas sąrašas tolimesnių veiksmų, kurie turėtų būti atliekami toliau nagrinėjant ar eksploatuojant testavimo sistemą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. **DoD.** Automatic Test Systems Architecture Guide. 1999.
2. **National Instruments.** Designing Automated Test Systems. 2009.
3. **P.F. Burrus, R. Jones, C. Luck.** A Commercial Approach to Military System Sustainment. IEEE. 2012
4. **M.Stora, S.Mann, R.Spinner, D.Droste, G.Isabella,** IEEE P1505.3TM Universal Test Interface Framework and Pin Configuration for Portable/Bench Top Test Requirements Utilization IEEE 1505 Receiver Fixture Interface Standard. IEEE. 2014
5. **M. Stora, S. Mann, R. Spinner.** Hybrid VXI/PXI/LXI Test System Using (MIPSS) IEEE-P1693 Standard. 2013
6. **H. A. Toku.** Developing New Automatic Test Equipments (ATE) using Systematic Design Approaches. IEEE. 2013.
7. **Agilent Technologies.** Test-System Development Guide. A Comprehensive Handbook for Test Engineer. USA. 2012
8. **D. Nosbusch.** Architecting High-Throughput PXI System. IEEE. USA. 2012
9. **National Instruments.** NI PXI Embedded Control Design Advantages. [Interaktyvus]. 2015-01-23. [žiūrėta: 2015-05-17]. Nuoroda internete: <http://www.ni.com/white-paper/7740/en/>
10. **R. Sodaitis, K. E. Refstie.** Standard Automated Test Station (SATS) Specification. 2014 08 25. Kitron
11. **National Instruments.** NI 622x Specifications. 371290G-01, 2007 liepa.
12. **National Instruments.** DAQ M Series. 371022K-01, 2008 liepa.
13. **FLUKE.** 8845A/8846A Digital Multimeter. Calibration Manual. 2007 sausis.
14. **Keysight Technologies.** 33500B Series Waveform Generators. Datasheet. 5991-0692EN. JAV. 2014.
15. **H. W. Ott.** Electromagnetic compatibility engineering. ISBN978-0-470-18930-6. JAV. 2009.
16. **N. Kularatna.** Digital and Analogue Instrumentation testing and measurement. ISBN978-0-85296-999-1. Jungtinė Karalystė. 2003
17. **Mathworks.** Sinad. Signal to noise and distortion ratio. [Interaktyvus]. Žiūrėta 2015-05-13. Prieiga per internetą: <http://se.mathworks.com/help/signal/ref/sinad.html>
18. **R. Ingale.** Harmonic Analysis Using FFT and STFT. 200-4254 IJSIP. 2005
19. **Keysight Technologies.** E4980A Precision LCR Meter. 20 Hz to 2 MHz. 5989-4435EN. 2014
20. **W. Kester.** MT-003 tutorial. Analog devices. 2009

Priedas 1. AI absoliutinio tikslumo lentelė

AI Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μ Vrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μ V)	Sensitivity ² (μ V)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	25	5	20	57	76	244	3,100	97.6
5	-5	85	25	5	20	60	76	122	1,620	48.8
1	-1	95	25	5	25	79	76	30	360	12.0
0.2	-0.2	135	25	5	80	175	76	13	112	5.2

$AbsoluteAccuracy = Reading \cdot (GainError) + Range \cdot (OffsetError) + NoiseUncertainty$
 $GainError = ResidualAI\GainError + GainTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco \cdot (TempChangeFromLastExternalCal)$
 $OffsetError = ResidualAI\OffsetError + OffsetTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error$
 $NoiseUncertainty = \frac{RandomNoise \cdot 3}{\sqrt{100}}$ For a coverage factor of 3 σ and averaging 100 points.

¹ Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:
 $TempChangeFromLastExternalCal = 10^\circ C$
 $TempChangeFromLastInternalCal = 1^\circ C$
 $number_of_readings = 100$
 $CoverageFactor = 3 \sigma$

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:
 $GainError = 75 ppm + 25 ppm \cdot 1 + 5 ppm \cdot 10$ $GainError = 150 ppm$
 $OffsetError = 20 ppm + 57 ppm \cdot 1 + 76 ppm$ $OffsetError = 153 ppm$
 $NoiseUncertainty = \frac{244 \mu V \cdot 3}{\sqrt{100}}$ $NoiseUncertainty = 73 \mu V$
 $AbsoluteAccuracy = 10 V \cdot (GainError) + 10 V \cdot (OffsetError) + NoiseUncertainty$ $AbsoluteAccuracy = 3,100 \mu V$

² Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.
 Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

0.1 pav. AI absoliutinio tikslumo lentelė [11]

Priedas 2. AO absoliutinio tikslumo lentelė

AO Absolute Accuracy Table

Positive Full Scale	Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (µV)
	Negative Full Scale								
10	-10		90	10	5	40	5	128	3,230

¹ Absolute Accuracy at full scale numbers is valid immediately following internal calibration and assumes the device is operating within 10 °C of the last external calibration. Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AbsoluteAccuracy = OutputValue · (GainError) + Range · (OffsetError)
GainError = ResidualGainError + GainTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco · (TempChangeFromLastExternalCal)
OffsetError = ResidualOffsetError + AOffsetTempco · (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error

Priedas 4. AO ir AI tyrimų programos algoritmas

