



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Paulius Jurkštas**

**ULTRAGARSINIO STIPRINTUVO ĮĖJIMO APSAUGOS**  
**GRANDINIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**  
Prof. Linas Svilainis

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**ULTRAGARSINIO STIPRINTUVO ĮĖJIMO APSAUGOS**  
**GRANDINIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Matavimų inžinerija (kodas 621H14001)

**Vadovas**

(parašas) Prof. Linas Svilainis  
(data)

**Recenzentas**

(parašas)  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Paulius Jurkštas  
(data)

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Paulius Jurkštas

(Studento vardas, pavardė)

Matavimų inžinerija, 621H14001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Ultragarsinio stiprintuvo įėjimo apsaugos grandinių tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 15 m. gegužės 20 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Pauliaus Jurkšto**, baigiamasis projektas tema „Ultragarsinio stiprintuvo įėjimo apsaugos grandinių 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)

Jurkštas, P. Ultragarsinio stiprintuvo įėjimo apsaugos grandinių tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. Linas Svilainis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 63 psl.

## SANTRAUKA

**Impulso aido režime dirbančios ultragarsinės sistemos imtuvo apsaugos grandinė turi apsaugoti stiprintuvą nuo perkrovų ir daryti kuo mažesnę įtaką priimtam signalui bei minimaliai apkrauti siųstuvą. Perdavimo dažninė charakteristika, atsistatymo laikas ir įėjimo impedansas priklauso nuo grandinės topologijos. Todėl apsaugos grandinių topologijų sulyginimui visus parametrus reikia vertinti kompleksiskai. Darbe atlikta mokslinės-techninės literatūros apžvalga, išskirtos esminės topologijos. Pasiūlyti tirtini parametrai, atliktas tyrimas ir pateiktas kompleksinis topologijų sulyginimas.**

*Reikšminiai žodžiai:*

**Impulso aido metodas, įėjimo apsauga, ultragarsinis stiprintuvas, diodinis ribotuvas, įsotinamas transformatorius, apsaugos grandinių tyrimas**

Jurkštas, Paulius. Investigation of ultrasonic amplifier input protection circuits. Final project of Master degree / supervisor prof. Linas Svilainis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics engineering.

Kaunas, 2015. 63 p.

## SUMMARY

**Protection circuit of receiver amplifier of an ultrasound system working in pulse-echo mode must protect the amplifier from overload and cause the least possible impact on the received signal and minimal strain on the transmitter. The transmission frequency response, recovery time and input impedance depends on the circuit topology. The parameters of all protective circuit topologies must be seen holistically. The analysis of scientific-technical literature review identified key topologies. Suggested parameters of the study and evaluation methodology, study and complex comparison topologies.**

*Keywords:*

**Pulse-echo method, input protection, ultrasound amplifier, diode limiter, saturable transformer, input protection circuit investigation**

## TURINYS

Terminų ir santrumpų žodynas.....	7
Įvadas.....	8
1. Problemos pristatymas.....	9
2. Apsaugos grandinių topologijų analizė.....	13
2.1. Diodinis ribotuvas RD .....	13
2.2. Diodinis ribotuvas su skiriamuoju kondensatoriumi CD.....	14
2.3. Diodų tiltelis 4D .....	14
2.4. Įsotinamas transformatorius TR .....	16
2.5. Įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi CTR .....	16
2.6. Srovės ribotuvas DEPL.....	17
2.7. Netiesinio talpumo ribotuvas VCAP .....	17
3. Apsaugos grandinių kokybės įvertinimo parametrai .....	19
3.1. Atsistatymo laikas.....	19
3.1.1. Imtuvo įėjimo impedanso įtakos daliklių perdavimo koeficientui tyrimas.....	23
3.2. Sunaudojama impulso energija .....	25
3.3. Dažninės perdavimo charakteristikos parametrai.....	27
3.3.1. Dažnių juostos plotis .....	27
3.3.2. Grupinis vėlinimas .....	27
3.3.3. Įterpties nuostoliai.....	27
3.4. Įėjimo impedansas .....	28
3.5. Triukšmo faktorius NF .....	28
3.6. Netiesinių iškraipymų koeficientas THD.....	29
4. Tyrimas .....	30
4.1. Tyrimo objektas.....	30
4.2. Atsistatymo laiko tyrimas .....	31
4.3. Sunaudojamos energijos tyrimas .....	32

4.4. Dažnių perdavimo charakteristikos parametrų tyrimas .....	33
4.5. Įėjimo impedansas .....	37
4.6. Triukšmo faktorius NF .....	37
4.7. Netiesinių iškraipymų koeficientas THD.....	38
5. Tyrimo rezultatai .....	39
5.1. Atsistatymo laikas.....	39
5.2. Sunaudojama impulso energija.....	42
5.3. Dažninės perdavimo charakteristikos parametrai.....	47
5.4. Įėjimo impedansas .....	48
5.5. Triukšmo faktorius NF .....	50
5.6. Netiesinių iškraipymų koeficientas.....	51
5.7. Kompleksinė grandinių analizė .....	52
5.7.1. Diodinis ribotuvas RD.....	54
5.7.2. Diodinis ribotuvas su skiriamuoju kondensatoriumi CD .....	54
5.7.3. Diodų tiltelis 4D.....	55
5.7.4. Įsotinamas transformatorius TR .....	56
5.7.5. Įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi CTR .....	56
5.7.6. Srovės ribotuvas DEPL .....	57
5.7.7. Netiesinio talpumo ribotuvas VCAP.....	58
6. Išvados .....	59
7. Literatūra.....	60

## TERMINŲ IR SANTRUMPŲ ŽODYNAS

DAQ – duomenų surinkimo sistema (data acquisition system, angl.)

DFT – diskretinė Furjė transformacija

F – Triukšmų koeficientas (noise factor, angl.)

NF – triukšmo faktorius (noise figure, angl.)

PRF – impulsų pasikartojimo dažnis (pulse repetition frequency, angl.)

PSRR – power supply rejection ratio, angl.

SWC – sine wave correlation, angl.

THD – netiesinių iškreipymų koeficientas

RMS – vidutinė kvadratinė vertė (Root Mean Square, angl.)

## IVADAS

Darbo objektas: ultragarsinis stiprintuvas su jėgimo apsaugos grandine.

Ultragarsinėje sistemoje, naudojančioje impulso aido metodą prie to paties keitiklio jungiamas ir siųstuvas ir imtuvas. Siekiant aukšto signalo ir triukšmo santykio, žadinimo įtampa aukšta ir stiprintuvo jėgimas turi būti apsaugotas specialia grandine. Literatūroje siūloma plati apsaugos grandinių gama. Skirtingų topologijų gandinės daro nevienodą įtaką imtuvo dažnių juostai ir triukšmams bei nevienodai apkrauna siųstuvą.

Impulsiniai signalai ultragarsiniuose tyrimuose naudojami dėl keleto priežasčių: jų nesudėtingas generavimas, plati juosta, gera laikinė skyra, tinka impulso aido režimui. Tačiau impulsiniams signalams pasiekti didelę energiją sudėtinga, todėl pasiekiamas signalo ir triukšmo santykis ribotas. Naudojant skleisto spektro signalus energija gali būti padidinama neprarandant skyros, tačiau tokie signalai ilgi, todėl imtuvo atsistatymo laikas itin svarbus. Kadangi šie signalai neša daugiau energijos, svarbu minimizuoti siųstuvo apkrovimą. Svarbi plati imtuvo dažnių juosta.

Apsaugos grandinės paskirtis - riboti į stiprintuvą patenkančio signalo įtampą ir daryti kuo mažesnę įtaką priimtam signalui bei minimaliai apkrauti siųstuvą.

Reikalavimai apsaugos grandinėms sudėtingi: i) riboti į stiprintuvą patenkančio signalo lygį; ii) kuo greičiau atsistatyti po siuntimo; iii) daryti minimalią įtaką praleidžiamam signalui; iv) minimaliai apkrauti siųstuvą.

**Darbo tikslas:** ištirti skirtingų topologijų imtuvus ir kompleksiskai įvertinti jų parametrus.

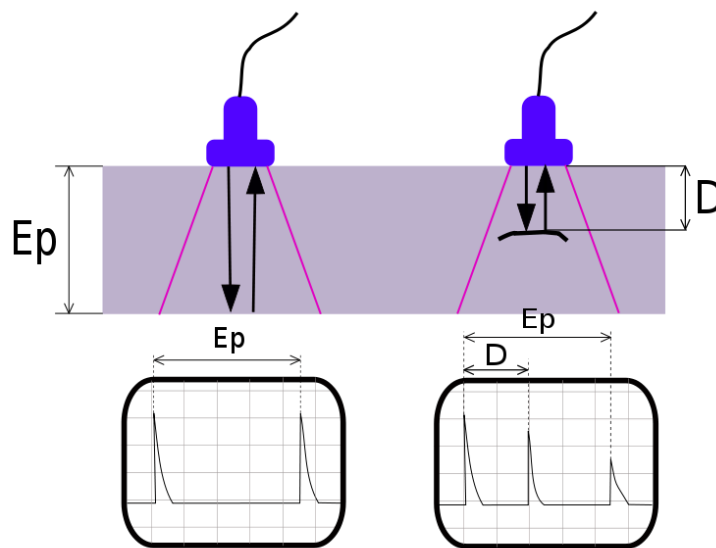
### **Darbo uždaviniai:**

- Atrinkti apsaugos grandinių topologijas tyrimui
- Atrinkti parametrus topologijų kokybės įvertinimui
- Ištirti apsaugos grandinių parametrus
- Kompleksiškai palyginti topologijas



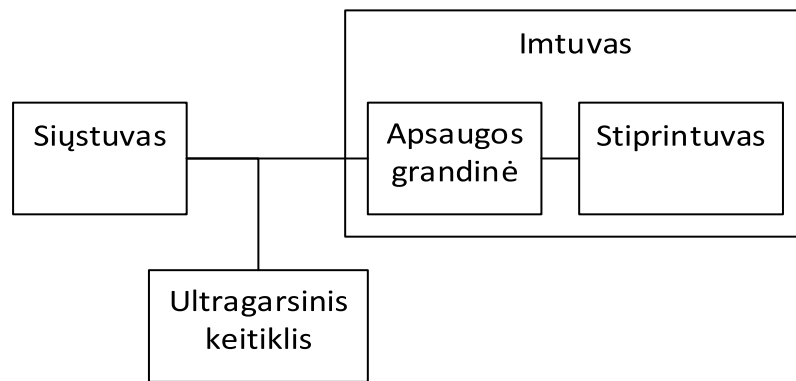
# 1. PROBLEMOS PRISTATYMAS

Ultragarsiniai tyrimai gali būti atliekami dviem režimais: praėjimo ir atspindžio [1, 2, 3]. Praėjimo režime ultragarsinis signalas siunčiamas iš vienos bandinio pusės ir priimamas kitoje. Tokiu būdu gaunamas didesnis jautrumas, galima tiksliai nustatyti defekto kontūrą, tačiau nėra informacijos apie defekto gylį. Atspindžio režime signalas siunčiamas ir atspindys priimamas toje pačioje bandinio pusėje. 1 paveiksle pateiktas aido atspindžio metodo veikimo principas.



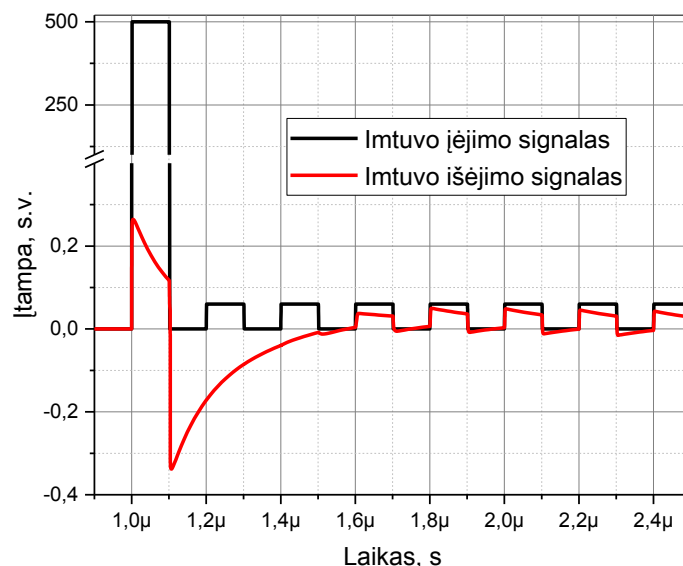
1 pav. Aido atspindžio metodo veikimo principas [4]

Ultragarsiniam bandinio tyrimui reikalingas priėjimas prie bandinio tik iš vienos pusės. Ultragarsinė sistema siunčia akustinę bangą į tiriamą objektą, priima atsispindėjusį signalą ir iš sklaidimo laikų  $D$  ir  $E_p$  nustato kokiam gylyje yra defektas. Galima naudoti dvigubą keitiklį, tačiau tokio keitiklio sudėtingesnis akustinis laukas ir norint atlikti tikslių matavimų reikalingas papildomas duomenų apdorojimas. Naudojant tą patį keitiklį siuntimui ir priėmimui šios problemos nėra. Tipinė ultragarsinės sistemos, dirbančios atspindžio režimu, struktūrinė schema pateikiama 2 pav.



2 pav. Atspindžio ultragarsinės sistemos sąsajos struktūrinė schema

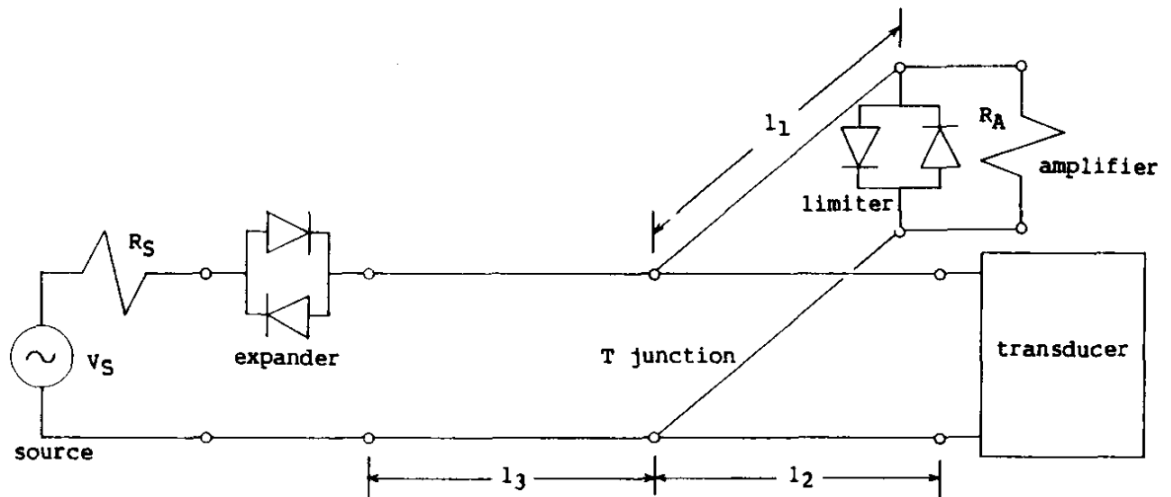
Naudojant atspindžio režimą tas pats keitiklis jungiamas ir prie siųstuvo ir prie imtuvo, todėl imtuvo jėjimas turi būti atsparus žadinimo signalui [5, 6, 2, 7]. Prieš imtuvo stiprintuvą jungiama apsaugos grandinė, kurios paskirtis – riboti į stiprintuvą patenkančio signalo įtampą. Siuntimo metu apsaugos grandinės perdavimo koeficientas turi būti minimalus, o priėmimo – maksimalus. 3 pav. pateiktas imtuvo su apsaugos grandine jėjimo ir išėjimo signalų pavyzdys.



3 pav. Imtuvo su apsaugos grandine jėjimo ir išėjimo signalai

Pirmasis impulsas – žadinimo. Po jo seka atspindžiai nuo objekto. Dėl baigtinio apsaugos grandinės atsistatymo laiko pirmų dviejų atsispindėjusių impulsų imtuvo išėjime nėra, o trečio amplitudė sumažėjusi. Impulso formos iškraipymas atsiranda dėl imtuvo dažninės perdavimo charakteristikos įtakos, tačiau tai tiesiniai iškraipymai, kuriuos nesudėtinga kompensuoti apdorojimo metu.

Apsaugos nuo žadinančio signalo problema radiolokacijoje nagrinėjama pakankamai seniai. Tačiau radiolokacijoje problema skiriasi iš esmės: santykinė zonduojančio signalo juosta yra siaura ir bangos ilgis trumpas. Radiolokacijoje populiarios grandinės pavyzdys pateiktas 4 paveiksle.



4 pav. Ultragarsinė sistema su perdavimo linijomis [6]

Imtuvas prijungiamas prie siųstuvas-antena grandinės ketvirčio bangos ilgio ryšio linija. Aukštos įtampos zonduojantis signalas sukelia stiprintuvo jėgimo grandinės apsaugos suveikimą ir stiprintuvo jėjimas užtrumpinamas. Dėl ketvirčio bangos sklidimo kelio tai neturi įtakos grandinei siųstuvas-antena. Apsaugos grandinė gali būti tiek diodinis ribotuvas, tiek dujinis iškroviklis. Grandinė gali būti naudojama ir aukšto dažnio ( $>20$  MHz) ultragarsinėms sistemoms, tačiau ketvirčio bangos ilgis išlaikomas tik esant siauros juostos signalams. Parenkant linijų ilgius ir siųstuvo, imtuvo ir keitiklio impedansus galima optimizuoti imtuvo apsaugos grandinės veikimą [6, 8]. Dar viena radiolokacijoje paplitusi grandinė – cirkulatorius [9]. Kita telekomunikacijoje paplitusi grandinė – hibridinis transformatorius. Plačiausiai naudojamas ultragarso dažnių diapazonas: nuo 0,5 MHz iki 30 MHz. Svarbu pastebėti, kad ultragarsinių keitiklių jėjimo impedansas yra kompleksinis ir ženkliai kinta jo darbo diapazone [10]. Minėtos apsaugos grandinės efektyviai veikia tik tada kai apkrovos impedansai stabilūs (paprastai –  $50 \Omega$  arba  $600 \Omega$ ). Užtikrinti ketvirčio bangos ilgį arba stabilų impedansą įmanoma tik siaurame dažnių diapazone, todėl tokios grandinės netinka plačiajuosčiams signalams.

Paprastai ultragarsiniuose tyrimuose naudojami impulsiniai signalai: jų nesudėtingas generavimas, plati juosta, gera laikinė skyra, tinka impulso aido režimui. Plati juosta reikalinga laikinės skyros užtikrinimui. Todėl siekiama naudoti plačiajuosčius keitiklius. Keitiklio juostos plotis nusakomas santykiu su centriniu dažniu ir paprastai išreiškiamas procentais. Pavyzdžiui 5 MHz 80 % juostos pločio keitiklis turės 4 MHz pločio juostą. Sklidimo laiko įvertinimo atsitiktinės paklaidos priklauso nuo signalo efektinio spektro pločio  $F_e$ , signalo energijos  $E$  ir triukšmo energijos  $N_0$  santykio, kaip tai apibrėžia Cramer-Rao apatinė riba (CRLB, Cramer-Rao lower bound, angl.) [11, 12]

$$\sigma(TOF) \geq \frac{1}{2\pi F_e \sqrt{\frac{2E}{N_0}}} \quad (1.1)$$

Siekiant pagerinti skyrą bei tikslumą reikia didinti signalo energiją bei plėsti dažnių juostą [13]. Impulsiniams signalams šie reikalavimai prieštarauja vienas kitam. Skleisto spektro signalai leidžia padidinti abu parametrus [14]: galima pasiekti ženkliai didesnę signalo energiją neprarandant skyros. Tačiau skleisto spektro signalų naudojimas kelia specifinius reikalavimus elektronikai. Tokie signalai ilgi, todėl trumpėja laikas tarp siuntimo pabaigos ir priėmimo pradžios, dėl šios priežasties imtuvo atsistatymo laikas daro ženklesnę įtaką minimaliam matavimo atstumui. Kadangi skleisto spektro signalai turi daugiau energijos, svarbu ir minimizuoti siųstuvo apkrovimą.

Šiame darbe tiriamos tik grandinės, kurios gali dirbti plačiame dažnių diapazone, nereikalauja išorinio valdymo ir kurioms nėra būtinas derinimas su perdavimo linijomis.

## 2. APSAUGOS GRANDINIŲ TOPOLOGIJŲ ANALIZĖ

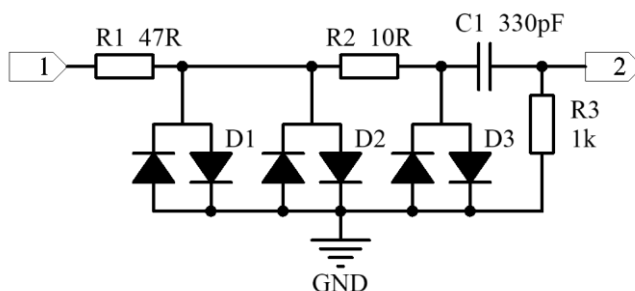
Ultragarsinio imtuvo jėjimo grandinės paskirtis – apsaugoti stiprintuvą nuo sugadinimo siuntimo metu. Egzistuoja keletas skirtingų grandinių topologijų, kurios skiriasi veikimo principu bei parametrais. Atlikus literatūros analizę išskirtos 7 pagrindinės apsaugos grandinių topologijos:

- Diodinis ribotuvas RD [5, 2, 15, 6]
- Diodinis ribotuvas su skiriamuoju kondensatoriumi CD (RD modifikacija)
- Diodų tiltelis 4D [16, 2, 17]
- Įsotinamas transformatorius TR [18]
- Įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi CTR (TR modifikacija)
- Srovės ribotuvas DEPL [2, 19, 20]
- Netiesinio talpumo ribotuvas VCAP [21]

Žemiau pristatomos grandinės.

### 2.1. Diodinis ribotuvas RD

Klasikinė, plačiai naudojama grandinė [5, 2, 15, 6]. Tai pati paprasčiausia iš visų nagrinėtų grandinių. Principinė schema pateikta 5 pav.



5 pav. RD grandinė

Priėmimo metu, kai signalo amplitudė maža, diodų impedansas aukštas. Siuntimo metu diodai atsidaro ir didžioji dalis įtampos krenta ant rezistoriaus R1. Rezistorius R2 ir diodas D3 riboja įtampą, atsirandančią ant diodų D1, D2.

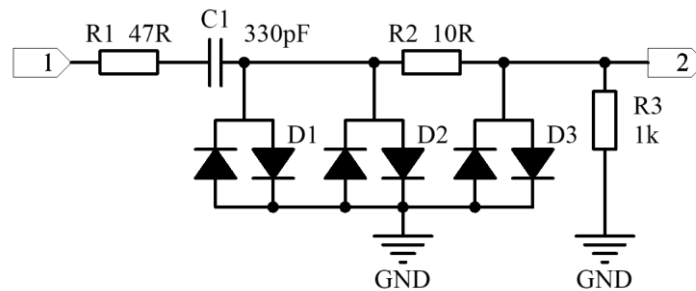
Grandinė apkrauta stiprintuvo jėjimo varža R3, todėl iš R1, R2 ir R3 susidaro įtampos daliklis, slopinantis signalą ir didinantis įterpties nuostolius, todėl R1 parenkamas atsižvelgiant į konkretaus taikymo keliamus reikalavimus. [5] naudojami diodai ir 680 Ω kaip kompromisinė vertė tarp siųstuvo apkrovimo ir priimamo signalo slopinimo. [15] naudojama į maitinimą įjungta diodų pora ir 20 kΩ varža, kuri su diodų sandūros talpa formuoja stiprintuvo jėjimo

dažninę charakteristiką. Šiame tyrime R1 parinktas  $47\ \Omega$  siekiant gauti suderintam artimą įėjimo impedansą siuntimo metu tuo pačiu sumažinant įterpties nuostolius.

Apatinę pralaidos juostos ribą nustato skiriamasis kondensatorius C1 ir stiprintuvo įėjimo varža R3.

## 2.2. Diodinis ribotuvas su skiriamuoju kondensatoriumi CD

Modifikuota RD grandinė pateikta 6 pav.



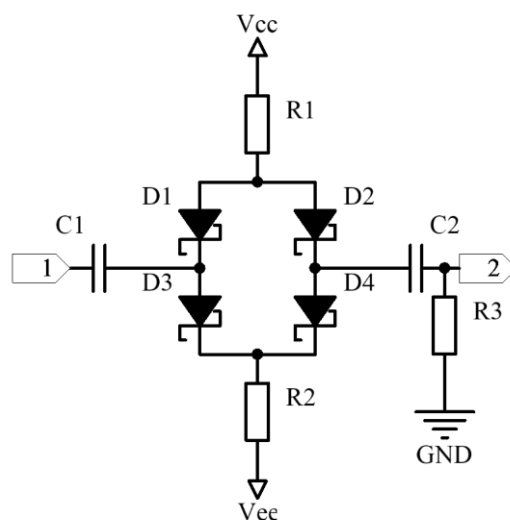
6 pav. CD grandinė

Skiriamasis kondensatorius C1 perkeltas prieš diodinį įtampos ribotuvą D1-D3. Ši modifikacija sumažina grandinės suvartojamą energiją, nes srovė teka tik įkraunant ir iškraunant kondensatorių impulso frontų metu. Dėl to impulso energijos suvartojimas turėtų būti proporcingas įtampos kvadratui bei mažai priklausyti nuo impulso trukmės. Priėmimo metu diodų impedansas aukštas, todėl apatinę pralaidos juostos ribą kaip ir RD grandinėje nustato C1 ir stiprintuvo įėjimo varža R3.

Grandinė galvaniškai atišta, todėl galima naudoti ultragarsinėse sistemose su nuolatine įtampa ant keitiklio.

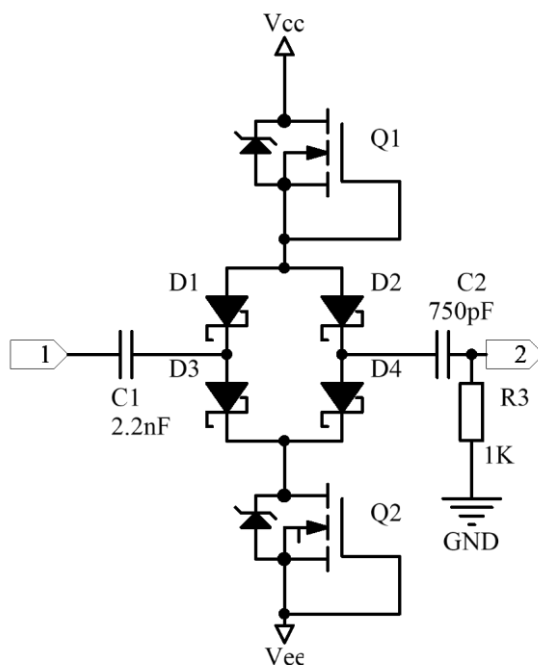
## 2.3. Diodų tiltelis 4D

Diodų tiltelio tipo grandinės [16, 2, 17] schema pateikta 7 paveiksle. Per diodus tekant ramybės srovei, jų dinaminė varža maža, todėl signalas praeina per tiltelį. Siuntimo metu srovė teka per vieną iš diodų, o du su juo besiribojantys tiltelio diodai dėl didelės žadinimo signalo įtampos uždaromi taip atjungiant stiprintuvą nuo siųstuvo.



7 pav. 4D su pasyviniu rambės srovės nustatymu

Grandinėje panaudoti C3D1P7060Q silicio karbido (SiC) Šotkio diodai, kurie pasižymi labai mažu atbulinio atsistatymo krūviu ir mažu sandūros krūviu, todėl atsistatymas ypatingai greitas. Rezistoriai R1 ir R2 nustato rambės srovę, kuri priklauso nuo maitinimo įtampos ir srovę impulso metu, kuri priklauso nuo impulso įtampos, todėl jų varža turi būti kompromisinė. Mažinant rambės srovę didėja diodų dinaminė varža ir tuo pačiu triukšmas bei įterpties nuostoliai, o didinant varžą didėja srovė impulso metu ir tuo pačiu grandinės energijos sąnaudos. Patobulinta grandinė pateikta 8 paveiksle.



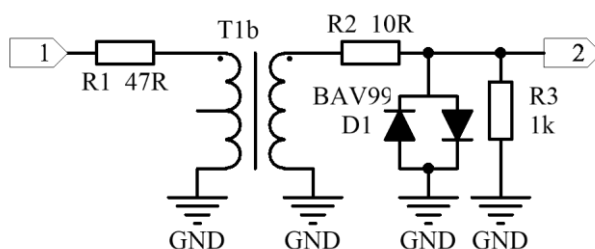
8 pav. 4D su aktyviniu rambės srovės nustatymu

Rezistoriai pakeisti lauko tranzistoriais su pradiniu kanalu Q1 ir Q2, kurie šiuo atveju veikia kaip srovės šaltiniai. Tai leidžia laisviau parinkti rambės srovę bei riboti srovę siuntimo metu. Panaudoti BSS126 tranzistoriai, kurių soties srovė – 22 mA.

Grandinė galvaniškai atišta, todėl galima naudoti ultragarsinėse sistemose su keitiklio priešįtampiu.

## 2.4. Įsotinamas transformatorius TR

Apsaugos grandinės su įsotinamu transformatoriumi (TR) [18] principinė schema pateikta 9 pav.



9 pav. TR grandinė

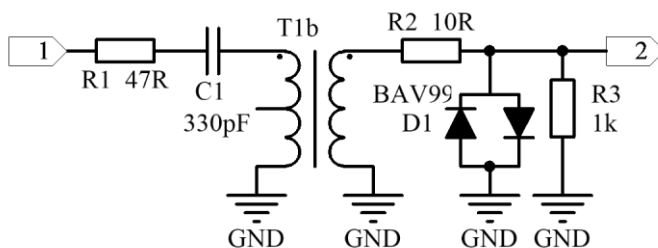
Šios grandinės išskirtinis bruožas – stiprus galvaninis ryšys: grandinės jėgimo impedansas nuolatinei srovei žemas. Priėmimo metu diodų impedansas aukštas, todėl transformatorius apkrautas tik stiprintuvo jėgimo varža. Siuntimo metu įtampą stiprintuvo jėgime riboja diodai, o srovę – transformatoriaus šerdies įsotinimas.

Grandinės jėgimo impedansas siuntimo metu susideda iš rezistoriaus R1 ir transformatoriaus pirminės apvijos varžos. R1 parinktas 47  $\Omega$  siekiant suderinti jėgimo impedansą siuntimo metu. Dažninė perdavimo charakteristika priklauso nuo transformatoriaus parametrų.

Tyrimė panaudotas transformatorius su 1:1 apvijų santykiu, tačiau projektuojant grandinę konkrečiam taikymui santykį galima parinkti taip padidinant arba sumažinant jėgimo impedansą, įtampos perdavimo koeficientą ar optimizuojant grandinę triukšmui sumažinti [22].

## 2.5. Įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi CTR

TR grandinė su įsotinamu transformatoriumi papildyta skiriamuoju kondensatoriumi. CTR grandinės schema pateikta 10 pav.



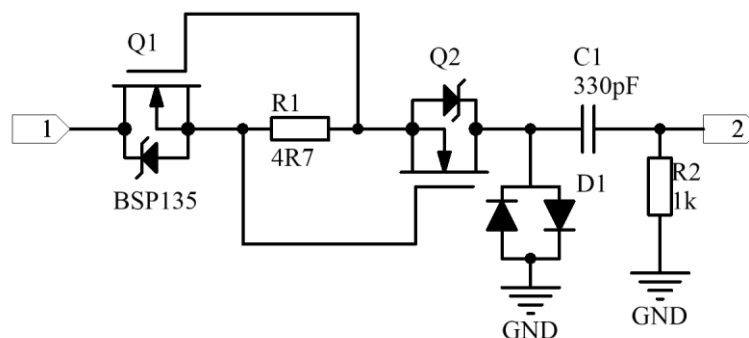
10 pav. CTR grandinė



Prenkant kondensatoriaus talpą galima keisti grandinės apatinę pralaidos juostos ribą nekeičiant transformatoriaus parametrų. Dar daugiau, kaip ir CD grandinėje, kondensatorius riboja energijos kiekį siuntimo metu. Grandinė galvaniškai atišta, todėl galima naudoti ultragarsinėse sistemose su keitiklio prieštampiu.

## 2.6. Srovės ribotuvas DEPL

Grandinė su lauko tranzistoriais su pradiniu kanalu. Tokio tipo tranzistorius su kartu sujungta užtūra ir santaka gali veikti kaip srovės šaltinis [2, 19, 20]. DEPL tipo grandinės su papildomu srovę ribojančiu rezistoriumi R1 schema pateikta 11 pav.



11 pav. DEPL tipo grandinė su srovę ribojančiu rezistoriumi

Grandinė su lauko tranzistoriais su pradiniu kanalu. Tokio tipo tranzistorius su kartu sujungta užtūra ir santaka gali veikti kaip srovės šaltinis [2, 19, 20]. Kadangi tranzistoriai jungiami nuosekliai su signalo šaltiniu, būtina įvertinti įterpties nuostolius dėl tranzistorių kanalo varžos.

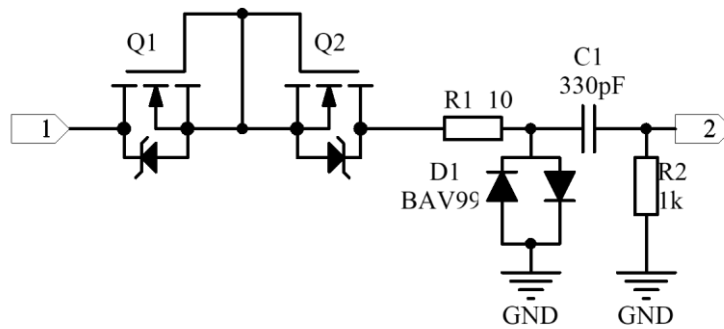
R1 parenkamas pagal [19]

$$R = \frac{V_{GS(OFF)}}{I_D} \cdot \left( \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

čia  $I_D$  - pageidaujama srovės riba,  $V_{GS(OFF)}$  - atkirtos įtampa  $I_{DSS}$  - santakos soties srovė, kai  $V_{GS} = 0V$ . Panaudotas BSP135 tranzistorius. Su  $4,7 \Omega$  R1 rezistoriumi suformuotas apytiksliai 50 mA srovės šaltinis.

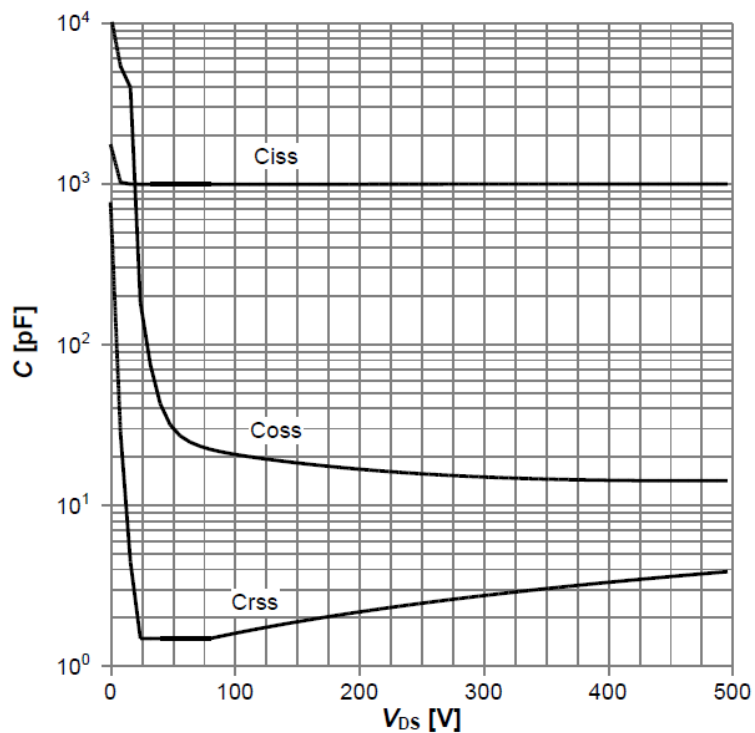
## 2.7. Netiesinio talpumo ribotuvas VCAP

Vietoje įprastinio skiriamojo kondensatoriaus CD grandinėje galima panaudoti įtampa valdomą kondensatorių – varikapą [21]. 12 pav. pateikta grandinės schema su lauko tranzistoriais vietoje varikapų.



12 pav. VCAP tipo grandinė

Kadangi didelės talpos ir darbinės įtampos varikapą rasti sunku, panaudoti lauko tranzistoriai su indukuojamuoju kanalu. Šiam taikymui tranzistoriai labiau tinka dėl didesnio nei varikapų talpos netiesiškumo. 13 paveiksle pateikta IPD65R225C7 talpų priklausomybė nuo santakos-ištakos įtampos, kai  $V_{DS} = 0$  V.



$C=f(V_{DS}); V_{GS}=0$  V;  $f=250$  kHz

13 pav. IPD65R225C7 talpų priklausomybė nuo  $V_{GS}$  [23]

Šių tranzistorių išėjimo talpa  $C_{OSS}$  augant kanalo įtampai  $V_{GS}$  sumažėja 1000 kartų. Kai įėjimo įtampa artima 0 V, tranzistorių talpa gali siekti 10 nF, todėl dominuoja nuosekliai sujungto kondensatoriaus  $C1$  talpa. Siuntimo metu, priklausomai nuo impulso įtampos, tranzistorių talpa sumažėja iki dešimčių pF. Tiroje grandinėje panaudotų dviejų nuosekliai sujungtų tranzistorių išmatuotoji talpa – 3 nF.

Nors grandinė turi skiriamuosius kondensatorius, tačiau jie netiesiniai, todėl netinka naudoti sistemose su nuolatine dedamąja ant keitiklio.

### 3. APSAUGOS GRANDINIŲ KOKYBĖS ĮVERTINIMO PARAMETRAI

Imtuvo su apsaugos grandines apibūdina grupė parametru, kiekvieno kurių svarba priklauso nuo konkretaus grandinės taikymo. Siekiant sukurti tvirtą techninį pagrindą ultragarsinių kontrolės įrangos prietaisų specifikavimui yra išleistas standartas EN 12668-1:2010 [24]. Dokumente pateiktas parametru sąrašas, kurį techninėje dokumentacijoje privalo nurodyti įrangos gamintojas, aprašyti metodai šiems parametrams išmatuoti, daliai parametru nurodyti tinkamumo kriterijai. Tačiau standarte nevertinami svarbūs apsaugos grandinių parametrai: imtuvo sunaudojama energija siuntimo metu, triukšmo faktorius NF, netiesinių iškraipymų koeficientas THD [2]. Sunaudojama energija svarbi projektuojant ar parenkant siųstuvą bei įeina į visos ultragarsinės sistemos energijos sąnaudas. Mažas triukšmo faktorius NF svarbus atliekant precizinius ultragarso sklidimo laiko tyrimus [25]. Tiriant netiesines medžiagų savybes svarbus kuo mažesnis imtuvo netiesiškumas, kurį nusako THD [26].

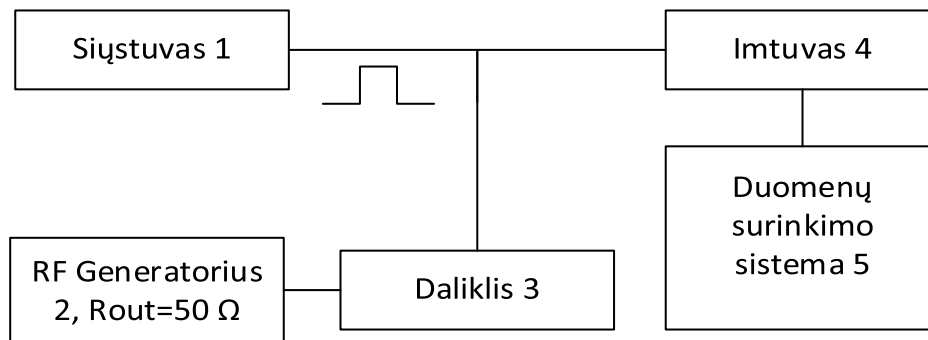
Siūlomas apsaugos grandinių specifikacijų sąrašas:

- Atsistatymo laikas.
- Sunaudojama impulso energija.
- Dažninės perdavimo charakteristikos parametrai:
  - Dažnių juostos plotis.
  - Grupinis vėlinimas.
  - Įterpties nuostoliai.
- Įėjimo impedansas:
  - Įėjimo impedanso modulis.
  - Lygiagreči įėjimo varža.
  - Lygiagreči įėjimo talpa.
- Triukšmo faktorius NF.
- Netiesinių iškraipymų koeficientas THD.

Žemiau pateikiamas parametru matavimo metodikos aprašymas.

#### 3.1. Atsistatymo laikas

Atsistatymo laikas – laiko intervalas po siųstuvo impulso pradžios kurį dėl apsaugos grandinės įsisotinimo nuo siųstuvo impulso imtuvas negali reaguoti į ateinančius signalus, kai naudojamas atspindžio režimas. 14 paveiksle pateikta atsistatymo laiko matavimo blokinė schema.

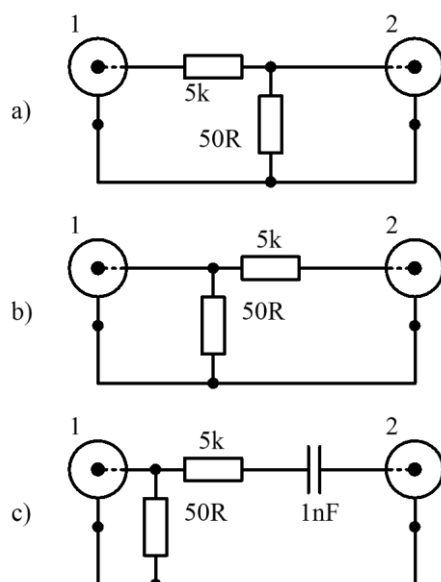


14 pav. Atsistatymo laiko tyrimo jungimo blokinė schema

1 – ultragarsinių impulsų generatorius. 2 – RF generatorius, generuojantis ultragarso signalą, kurį turi priimti imtuvas. 3 – daliklis: apsaugo generatorių nuo sugadinimo siuntimo metu ir vietoje ultragarsinio keitiklio apkrauna siųstuvo išėjimą ir imtuvo įėjimą. 4 – ultragarsinis imtuvas, kurio reakcija į žadinimo impulsą ir atsistatymas po jo tiriamas šiame darbe. 5- kompiuterinė duomenų surinkimo sistema (oscilografas), kuria surinkti duomenys toliau apdorojami. Apsaugo generatorių nuo sugadinimo bei tam tikru impedansu apkrauna siųstuvą taip imituojant prijungtą ultragarsinį keitiklį.

Standarte EN 12668-1:2010 [24] nurodoma matuoti priimamo signalo amplitudę ir atsistatymo momentu laikyti signalo 50 % (-6 dB) amplitudės. Šiame darbe siūloma naudoti - 3 dB (70 %) Šis lygis tiksliau nusako imtuvo atsistatymą, nes amplitudė tik nedidele dalimi mažesnė už pilną amplitudę. Taip pat rekomenduojama pateikti 95 % atsistatymo laiką, kuris nusako pilną grandinės parametrų atsistatymą ir pereinamųjų procesų pabaigą.

Standarte nurodoma naudoti standartinį 50 Ω daliklį. Darbe pasiūlyti dar du dalikliai, kurių savybės labiau tinka atsistatymo laiko įvertinimui. Konkretaus daliklio pasirinkimą turėtų lemti ultragarsinėje sistemoje numatomo naudoti ultragarsinio keitiklio savybės. 15 pav. pateiktos trijų daliklio schemas.



15 pav. Atsistatymo laiko matavimui naudoti dalikliai. 1 – į RF generatorių, 2 – į UG sistemą. 50R tipas, atitinkantis EN 12668-1 (a), 5k tipas (b), C tipas (c)

### **50R daliklis**

Išėjimo varža atitinka standartinio 50  $\Omega$  daliklio, kokį reikalauja naudoti EN 12668-1:2010 [24], išėjimo varžą, todėl daliklis pasižymi stipriu galvaniniu ryšiu į žemę. 5 k $\Omega$  varža parinkta siekiant gauti 2 V signalą generatoriaus įėjime, kai siųstuvo impulso amplitudė – 400 V.

Šis daliklis pasižymi keletu trūkumų: maža ominė daliklio varža neatitinka pjezokeraminių ar CMUT [27] keitiklių aukšto impedanso, stiprus galvaninis ryšys gali sugadinti keitiklio prieštampio nustatymo grandines, keitiklio impedansas net ties centriniu dažniu ne visais atvejais yra 50  $\Omega$ . Dėl to siūlomi keitikliai su 100 kartų aukštesne išėjimo varža.

### **5k daliklis**

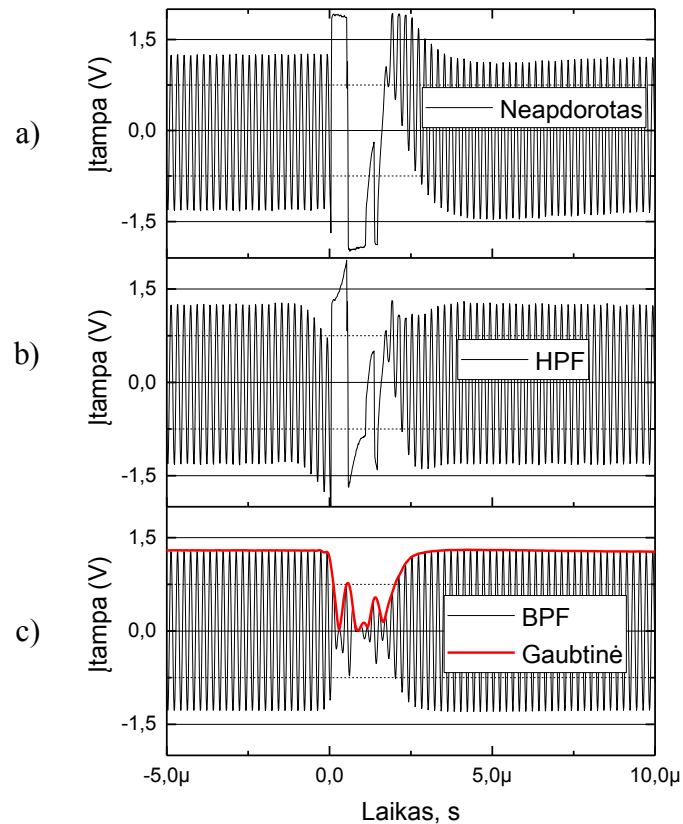
15 pav. b pateikta 5k daliklio schema. Išėjimo varža - 5 k $\Omega$ , todėl galvaninis ryšys į žymiai silpnesnis, daliklis mažiau apkrauna ultragarsinę sistemą bei daro mažesnę įtaką atsistatymo procesams.

### **C daliklis**

15 pav. a pateikta C daliklio schema. Tai 5k tipo daliklis, papildytas išėjime nuosekliai įjungtu 1 nF kondensatoriumi taip panaikinant galvaninį ryšį. Tai leidžia daliklį naudoti su ultragarsinėmis sistemomis su keitiklio prieštampiu, pavyzdžiui CMUT. Kondensatoriaus talpa parinkta taip, kad kai  $f > 500 \text{ kHz}$  to įtaka būtų nykstamai maža.

### Atsistatymo laiko įvertinimas iš gauto signalo

Signalas registruojamas oscilografu arba DAQ [28]. Matavimo ir apdorojimo pavyzdys pateiktas 16 pav.

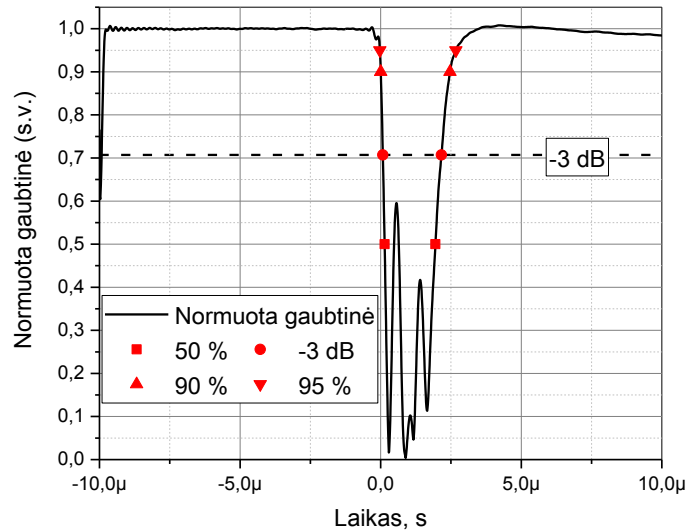


16 pav. Signalo apdorojimo seka

Pirmiausia signalas filtruojamas nulinės fazės aukštų dažnių filtru (HPF), kurio ribinis dažnis – 10 % generatoriaus signalo dažnio. Pradinio signalo pavyzdys pateiktas 16 pav. a, filtruoto HPF - 16 pav. b Galiausiai signalas filtruojamas juostiniu filtru (BPF), kurio centrinis dažnis ir juostos plotis – generatoriaus signalo dažnis. Signalų pavyzdys pateiktas 16 pav. c. HPF naudojamas pašalinti didelės amplitudės žemo dažnio dedamąsias, o BPF – triukšmą ir aukštesnes harmonikas. Po filtravimo signalo gaubtinė gaunama atliekant Hilberto transformaciją, kuri diskretiniame pavidale gali būti užrašoma kaip

$$s_{Henv_n} = \left| \sum_{k=1}^N \left\{ \left( \sum_{n=1}^N s[n] e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \right) \cdot 2 \cdot H[k] \cdot e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \right\} \right| \quad (3.1)$$

čia  $s[n]$  – signalas,  $N$  – imčių skaičius,  $H[k]$  – Hevisaido funkcija dažnių srityje. Juostiniu filtru filtruotas signalas ir Hilberto transformacija gauta gaubtinė pateikta 16 pav. c. Gaubtinė normuojama pagal vidutinę signalo amplitudę prieš siūstovo impulsą. Pavyzdys pateiktas 17 pav.



17 pav. Amplitudės atsistatymo iki 50 %, -3 dB, 90 % ir 95 % matavimas

Atsistatymo iki tam tikro lygio momentu laikomas paskutinis signalo amplitudės pakilimas virš to lygio. Atsistatymo laiko pradžia laikomas pirmas signalo lygio sumažėjimas žemiau to lygio. Atsistatymo laikas yra šių dviejų laikų skirtumas.

### 3.1.1. Imtuvo jėjimo impedanso įtakos daliklių perdavimo koeficientui tyrimas

Varžinio daliklio perdavimo koeficientas priklauso nuo šaltinio ir apkrovos varžos. Šaltinio varža – generatoriaus išėjimo varža – fiksuota, o apkrovos varža – ultragarsinio imtuvo jėjimo varža – apsaugos grandinės atsistatymo po žadinimo signalo metu kinta. Dėl to būtina atsižvelgti į daliklio perdavimo koeficiento priklausomybę nuo jos.

50R daliklio tiesioginio įtampos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo imtuvo jėjimo impedanso priėmimo metu  $Z_{UGI}$ , kai generatoriaus išėjimo impedansas – 50 Ω:

$$\tau_{50R12}(Z_{UGI}) = \frac{1}{2} \frac{Z_{UGI}}{51Z_{UGI} + 2525} \quad (3.2)$$

50R daliklio atgalinio perdavimo koeficiento priklausomybė nuo siųstuvo išėjimo impedanso siuntimo metu  $Z_{UGS}$ , kai generatoriaus jėjimo impedansas – 50 Ω:

$$\tau_{50R21}(Z_{UGS}) = \frac{25}{51Z_{UGS} + 2525} \quad (3.3)$$

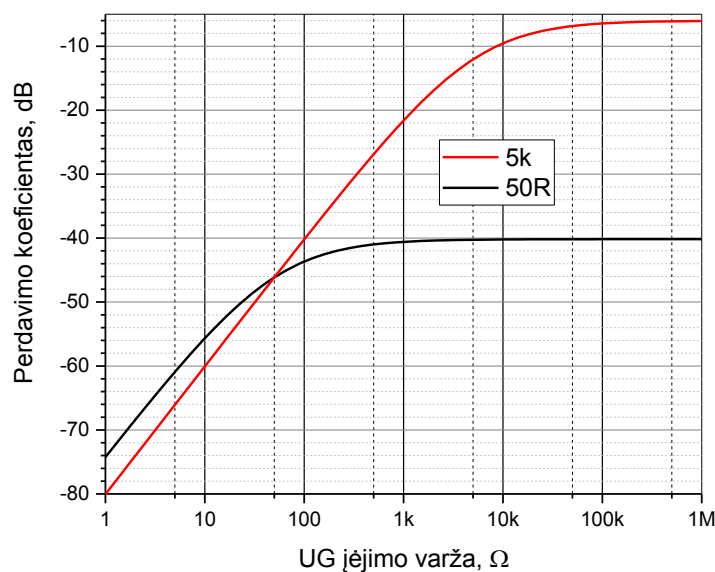
5k daliklio tiesioginio įtampos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo imtuvo jėjimo impedanso priėmimo metu  $Z_{UGI}$ , kai generatoriaus išėjimo impedansas – 50 Ω:

$$\tau_{5k12}(Z_{UGI}) = \frac{1}{2} \frac{Z_{UGI}}{5025 + Z_{UGI}} \quad (3.4)$$

5k daliklio atgalinio perdavimo koeficiento priklausomybė nuo siųstuvo išėjimo impedanso siuntimo metu  $Z_{UGS}$ , kai generatoriaus įėjimo impedansas – 50 Ω:

$$\tau_{5k21}(Z_{UGS}) = \frac{25}{5025 + Z_{UGS}} \quad (3.5)$$

Daliklių 50R ir 5k tiesioginio perdavimo koeficientų  $\tau_{5k12}(Z_{UGI})$  ir  $\tau_{50R12}(Z_{UGI})$  priklausomybė nuo imtuvo įėjimo impedanso  $Z_{UGI}$  grafiškai pavaizduota 18 paveiksle.

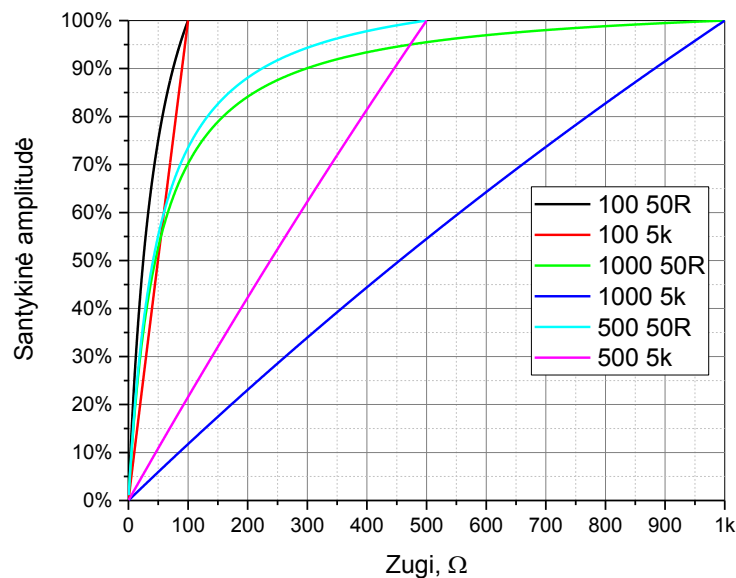


18 pav. Daliklių (15 pav. b, c) perdavimo koeficiento priklausomybė nuo imtuvo įėjimo varžos

Kai imtuvo impedansas  $Z_{UGI} = 50\Omega$ , koeficientai susilygina ties -46 dB reikšme, tačiau impedansui tolstant nuo šios reikšmės daliklių veikimas skiriasi.

Remiantis matavimų rezultatais, įėjimo impedansas gali kisti 50 Ω – 1 kΩ diapazone. 50R daliklio perdavimo koeficientas šiame diapazone kinta nuo -46 dB iki -41 dB, o 5K – nuo -46 dB iki -22 dB. Dėl šios priežasties 5K daliklis yra žymiai jautresnis imtuvo įėjimo impedanso kitimui atsistatymo metu. Palyginimas pateiktas 19 paveiksle.





19 pav. Santykinės amplitudės priklausomybė nuo ultragarsinio imtuvo jėjimo varžos

Pavyzdyje pateiktas daliklio perdavimo koeficientas trimis atvejais: kai atsistatymo metu kinta nuo  $0 \Omega$  iki  $100 \Omega$ ,  $500 \Omega$  arba  $1 \text{ k}\Omega$ . Matyti, kad jėjimo impedansui augant daliklių perdavimo koeficientų kitimo pobūdis skirtingas. 1 lentelėje pateikti jėjimo impedansai procentais nuo atsistačiusio jėjimo impedanso, kuriems esant daliklių perdavimo koeficientai atitinka 50 %, -3 dB, 90 % ir 95 % amplitudės.

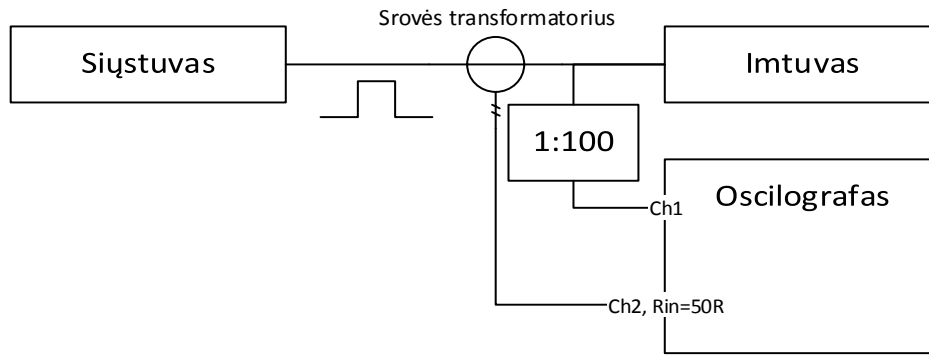
1 lentelė. Jėjimo impedanso atsistatymo įtaka amplitudei naudojant 50R ir 5k daliklius

Atsistačiusio jėjimo impedansas	$Z_{UGI} = 100 \Omega$		$Z_{UGI} = 500 \Omega$		$Z_{UGI} = 1 \text{ k}\Omega$	
Amplitudės atsistatymo lygis	5k	50R	5k	50R	5k	50R
50%	50%	25%	48%	8%	45%	5%
-3dB (~70,8 %)	70%	44%	69%	18%	67%	10%
90%	90%	75%	89%	45%	88%	30%
95%	95%	86%	95%	63%	94%	47%

50R daliklio išėjimo amplitudė atsistato žymiai greičiau, todėl, jei apsaugos grandinės impedansas siuntimo metu sumažėja, atsistatymo laikas matuojant su šiuo dalikliu gali būti išmatuotas trumpesnis. Visais atvejais 5K daliklio amplitudės dalis artima jėjimo impedanso daliai.

### 3.2. Sunaudojama impulso energija

Ultragarsinis keitiklis ir imtuvas prie siūstuvo prijungti lygiagrečiai, todėl svarbu kiek impulso energijos siuntimo metu sunaudoja imtuvo apsaugos grandinė. 20 paveiksle pateikta energijos matavimo blokinė schema.



20 pav. Sunaudojamos energijos matavimo schema

Srovės transformatoriaus pirminė apvija jungiama nuosekliai tarp siųstuvo išėjimo ir imtuvo įėjimo. Kadangi ne visų grandinių įėjimo impedansas siuntimo metu suderintas, siekiant sumažinti atspindžius, svarbu srovės transformatoriaus pirminę apviją jungti prie siųstuvo ir imtuvo kuo trumpesniais kabeliais. Įtampa imtuvo įėjime  $u_L$  per 1:100 daliklį patenka į pirmąjį oscilografo įėjimą. Srovės transformatoriaus antrinė apvija jungiama į antrąjį oscilografo įėjimą, kurio įėjimo varža  $R_a = 50 \Omega$ . Oscilografu registruojamos siųstuvo įtampa ir transformatoriaus antrinės apvijos įtampa.

Pirminės apvijos srovė  $i_p$  gali būti apskaičiuojama pagal

$$i_p[n] = \frac{u_a[n]}{R_a} \frac{N_a}{N_p} \quad (3.6)$$

čia  $N_p$  – pirminės apvijos vijų skaičius,  $N_a$  – antrinės apvijos vijų skaičius,  $u_a$  – antrinės apvijos įtampa. Tačiau taip neįvertinama matavimo sistemos perdavimo charakteristikos priklausomybė nuo dažnio.

Siekiant padidinti matavimo tikslumą matavimo sistema kalibruojama vietoje imtuvo prijungiant žinomos varžos apkrovą  $R_{cal}$  ir išmatuojant ant  $R_{cal}$  krentančią įtampą  $u_{Lcal}$  ir antrinės apvijos įtampą  $u_{acal}$ . Taikoma dekonvoliucija [29] panaudojant tiesioginę ir atvirkštinę diskretinę Furjė transformaciją (DFT). Išėjimo signalo DFT santykis su įėjimo signalo DFT yra sistemos impulsinės charakteristikos DFT:

$$G[k] = \frac{F(\{u_{Lcal}\})}{R_{cal} \cdot F(\{u_{acal}\})} \quad (3.7)$$

čia tiesioginė ir atvirkštinė DFT

$$X[k] = F(\{x\}) = \sum_{n=0}^{N-1} \left( x[n] \cdot e^{-\frac{2\pi i k n}{N}} \right) \quad (3.8)$$

$$x[n] = F^{-1}(\{X\}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left( X[k] \cdot e^{\frac{2\pi i k n}{N}} \right) \quad (3.9)$$

Srovė, tenkanti per srovės transformatoriaus pirminę apviją

$$i_p[n] = F^{-1}(\{F\{u_a\} \cdot G[k]\}) = F^{-1}\left(\left\{F\{u_a\} \cdot \frac{F(\{u_{Lcal}\})}{R_{cal} \cdot F(\{u_{acal}\})}\right\}\right) \quad (3.10)$$

Momentinė galia

$$p[n] = i_p[n] \cdot u_L[n] \quad (3.11)$$

Energija

$$e[n] = \sum_{k=0}^n (p[k] \cdot T_s) \quad (3.12)$$

čia  $T_s$  – imčių periodas.

Pateikiama didžiausia energijos vertė

$$E = \max\{e\} \quad (3.13)$$

### 3.3. Dažninės perdavimo charakteristikos parametrai

Išmatuojama dažninė perdavimo charakteristika, iš kurios nustatomas dažnių juostos plotis ir įterpties nuostoliai.

#### 3.3.1. Dažnių juostos plotis

Išmatuojama grandinės įtampos perdavimo koeficiento dažninė charakteristika

$$A(f) = 20 \lg \left( \frac{U_{out}(f)}{U_{in}(f)} \right) \quad (3.14)$$

čia  $U_{in}(f)$  - grandinės įėjimo įtampa,  $U_{out}(f)$  - grandinės išėjimo įtampa. Nustatomas didžiausias perdavimo koeficiento dažnis  $f_{max}$  ir didžiausias perdavimo koeficientas  $A(f_{max})$ .

Centrinis dažnis  $f_o$  yra  $f_u$  ir  $f_l$  geometrinis vidurkis

$$f_o = \sqrt{f_u \cdot f_l} \quad (3.15)$$

#### 3.3.2. Grupinis vėlinimas

Grupinis vėlinimas nusako kiek suvėlinamas signalas jam praeinant sistemą. Nusakomas kaip fazinio kampo išvestinė pagal kampinį dažnį

$$\tau = - \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (3.16)$$

#### 3.3.3. Įterpties nuostoliai

Apsaugos grandinė jungiama tarp keitiklio ir stiprintuvo, todėl būtina įvertinti signalo amplitudės sumažėjimą jam praeinant apsaugos grandinę. Išmatuojamas stiprintuvo be

apsaugos grandinės įtampos perdavimo koeficientas  $A_{ref}$  ir stiprintuvo su apsaugos grandine perdavimo koeficientas  $A_{DUT}$ . Įterpties nuostoliai

$$IL_{dB} = 20 \lg \left( \frac{|A_{ref}|}{|A_{DUT}|} \right) \quad (3.17)$$

### 3.4. Įėjimo impedansas

Standartas [24] reikalauja įėjimo impedansą specifikuoti kaip lygiagrečią įėjimo varžą  $R_p$  ir lygiagrečią įėjimo talpą  $C_p$ . Jei naudojama įranga leidžia, galima šiuos dydžius matuoti tiesiogiai arba apskaičiuoti iš nuoseklaus impedanso aktyvinės varžos  $R_s$  ir reaktyvinės varžos  $X_s$ . Impedanso priklausomybė nuo šių dydžių

$$Z(f) = R_s + iX_s = R_p \parallel \frac{1}{i2\pi f \cdot C_p} = \frac{R_p \cdot \frac{1}{i2\pi f \cdot C_p}}{R_p + \frac{1}{i2\pi f \cdot C_p}} \quad (3.18)$$

Lygiagreti aktyvinė ir reaktyvinė varžos [30]

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} \quad (3.19)$$

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} \quad (3.20)$$

Kondensatoriaus reaktyvinė varža

$$X_c(f) = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (3.21)$$

Pagal (3.20) ir (3.21) apskaičiuojamas lygiagretus talpumas turint nuoseklias aktyvinę ir reaktyvinę varžas

$$C_p = -\frac{X_s}{2\pi f \cdot (R_s^2 + X_s^2)} \quad (3.22)$$

### 3.5. Triukšmo faktorius NF

NF nusako kiek suprastėja signalo ir triukšmo santykis stiprintuvo išėjime, kai šaltinio varža  $R_s = 50 \Omega$ , laikant, kad vienintelis triukšmo šaltinis – šaltinio varžos šiluminis triukšmas. Apskaičiuojamas išmatavus grandinės įėjimo impedansą  $Z_i$ , įtampos perdavimo koeficientą  $A$  ir išėjimo triukšmo spektrinį tankį  $v_{no}$ .

Išėjimo triukšmo spektrinis tankis perskaičiuojamas į įėjimą. Įėjimo triukšmo vidutinė kvadratinė įtampa vertė [22]

$$\overline{v_{ni}^2} = \frac{\overline{v_{no}^2}}{|A|^2} \times \left| 1 + \frac{R_s}{Z_i} \right|^2 \quad (3.23)$$

Triukšmo koeficientas  $F$  yra stiprintuvo išėjimo vidutinio kvadratinio triukšmo stiprintuvo išėjime santykis su vidutine kvadratinio išėjimo triukšmu, kai vienintelis triukšmo šaltinis yra šiluminis įėjimo apkrovos triukšmas [22]

$$F = \frac{\overline{v_{ni}^2}}{4kTR_s} \quad (3.24)$$

čia  $k=1,380\ 6504(24) \times 10^{-23}$  J/K – Bolcmano konstanta,  $T$  – temperatūra, K.

Triukšmo faktorius NF

$$NF = 10 \lg(F) \quad (3.25)$$

### 3.6. Netiesinių iškraipymų koeficientas THD

Netiesinių iškraipymų koeficientas (THD) yra aukštesnių harmonikų amplitudžių RMS amplitudės santykis su pirmos harmonikos RMS amplitude [31]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (3.26)$$

Čia  $V_n$  -  $n$ -osios harmonikos amplitudė,  $N$  – skaičiavimui naudotų harmonikų skaičius.

Atsižvelgiant į tai, kad ultragarsinio tyrimo metu aukštesnės, nei trečia harmonikos slopinamos dėl riboto ultragarsinio keitiklio juostos pločio, siūloma vertinti tik antrą ir trečią harmonikas. Tuomet (3.26) galima perrašyti kaip

$$THD_3 = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2}}{V_1} \quad (3.27)$$

## 4. TYRIMAS

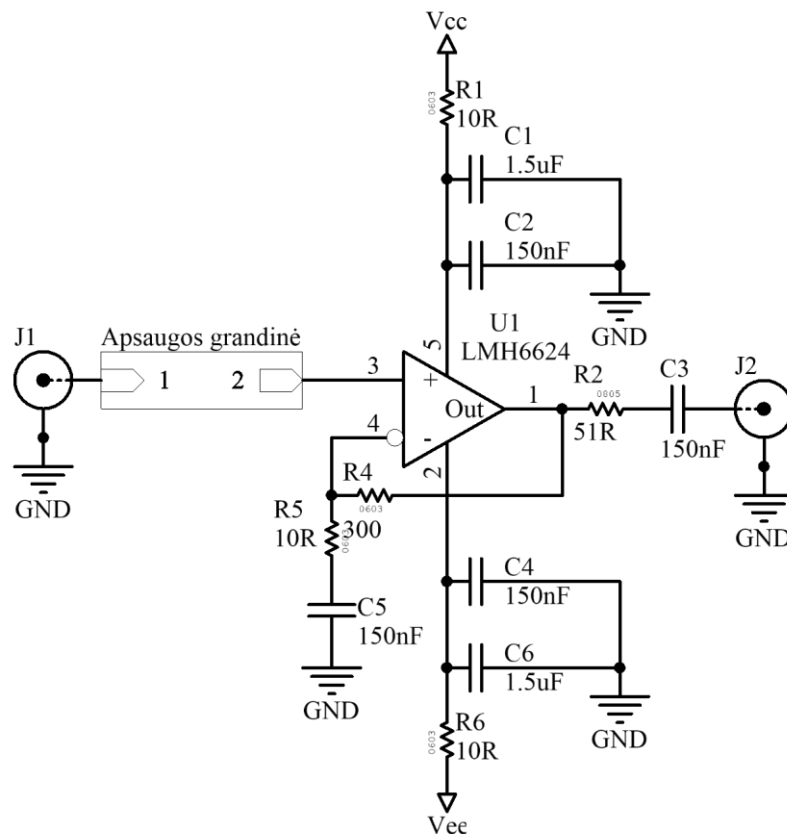
Skyriuje pateiktas aukščiau paminėtų parametrų tyrimas.

### 4.1. Tyrimo objektas

Tiriami ultragarsiniai imtuvai, susidedantys iš įėjimo apsaugos grandinės ir stiprintuvo. Apsaugos grandinių atsistatymas savo kilme yra pereinamasis procesas, todėl daroma prielaida, jog atsistatymo trukmė priklauso nuo apatinės -3 dB perdavimo juostos ribos. Dėl to visos tirtos grandinės buvo projektuojamos taip, kad apatinė pralaidos juostos riba būtų kuo artimesnė 500 kHz.

#### *Tiriama imtuvo struktūra*

Imtuvo principinė schema pateikta 21 paveiksle.



21 pav. Tyrime naudotas ultragarsinis stiprintuvas

Stiprintuvo pagrindas – operacinis stiprintuvas LMH6624 [32]. Visų tirtų grandinių stiprintuvo dalis identiška su vienodu išdėstymu montažinėje plokštėje. Grįžtamojo ryšio rezistoriai R4, R5, išėjimo rezistorius R2 su 1 % tolerancija. Visi perdavimo charakteristikai įtakos turintys komponentai paimti iš tos pačios partijos, siekiant sisteminių paklaidą padaryti

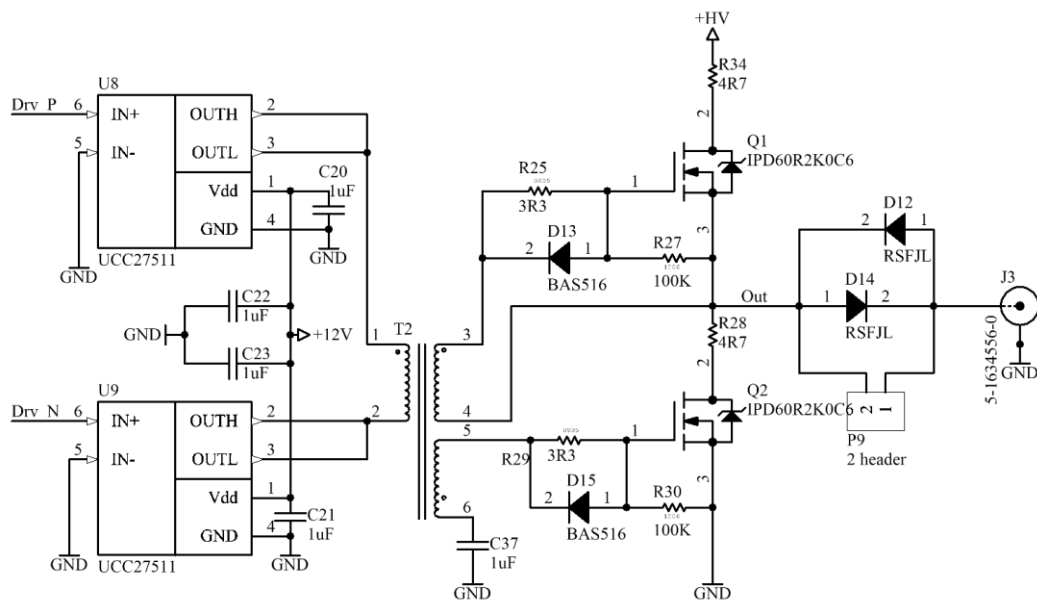
kuo vienodesnę visais atvejais. Stiprintuvo perdavimo koeficientas be apkrovos – 30 dB, su 50 Ω apkrova – 26 dB.

#### 4.2. Atsistatymo laiko tyrimas

Grandinės tirtos naudojant du skirtingų konstrukcijų siūstuvus ir trijų tipų daliklius. Abiejų siūstuvų išėjimuose naudojamas diodiniai signalo ekspanderiai, skirti atjungti siūstuvo išėjimą nuo keitiklio ir imtuvo priėmimo metu.

#### **Dvitaktis siūstuvus $T_x=HB$**

Siūstuvus su dvitakčiu išėjimu. Gali generuoti vieno poliarumo signalus. Išėjimo pakopos schema pateikta 22 paveiksle.

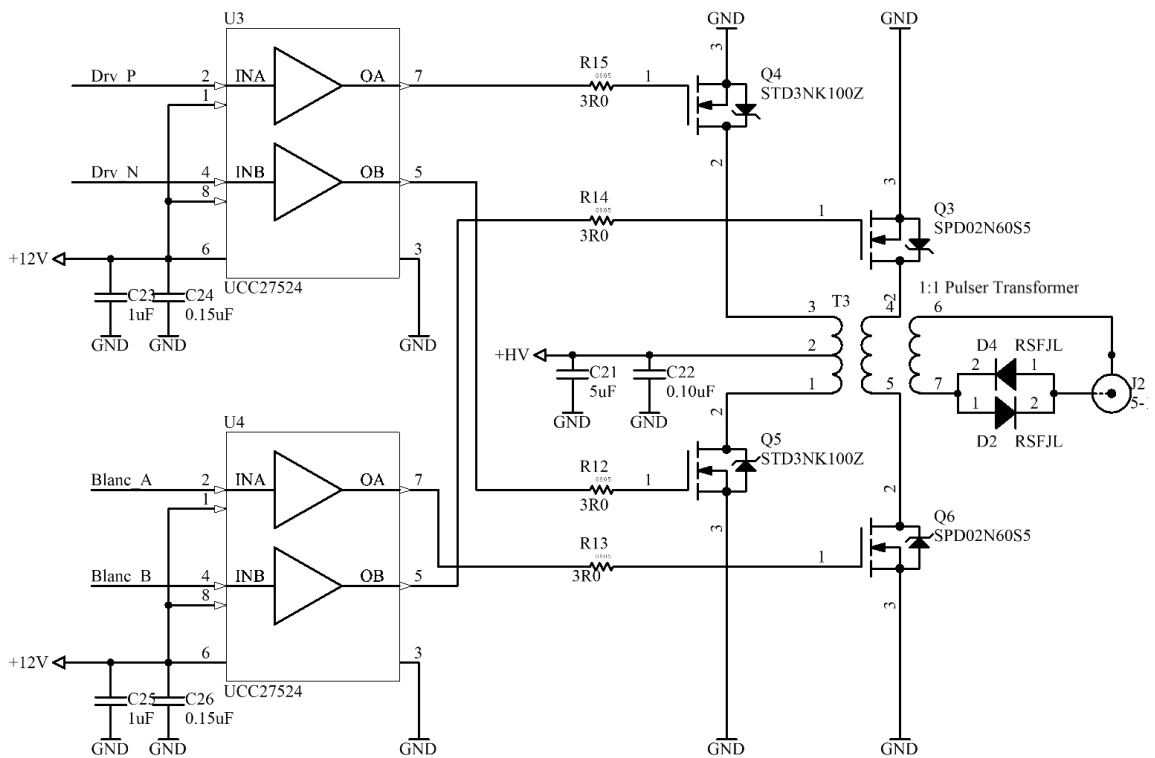


22 pav. dvitaktis siūstuvus  $T_x=HB$

Šio siūstuvo privalumai: paprasta ir nebrangi konstrukcija, aukšta maksimali išėjimo srovė, priklausanti nuo naudojamų tranzistorių. Transformatorinis tranzistorių valdymas kartu su specialiais maža Milerio talpa pasižyminčiais tranzistoriais užtikrina stačius impulso frontus, gerą impulso formos pakartojamumą, kas ypač svarbu naudojant skleisto spektro signalus, nes supaprastina signalų sintezę. Toks valdymas leidžia atsisakyti P kanalo tranzistorių ir naudoti tik greitesnius N kanalo tranzistorius. Dėl šių savybių  $T_x=HB$  siūstuvus naudotas tiriant grandinių suvartojamą energiją.

#### **Transformatorinis siūstuvus $T_x=PTr$**

Siūstuvo išėjimo pakopos principinė schema pateikta 23 pav.



23 pav. Transformatorinis siūstuvas Tx=Tr

Naudojami du apatinio kaskado raktai Q4 ir Q5, kurių signalai sumuojami transformatoriumi, vieną jų invertuojant. Tokios topologijos privalumai: tranzistorių valdymo grandinių (draiverių) atsparumas  $dV/dt$  pereinamiesiems procesams, nereikalingi viršutinio kaskado draiveriai, todėl galimas greitas perjungimas, transformatoriumi siūstuvą galvaniškai atišamas nuo imtuvo, galimybė generuoti tiek teigiamus, tiek neigiamus impulsus su vienpoliu maitinimo šaltiniu. Topologijos trūkumas – transformatoriaus sotinimasis, pašalinamas siūstuvą papildant dar viena raktų pora Q3, Q6 ir transformatoriaus apviją. Siuntimo pabaigoje Q3 ir Q6 užtrumpina apviją ir taip pašalina transformatoriaus liekamąją magnetinę energiją. Siūstuvai gali generuoti aukštos įtampos plačiajuosčių impulsų sekas į talpinę apkrovą [33], kas yra svarbu naudojant skleisto spektro signalus. Simetrinė išėjimo pakopa pasižymi mažesniais netiesiniais iškraipymais, lyginant su Tx=HB išėjimo pakopa.

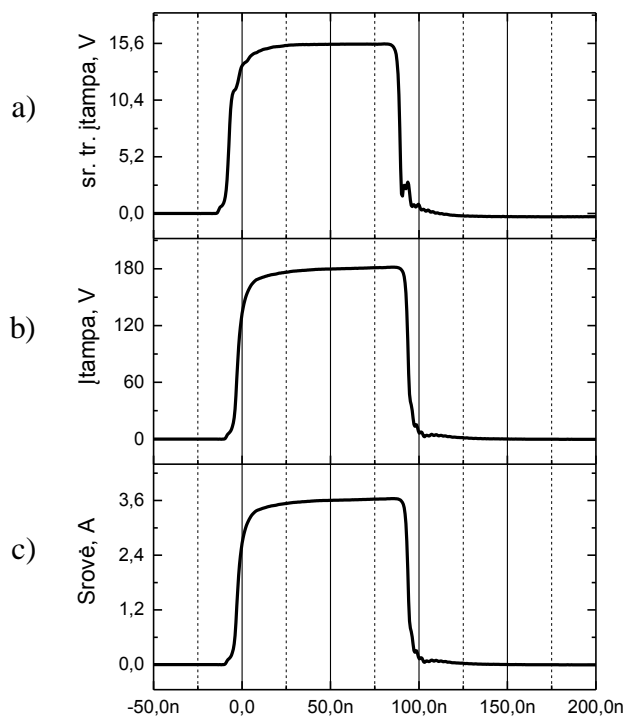
#### 4.3. Sunaudojamos energijos tyrimas

Matavimai atlikti naudojant savadarbį srovės transformatorių ekraninėje dėžutėje.

Kalibravimo rezistoriaus varža, išmatuota Rigol DM3068 [34]:  $49,903 \pm 0,013 \Omega$ . Signalai registruoti oscilografu Yokogawa DLM2000 [35].

Srovės transformatoriaus antrinės apvijos įtampa, įtampa imtuvo įėjime bei apskaičiuoja srovė pateikta 24 pav.



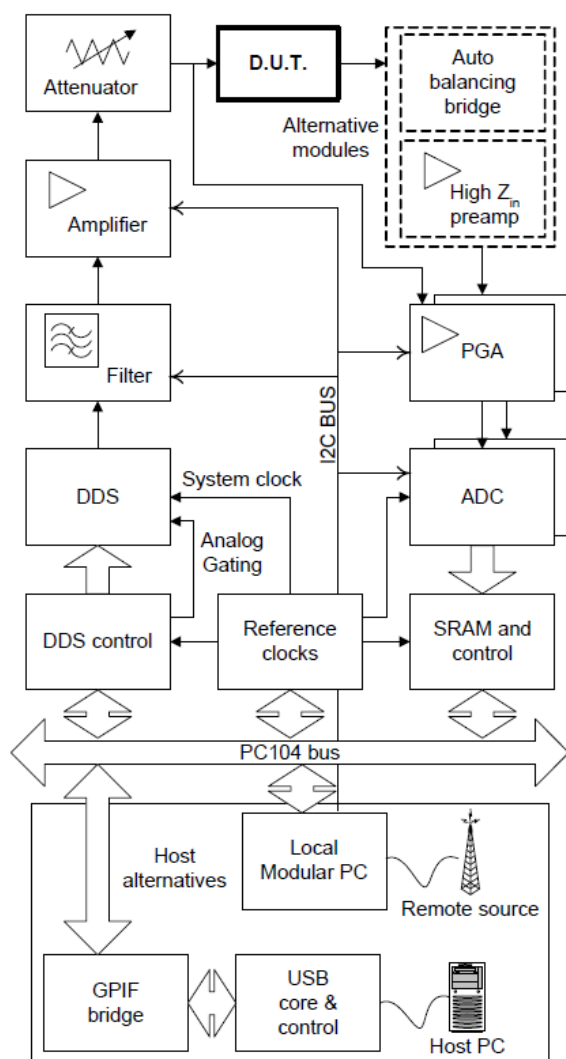


24 pav. Kalibravimas su 200 V, 100 ns impulsu: srovės transformatoriaus antrinės apvijos įtampa (a), siūstuvo įtampa (b), apskaičiuota 50 Ω apkrovos srovė (c)

Kalibravimui prie srovės transformatoriaus išėjimo vietoje tiriamos grandinės prijungiamas žinomos varžos rezistorius. Oscilografu išmatuojama įtampa, krentanti ant šio rezistoriaus bei antrinės apvijos įtampa – kalibruojamos sistemos išėjimo signalas. Pirminės apvijos srovė apskaičiuojama pagal Omo dėsnį – tai yra kalibruojamos sistemos įėjimo signalas. Iš šių signalų taikant dekonvoliuciją apskaičiuojama sistemos perdavimo charakteristika, kuri vėliau naudojama apskaičiuoti pirminės apvijos srovę, kai prie transformatoriaus išėjimo prijungta tiriamą grandinę.

#### 4.4. Dažnių perdavimo charakteristikos parametrų tyrimas

Apatinei perdavimo charakteristikos -3 dB ribai nustatyti panaudota duomenų surinkimo sistema DAQ [36]. Sistemos struktūrinė schema pateikta 25 paveiksle.



25 pav. Duomenų surinkimo sistema, naudota tyrime [36]

Sistema generuoja harmoninį signalą, kuris patenka į tiriamą grandinę (DUT) bei į pirmąjį DAQ įėjimą. DUT išėjimo signalas patenka į antrąjį DAQ įėjimą. Duomenų apdorojimas atliekamas kompiuteryje.

Matuojama amplitudė stiprintuvo įėjime ir išėjime, perdavimo koeficientas:

$$G(f_k) = \frac{U_{out}(f_k)}{U_{in}(f_k)} \quad (4.1)$$

Matavimas atliktas naudojant universalią duomenų surinkimo sistemą [28]. Sistemoje naudojamas tas pats taktinio dažnio šaltinį tiek DDS generatoriui, tiek ADC. Kompleksinė amplitudė apskaičiuojama naudojant SWC (Sine Wave Correlation, angl.).

Menama signalo amplitudės dalis

$$U_c = \frac{\sum_{m=1}^M [\cos(2\pi f t_m) \cdot y_m]}{\sum_{m=1}^M [\cos(2\pi f t_m)]^2} \quad (4.2)$$

Reali signalo amplitudės dalis

$$U_s = \frac{\sum_{m=1}^M [\sin(2\pi f t_m) \cdot y_m]}{\sum_{m=1}^M [\sin(2\pi f t_m)]^2} \quad (4.3)$$

Amplitudės modulis ir argumentas

$$U = \sqrt{U_c^2 + U_s^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \quad (4.4)$$

Pagal (4.4) apskaičiuojama įėjimo įtampa  $U_{in}(f)$  ir išėjimo įtampa  $U_{out}(f)$ . Pagal (3.14) apskaičiuojamas perdavimo koeficientas ir nustatoma apatinė perdavimo charakteristikos -3 dB riba centrinį dažnį laikant 5 MHz.

Viršutinė perdavimo charakteristikos -3 dB riba iširta naudojant vektorinį grandinių analizatorių Rohde Schwartz FSH8 [37]. Vektorinio grandinių analizatoriaus tiesiogiai matuojami trys parametrai: krintančios bangos amplitudė  $V_i$ , atspindėtos bangos amplitudė  $V_r$  ir praėjusios bangos amplitudė  $V_t$ . Iš jų apskaičiuojami perdavimo koeficientas

$$T = \frac{V_t}{V_i} = \tau \angle \phi \quad (4.5)$$

ir atspindžio koeficientas

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \rho \angle \Phi \quad (4.6)$$

Analizatoriaus parametrų amplitudę pateikia dB, o fazę laipsniais, todėl tiesinė kompleksinė vertė gaunama:

$$T = 10^{\frac{\tau_{dB}}{20}} \cdot e^{-i \cdot \phi \cdot \pi / 180} \quad (4.7)$$

$$\Gamma = 10^{\frac{\rho_{dB}}{20}} \cdot e^{-i \cdot \Phi \cdot \pi / 180} \quad (4.8)$$

Įtampa įėjime:

$$V_T = V_i + V_r = 2 \cdot V_i \frac{Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (4.9)$$

Įėjimo impedansas apskaičiuojamas iš atspindžio koeficiento:

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (4.10)$$

Įstačius (4.10) į (4.8) gaunama įtampos įėjime priklausomybė nuo atspindžio koeficiento:

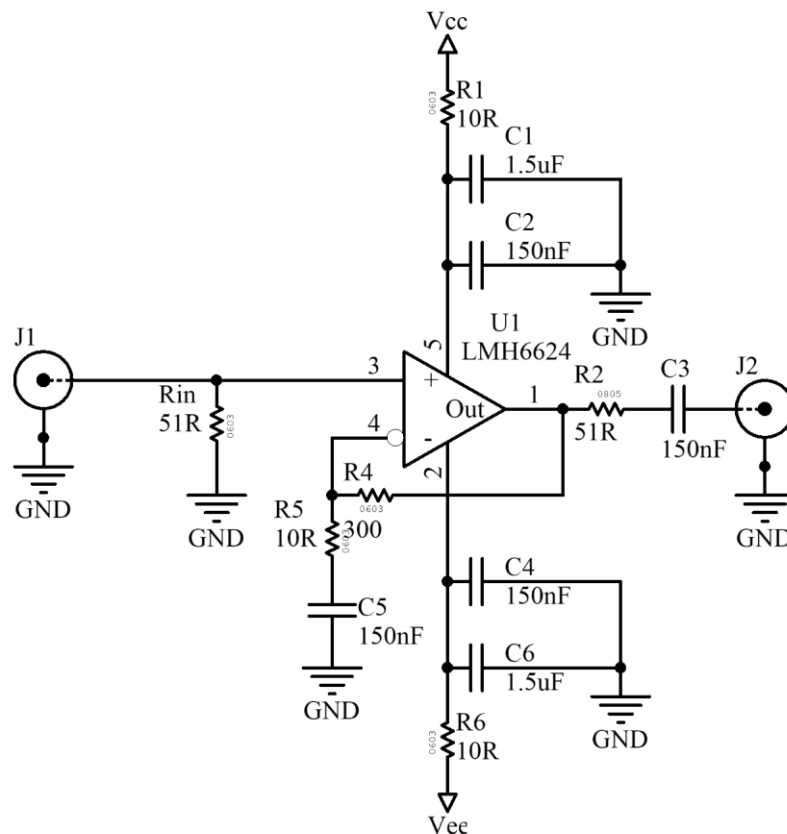
$$V_T = V_i(1 + \Gamma) \quad (4.11)$$

Įtampos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas

$$G = \frac{V_t}{V_T} = \frac{V_t}{V_i(1 + \Gamma)} = \frac{T}{(1 + \Gamma)} \quad (4.12)$$

### Įterpties nuostolių tyrimas

Įterpties nuostolių matavimui sukonstruotas kontrolinis stiprintuvas REF. 26 pav. pateikta REF principinė schema.



26 pav. Kontrolinis stiprintuvas REF

Stiprintuvo konstrukcija analogiška imtuvų konstrukcijai: panaudoti tokie patys komponentai bei atkartotas jų išdėstymas montažinėje plokštėje.

Stiprintuvo, apkrauto rezistoriumi  $R_{load}=50 \Omega$  be apsaugos grandinės perdavimo koeficientą nustato grįžtamojo ryšio rezistoriai  $R_f=300 \Omega$ ,  $R_g=10 \Omega$  ir išėjimo rezistorius  $R_{out}=51 \Omega$ . Kontrolinio stiprintuvo REF perdavimo koeficientas

$$|A_{ref}| = \left( 1 + \frac{R_{f_{ref}}}{R_{g_{ref}}} \right) \cdot \frac{R_{load}}{R_{out_{ref}} + R_{load}} \quad (4.13)$$

Tiriamo stiprintuvo su apsaugos grandine (DUT) perdavimo koeficientas:

$$|A_{DUT}| = \frac{1}{IL} \cdot \left( 1 + \frac{R_{f_{DUT}}}{R_{g_{DUT}}} \right) \cdot \frac{R_{load}}{R_{out_{DUT}} + R_{load}} \quad (4.14)$$

Įterpties nuostoliai  $IL_{dB}$  apskaičiuojami kaip stiprintuvo be apsaugos grandinių perdavimo koeficiento ir DUT perdavimo koeficiento santykis:

$$IL_{dB} = 20 \lg \left( \frac{|A_{ref}|}{|A_{DUT}|} \right) \quad (4.15)$$

Įstačius (4.13) ir (4.14) į (4.15) gaunama pilnoji matavimo lygtis

$$IL_{dB} = 20 \lg \left( IL \cdot \frac{R_{g_{DUT}} \cdot (R_{g_{ref}} + R_{f_{ref}}) \cdot (R_{out_{DUT}} + R_{load})}{R_{g_{ref}} \cdot (R_{g_{DUT}} + R_{f_{DUT}}) \cdot (R_{out_{ref}} + R_{load})} \right) \quad (4.16)$$

Visų rezistorių, išskyrus  $R_{load}$  nominalo paklaida – 1 %, laikoma, kad pasiskirstymo dėsnis – stačiakampis. Nors REF stiprintuvo perdavimo koeficiento paklaida daro įtaką įterpties nuostolių matavimo neapibrėžčiai, lyginant grandinių vertes tarpusavyje išlieka tik tiriamos grandinės rezistorių paklaidos įtaka. GUM Workbench [38] įvertinta  $IL_{dB}$  išplėstinė neapibrėžtis dėl DUT rezistorių paklaidos -  $\pm 0,15$  dB.

#### 4.5. Įėjimo impedansas

Impedansas išmatuotas impedanso analizatoriumi Wayne Kerr 6510P [39]. Grandinių impedansas matuojamas naudojant keturlaidį metodą, kuomet analizatorius atskirais kabeliais matuoja tiriamos grandinės įtampą ir srovę bei apskaičiuoja impedansą. Analizatoriaus paklaida -  $\pm 0,05$  %, tačiau dokumentacijoje nenurodoma aplinkos veiksnių bei analizatoriaus nustatymų įtaka paklaidai.

#### 4.6. Triukšmo faktorius NF

Tyrimui naudotas spektro analizatorius Agilent N9320A [40]. Matuojamas dydis – vidutinis išėjimo triukšmo amplitudžių spektras  $\overline{E_n}$ . Spektrinis tankis apskaičiuojamas įvertinant spektro analizatoriaus skyros filtro juostos plotį  $RBW=30$  kHz

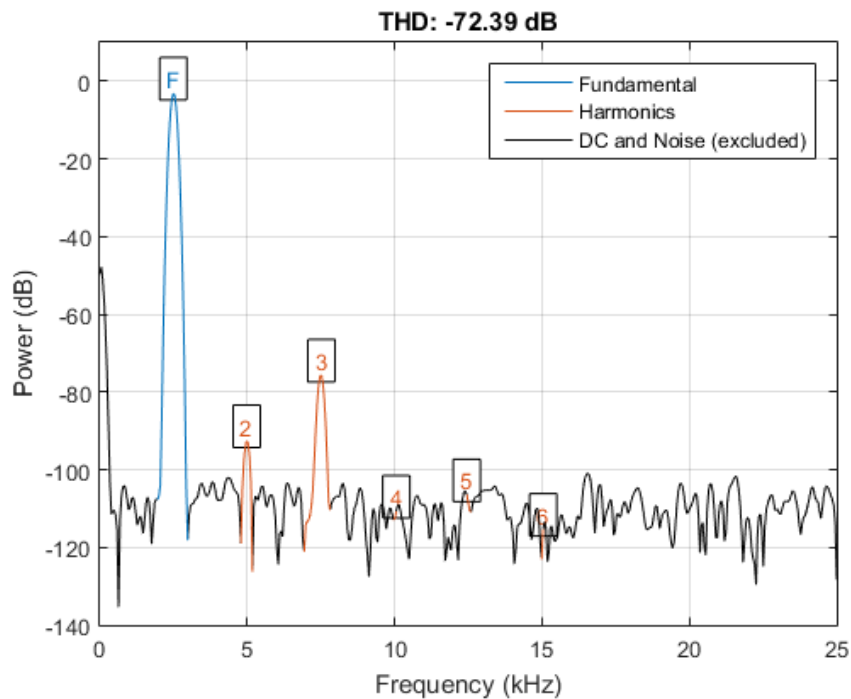
$$\overline{v_{no}} = \frac{\overline{E_n}}{\sqrt{RBW}} \quad (4.17)$$

Analizatoriaus amplitudės matavimo sisteminė paklaida:  $\pm 2$  dB. Ji daugiausiai priklauso nuo pasirinkto skyros filtro juostos pločio paklaidos ir atraminės įtampos paklaidos. Taip yra todėl, kad analizatoriuje matavimo grandinėje naudojamas perderinamas analoginis juostinis filtras. Šio filtro parametrai nėra tikslūs, bet nekeičiant nustatymų nekinta. Aplinkos

temperatūros aplinkos temperatūros ir kitų faktorių [40] įtaka matavimui daug kartų mažesnė. Visi matavimai buvo atlikti iškart, esant toms pačioms aplinkos sąlygoms bei nekeičiant analizatoriaus parametrų, todėl daroma prielaida jog sisteminė paklaida visų triukšmo amplitudžių spektro matavimų metu vienoda, ir gauti rezultatai lygintini tarpusavyje.

#### 4.7. Netiesinių iškreipimų koeficientas THD

Generatoriumi Rigol DG5251 [41] generuojamas signalas paduodamas į tiriamo imtuvo jėjimą. Imtuvo išėjimo signalas registruojamas oscilografu Yokogawa DLM2000 [35]. Generatoriaus netiesinių iškreipimų koeficientas specifikuojamas  $<45$  dB. Išėjimo signalas apdorojamas MATLAB aplinkoje funkcija `thd` [42]. Naudojama modifikuota periodograma su Kaiserio lango funkcija. 27 pav. pateiktas signalo periodogramos pavyzdys su pažymėtomis harmonikomis.



27 pav. Signalo periodograma su nustatytais harmonikų energijomis [42]

Funkcija nustato didžiausios amplitudės dedamosios dažnį ir daro prielaidą, kad tai pirma harmonika. Aukštesnių harmonikų dažniai yra pirmos harmonikos kartotiniai. Harmonikos energija nustatoma apskaičiuojant visų binių, kurių amplitudė monotoniškai mažėja nuo harmonikos dažnio, centrinių momentą.

## 5. TYRIMO REZULTATAI

Energijos suvartojimo ir atsistatymo laiko tyrimui naudoti siūstuvai skirti dirbti 0,5-30 MHz dažnių diapazone, todėl pasirinktas apytiksliai atitinkantis jų centrinį dažnį 5 MHz dažnis ir 100 ns trukmės impulsai, atitinkantys 5 MHz signalo pusę periodo.

### 5.1. Atsistatymo laikas

Pagal aprašytą metodiką iš viso atlikti 1453 matavimai. Su abiejų tipų siūstuvais atliktas tyrimas, apimantis visą jų įtampų diapazoną bei 100 ns – 500 ns impulsus, atitinkančius 1 MHz – 5 MHz signalus.

Su duomenų surinkimo sistema [28] ir Tx=Tr siūstuvu atlikta 1260 matavimų su visomis kombinacijomis:

1. 7 tipų grandinės
2. 50R, 5k ir C dalikliai
3. Įtampa: 100 V, 150 V, 200 V, 300 V.
4. 15 skirtingos formos ir trukmės žadinimo signalų:
  - 100 ns, 200 ns, 300 ns, 400 ns, 500 ns trukmių teigiamas impulsas
  - 100 ns, 200 ns, 300 ns, 400 ns, 500 ns trukmių neigiamas impulsas
  - 100 ns, 200 ns, 300 ns, 400 ns, 500 ns trukmių teigiamo ir neigiamo impulsų seka

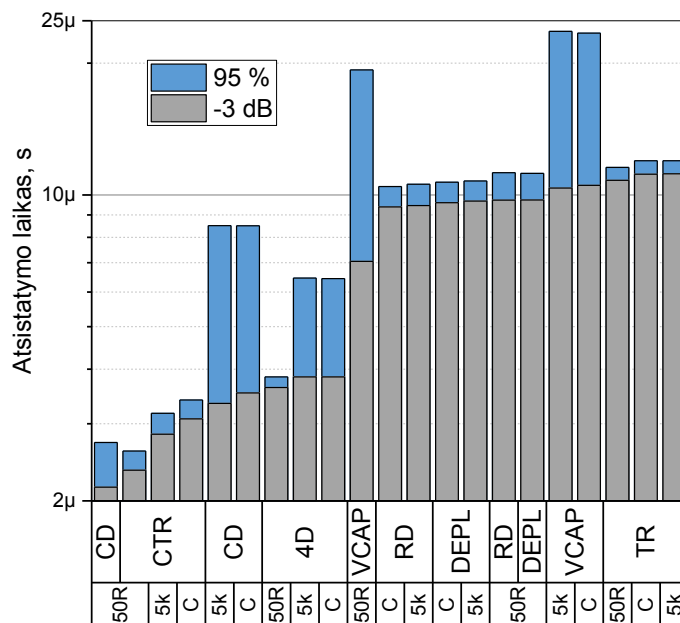
Su oscilografu Yokogawa ir Tx=HB siūstuvu atlikti 189 matavimai:

1. 7 tipų grandinės
2. 50R, 5k ir C dalikliai
3. Įtampa: 50 V, 100 V, 300 V, 400 V, 300 V, impulso trukmė 100 ns; įtampa: 200 V, impulso trukmė 100 ns, 200 ns, 300 ns, 400 ns. Viso: 9 įtampų ir trukmių kombinacijos.

Darbe patekti tyrimo abejomis sistemomis su 200 V įtampos ir 100 ns trukmės impulsais bei 100 ns teigiamo ir neigiamo impulsų seka rezultatai.

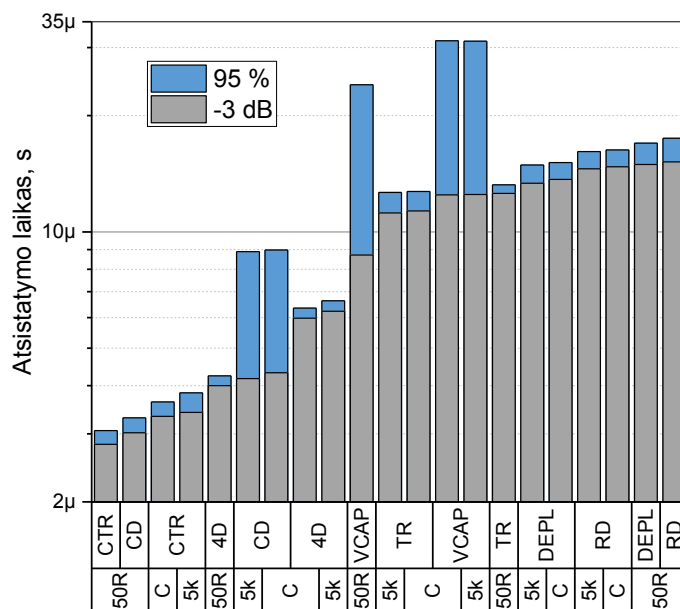
Grandinių atsistatymo laikai po  $T_x=TR$  neigiamo 200 V, 100 ns impulso pateikti 28

pav.



28 pav. Atsistatymas po  $T_x=TR$  neigiamo 200 V, 100 ns impulso

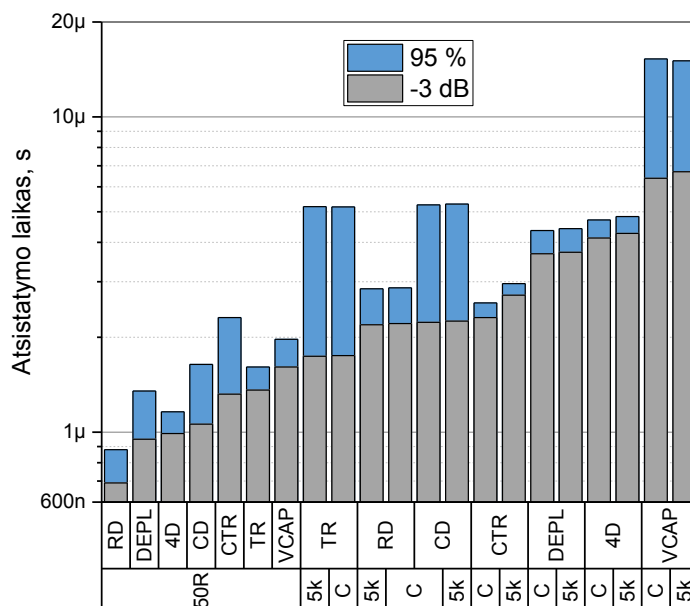
Greičiausiai atsistato CD, CTR ir 4D grandinės. CD, 4D grandinės 95 % atsistatymo laikas ilgesnis su 5k ir C dalikliais. VCAP 95 % atsistatymo laikas ilgas su visais dalikliais. Visais, išskyrus DEPL, atvejais, 50R daliklis lemia trumpesnę atsistatymo laiką. Atsistatymo laikas su 5k ir C dalikliais panašus.



29 pav. Atsistatymas po  $T_x=TR$  200 V, 100 ns teigiamo impulso

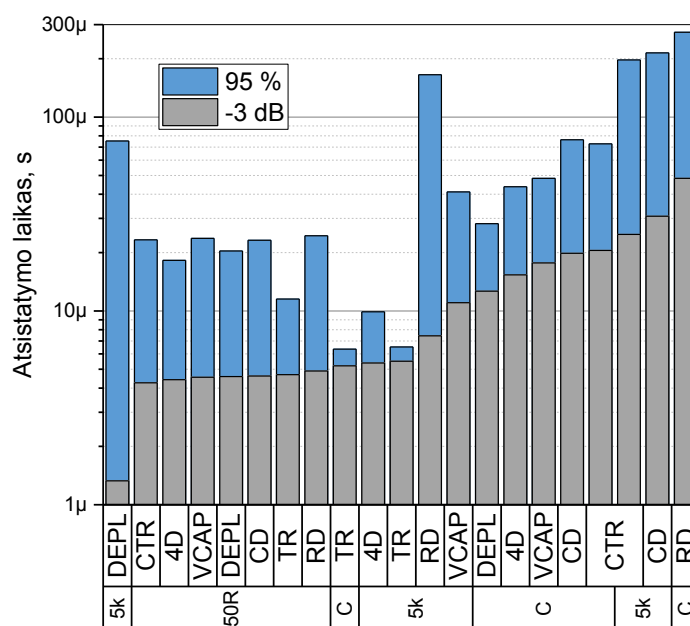
Rezultatų pobūdis panašus į neigiamo impulso rezultatus. Nors teoriškai  $T_x=TR$  teigiamas ir neigiamas impulsai simetriški, nevienodi atsistatymo laikai indikuoja, jog taip nėra.





30 pav. Atsistatymas po Tx=TR 200 V, 100 ns teigiamo ir neigiamo impulsų sekos

Visų grandinių atsistatymo laikas trumpiausias su 50R dalikliu. Su 5k ir C dalikliais panašus. TR, CD ir VCAP 95 % atsistatymo laikas gerokai didesnis, nei -3 dB atsistatymo laikas. RD, DEPL, 4D atsistatymo laikas trumpiausias su šio signalu.



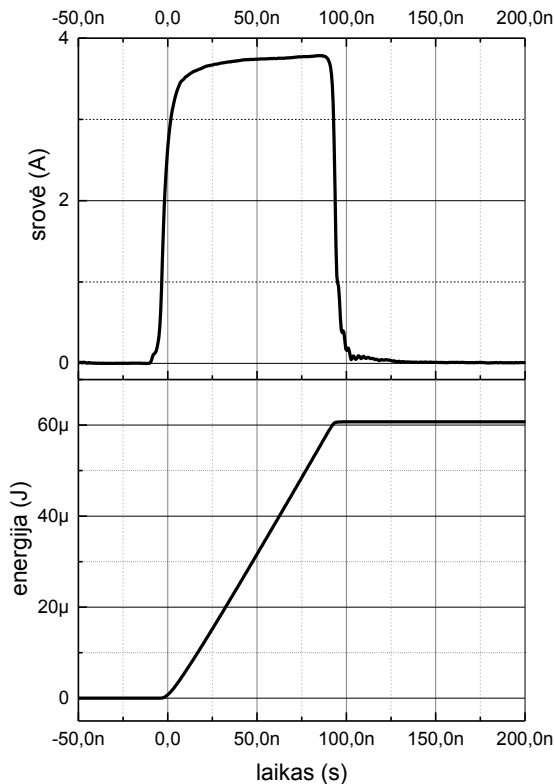
31 pav. Atsistatymas po Tx=HB 200 V, 100 ns teigiamo impulso

Visų grandinių, išskyrus TR su C ir 5k dalikliais 95 % atsistatymo laikas labai ilgas. Tai rodo, kad siūstovo veikimas turi didelę įtaką pilnam grandinių atsistatymui. Visų grandinių atsistatymo laikas trumpesnis su 50R dalikliu, daugumos su C dalikliu ilgesnis nei su 5k dalikliu.

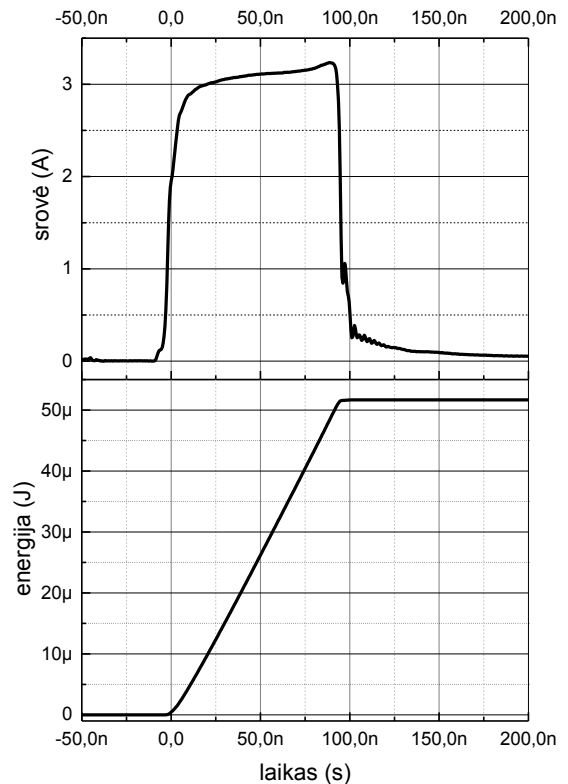
## 5.2. Sunaudojama impulso energija

Tyrimo metu naudotas 100 ns trukmės, 200 V amplitudės signalas. Pateikiamos laikinės imtuvo jėgimo srovės ir energijos diagramos. Aptariamos grandinių specifinės savybės, privalumai bei trūkumai.

RD grandinės srovė ir suvartojama energija pateiktos 32 pav., 33 pav. – TR grandinės srovė ir suvartojama energija.



32 pav. RD grandinės srovė ir sunaudota energija

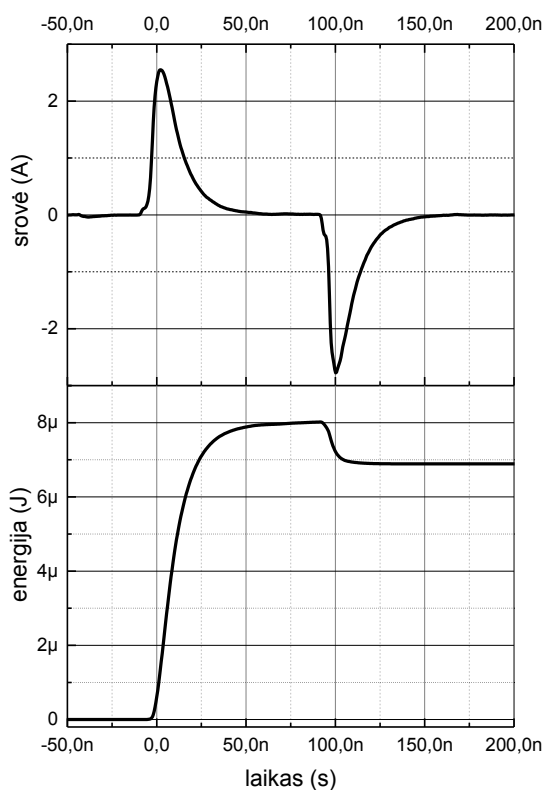


33 pav. TR grandinės srovė ir sunaudota energija

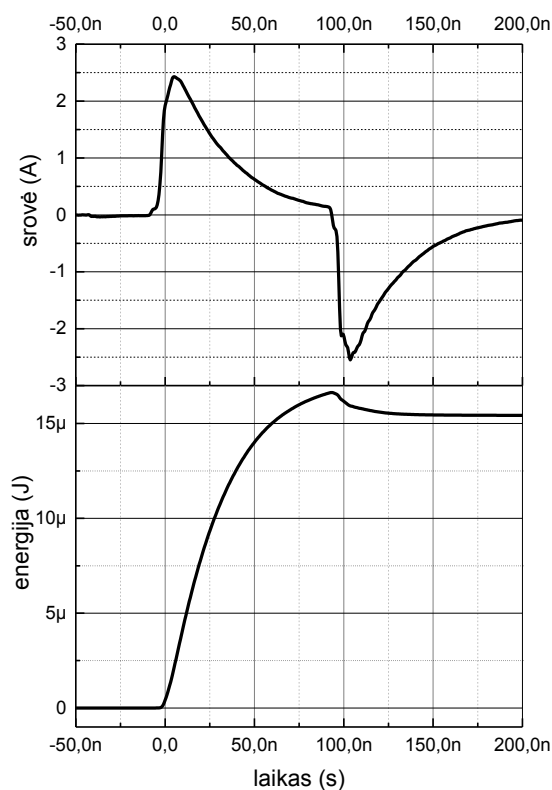
Grandinių impedansas žadinimo metu artimas  $50 \Omega$ . Tai lemia aukštą srovę viso impulso metu, didelę sunaudojamą energiją, bet dėl suderinimo praktiškai nėra atspindžių. Grandinių suvartojama energija dėl dominuojančios aktyvinės jėgimo varžos žadinimo metu tiesiogiai proporcinga impulso trukmei ir žadinimo įtampos kvadratui.

TR grandinės jėgimo impedansas dėl transformatoriaus apvijų induktyvumo ir varžos nežymiai didesnis, nei RD grandinės, todėl suvartojama energija šiek tiek mažesnė.

CD grandinės srovė ir suvartojama energija pateiktos 34 pav., 35 pav. – CTR grandinės srovė ir suvartojama energija.



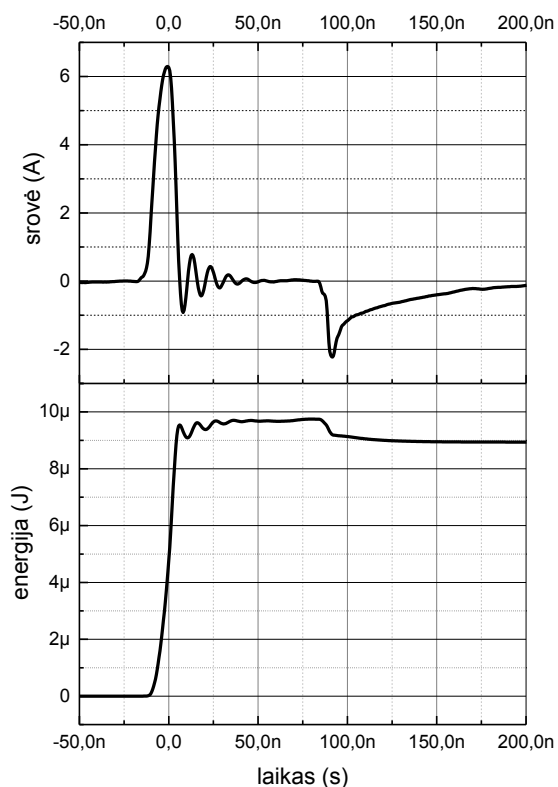
34 pav. CD grandinės srovė ir sunaudota energija



35 pav. CTR grandinės srovė ir sunaudota energija

Srovė didžiausia impulso frontų metu, kai įkraunamas ir iškraunamas skiriamasis kondensatorius. Nors skiriamieji kondensatoriai vienodo talpos (žr. CD ir CTR principines schemas 6 ir 10 pav.), CTR grandinėje nuosekliai skiriamajam kondensatoriui, kurio reaktansas neigiamas, esantis transformatoriaus induktyvumas savo teigiamu reaktansu sumažina bendrą įėjimo impedansą, todėl pereinamasis procesas ilgesnis ir didesnės energijos sąnaudos. Abiejų grandinių srovės impulsai priekinio ir galinio impulso frontų metu identiški. Suvartota energija po galinio impulso fronto sumažėja, nes dalis energijos iš kondensatoriaus grįžta į siūstuvą ir virsta šiluma apatinio kaskado rakte. Šio reiškinio nėra RD ir TR grandinėse, kurios skiriamąjį kondensatoriaus neturi. Kadangi CD ir CTR įėjimo varža kaip ir RD, TR atvejais artima  $50 \Omega$ , impedansas suderintas ir atspindžiai nepastebimi.

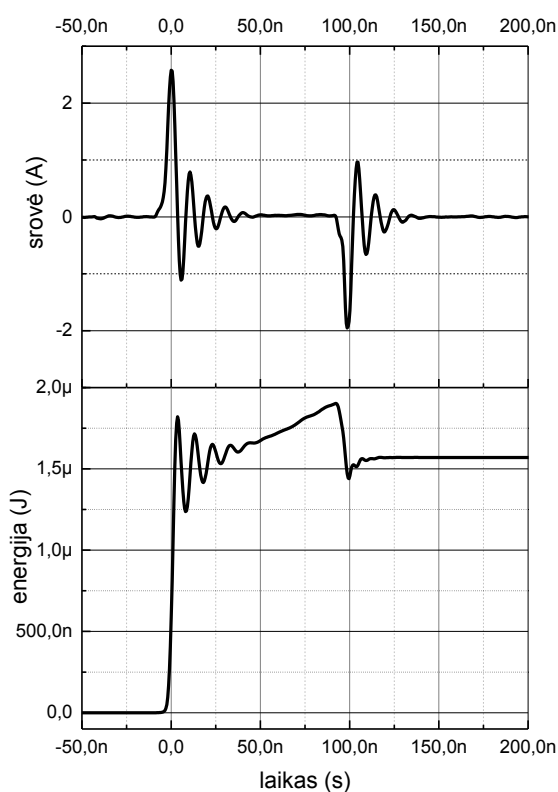
VCAP grandinės srovė ir suvartojama energija pateiktos 36 pav.



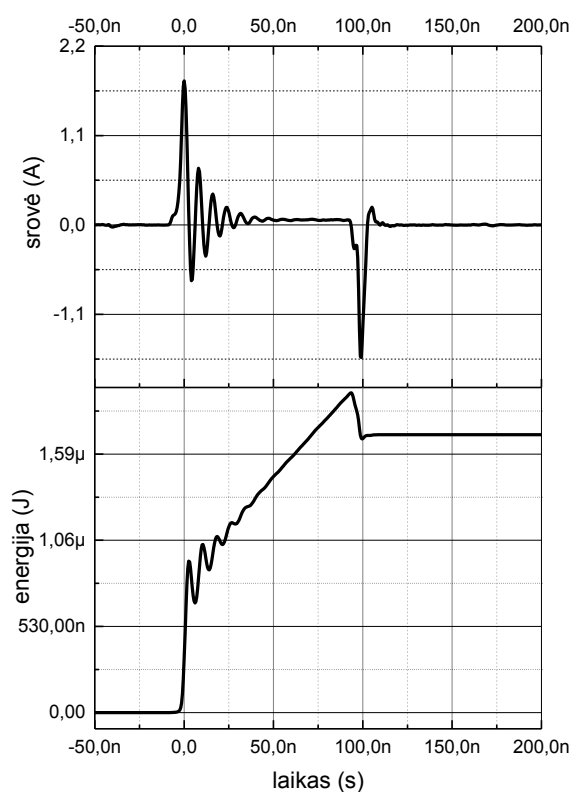
36 pav. VCAP grandinės srovė ir sunaudota energija

Kadangi grandinėje nėra nuoseklios varžos, srovė priekinio fronto metu dvigubai didesnė, nei CD ir CTR grandinėse. Nors lauko tranzistorių talpa, kai  $V_{GS}=0$  V, 10 kartų didesnė, nei skiriamųjų kondensatorių CD ir CTR grandinėse, dėl talpos netiesiškumo energijos sunaudojama tik 20 % daugiau, nei CD grandinėje ir 42 % mažiau, nei CTR grandinėje. Dar daugiau, dėl talpos netiesiškumo galinio fronto srovė mažesnė nei priekinio fronto ir artima CD grandinės srovei galinio fronto metu. Energijos sumažėjimas po galinio fronto taip pat mažesnis, todėl mažiau apkraunamas siūstovo apatinis kaskadas. Šios grandinės įėjimo impedansas nesuderintas, todėl srovės diagramoje matomi atspindžiai. Kadangi šių galia reaktyvinė, ją integruojant energijos kiekis auga nežymiai.

4D grandinės srovė ir suvartojama energija pateiktos 37 pav., 38 pav. – DEPL grandinės srovė ir suvartojama energija.



37 pav. 4D grandinė



38 pav. DEPL tipo grandinė

Šios dvi grandinės aktyvinių komponentų pagalba riboja srovę žadinimo impulso metu. 4D grandinė turi skiriamąjį kondensatorių įėjime, tačiau dėl didelio tiltelio ramybės srovės šalinių impedanso žadinimo metu jis sukaupia gerokai mažiau krūvio, nei CD ar CTR grandinių skiriamieji kondensatoriai, nors jo talpa beveik 7 kartus didesnė (žr. C1 grandinių principines schemas 6 pav., 8 pav., 10 pav.).

Dėl didesnės 4D įėjimo talpos daugiau energijos sunaudojama fronto metu. Tačiau 4D srovę ribojantys tranzistoriai yra ne priimamo signalo kelyje, todėl juos galima parinkti tokius, kurių kanalo didesnė varža ir tuo pačiu mažesnė soties srovė. DEPL tranzistoriai priimamo yra signalo kelyje, todėl svarbu maža kanalo varža, kas lemia didesnę soties srovę, kuri teka žadinimo metu. Dėl šios priežasties srovė 4D grandinėje impulso metu ir tuo pačiu sunaudojama energija mažesnė, nei DEPL grandinėje.

2 lentelėje pateikti apibendrinti energijos sąnaudų tyrimo rezultatai.

2 lentelė. 200V, 100 ns trukmės impulsas

<b>Grandinė</b>	<b>RD</b>	<b>CD</b>	<b>4D</b>	<b>TR</b>	<b>CTR</b>	<b>DEPL</b>	<b>VCAP</b>	<b>50 Ω</b>
Sunaudojama energija, μJ	60,7	8,02	1,90	51,7	16,6	1,97	9,75	59,16
Maksimali srovė, A	3,79	2,55	2,59	3,24	2,43	1,77	6,30	3,64
Srovė, kai t=80 ns, A	3,77		25,6 m	3,17		60,3 m		3,63

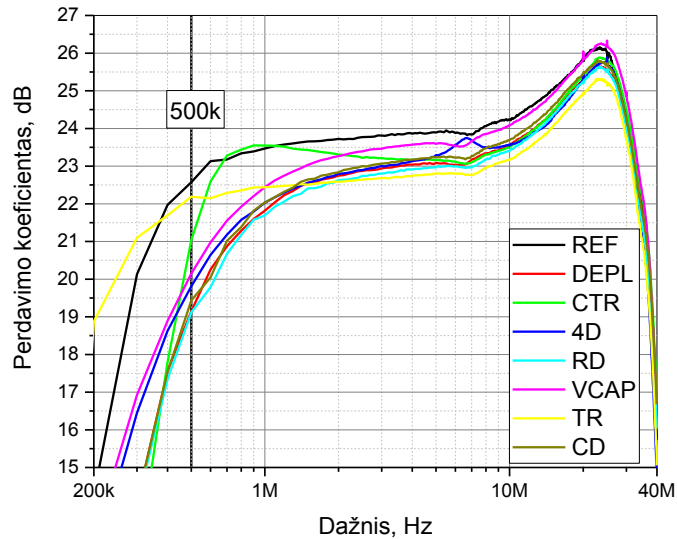
Apskaičiuoti parametrai:

- 1) vidutinė vartojama galia, kai PRF=1 kHz,
- 2) didžiausia sunaudota energija žadinimo metu,
- 3) didžiausia srovė,
- 4) srovė 80 ns nuo impulso pradžios. Grandinių su skiriamuoju kondensatoriumi (CD, CTR, VCAP) srovė pereinamojo proceso metu artėja į 0, todėl neinformatyvi ir nėra nenurodyta.

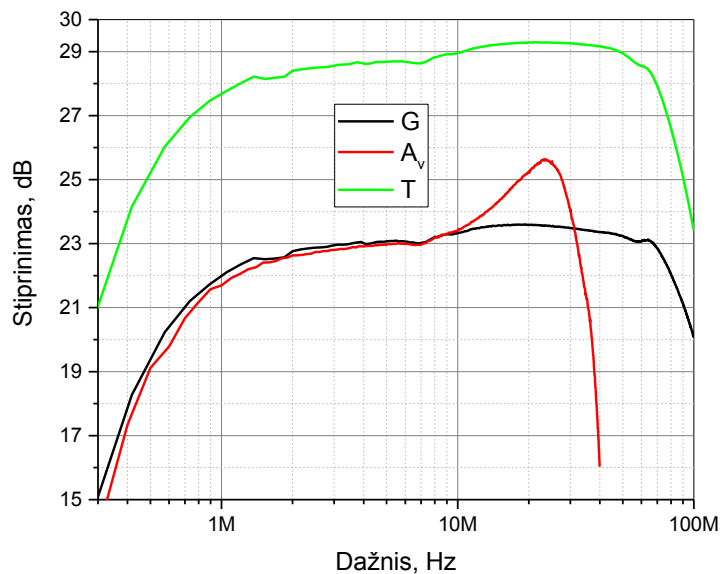
Mažiausiai energijos sunaudoja DEPL ir 4D grandinės, kurių srovė žadinimo metu ribojama. DEPL grandinės mažiausia maksimali srovė. Vidutiniškai energijos sunaudoja grandinės su skiriamaisiais kondensatoriais: VCAP, CD ir CTR. Pastarosios grandinės energijos sąnaudos didžiausios iš trijų dėl transformatoriaus induktyvumo sąveikos su skiriamąjo kondensatoriaus talpa. Didžiausios energijos sąnaudos – RD ir TR grandinių, nes jose srovė žadinimo metu riboja tik įėjimo rezistorius. Šios grandinės sunaudoja 27-32 kartus daugiau energijos, nei 4D grandinė, jų srovė impulso metu 120-150 kartų didesnė. Didžiausia maksimali srovė teka naudojant VCAP grandinę, nes joje naudojamų lauko tranzistorių kanalo varža maža.

### 5.3. Dažninės perdavimo charakteristikos parametrai

39 pav. pateiktos imtuvų su tirtomis grandinėmis ir REF stiprintuvo įtampos perdavimo koeficiento dažninės charakteristikos. 40 pav.



39 pav. Imtuvų įtampos perdavimo koeficiento dažninės charakteristikos



40 pav. RD grandinės išmatuotas galios perdavimo koeficientas  $G$ , apskaičiuotas įtampos perdavimo koeficientas  $T$  (vektorinis grandinių analizatorius) ir išmatuotas įtampos perdavimo koeficientas  $A_v$  (DAQ)

Charakteristikų iškilimą ties 25 MHz lemia tyrimo metu naudoti DAQ įėjimo aukštos elektrinės kokybės pasyviniai persiklojimo filtrai (antialiasing filter, angl.). Kadangi įtaka visoms grandinėms vienoda, tai netrukdo įvertinti įterpties nuostolių. Žemuose dažniuose filtrai neveikia, todėl neturi įtakos apatinės -3 dB juostos ribos nustatymui. Visos tirtos grandinės pasižymi dažninės charakteristikos anomalija ties 6,8 MHz: visų, išskyrus 4D, grandinių stiprinimas sumažėja apytikriai 0,1 dB, o 4D padidėja 0,4 dB. Kadangi visų imtuvų stiprintuvų

principinė schema ir komponentų išdėstymas montažinėje plokštėje identiškas, tai greičiausiai yra stiprintuvo įtaka.

3 lentelėje pateiktas grandinių įtampos stiprinimo koeficiento modulis  $|A_v|$  5 MHz dažniui, -3 dB juostos apatinė riba ir grupinis vėlinimas ties 5 MHz.

3 lentelė. Perdavimo koeficientas ties 5 MHz ir -3 dB apatinė juostos riba

Parametras	RD	CD	4D	TR	CTR	DEPL	VCAP	REF
$ A_v $ , dB (5MHz)	23,00	23,24	23,29	22,80	23,16	23,08	23,59	23,91
$f$ , kai $ A_v  - 3$ dB, kHz	534	529	551	384	445	489	550	151
Grupinis vėlinimas ties 5 MHz, ps	38,9	37,2	41,9	29,4	47,2	39,1	39,4	12,98
Įterpties nuostoliai, dB (skirtumo neapibrėžtis $\pm 0,15$ dB)	-0,91	-0,67	-0,62	-1,11	-0,75	-0,83	-0,32	0

Visos apsaugos grandinės buvo projektuojamos taip, kad apatinė juostos riba būtų kuo artimesnė 500 kHz. Stiprintuvas REF apsaugos grandinės neturi, todėl jo apatinę juostos ribą nustato grįžtamojo ryšio kondensatorius C5 (21 pav.). TR grandinės derinimo galimybės ribotos, nes žemų dažnių srityje perdavimo koeficientas priklauso nuo konkretaus naudojamo transformatoriaus parametrų ir nėra nepriklausomas kaip kitose grandinėse. Visais kitais atvejais pasiekta 500 KHz  $\pm 10$  % reikšmė. Tokius režius lemia ribotas kondensatorių talpų pasirinkimas.

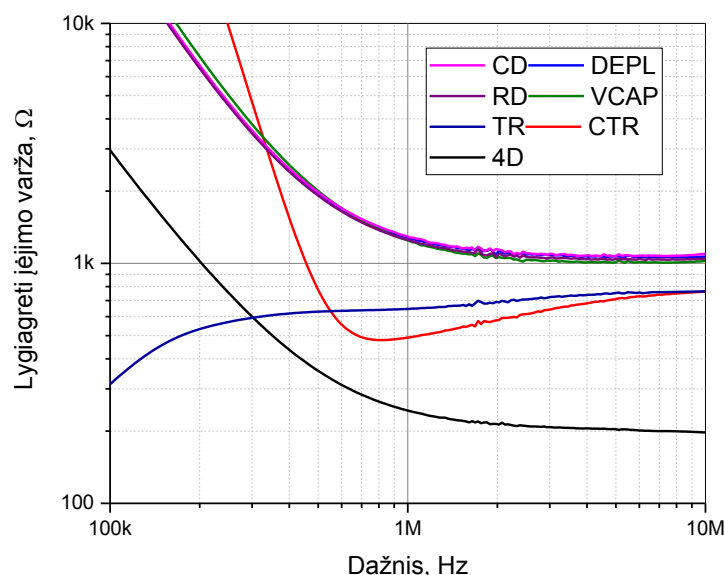
Įterpties nuostoliai apskaičiuojami kaip stiprinimo skirtumas tarp tiriamos grandinės ir atraminio stiprintuvo REF. Mažiausiais nuostoliais pasižymi VCAP grandinė dėl mažos tranzistorių kanalo varžos. Transformatorinės grandinės TR nuostoliai didesni galimai dėl transformatoriaus nuostolių ir induktyvumo. CTR grandinės skiriamasis kondensatorius sumažina induktyvumo įtaką, todėl įterpties nuostoliai mažesni, nei TR grandinės.

#### 5.4. Įėjimo impedansas

Grandinių įėjimo impedansas išmatuotas Wayne Kerr 6510P [39]  $\pm 0,05$  %.

41 pav. pateiktos apskaičiuotos lygiagrečios įėjimo varžos dažninės charakteristikos.

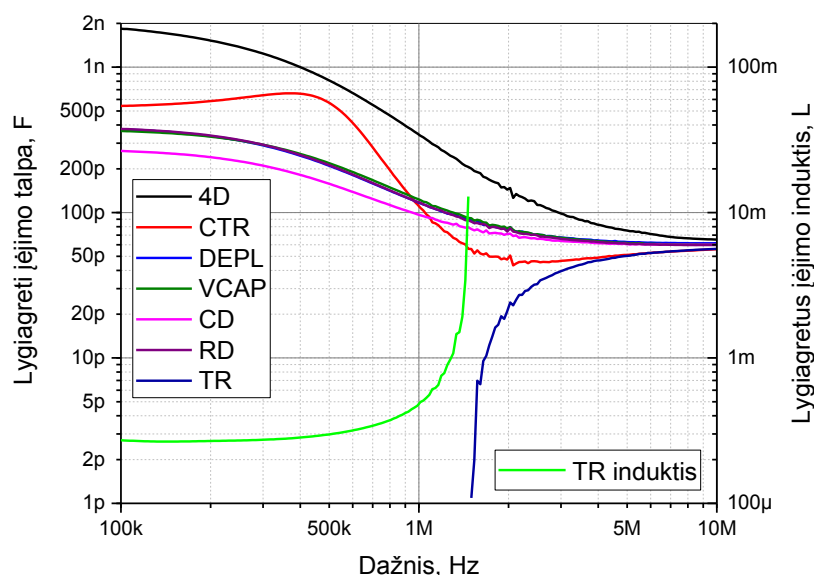




41 pav. Apskaičiuota lygiagreti įėjimo varža

CD, DEPL, RD ir VCAP įėjimo varža praktiškai sutampa. Virš 2 MHz šių grandinių įėjimo varža artėja prie stiprintuvo įėjimo varžos, kuri visose grandinėse yra 1 kΩ. Žemiau 2 MHz lygiagrečią įėjimo varžą didina skiriamieji kondensatoriai. Transformatorinės grandinės TR ir CTR pasižymi mažesne įėjimo varža dėl transformatoriaus šerdies nuostolių varžos, kuri pasireiškia kaip lygiagreti apvijų varža. Parenkant transformatoriaus konstrukciją ir šerdies medžiagą šį reiškinį galima sumažinti. CTR varža ties 800 kHz sumažėja iki 480 Ω dėl skiriamojo kondensatoriaus talpos ir apvijų induktyvumo sąveikos. TR grandinė skiriamojo kondensatoriaus neturi, todėl žemuose dažniuose įėjimo varža artėja prie transformatoriaus pirminės apvijų ominės varžos. 4D grandinės įėjimo varža mažiausia iš visų, nes lygiagrečiai įėjimui prijungti tranzistoriniai srovės šaltiniai, kurie esant žemai maitinimo įtampai dirba tiesiniame režime, o ne soties režime, todėl dinaminė varža maža. To būtų galima išvengti parinkus kitokios konstrukcijos srovės šaltinius arba naudojant aukštesnę maitinimo įtampą, nes soties režime lauko tranzistoriaus dinaminė varža daug aukštesnė.

42 pav. pateiktos apskaičiuotos lygiagrečios talpos ir, CTR atveju, induktyvumo dažninės charakteristikos.



42 pav. Apskaičiuota lygiagreti įėjimo talpa ir TR grandinės induktis

4 lentelėje pateiktos išmatuotos nuoseklaus impedanso vertės ir apskaičiuotos lygiagretaus impedanso bei lygiagretaus talpumo vertės.

4 lentelė. Įėjimo impedansas 5 MHz dažniui

Grandinės tipas	$R_s, \Omega$	$X_s, \Omega$	$R_p, \Omega$	$X_p, \Omega$	$C_p, \text{pF}$
RD	209,524	-417,839	1042,8	-522,90	60,873
CD	207,547	-423,231	1070,6	-525,01	60,629
4D	165,442	-79,5002	203,644	-423,79	75,110
TR	311,945	-370,617	752,27	-633,18	50,272
CTR	309,312	-351,534	708,83	-623,70	51,036
DEPL	197,111	-415,095	1071,3	-508,69	62,574
VCAP	209,267	-409,415	1010,26	-516,38	61,643

Mažiausias įėjimo impedansas – 4D grandinės. Šios grandinės įėjimo talpa didžiausia ir mažiausia varža. Grandinių su skiriamuoju transformatoriumi TR ir CTR varža taip pat mažesnė, nei likusių grandinių dėl transformatoriaus nuostolių varžos. Tačiau dėl apvijų induktyvumo TR ir CTR įėjimo talpa mažiausia. RD, CD ir VCAP ir DEPL įėjimo varža artima stiprintuvo įėjimo varžai, įėjimo talpa skiriasi nežymiai.

### 5.5. Triukšmo faktorius NF

5 lentelėje pateikti grandinių F ir NF bei visi apskaičiavimui reikalingi duomenys: įtampos perdavimo koeficientas, išėjimo triukšmas ir įėjimo impedansas.

5 lentelė. Triukšmo tyrimo rezultatai

Grandinės tipas	$A_v$	$V_{no}, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	$Z_i, \Omega$	$V_{ni}, \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	$F$	$NF, dB$
RD	14,12537545	32,40	209,524-417,839i	2,40	7,09	8,50
CD	14,52111618	32,70	207,547-423,231i	2,31	6,61	8,20
4D	14,60494749	29,00	165,442-79,5002i	2,45	7,44	8,71
TR	13,80384265	32,30	311,945-370,617i	2,48	7,59	8,80
CTR	14,38798578	31,90	309,312-351,534i	2,37	6,93	8,40
DEPL	14,25607594	37,90	197,111-415,095i	2,76	9,44	9,74
VCAP	15,11819699	29,60	209,267-409,415i	2,05	5,17	7,13
REF	15,68555898	26,92	45,2959+1,46007i	3,608	16,096	12,07

Mažiausiu NF pasižymi VCAP grandinė. Taip yra dėl mažos nuosekliai su įėjimu esančių lauko tranzistorių kanalo varžos ir didelės talpos. Didžiausias NF – DEPL grandinės dėl didesnės, nei kitų grandinių įėjime esančių 50  $\Omega$  rezistorių nuosekliai su įėjimu esančių lauko tranzistorių kanalo varžos. Visų kitų grandinių NF panašus.

### 5.6. Netiesinių iškreipimų koeficientas

THD tyrimo generatoriumi ir oscilografu rezultatai pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. THD matavimo Rigol DG5251 ir Yokogawa DLM2000 rezultatai

	RD	CD	4D	TR	CTR	DEPL	VCAP
THD, %	-49,4 dB	-47,4 dB	-47,2 dB	-49,3 dB	-47,7 dB	-48,3 dB	-48,3 dB

Matuota naudojant Rigol DG5251 [41] generatorių ir Yokogawa DLM2000 [35] oscilografą. Kadangi Rigol DG5251 THD specifikuojamas <45 dB, galima teigti jog visų grandinių THD yra žemiau matavimo jautrumo ribos.

Modeliuojant įvertinta įėjimo amplitudė kuriai esant apsaugos grandinių THD pasiekia 1 % ir 10 % vertę. 7 lentelėje didėjimo tvarka pateikti THD tyrimo rezultatai, gauti modeliuojant PSPICE [43].

7 lentelė. Įėjimo amplitudės, kurioms esant THD iškreipimų lygis 1 % ir 10 %. PSPICE modeliavimas

THD@V	CD	RD	CTR	TR	DEPL	VCAP	4D
1%	0,53 V	0,53 V	0,55 V	0,55 V	0,60 V	0,61 V	6,50 V
10 %	0,90 V	0,85 V	0,80 V	0,80 V	0,93 V	0,95 V	9,10 V

Didžiausios amplitudės signalą galima naudoti su 4D grandine, nes ji riboja amplitudę iki maitinimo įtampos. Visose kitose grandinėse įtampą riboja diodiniai ribotuvai, todėl iškreipimai išauga įtampai artėjant prie diodo tiesioginės srovės sandūros įtampos. Iš šių grandinių šiek tiek didesnę įėjimo įtampą leidžia naudoti DEPL ir VCAP grandinės.

## 5.7. Kompleksinė grandinių analizė

Visų grandinių parametrų suvestinė pateikta 8 lentelėje.

8 lentelė. Grandinių parametrų suvestinė

Parametras	4D	CTR	DEPL	VCAP	CD	RD	TR	REF
Įterpties nuostoliai, dB ( $\pm 0,21$ dB)	-0,60	-0,73	-0,81	-0,30	-0,66	-0,93	-1,1	0,0
Atsistatymo laikas $T_x=Tr$ , $\mu s$	3,84	2,31	3,68	6,39	2,23	2,19	1,74	-
Atsistatymo laikas $T_x=HB$ , $\mu s$	5,39	2,05	1,33	11,0	19,8	7,44	5,21	-
NF, dB	8,71	8,4	9,74	7,13	8,2	8,5	8,8	12,07
Lygiagreti įėjimo varža, $\Omega$	203,644	708,83	1071,3	1010,26	1070,6	1042,8	752,27	45,343
Lygiagreti įėjimo talpa, pF	75,11	51,04	62,57	61,64	60,63	60,87	50,27	-
Įėjimo impedanso modulis, $\Omega$ (5 MHz)	183,55	468,2	459,5	459,8	471,4	467,4	484,4	45,319
Grupinis vėlinimas, ps (5 MHz)	41,9	47,2	39,1	39,4	37,2	38,9	29,4	12,98
Sunaudojama energija (200 V, 100 ns impulsas), $\mu J$	1,97	16,6	1,90	8,02	9,75	51,7	60,7	59,16

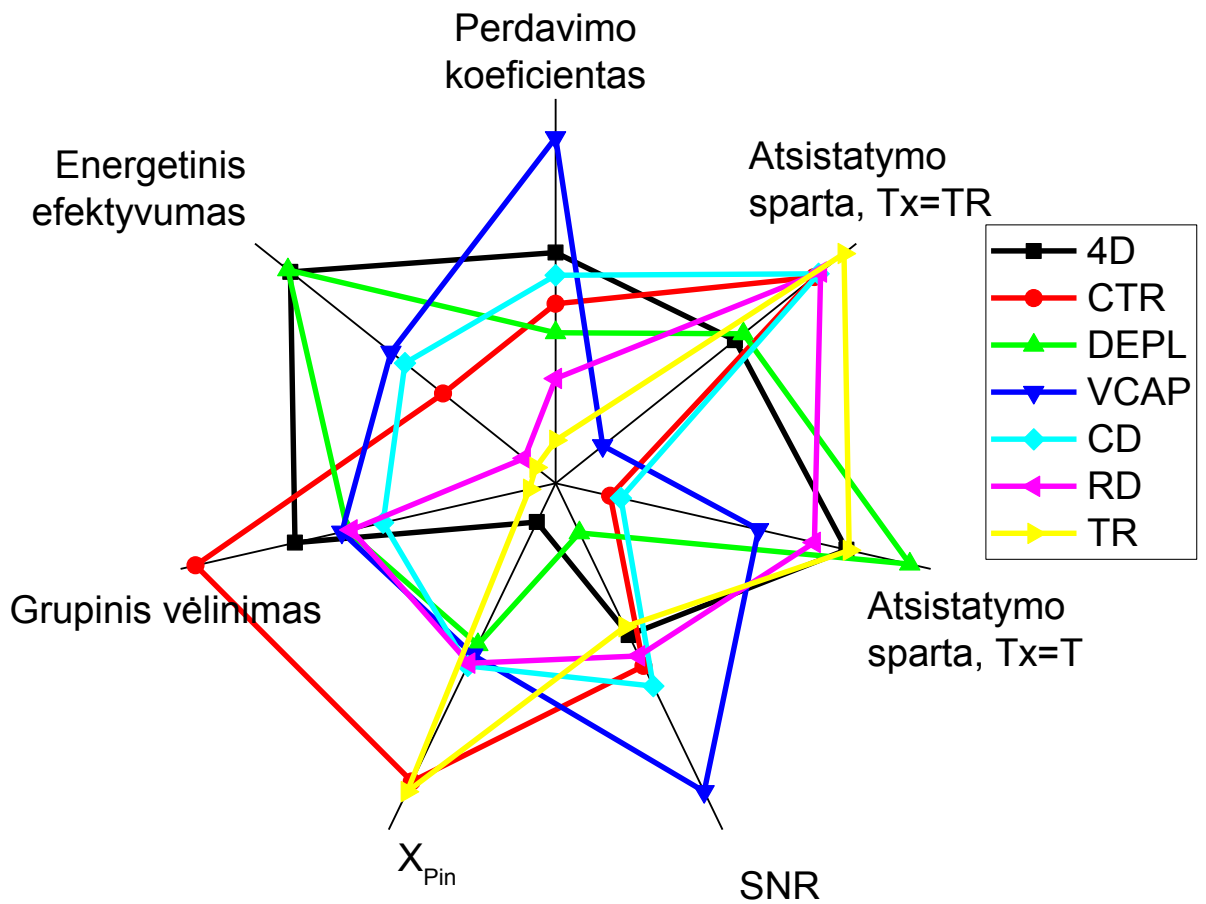
Pagal kiekvieną iš parametrų surūšiuotos grandinės pateiktos 9 lentelėje.

9 lentelė. Grandinės nuo geriausios iki blogiausios pagal kiekvieną parametą

Parametras	Geriausia → Blogiausia						
	VCAP	4D	CD	CTR	DEPL	RD	TR
Įterpties nuostoliai	VCAP	4D	CD	CTR	DEPL	RD	TR
Atsistatymo laikas $T_x=Tr$	TR	RD	CD	CTR	DEPL	4D	VCAP
Atsistatymo laikas $T_x=HB$	DEPL	CTR	TR	4D	RD	VCAP	CD
NF	VCAP	CD	CTR	RD	4D	TR	DEPL
Lygiagreti įėjimo varža	DEPL	CD	RD	VCAP	TR	CTR	4D
Lygiagreti įėjimo talpa	TR	CTR	CD	RD	VCAP	DEPL	4D
Įėjimo impedansas, (5 MHz)	TR	CD	CTR	RD	VCAP	DEPL	4D
Grupinis vėlinimas (5 MHz)	TR	CD	RD	DEPL	VCAP	4D	CTR
Sunaudojama energija	DEPL	4D	VCAP	CD	CTR	RD	TR

Visus matavimų rezultatus galima vaizdžiai pateikti spindulinėje diagramoje. Šis kompleksinių parametrų atvaizdavimo būdas leidžia greitai palyginti grandines pagal norimą parametą ar jų visumą.

43 pav. pateiktos visų grandinių spindulinės diagramos.



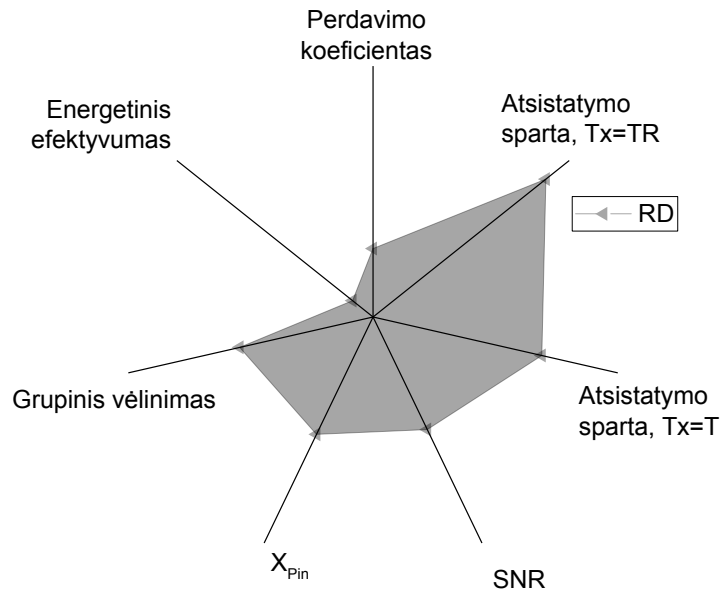
43 pav. Visų grandinių spindulinės diagramos kompleksiniam parametrų įvertinimui

7 ašyse pavaizduotos svarbiausios grandinių savybės, leidžiančios jas palyginti kompleksiskai. Diagramos išorėje geriausios parametrų vertės, o centre – blogiausios. Energetinis efektyvumas nusako kaip mažai suvartojama energijos, perdavimo koeficientas – ar grandinė slopina signalą, atsistatymo sparta – atvirkščias atsistatymo laikui dydis, SNR – atvirkščias NF dydis, įėjimo reaktansas – atvirkščias įėjimo talpai dydis. Grupinis vėlinimas – centre mažiausias, išorėje didžiausias.

Toliau kiekviena grandinė aptariama atskirai.

### 5.7.1. Diodinis ribotuvas RD

RD grandinės parametų spindulinė diagrama pateikta 44 pav.

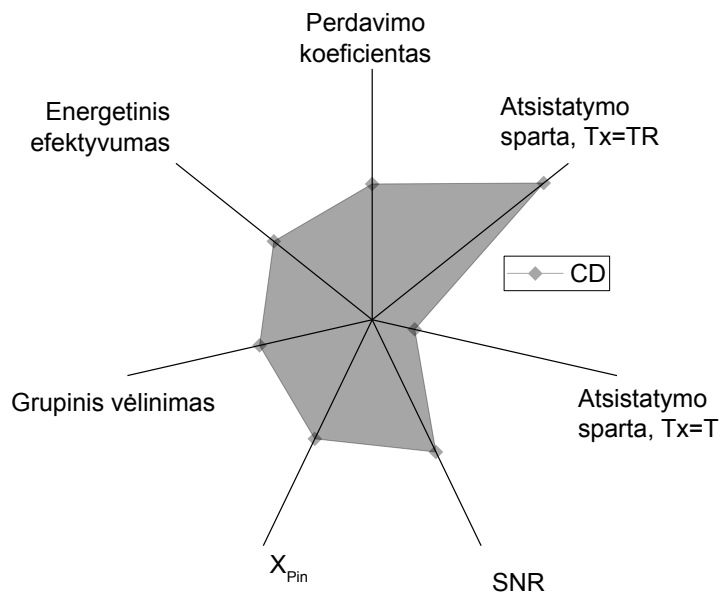


44 pav. RD grandinės parametų spindulinė diagrama kompleksiniam parametų įvertinimui

Grandinė pasižymi trupu atsistatymo laiku su  $T_x=TR$  siųstuvu ir vidutiniu atsistatymo laiku su  $T_x=BR$  siųstuvu. Įėjimo impedansas siuntimo metu suderintas, todėl maži atspindžiai. Didelės energijos sąnaudos. Grupinis vėlinimas, įėjimo talpa ir triukšmo koeficientas vidutiniški.

### 5.7.2. Diodinis ribotuvas su skiriamuoju kondensatoriumi CD

CD grandinės parametų spindulinė diagrama pateikta 45 pav.

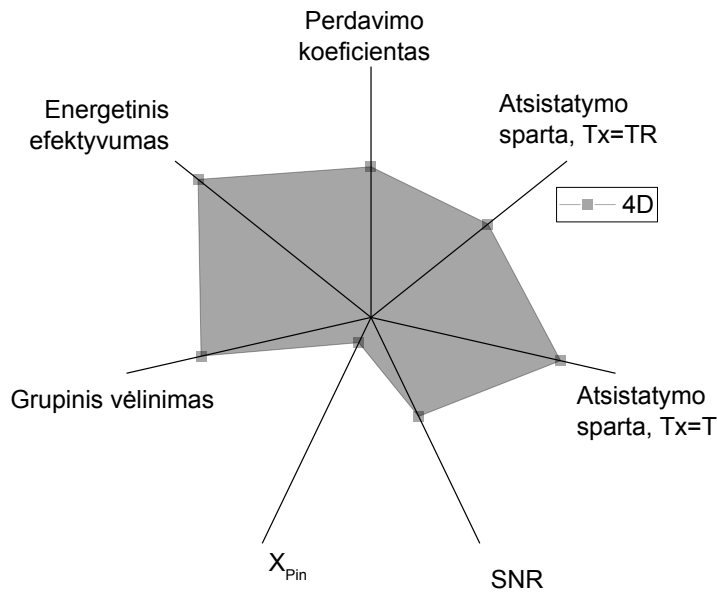


45 pav. CD grandinės parametų spindulinė diagrama kompleksiniam parametų įvertinimui

Trumpas atsistatymo laikas su  $T_x=TR$  siūstuvu ir labai ilgas su  $T_x=T$  siūstuvu. Energijos sąnaudos dėl skiriamojo kondensatoriaus vidutinės. Įėjimo impedansas siuntimo metu suderintas, todėl maži atspindžiai. Skiriamasis kondensatorius leidžia naudoti ultragarsinius keitiklius su priešįtampiu. Perdavimo koeficientas, grupinis vėlinimas, triukšmo faktorius ir įėjimo talpa vidutiniai.

### 5.7.3. Diodų tiltelis 4D

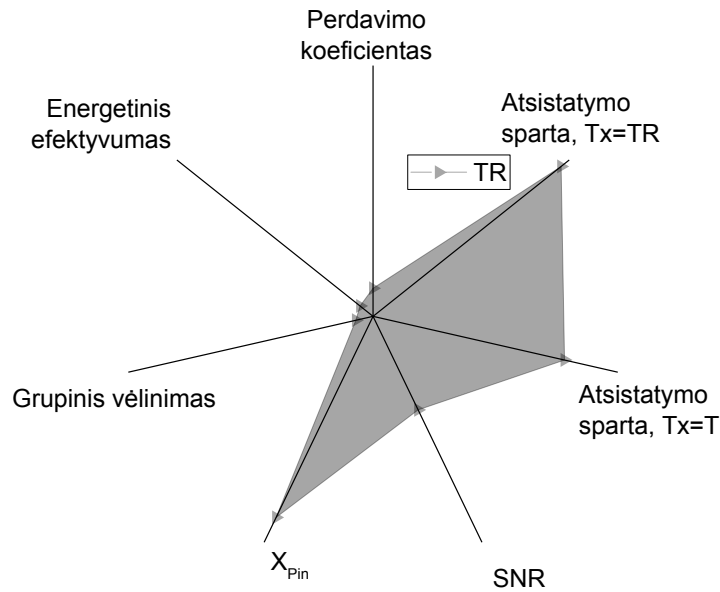
4D grandinės parametrų spindulinė diagrama pateikta 46 pav.



46 pav. 4D grandinės spindulinė diagrama kompleksiniam parametrų įvertinimui

Vienos mažiausių energijos sąnaudos. Dėl didelės įėjimo talpos, dominuoja energija, reikalinga šiai talpai įkrauti. Impulso metu srovė maža, todėl energijos sąnaudos nuo impulso trukmės turėtų priklausyti nežymiai. Maži įterpties nuostoliai. Maža įėjimo varža bei didelis įėjimo talpa kas lemia mažą įėjimo impedansą. Nesuderintas įėjimo impedansas siuntimo metu. Atsistatymo laikas vidutinis.

#### 5.7.4. Įsotinamas transformatorius TR

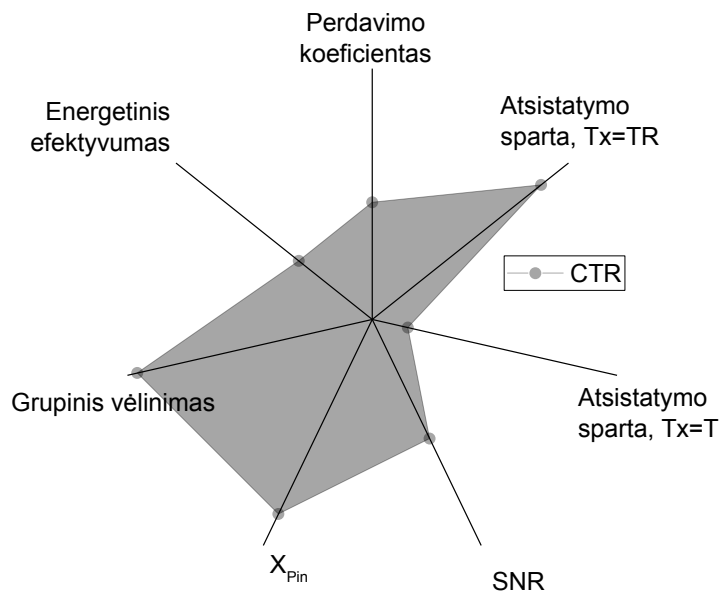


47 pav. TR grandinės parametų spindulinė diagrama kompleksiniam parametų įvertinimui

Trumpiausias atsistatymo laikas su transformatoriniu siūstuvu, vidutinis su  $T_x=BR$  siūstuvu. Didžiausias įėjimo impedansas, maža įėjimo talpa. Mažiausias grupinis vėlinimas. Suderintas įėjimo impedansas siuntimo metu. Didelės energijos sąnaudos, didžiausi iš tirtų grandinių įterpties nuostoliai.

#### 5.7.5. Įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi CTR

CTR grandinės parametų spindulinė diagrama pateikta 48 pav.



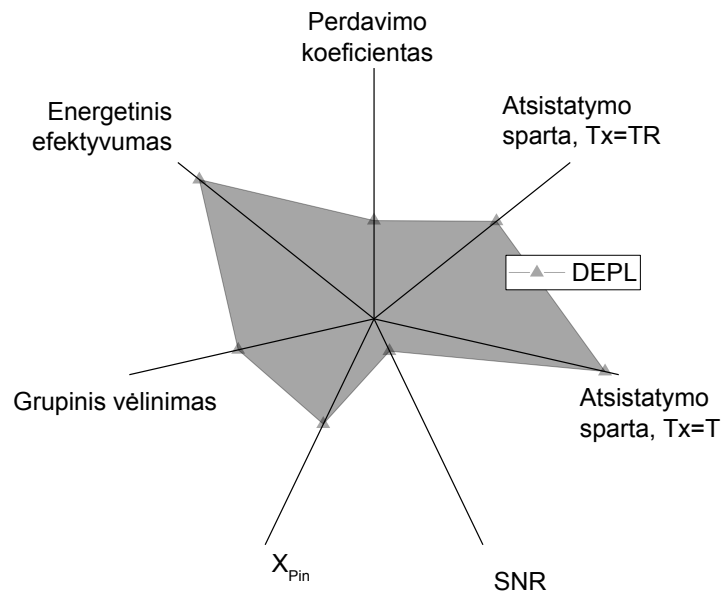
48 pav. CTR grandinės parametų spindulinė diagrama kompleksiniam parametų įvertinimui

Mažiausia įėjimo talpa. Didžiausias grupinis vėlinimas. Sunaudojama energija vidutinė. Ilgas atsistatymas su  $T_x=HB$  siūstuvu.



### 5.7.6. Srovės ribotumas DEPL

DEPL grandinės parametų spindulinė diagrama pateikta 49 pav.

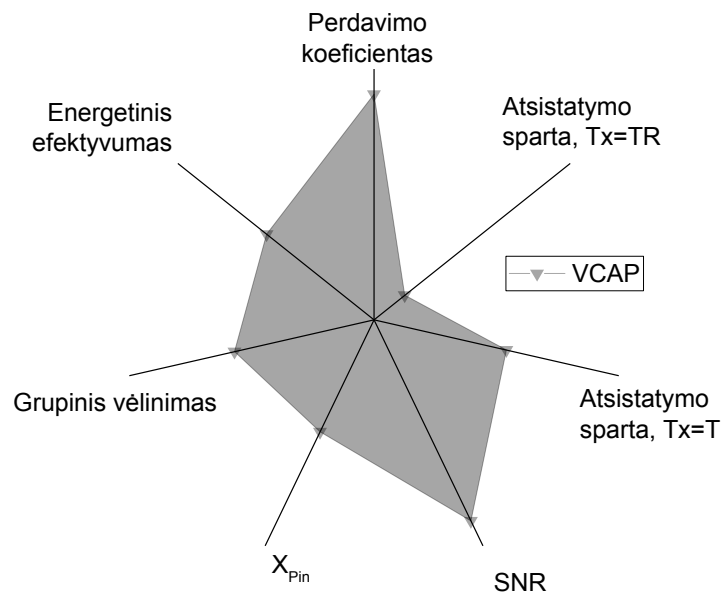


49 pav. DEPL grandinės spindulinė diagrama kompleksiniam parametų įvertinimui

Trumpiausias atsistatymo laikas su dvitakčiu siųstuvu, tačiau didžiausias triukšmo faktorius. Nesuderintas įėjimo impedansas siuntimo metu, bet labai mažiausios energijos sąnaudos.

### 5.7.7. Netiesinio talpumo ribotumas VCAP

50 paveiksle pateikta VCAP grandinės parametų spindulinė diagrama.



50 pav. VCAP grandinės parametų spindulinė diagrama kompleksiniam parametų įvertinimui

Mažiausi įterpties nuostoliai. Didžiausia įėjimo varža su vidutine talpa. Mažiausias triukšmo faktorius. Ilgas atsistatymo laikas, ypač su dvitakčiu siūstuvu. Nesuderintas įėjimo impedansas siuntimo metu. Energijos sąnaudos vidutinės.

## 6. IŠVADOS

Atliktas tyrimas, leidžiantis kompleksiskai įvertinti ultragarsinio imtuvo įėjimo apsaugos grandines.

Tyrimui atrinktos esminės apsaugos grandinių topologijos: diodinis ribotuvas, diodinis ribotuvas su skiriamuoju kondensatoriumi, diodų tiltelis, įsotinamas transformatorius, įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi, srovės ribotuvas, netiesinio talpumo ribotuvas. Tyrimui naudoti dviejų tipų siūstuvai: su dvitakte išėjimo pakopa ir su išėjimo transformatoriumi.

Išskirti parametrai topologijų analizei:

- Atsistatymo laikas
- Energijos sąnaudos žadinimo metu
- Įterpties nuostoliai
- Grupinis vėlinimas
- Įėjimo impedansas
- Triukšmo faktorius

Atsistatymo laiko matavimui pasiūlyta naudoti 5 k $\Omega$  išėjimo impedanso daliklį vietoje keitiklio bei atsistatymu laikyti amplitudės grįžimą iki -3 dB ribos. Rekomenduojama taip pat nurodyti atsistatymo iki 95 % laiką kaip pilno grandinės atsistatymo indikaciją.

Energijos sąnaudų matavimui pasiūlyta naudoti srovės transformatorių. Matavimo sistemą siūloma kalibruoti panaudojant žinomos varžos apkrovą ir taikant dekonvoliuciją.

Nustatyta, kad mažiausiomis energijos sąnaudomis pasižymi diodų tiltelis. Greičiausiai atsistatymo laiku su transformatoriniu siūstuvu pasižymi įsotinamas transformatorius, o su dvitakčiu siūstuvu – srovės ribotuvas. Ilgiausiai atsistatinėja netiesinio talpumo ribotuvas ir įsotinamas transformatorius su skiriamuoju kondensatoriumi. Mažiausia įėjimo talpa – įsotinamo transformatoriaus, didžiausia – diodų tiltelio. Įsotinamas transformatorius taip pat pasižymi mažiausiu grupiniu vėlinimu bei didžiausiais įterpties nuostoliais. Didžiausias grupinis vėlinimas įsotinamo transformatoriaus su skiriamuoju kondensatoriumi. Mažiausi įterpties nuostoliai – ribotuvo su netiesiniu talpumu.

## 7. LITERATŪRA

- [1] R. Martinez, L. Leija ir A. Vera, „Ultrasonic attenuation in pure water: Comparison between through-transmission and pulse-echo techniques,“ *Health Care Exchange (PAHCE), 2010 Pan American*, pp. 81-84, 2010.
- [2] J. Camacho ir C. Fritsch, „Protection Circuits for Ultrasound Applications,“ *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, t. 55, nr. 5, pp. 1160-1164, 2008.
- [3] „A comparison study of the pulse-echo and through-transmission ultrasonics in glass/epoxy composites,“ *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, t. 22, nr. 2, pp. 51-54, 2007.
- [4] Romary, „File:UT principe.svg - Wikimedia Commons,“ 08 12 2008. [Tinkle]. Available: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:UT\\_principe.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:UT_principe.svg). [Kreiptasi 06 05 2015].
- [5] G. L. Athanasopoulos, S. J. Carey ir J. V. Hatfield, „A High Voltage Pulser ASIC for Driving High Frequency Ultrasonic Arrays,“ įtraukta *2004 IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004.
- [6] G. R. Lockwood, W. J. Hunt ir F. S. Foster, „The design of protection circuitry for high-frequency imaging systems,“ *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, t. 38, nr. 1, pp. 48-53, 1991.
- [7] N. C. Chaggares, R. K. Tang ir A. N. Sinclair, „Protection circuitry and time resolution in high frequency ultrasonic NDE,“ įtraukta *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 1999.
- [8] I. J. Lowe ir C. E. Tarr, „A fast recovery probe and receiver for pulsed nuclear magnetic resonance spectroscopy,“ *Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E)*, t. 1, nr. 2, pp. 320-322, 1968.
- [9] H. Bosma, „On Stripline Y-Circulation at UHF,“ *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, t. 12, nr. 1, pp. 61-72, 1964.
- [10] V. Domarkas ir R. J. Kažys, Kontrolės-matavimo pjezoelektriniai keitikliai, 1975, p. 255.
- [11] C. R. Rao, „Information and the Accuracy Attainable in the Estimation of Statistical Parameters,“ įtraukta *Breakthroughs in Statistics*, Springer New York, 1992, pp. 235-247.

- [12] H. Cramer, *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1946.
- [13] J. Minkoff, *Signal processing fundamentals and applications for communications and sensing systems*, Norwood, MA, USA: Artech House, 2002.
- [14] L. Svilainis, V. Dumbrava, A. Chaziachmetovas ir A. Aleksandrovas, „Application of spread spectrum signals in ultrasonic imaging,“ *Journal of Applied Electromagnetism*, t. 15, nr. 1, pp. 49-64, 2013.
- [15] I. Cicek, A. Bozkurt ir M. Karaman, „Design of a Front-End Integrated Circuit for 3D Acoustic Imaging Using 2D CMUT Arrays,“ *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, t. 52, nr. 12, pp. 2235-2241, 2005.
- [16] S. ZHOU, K. ZHANG, D. XIAO, C. XU ir B. YANG, „Application of Silicon Carbide Diode in Ultrasound High Voltage Pulse Protection Circuit,“ Beijing Institute of Technology, Beijing.
- [17] M. Vogt, B. Paul, S. Scharenberg, R. Scharenberg ir H. Ermert, „Development of a high frequency ultrasound skin imaging system: Optimization using time domain reflectometry and network analysis,“ įtraukta *IEEE Ultrason. Symp.*, 2003.
- [18] J. K. Poulsen, „Low loss wideband protection circuit for high frequency ultrasound,“ įtraukta *IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM*, 1999.
- [19] Supertex inc., „LND150: ±500 Volt Protection Circuit,“ 19 06 2014. [Tinkle]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN-D11.pdf>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [20] R. K. Williams, S. Mallikarjunaswami, M. Darwish ir M. Cornell, „A novel automotive 60 V load-dump protected ESD diode,“ įtraukta *IEEE Symp. Power Semicond. Devices and ICs*, 1997.
- [21] O. e. al., „Duplexer including a variable capacitance diode for an ultrasound imaging system“. United States of America Patentas 5,609,154, 11 05 1997.
- [22] W. M. Leach, Jr., „Noise Measurement,“ įtraukta *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, 2 mont., t. II, J. G. Webster ir H. Eren, Mont., Taylor & Francis Group, LLC.
- [23] Infineon Technologies AG, „650V CoolMOS™ C7 Power Transistor IPD65R225C7,“ 18 04 2013. [Tinkle]. Available: [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPD65R225C7-DS-v02\\_00-en.pdf?fileId=db3a30433e78ea82013e793234000141](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPD65R225C7-DS-v02_00-en.pdf?fileId=db3a30433e78ea82013e793234000141). [Kreiptasi 06 05 2015].

- [24] EN 12668-1:2010 *Non-destructive testing - Characterization and verification of ultrasonic examination equipment - Part 1: Instruments*, Brussels: CEN, 2010.
- [25] L. Svilainis, P. Kabišius ir S. Kitov, „Ultrasonic transit time flow meter for diesel: initial analysis“, *Ultrasound*, t. 65, nr. 4, pp. 16-21, 2010.
- [26] C. W. Lloyd, K. D. Wallace, M. R. Holland ir J. G. Miller, „A plane wave source with minimal harmonic distortion for investigating nonlinear acoustic properties“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, t. 122, nr. 1, pp. 91-96, 2007.
- [27] O. Oralkan., A. Ergun, J. Johnson, M. Karaman, U. Demirci, K. Kaviani, T. Lee ir B. Khuri-Yakub, „Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Next-Generation Arrays for Acoustic Imaging?“, *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, t. 49, nr. 11, pp. 1596-1610, 2002.
- [28] L. Svilainis, V. Dumbrava ir C. Andrius, „Versatile signal acquisition system for ultrasound equipment frequency domain parameters estimation“, *Sensors & Transducers*, t. 24, pp. 7-17, 2013.
- [29] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky ir W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press., 1992.
- [30] B. Les ir R. Gilmore, *Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems*, t. 1, Nortwood, MA: Artech House, Inc., 2003.
- [31] D. Shmilovitz, „On the Definition of Total Harmonic Distortion and Its Effect on Measurement Interpretation“, *IEEE Transactions On Power Delivery*, t. 20, nr. 1, pp. 526-528, 2005.
- [32] Texas Instruments Incorporated, „LMH6624 and LMH6626 Single/Dual Ultra Low Noise Wideband Operational Amplifier“, 2015. [Tinkle]. Available: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lmh6624.pdf>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [33] L. Svilainis, V. Dumbrava, A. Chaziachmetovas ir A. Aleksandrovas, „Pulser for arbitrary width and position square pulse trains generation“, įtraukta *Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International*, Dresden, 2012.
- [34] Rigol Inc., „DM3068 6 ½ Digit Digital Multimeter“, [Tinkle]. Available: <http://beyondmeasure.rigoltech.com/acton/attachment/1579/f-0020/0/-/-/-/-/file.pdf>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [35] „DLM2000 Series Mixed Signal Oscilloscopes“, Yokogawa, 2014. [Tinkle]. Available: [http://tmi.yokogawa.com/files/uploaded/Bulletin\\_DLM2000\\_EEA.pdf](http://tmi.yokogawa.com/files/uploaded/Bulletin_DLM2000_EEA.pdf). [Kreiptasi 06 05 2015].

- [36] L. Svilainis, V. Dumbrava ir A. Chaziachmetovas, „Universal acquisition system for frequency domain parameters measurement,“ įtraukta *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011 IEEE 6th International Conference on*, 2011.
- [37] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, „R&S@FSH4/8/13/20 Spectrum Analyzer Specifications,“ 2013. [Tinkle]. Available: [http://www.rohde-schwarz.pt/file\\_20074/fsh](http://www.rohde-schwarz.pt/file_20074/fsh). [Kreiptasi 06 05 2015].
- [38] „Metrodata GmbH - GUM Workbench Educational Version,“ Metrodata GmbH, 2014. [Tinkle]. Available: [http://www.metrodata.de/edu\\_en.html](http://www.metrodata.de/edu_en.html). [Kreiptasi 06 05 2015].
- [39] Wayne Kerr Electronics, „6500P Series HF LCR Meters Technical data sheet,“ 10 2008. [Tinkle]. Available: <http://www.waynekerrtest.com/brochure/6500P%20Series.pdf>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [40] Agilent Technologies, Inc., „Agilent N9320A Spectrum Analyzer Technical Overview,“ 2010. [Tinkle]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-5521EN.pdf>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [41] Rigol Technologies USA, „DG5000 series Waveform Generators Datasheet,“ [Tinkle]. Available: <http://beyondmeasure.rigoltech.com/acton/attachment/1579/f-001e/0/-/-/-/-/file.pdf>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [42] The MathWorks, Inc., „Total harmonic distortion - MATLAB thd - MathWorks Nordic,“ 2015. [Tinkle]. Available: <http://se.mathworks.com/help/signal/ref/thd.html>. [Kreiptasi 06 05 2015].
- [43] Cadence Design Systems, Inc., „OrCAD,“ [Tinkle]. Available: [http://www.cadence.com/products/orcad/Pages/new\\_orcad.aspx](http://www.cadence.com/products/orcad/Pages/new_orcad.aspx). [Kreiptasi 06 05 2015].