



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

**Ignas Černiauskas**

**AKUSTINĖS EMISIJOS SIGNALŲ PARAMETRŲ MATAVIMO**  
**SISTEMA**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**  
Prof. Darius Gailius

**KAUNAS, 2016**

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

**AKUSTINĖS EMISIJOS SIGNALŲ PARAMETRŲ MATAVIMO  
SISTEMA**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektronikos inžinerija (621H61002)

**Vadovas**  
Prof. Darius Gailius

**Recenzentas**  
Doc. dr. Pranas Kuzas

**Projektą atliko**  
Ignas Černiauskas

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS

(Fakultetas)

Ignas Černiauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija (621H61002)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Akustinės emisijos signalų parametrų matavimo sistema“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 24 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Igno Černiausko** baigiamasis projektas tema „Akustinės emisijos signalų parametrų matavimo sistema“ 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)

**I.Černiauskas. Measurement system of parameters of acoustic emission signals. Final project of Electronics Engineering master degree/supervisor prof. D.Gailius; Department of Electronics Engineering, Faculty of Electrical and Electronics, Kaunas University of Technology.**

**Kaunas, 2016. – 75 p.**

### **SUMMARY**

The objective of this research is to create a one sensor high resolution acoustic emission measurement system. To obtain this goal, two low noise and distortion amplifiers are designed, with gains of 46 dB and 60 dB. Gain could be reduced by 6 dB using relay switched voltage dividers. Amplified signal then goes to active low pass 7th order filter, unbalanced to balanced signal converter and finally to 16 bits analog to digital converter (ADC). Those circuits, together with six power supply regulators (three of them are used for ADC power supply), are layout on single printed circuit board (PCB), which consist of approximately 170 elements. In addition, another PCB is designed to reduce electromagnetic interference of field programmable gate array (FPGA) matrix. Board uses an optic decouples and differential line for the data transfer (to and from ADC) in order that noisy “ground” loops would not occur. Grounds between those boards are connected with capacitor. By using this technique, declared ADC dynamic range by manufacturer was reached (94 dB). Data from FPGA matrix is transferred to microcontroller, which writes it to SD memory card by using a file system (FAT). Recorded data is processed in computer.

**Keywords:** Acoustic Emission Noise Figure Distortion FPGA EMI

**I.Černiauskas. Akustinės emisijos signalų parametrų matavimo sistema. Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas/vadovas prof. D.Gailius; Elektronikos inžinerijos katedra, Elektros ir Elektronikos fakultetas, Kauno Technologijos Universitetas.**

**Kaunas, 2016. – 75 p.**

## **SANTRAUKA**

Darbo tikslas – sukurti vieno jutiklio didelės skiriamosios gebos akustinės emisijos matavimo sistemą. Darbo metu projektuojami du mažatriukšmiai, mažus iškraipymus turintys stiprintuvai, kurių stiprinimas siekia 60 dB ir 46 dB. Stiprintuvų išėjimuose suprojektuoti relėmis perjungiami įtampos dalikliai, kurie signalą gali nuslopinti 6 dB. Sustiprintas signalas perduodamas į 7 eilės žemo dažnio aktyvinių filtrą, nesimetrinio signalo į simetrinį buferį ir galiausiai į 16 bitų keitiklį analoginio signalo į skaitmeninį (toliau ADC (*angl. Analog to Digital Converter*)). Šie grandynai, kartu su šešiais įtampos reguliatoriais (trys iš jų skirti ADC maitinimui), sutrasuoti vienoje plokštėje, kurią sudaro apie 170 komponentų. Siekiant, jog triukšmai nepatektų iš programuojamos loginės matricos plokštės (toliau FPGA (*angl. Field Programmable Gate Array*)) ir nesusidarytų triukšmingos „žemės“ kilpos, suprojektuojama dar viena plokštė su optiniais atrišežiais valdymo signalams. Kadangi duomenys keitikliui perduodami simetrine linija, „žemės“ tarp plokščių sujungiamos naudojant polipropileno kondensatorių. Šie sprendimai leido pasiekti ADC gamintojo deklaruojamą dinaminį diapazoną (94 dB). Duomenys iš FPGA perduodami mikrovaldikliui kuris, naudodamas failų sistemą, juos įrašo į atminties kortelę. Kompiuteryje realizuotas akustinės emisijos signalų apdorojimas.

**Raktiniai žodžiai:** Akustinė Emisija Triukšmų Skaitmuo Iškraipymai FPGA EMI

# TURINYS

ĮVADAS .....	9
1. APŽVALGINĖ DALIS .....	10
1.1. Akustinės emisijos šaltiniai .....	11
1.2. Akustinės emisijos matavimo keitikliai .....	12
1.3. Signalų parametrai ir skaitmeninis apdorojimas .....	14
1.4. AE sistemos .....	16
2. METODINĖ DALIS .....	17
2.1. Matavimo mazgų kūrimas .....	17
2.1.1. Imtuvas .....	18
2.1.1.1. Galimos stiprintuvų realizacijos .....	18
2.1.1.2. Triukšmų skaičiavimas .....	19
2.1.1.3. Operacinių stiprintuvų ir lauko tranzistorių parinkimas .....	20
2.1.1.4. Stiprintuvo principinės schemos sudarymas ir skaičiavimai .....	24
2.1.1.5. Stiprintuvo schemos simuliacija .....	32
2.1.1.6. Keitiklio analoginio signalo į skaitmeninį parinkimas .....	34
2.1.1.7. Analoginis filtras .....	36
2.1.1.8. Keitiklio analoginio į skaitmeninį signalą įėjimo buferis .....	37
2.1.1.9. Maitinimo šaltinių parinkimas .....	39
2.1.1.10. Imtuvo spausdintinio montažo plokštės braižymas .....	42
2.1.1.11. Pasyvinių komponentų parinkimas .....	44
2.1.2. Programuojama loginė matrica .....	45
2.1.2.1. FPGA programavimas .....	45
2.1.3. Mikrovaldiklis .....	46
2.1.3.1. Failų sistema .....	47
2.2. Matavimo metodų apžvalga bei matavimo proceso modeliavimas .....	49
2.2.1. Matavimo metodai .....	49
2.2.2. Matavimo proceso modeliavimas .....	51

3.	TIRIAMOJI DALIS .....	54
3.1.	Sistemos tyrimas .....	54
3.1.1.	Stiprintuvų dažninių charakteristikų ir triukšmų tyrimas .....	54
3.1.1.1.	Stiprintuvo iš operacinių stiprintuvų tyrimas .....	55
3.1.1.2.	Stiprintuvo iš diskretinių elementų tyrimas.....	57
3.1.2.	Analoginio filtro ADCH matavimas.....	59
3.1.3.	ADC keitiklio ir įėjimo buferio tyrimas .....	59
3.1.4.	Sistemos struktūra ir papildomi tyrimai .....	61
3.1.4.1.	Triukšmų spektro matavimas .....	61
3.1.4.2.	Harmoninių iškreipymų matavimas .....	64
3.1.4.3.	Diskretizavimo dažnio didinimas .....	65
3.1.4.4.	Duomenų rašymas į atminties kortelę .....	66
3.1.4.5.	Duomenų perdavimas SPI sąsaja mikrovaldikliui.....	66
3.2.	Akustinės emisijos signalų matavimas .....	67
3.3.	Akustinės emisijos signalų parametrų skaičiavimas.....	71
	IŠVADOS.....	72
	INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	73
	PRIEDAI .....	76
	Priedas 1. Stiprintuvo, sudaryto iš dviejų operacinių stiprintuvų ADCH matavimo lentelė	76
	Priedas 2. Stiprintuvo, sudaryto iš diskretinių elementų ir operacinio stiprintuvo ADCH matavimo lentelė.....	77
	Priedas 3. Filtro ADCH tyrimo matavimo lentelė .....	78
	Priedas 4. Signalų perdavimas FPGA matricijoje tarp blokų .....	79
	Priedas 5. STM_SPI blokelis RTL lygmenyje .....	79
	Priedas 6. ADC_SPI blokelis RTL lygmenyje (geltonas blokelis – būsenos mašina) .....	80
	Priedas 7. Pagrindinės plokštės principinė schema .....	81
	Priedas 8. Imtuvo plokštės principinė schema .....	82

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNĖLIS

<b>ADC</b>	Keitiklis analoginio signalo skaitmeniniu ( <i>angl. Analog to Digital Converter</i> ).
<b>ADCH</b>	Amplitudinė dažninė charakteristika.
<b>AE</b>	Akustinė emisija.
<b>ESL</b>	Ekvivalentinis nuoseklus induktyvumas ( <i>angl. equivalent series inductance</i> ).
<b>ENOB</b>	Efektyvus keitiklio bitų skaičius ( <i>angl. efective-number-of-bits</i> ).
<b>FAT</b>	Failų sistema, kurioje naudojama lentelė saugoti informacijai apie įrašytus failus ( <i>angl. File Allocation Table</i> ).
<b>FPGA</b>	Programuojama loginė matrica ( <i>angl. Field Programable Gate Array</i> ).
<b>IC</b>	Integruotas grandynas ( <i>angl. integrated cuircuit</i> ).
<b>LMS</b>	Mažiausių vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras ( <i>angl. Last Mean Square</i> ).
<b>LVDS</b>	Simetrinė duomenų perdavimo linija ( <i>angl. Low Voltage Differential Signaling</i> ).
<b>NF</b>	Triukšmų skaitmuo, nurodantis, kiek dB turimas stiprintuvas skiriasi nuo idealaus ( <i>angl. Noise Figure</i> ).
<b>PCB</b>	Spausdintinio montažo plokštė ( <i>angl. Printed Circuit Board</i> ).
<b>PSR</b>	Įtampos svyravimo maitinimo linijoje slopinimas ( <i>angl. Power Supply Rejection</i> ).
<b>PSRR</b>	Įtampos svyravimo maitinimo linijoje slopinimo santykis ( <i>angl. Power Supply Rejection Ratio</i> ).
<b>RTL</b>	Abstraktus skaitmeninės sistemos modelis ( <i>angl. register-transfer level</i> ).
<b>SD</b>	Atminties kortelių tipas, kurios nepraranda duomenų išjungus maitinimą ( <i>angl. Secure Digital</i> ).
<b>SDIO</b>	Komunikacijai su atminties kortele naudojama sąsaja ( <i>angl. Secure Digital Input Output</i> ).
<b>SINAD</b>	Signalų triukšmo ir iškreipimų santykis ( <i>angl. Signal to noise and distorition ratio</i> ).
<b>SNR</b>	Signalų triukšmo santykis ( <i>angl. Signal to Noise Ratio</i> ).
<b>SPI</b>	Nuosekli duomenų perdavimo linija ( <i>angl. Serial Peripheral Interface</i> ).
<b>UHS-I</b>	SD atminties kortelių klasifikacija, kurių duomenų perdavimo greitis siekia iki 104 MB/s ( <i>angl. Ultra High Speed – I</i> ).



## IVADAS

Akustinė emisija (AE) yra pasyvus pokyčių medžiagose ar konstrukcijose aptikimo ir stebėjimo metodas. AE užfiksuojama vykstant įvairiems procesams – cheminėms reakcijoms, plastinei deformacijai, struktūrų įtrūkimams ir lūžiams, esant trinčiai, magnetinio lauko pokyčiui, judant žemynų plokštėms. Dėl šių priežasčių AE turi platų pritaikymą, kurį galima suskirstyti į dvi grupes: medžiagos savybių tyrimas ir AE įvykio bei jo vietos nustatymas. Pirmuoju atveju analizuojamas AE signalas, taip apskaičiuojant reikalingus parametrus, pagal kuriuos galima pasakyti, kokio tipo cheminė reakcija vyksta, ar kokia yra cheminė sudėtis tam tikros medžiagos (pavyzdžiui, kokio tipo stiklas, kadangi dūžtant stiklui AE signalas skirsis dėl skirtingo oksidų kiekio sudėtyje). Signalų klasifikavimui reikalinga duomenų bazė ir algoritmas parametrus apskaičiuoti. Antruoju atveju AE signalai naudojami tiesiog nustatyti ar vyksta akustinė emisija ir signalo atsklidimo vietą. Šis metodas dažnai taikomas objektų stebėsenai, norint užtikrinti saugumą (tiltai, naftos talpyklos) arba mechaniniam atsparumui tirti.

Darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti vieno jutiklio didelės skiriamosios gebos akustinės emisijos matavimo sistemą ir atlikti AE signalų tyrimą. Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

1. Suprojektuoti nedidelius triukšmus ir iškraipymus turintį stiprintuvą.
2. Panaudoti išorinį didelės spartos ir skiriamosios gebos ADC.
3. Realizuoti aktyvinį mažatriukšmį žemo dažnio antisanklodinį filtrą.
4. Realizuoti duomenų iš ADC surinkimą FPGA matricoje.
5. Realizuoti duomenų perdavimą iš FPGA matricos į mikrovaldiklį, kuris juos įrašytų į atminties kortelę.
6. Realizuoti failų sistemą mikrovaldiklyje, kad kompiuteris galėtų atpažinti SD kortelėje įrašytus failus.
7. Atlikti sistemos parametrų ir AE signalų matavimus.
8. Atlikti gautų AE signalų apdorojimą kompiuteryje.

## 1. APŽVALGINĖ DALIS

Akustinė emisija (AE) – tai deformuojamos medžiagos sukurtos garso ir ultragarso bangos. Šios bangos sukuriamos kai tam tikroje objekto dalyje išsiskiria energija. AE pavyzdžių galima išgirsti kiekvieną dieną – tai dūžtančio stiklo, lūžtančio ledo ar medžio garsai, kuriuos sukuria išoriniai stimulai, dažniausiai tai slėgio, temperatūros arba apkrovos pokyčiai. AE šaltiniai gali būti ir natūralūs, tokie kaip žemės drebėjimas, žemynų plokščių judėjimas. Su tinkamai sukalibruota matavimo įranga gali būti aptikti iki 10-12 piko metrų paviršiaus pokyčiai. AE paprastai aptinkama dažnių ruože nuo 1 kHz iki 1 MHz ir yra pritaikoma trijose pagrindinėse srityse [ 1, 4, 5, 7]:

- vietos aptikimui, kurioje įvyko energijos išsiskyrimas;
- tirti medžiagų ar struktūrų savybėms;
- saugumo užtikrinimui, stebint įvairias struktūras – tiltus, aukšto slėgio talpyklas, vamzdynus ir pan. [11]

Akustinės emisijos metodas turi tris privalumus, lyginant su kitais metodais. Pirmasis – nereikia perduoti energijos į tiriamą objektą atliekant testavimą. Antrasis – dinamika. Galima pastebėti tik tuos defektus kurie kinta. Galiausiai, panaudojus daug keitiklių galima tūrinė analizė.

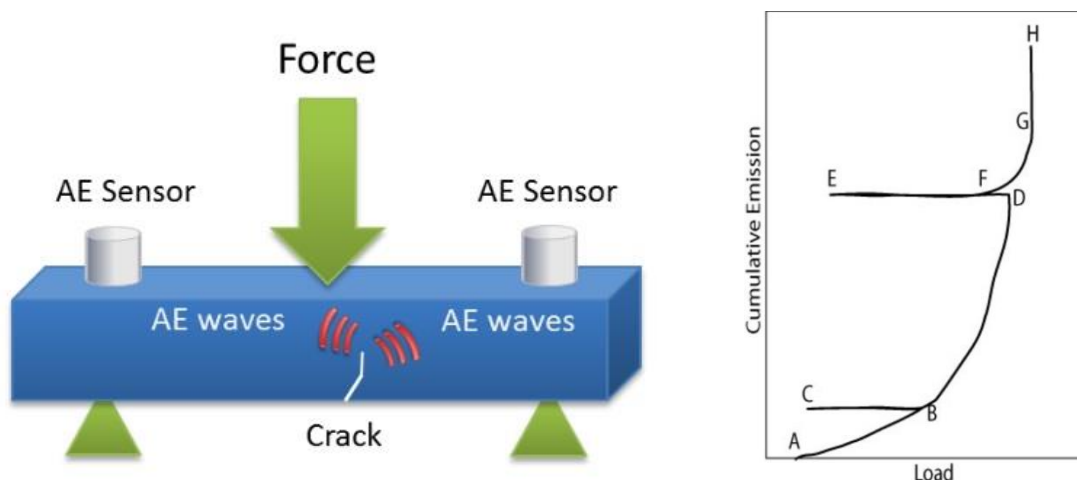
Tačiau šis metodas turi ir trūkumų, kadangi negalima pasakyti kiek yra pažeista struktūra. Norint pasakyti apie defekto dydį, tarkime, įtrūkimo plotį ilgį ir gylį, reikalingas kitas metodas (dažniausiai ultragarsinis skenavimas). Kitas trūkumas – patalpinus tokią sistemą triukšmingose aplinkose signalas bus užterštas aplinkos triukšmu.

Akustinės emisijos sistemas galima suskirstyti į du tipus – vieno jutiklio ir kelių jutiklių. Kai naudojamas vienas jutiklis, tokia sistema galima nustatyti ar vyksta akustinė emisija, o turint AE signalų duomenų bazę pasakyti, kokio tipo tai akustinė emisija, taip pat ir kokia medžiaga yra testuojama. Turint bent du ar daugiau keitiklių galima nustatyti ne tik AE tipą ir medžiagos savybes, tačiau ir kur įvyko akustinė emisija. Tokia sistema yra sudėtingesnė, kadangi būtinas jutiklių tarpusavio sinchronizavimas, taip pat AE bangų sklidimas priklauso nuo medžiagos savybių [2 p.5].

## 1.1. Akustinės emisijos šaltiniai

Akustinės emisijos šaltiniai – pokyčiai nagrinėjamame objekte dėl jį veikiančio išorinio stimulo. Pagrindiniai akustinės emisijos šaltiniai:

- įtrūkimai;
- trintis;
- plastinė deformacija;
- cheminės reakcijos;
- magnetinio lauko pokytis.



**1 pav.** Kairėje – AE dėl medžiagos įtrūkimo [1]; dešinėje – tipinė akustinės emisijos kreivė. Kaiserio efektas (BCB), Felicity efektas (DEF) [3]

Skirtingų AE šaltinių signalai skirsis. Taip pat signalų forma priklausys ir nuo medžiagos savybių. Pagrindinis skirtumas – tai energijos pasiskirstymas dažnių srityje. Dėl to yra naudojami skirtingi AE jutikliai (pritaikyti dirbti tam tikrame dažnių diapazone), pagal tai, kokio tipo AE yra tiriama.

Prie skirtingų apkrovų gauti signalai suteikia naudingos informacijos apie medžiagos struktūrą ir mechaninį atsparumą. Apkraunant objektą tam tikra jėga gauti akustinės emisijos signalai gali būti užfiksuoti tik vieną kartą, t.y. pašalinus apkrovą ir paskui ją vėl didinant nebus gauti jokie akustinės emisijos signalai iki kol nebus pasiekta buvusi didžiausia apkrovos jėga. Šis fenomenas žinomas kaip Kaiserio Efektas.

Kai objektas yra apkraunamas (1 pav. dešinėje) vyksta akustinė emisija (ruožas AB). Kai apkrova pašalinama ir vėl pridedama (kreivė BCB), akustinės emisijos įvykiai nevyksta, kol nepasiekiamas prieš tai buvusi didžiausia apkrova. Toliau didinant apkrovą vyksta akustinė emisija (BD), kol pasiekiamas taškas D. Tačiau F taške pridedama jėga yra pakankamai didelė ir sukelia akustinę emisiją, nors ir nebuvo viršyta D taške pridėta jėga. Šis fenomenas žinomas kaip Felicity Efektas. GH atkarpoje įvyksta dideli struktūriniai pakitimai [3].

## 1.2. Akustinės emisijos matavimo keitikliai

Akustinės emisijos keitikliai gali būti dviejų tipų – rezonansiniai (dirbantys siaurame dažnių ruože) ir plačiajuosčiai [43 p.11]. Pagal veikimo dažnį juos galima skirstyti į tris grupes:

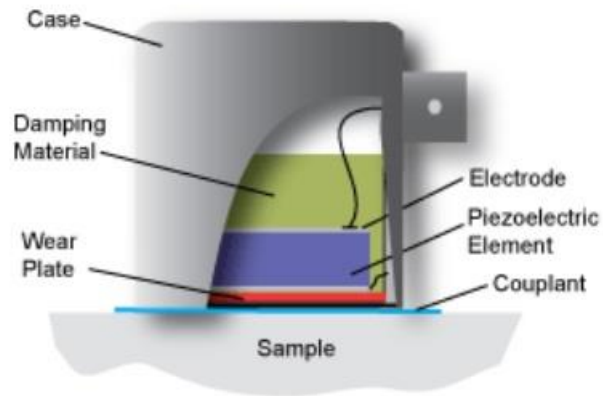
- žemo dažnio ( 20 kHz – 100 kHz);
- standartinio dažnio ( 100 kHz – 400 kHz);
- aukšto dažnio ( > 400 kHz).

1. lentelė. [2]

Panaudoji sritis	Darbinis dažnis		
	20-100 kHz	100-400 kHz	>400 kHz
Korozijos stebėjimas	X		
Nuotėkio aptikimas vandens ar naftos vamzdynuose	X		
Pašildymo sistemų trūkių detektavimas		X	
Aukšto slėgio indų testavimas		X	
Dalinio pratrūkimo aptikimas	X ( kai nedideli triukšmai)	X	
Metalinių struktūrų testavimas		X	
Daugiakomponenčių medžiagų testavimas		X	
Betoninių struktūrų testavimas	X		
Augalų ar medžio džiovinimo proceso stebėjimas		X	
Mažo bandinio akustinės emisijos testavimas, moksliniai tyrimai			X

Didžioji dalis stebimų procesų yra fiksuojami dažnių ruože 100 kHz – 400 kHz. Tačiau juosta yra parenkama pagal tiriamą objektą, t.y. kokio tipo AE yra stebima ir pagal tai, kokios yra medžiagos savybės, kuria sklinda akustinės emisijos bangos. Tai svarbu, kadangi medžiagos nehomogeniškai slopina tam tikrus dažnius.

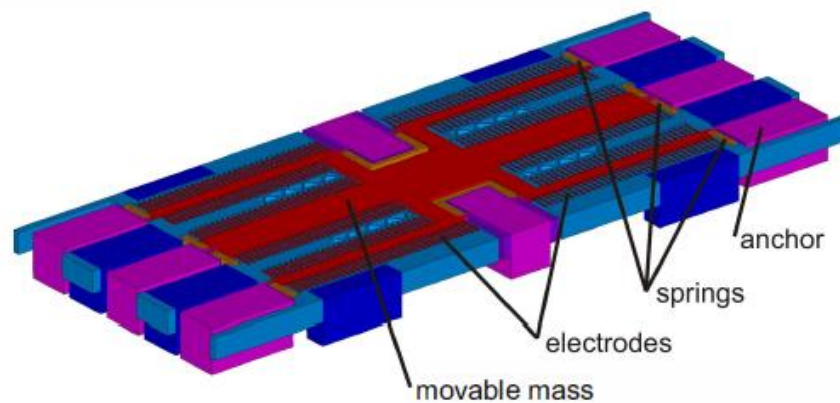
Akustinės emisijos keitikliai dažniausiai yra pjezoelektriniai. Tokio keitiklio struktūra pavaizduota 2 pav.



**2 pav.** Pjezoelektrinis akustinės emisijos keitiklis [3]

Akustinė banga per apsauginę plokštelę patenka į pjezoelektrinį elementą, kuris mechaninę energiją pakeičia į elektrinę. Tačiau dalis energijos sukuria akustines bangas keitiklio viduje, kurios atsispindėjusios nuo korpuso gali vėl sujudinti pjezoelektrinį elementą. Todėl dalis keitiklio yra užpildoma šias bangas sugeriančia medžiaga, kuri kartu ir pritvirtina pjezoelektrinę plokštelę. Mažesnio diametro keitikliai skirti dirbti prie aukštesnio dažnio, tuo tarpu didesnio diametro – dirbti prie žemesnių dažnių.

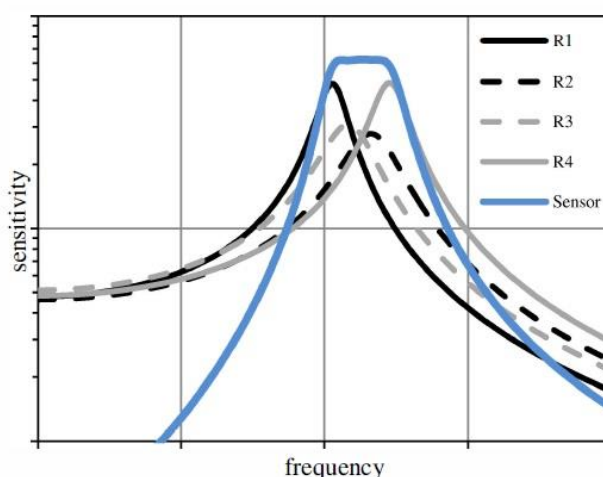
Akustiniai emisijai aptikti taip pat gali būti panaudoti ir MEMS (*angl. Microelectromechanical systems*) tipo jutikliai. Tokio jutiklio struktūra pateikta 4 pav.



**3 pav.** MEMS tipo akustinės emisijos jutiklis [7]

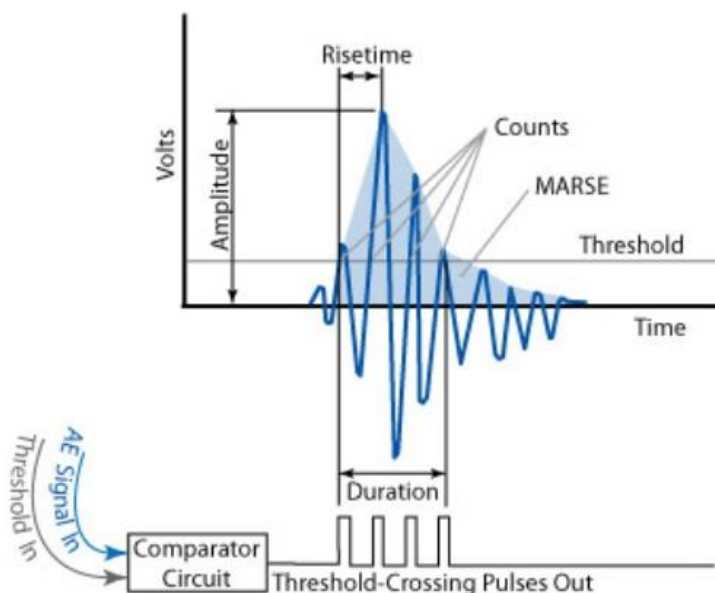
Prie pakabos pritvirtinamas žinomos masės elektrodas. Kai judės visas jutiklis, dėl inercijos šis laisvai įtvirtintas elektrodas turės tam tikrą vėlinimą. Kitas elektrodas yra pritvirtintas tiesiai prie korpuso ir tarp jų susidaro kondensatorius. Kai bus judinamas jutiklis (sklandant AE bangai vyks svyravimai objekto paviršiuje) keisis šio kondensatoriaus talpa, kuri ir bus proporcinga tam judėjimui.

Akivaizdu, jog keičiant šio elektrodo masę keisis ir jutiklio rezonansinis dažnis (kontūro kokybė  $Q$  svyruoja ties 5-10). Kadangi norima, jog dažninė charakteristika būtų tiesiška, panaudojami keli skirtingos masės elektrodai (sujungiami keli jutikliai) su parinktais rezonansiniais dažniais ir kontūro kokybės vertėmis. Tokiu būdu galima suformuoti norimą dažnių juostą, kuri iš karto būtų filtras, t.y. slopintų žemiausius ir aukščiausius dažnius, paliekant tik norimą dažnių sritį (tarkime 100-300 kHz).



4 pav. Iš keturių jutiklių sudarytos MEMS sistemos veikimo principas [7]

### 1.3. Signalų parametrai ir skaitmeninis apdorojimas



5 pav. Akustinės emisijos signalas laiko srityje [10]

Pagrindiniai signalo parametrai [9,10]:

- Amplitudė,  $A$  – didžiausia išmatuota signalo įtampa, išreikšta decibelais (dB). Dažniausiai perskaičiuojama į decibelus  $1 \mu V$  atžvilgiu.

- Kilimo laikas,  $R$  – tai laiko intervalas tarp pirmojo impulso, viršijusio atraminę įtampą, ir signalo piko. Šis parametras susijęs su bangos sklidimu tarp akustinės emisijos šaltinio ir keitiklio.
- Trukmė,  $D$  – tai laiko intervalas tarp pirmojo ir paskutinio perėjimo per slenkstinę įtampą. Ši trukmė gali būti panaudota identifikuoti skirtingiems akustinės emisijos šaltiniams ir filtro išėjimo triukšmams.
- Energija,  $E$  – impulso energija, tai plotas tarp pirmojo perėjimo per slenkstinę įtampą iki paskutinio.
- Skaičius,  $N$  – tai impulsų, viršijusių slenkstinę įtampą skaičius. Šis skaičius priklauso nuo akustinės emisijos pobūdžio ir medžiagos savybių, kuria sklinda akustinė banga. Šis parametras turi būti susietas su amplitude  $A$  ir impulso trukme  $D$ .

AE signalai dažniausiai būna užteršti triukšmu ir tipinis signalo triukšmo santykis SNR (*angl. Signal to Noise Ratio*) yra apie 50 dB. Pats paprasčiausias metodas triukšmams sumažinti yra panaudoti juostos apribojimą. Tačiau tai tik iš dalies išsprendžia problemą, kadangi sumažinus juostą 4 kartus, SNR pagerės tik apie 6 dB. Be to juostos apribojimas yra ribotas (priklauso nuo AE signalų). Galimi alternatyvūs filtravimo variantai yra triukšmų nustūmimas spektre arba LMS (*angl. Last Mean Square*), mažiausių vidutinių kvadratų adaptyvusis filtras [8]. Tokio filtro veikimas yra sudarytas iš trijų etapų:

(1) Trikdžio signalo įvertis (trikdžio signalo vektoriaus ir filtro koeficientų vektoriaus sandauga)

$$y(k) = \sum_{i=0}^{M-1} W_i(k) \cdot X(k-i) \quad (1.1)$$

(2) Paklaidos įvertinimas (trikdžiu užteršto signalo ir trikdžio signalo įverčio skirtumas)

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (1.2)$$

(3) Filtro koeficientų adaptavimas (atnaujinamas filtro koeficientų vektorius. Su šiais koeficientais bus filtruojama kitoje iteracijoje).

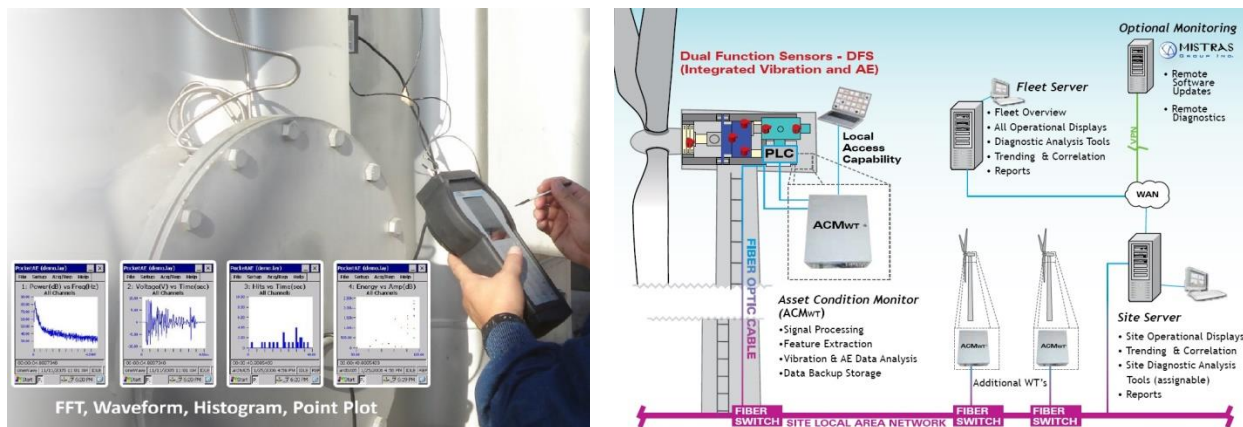
$$W_i(k+1) = W_i + 2 \cdot \mu \cdot e(k) \cdot X(k-i) \quad (1.3)$$

Čia  $y(k)$  –  $k$ -toji nufiltruoto trikdžio signalo atskaita;  $W_i$  – filtro koeficientų vektorius (didžiosiomis raidėmis žymimi vektoriai);  $X$  – sukauptų trikdžio signalo atskaitų vektorius;  $e(k)$  – jutiklio signalo įvertis;  $d$  – signalas iš jutiklio,  $\mu$  – adaptacijos žingsnis/greitis,  $M$  – filtro eilė (ne vektorius, dažniausiai naudojamas FIR filtras (*angl. Finite Impulse Reaction filter*)).

Aptartam filtrui reikalingas triukšmo signalas, kurį galima gauti panaudojant Wavelet transformaciją. [9]

## 1.4. AE sistemos

Akustinės emisijos sistemos galima skirstyti į du tipus – tai stacionarios arba nešiojamos sistemos. Nešiojamos sistemos būna vieno arba dviejų kanalų, tuo tarpu stacionarios gali turėti ir šimtus kanalų. Taip pat gamintojai siūlo sistemas, pritaikytas konkrečiam AE emisijos matavimui, tarkime, vėjo jėgainių ar slėgio talpyklų stebėjimui [51].



6 pav. Kairėje – nešiojama AE sistema; dešinėje – stacionari AE sistema skirta vėjo jėgainėms [13,15]

Daug kanalų turinčios sistemos dažniausiai būna modulinės konstrukcijos – naudojama grupė tokių pačių imtuvo plokščių jas montuojant į vieną korpusą. Kadangi vėliau iš visų kanalų gauta informacija dažniausiai turi būti apdorota bendrai (koreliacijos skaičiavimas vietos nustatymui), šios plokštės jungiamos prie kompiuterio, kuriame vyksta duomenų apdorojimas. Nešiojamos sistemos iš karto atlieka duomenų apdorojimą. AE sistemų tipiniai parametrai:

- pradinio stiprintuvo stiprinimas 0 – 60 dB;
- dažnių juosta 1 kHz – 1 MHz;
- ADC skiriamoji geba 16 – 18 bitų;
- diskretizavimo dažnis iki 10 – 20 MSps;
- skaitmeninis duomenų apdorojimas.



## 2. METODINĖ DALIS

Metodinėje dalyje projektuojama akustinės emisijos matavimų sistema, kurią sudaro imtuvas, programuojama loginė matrica, mikrovaldiklis ir laikmena duomenims išsaugoti. Taip pat aptariami skirtingi akustinės emisijos matavimo metodai bei modeliuojamos modos baigtinių elementų metodai.

Projektuojama sistema yra vieno kanalo (galima prijungti tik vieną jutiklį). Imtuve naudojami du atskiri stiprintuvai, kurių maksimalus stiprinimas yra 60 dB ir 46 dB. Stiprintuvai perjungiami rele, o jų išėjimuose suprojektuoti įtampos dalikliai, valdomi relėmis. Taigi galimas signalo stiprinimas yra 40 ir 46 dB arba 54 ir 60 dB. Sustiprintas signalas perduodamas į 7 eilės žemo dažnio filtrą, kurio išėjime esantis buferis pakeičia signalą iš nesimetrinio į simetrinį ir perduoda jį į ADC. Duomenys iš ADC siunčiami žemos įtampos diferencialine linija LVDS (*angl. Low Voltage Differential Signaling*) į FPGA matricą, kuri sujungta su mikrovaldikliu. Mikrovaldiklis įrašo duomenis į SD (*angl. Secure Digital*) atminties kortelę, naudodamas failų sistemą FAT (*angl. File Allocation Table*), kad sukurtus failus kortelėje galėtų atpažinti kompiuteris.

### 2.1. Matavimo mazgų kūrimas

Matavimo mazgų laikoma sistema, kurią sudaro šios dalys:

- akustinės emisijos jutiklis/keitiklis;
- imtuvas (stiprintuvas ir filtras);
- keitiklis analoginio signalo skaitmeniniu;
- loginė matrica ar mikrovaldiklis;
- maitinimo šaltinis.

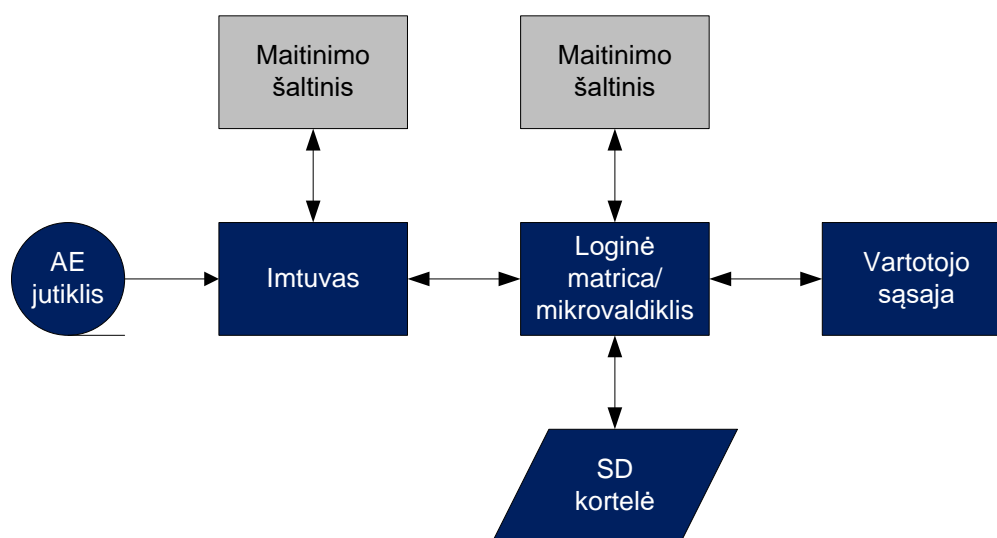
Akustinės emisijos jutiklis/keitiklis gali turėti ~40dB integruotą stiprintuvą, tačiau didžioji dalis jutiklių stiprintuvo neturi. Jutiklių išėjimo talpa svyruoja nuo 30pF iki 1nF, dažnių juosta paprastai iki 1 MHz [2].

Imtuvas skirtas signalo filtravimui bei stiprinimui. Aukštų dažnių filtras skirtas sumažinti triukšmų daromą įtaką, kadangi įvairūs pašaliniai garsai sukelia virpesius objekte, kurie bus priimti AE jutikliu. Filtro riba turi būti parinkta pagal jutiklio charakteristiką ir stebimą AE procesą. Žemų dažnių filtras parenkamas taip pat pagal jutiklio dažnių juostą, ADC dinaminį diapazoną bei diskretizavimo dažnį. Reikalingas stiprintuvo stiprinimas yra apie 40-60 dB.

ADC diskretizavimo sparta teoriškai turi būti daugiau nei 2 milijonai išrankų per sekundę (daugiau nei 2 kartus didesnis už maksimalų signalo dažnį kuris yra 1 MHz). ADC skiriamoji geba apskaičiuojama pagal imtuvo triukšmus bei iškraipymus.

Loginė matrica ar mikrovaldiklis turi turėti sąsajas ADC ir kitos išorinės periferijos prijungimui, atlikti duomenų apdorojimą ir įrašyti duomenis į atmintį. Kaip atminties laikmeną pasirinkta naudoti SD atminties kortelę.

Maitinimo šaltinis turi užtikrinti ne tik reikalingas maitinimo įtampas. Jo kuriami triukšmai neturi daryti įtakos prijungtų grandynų veikimui. Taip pat analoginei ir skaitmeninei daliai turėtų būti naudojami atskiri maitinimo šaltiniai.



7 pav. Sistemos struktūrinė schema

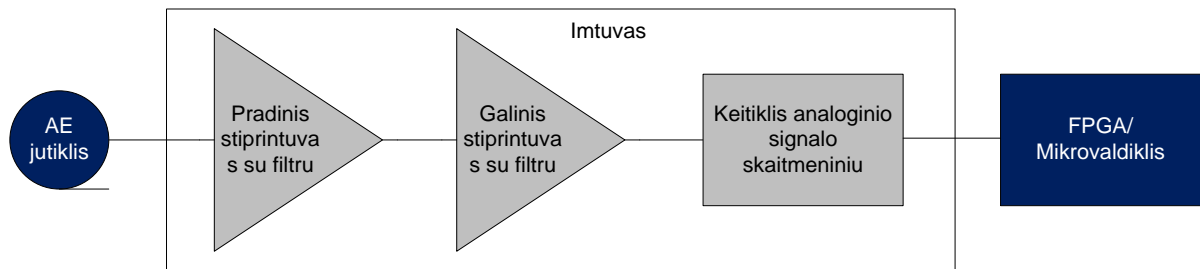
### 2.1.1. Imtuvas

Imtuvui keliami reikalavimai:

- nedideli triukšmai ir iškraipymai;
- stabilumas;
- dažnių juosta iki 1 MHz;
- juostinis filtras, kurio praleidžiamų dažnių juosta nuo 10 kHz iki 1 MHz;
- keičiamas stiprinimas nuo 40 dB iki 60 dB.

#### 2.1.1.1. Galimos stiprintuvų realizacijos

Dažniausiai naudojama akustinės emisijos imtuvo schema pavaizduota 8 paveikslėlyje. Imtuvą sudaro stiprintuvai kartu su filtrais, kadangi stiprintuvai turi apribotą dažnių juostą dėl parazitinių talpumų. Taip pat nesunku gauti filtrą stiprintuve panaudojant C ir/arba L elementus grįžtamo ryšio grandinėse. Tai leidžia šiek tiek supaprastinti ir atpiginti imtuvą. Dažniausiai tarp galinio stiprintuvo ir ADC naudojamas papildomas aktyvinis filtras.



**8 pav.** Standartinė akustinės emisijos analoginio signalo apdorojimo schema

Imtuvo stiprintuvai gali būti realizuojami trimis būdais:

- naudojant diskretinius elementus (įvairių tipų tranzistoriai);
- naudojant integruotus grandynus IC (*angl. integrated circuit*);
- naudojant diskretinius elementus ir integruotus grandynus.

Naudojant diskretinius elementus stiprintuvo schema bus sudėtingesnė. Jei naudojami lauko tranzistoriai, juos dažniausiai tenka atrinkti. Tačiau galima pagaminti stiprintuvą, kurio triukšmai būtų mažesni nei naudojant IC. Taip pat tarp kelių pakopų galima realizuoti filtrus. Naudojant IC (dažniausiai operacinius stiprintuvus) užtikrinamas parametų atsikartojamumas, stabilumas, gaunama paprastesnė schema. Naudojant diskretinius elementus pradiniam stiprintuvui (pirmos pakopos triukšmai daro didžiausią įtaką, kadangi kitos pakopos stiprins pirmos pakopos triukšmus) ir operacinius stiprintuvus tolimesnėse pakopose galima pasiekti optimalų variantą.

### 2.1.1.2. Triukšmų skaičiavimas

Kadangi projektuojamas mažatriukšmis stiprintuvas svarbu žinoti triukšmų šaltinius ir, naudojantis formulėmis, apskaičiuoti triukšmų įtampą stiprintuvo išėjime. Atsižvelgiant į tai galima parinkti tinkamus komponentus ir optimalų darbo tašką bei apskaičiuoti reikalingą ADC skiriamąją gebą. Triukšmai skirstomi į tris tipus: šiluminiai, įtampos ir srovės [48,49].

- Šiluminis (Johnson–Nyquist ) triukšmas:

$$V_{nt} = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot \Delta f \cdot R} \quad (2.1)$$

čia:

$k_B$  – Boltmano konstanta;  $T$  – absoliutinė temperatūra, K;  $\Delta f$  – dažnių juosta, Hz;  
 $R$  – apkrovos varža,  $\Omega$

- Įtampos triukšmai:

$$V_{ni} = e_n \cdot \sqrt{\Delta f} \quad (2.2)$$

čia:

$e_n$  – triukšmų įtampa, V;  $\Delta f$  – dažnių juosta, Hz.

- Srovės triukšmai:

$$V_{ns} = i_n \cdot R \cdot \sqrt{\Delta f} \quad (2.3)$$

čia:

$i_n$  – triukšmų srovė, A;  $\Delta f$  – dažnių juosta, Hz; R – apkrovos varža,  $\Omega$ .

- Suminiai triukšmai:

$$V_n = \sqrt{V_{nt}^2 + V_{ni}^2 + V_{ns}^2} \quad (2.4)$$

čia:

$V_{nt}$  – šiluminiai triukšmai, V;  $V_{ni}$  – įtampos triukšmai, V;  $V_{ns}$  – srovės triukšmai, V.

Įtampos ir srovės triukšmai yra nurodomi diskretinių ar integruotų grandynų aprašymuose. Jei stiprintuvai sujungti kaskadiškai, triukšmai gali būti apskaičiuoti naudojantis 2.5 formule:

$$En = \sqrt{(En_{in1} * gain_1)^2 + (En_{in2})^2} \quad (2.5)$$

čia:

$En$  – triukšmų įtampa antro stiprintuvo įėjime, V;

$En_{in1}$  – triukšmų įtampa pirmo stiprintuvo įėjime, V;

$gain_1$  – pirmo stiprintuvo stiprinimas, kartais;

$En_{in2}$  – antro stiprintuvo įėjimo triukšmai, kai jo įėjimo varža lygi pirmojo stiprintuvo išėjimo impedansui, V.

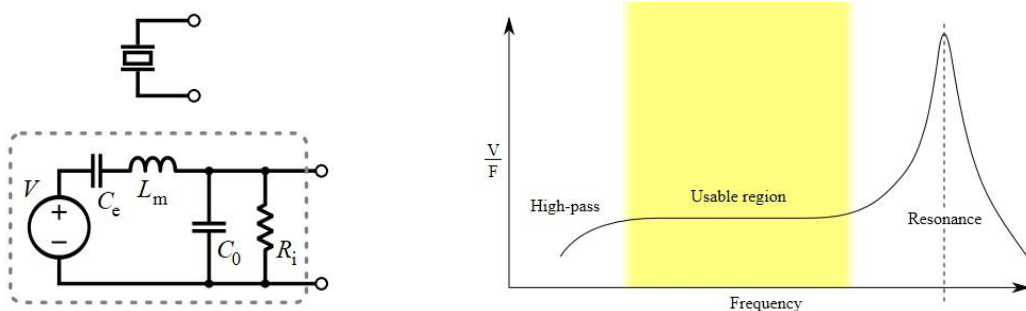
### 2.1.1.3. Operacinių stiprintuvų ir lauko tranzistorių parinkimas

Operaciniai stiprintuvai parenkami pagal mažiausius įtampos ir srovės triukšmus, dažnių juostą bei maksimalų stiprinimą esant 1 MHz juostai. Dažnių juosta bei maksimalus stiprinimas esant 1 MHz svarbu, kadangi nuo to iš dalies priklauso kokie bus signalo iškraipymai. Jei stiprintuvas bus mažatriukšmis, bet turės didelius iškraipymus, šie iškraipymai sumažins SINAD (*angl. Signal to noise and distortion ratio*).

2. lentelė. Mažatriukšmių operacinių stiprintuvų palyginimas [19,20,22,23,24,25,26,29,30]

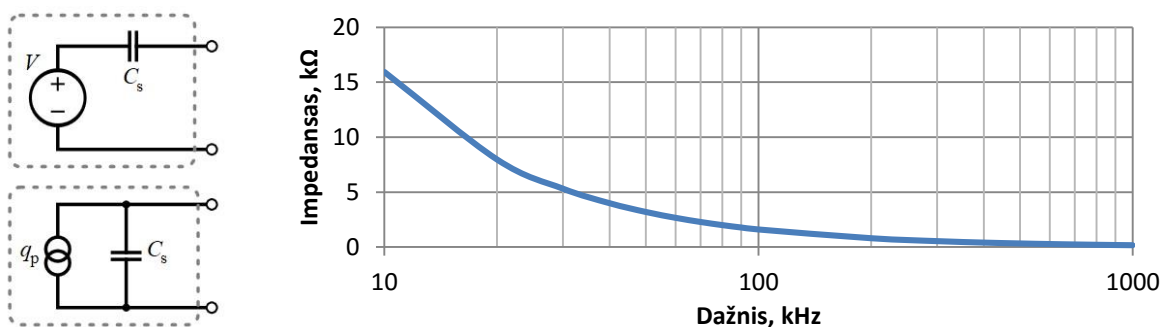
Modelis	Juosta, MHz	Triukšmų įtampa, $nV\sqrt{Hz}$	Triukšmų srovė, $pA\sqrt{Hz}$	Maksimalus stiprinimas esant 1MHz juostai, dB
LT1028	50	0,85	1	40
LT1115	40	0,9	1,2	30
AD8432	200	0,8	2	24
AD797	110	0,9	2	40
LMH6624	90	1	1,8	60
LMH6629	380	0,7	2,6	65
OPA1612	80	1,1	1,7	40
ADA4899	600	1	2,6	50
AD8099	3800	0,95	2,6	70

Žinant įtampos ir srovės triukšmus galima apskaičiuoti, kokia bus triukšmų įtampa operacinio stiprintuvo išėjime. Skaičiavimams atlikti taip pat reikia žinoti: dažnių juostą, temperatūrą ir įėjimo varžą. Dažnių juosta parenkama 1 MHz, temperatūra 300 K (27 °C). Įėjimo varža priklauso nuo naudojamo pjezoelektrinio jutiklio.



9 pav. Kairėje – pjezoelektrinio jutiklio ekvivalentinė elektrinė schema; dešinėje – pridėtos jėgos į elektrinį signalą pakeitimo priklausomybė nuo dažnio [50]

Pjezoelektrinis jutiklis prie tam tikro dažnio turi rezonansą, dėl kurio jo ekvivalentinė schema yra sudėtinga. Tačiau jutiklis turėtų būti naudojamas tik tiesinėje charakteristikos dalyje, kurioje principinė schema supaprastėja (10 pav.).



10 pav. Kairėje – AE jutiklio supaprastinta ekvivalentinė schema tiesinėje dažninės charakteristikos dalyje [50]; dešinėje – išėjimo impedansas šioje dalyje ( $C = 1 \text{ nF}$ )

Taigi jutiklio išėjimo impedansas iš esmės yra talpinio pobūdžio (apskaičiuotas pagal 2.6 formulę). Įėjimo varža vienu atveju parenkama 100 Ω, kitu 10 kΩ ir apskaičiuojama triukšmų įtampa operacinių stiprintuvų išėjimuose esant šioms ribinėms vertėms.

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2.6)$$

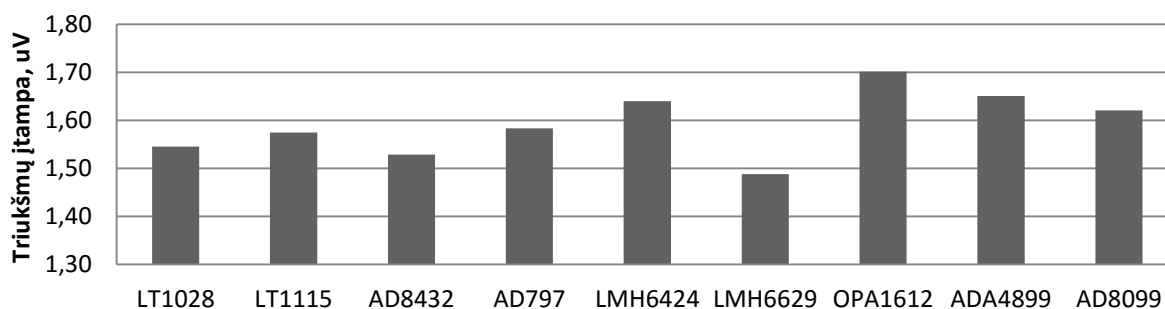
čia:

$X_C$  – kondensatoriaus impedansas, Ω prie dažnio  $f$ , Hz;  $C$  – kondensatoriaus talpa.

**3. lentelė.** Apskaičiuota triukšmų įtampa esant 1 MHz dažnių juostai, 300 K temperatūrai ir 100 Ω įėjimo impedansui.

Modelis	Šiluminiai triukšmai esant 100 Ω, μV	Įtampos triukšmai, μV	Srovės triukšmai, μV	Suminiai triukšmai, μV
LT1028	1,29	0,85	0,1	1,55
LT1115	1,29	0,9	0,12	1,57
AD8432	1,29	0,8	0,2	1,53
AD797	1,29	0,9	0,2	1,58
LMH6424	1,29	1	0,18	1,64
LMH6629	1,29	0,7	0,26	1,50
OPA1612	1,29	1,1	0,17	1,70
ADA4899	1,29	1	0,26	1,65
AD8099	1,29	0,95	0,26	1,62

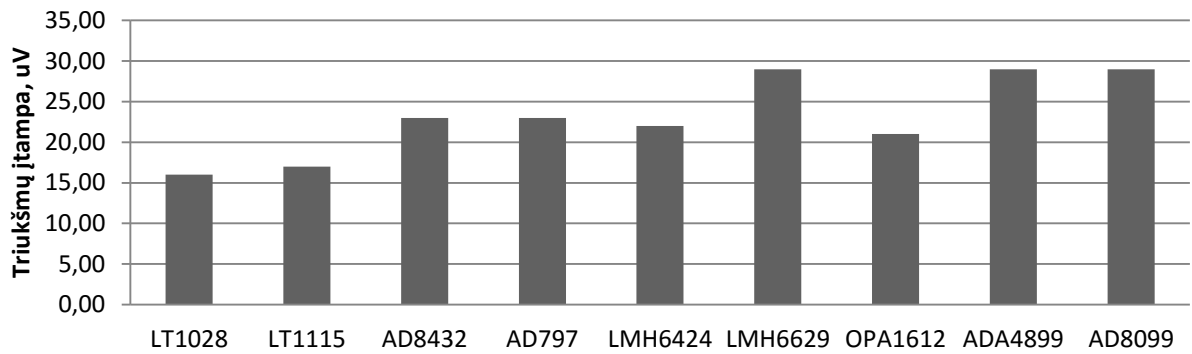
**Įėjimo impedansas 100 Ω**



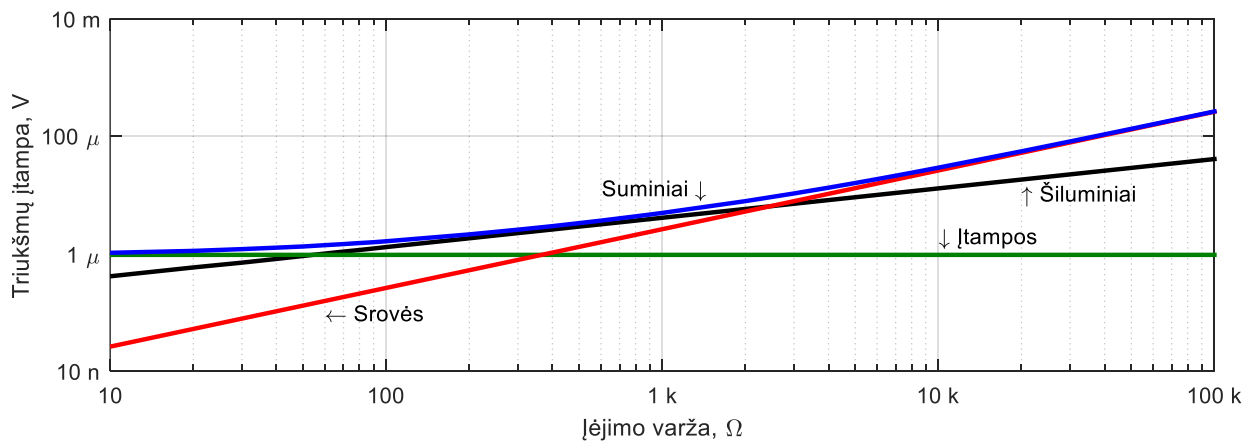
**4. lentelė.** Apskaičiuota triukšmų įtampa esant 1 MHz dažnių juostai, 300 K temperatūrai ir 10 kΩ įėjimo impedansui.

Modelis	Šiluminiai triukšmai esant 10 kΩ, μV	Įtampos triukšmai, μV	Srovės triukšmai, μV	Suminiai, μV
LT1028	12,87	0,85	10	16,32
LT1115	12,87	0,9	12	17,62
AD8432	12,87	0,8	20	23,80
AD797	12,87	0,9	20	23,80
LMH6424	12,87	1	18	22,15
LMH6629	12,87	0,7	26	32,65
OPA1612	12,87	1,1	17	21,35
ADA4899	12,87	1	26	29,03
AD8099	12,87	0,95	26	29,03

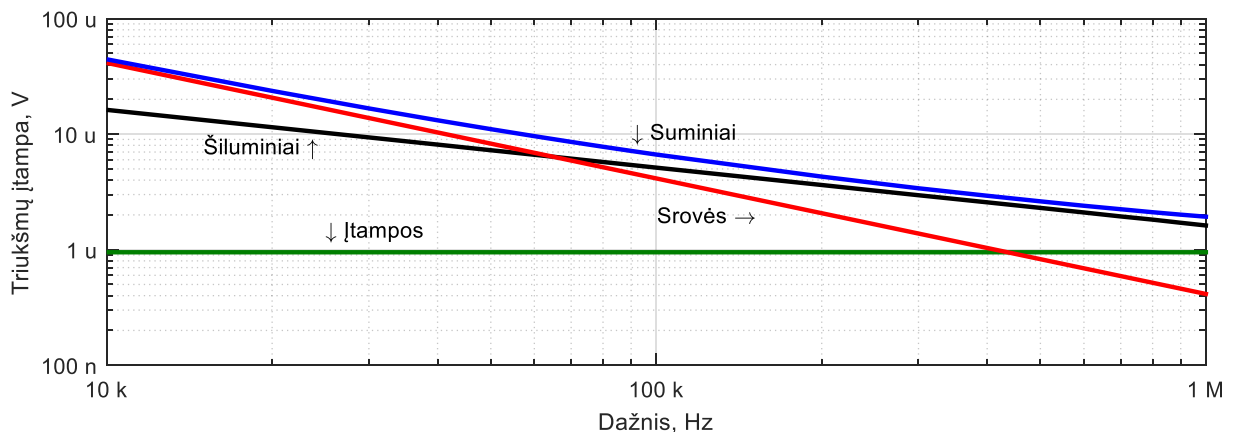
## Įėjimo impedansas 10 kΩ



Kai įėjimo impedansas yra 100 Ω, dominuoja operacinių stiprintuvų įtampos triukšmai. Esant 10 kΩ įėjimo impedansui – srovės triukšmai (4 lentelė). Nedideliais srovės triukšmais pasižymi BiFET operaciniai stiprintuvai AD745 (6,9  $fA\sqrt{Hz}$  srovės triukšmai, 2,9  $nV\sqrt{Hz}$  įtampos triukšmai [27]), kurio triukšmai prie 10 kΩ įėjimo impedanso būtų 20% mažesni nei LT1028, tačiau 200% didesni prie 100 Ω įėjimo impedanso, todėl toks sprendimas neturi prasmės.

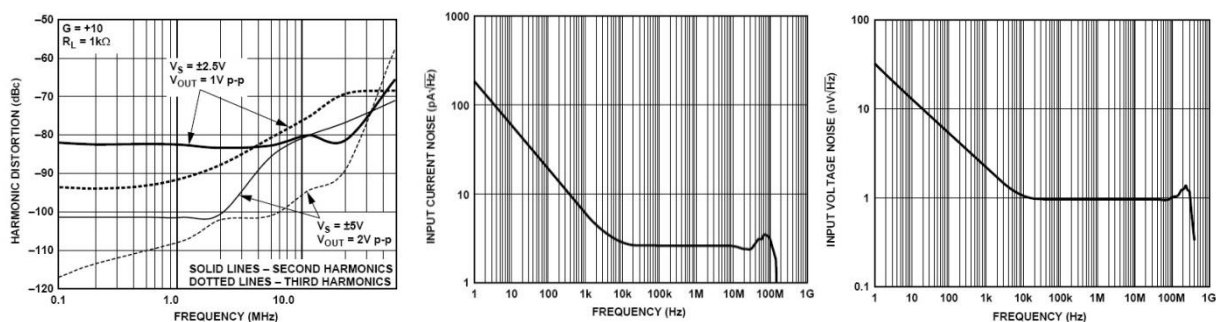


**11 pav.** AD8099 operacinio stiprintuvo triukšmų priklausomybė esant skirtingiems įėjimo impedansams



**12 pav.** AD8099 operacinio stiprintuvo triukšmų priklausomybė esant skirtingiems dažniams, kai prijungtas AE jutiklis, kurio impedansas pateiktas 10 pav.

Bendras triukšmų pobūdis išliktų nepakitęs naudojant kitą operacinį stiprintuvą. Šiluminiai triukšmai būtų identiški, skirtusi tik srovės ir įtampos triukšmai. Pagal pateiktus grafikus galima matyti, jog jutiklio impedansas turėtų būti kuo mažesnis. Pasirinkta naudoti AD8099 operacinį stiprintuvą, kuris pasižymi nedideliais iškraipymais, o jo triukšmų įtampa panaši kaip ir kitų operacinių stiprintuvų. Esant 10 kartų stiprinimui bei  $\pm 5V$  maitinimui, iškraipymai 1 MHz juostoje yra mažesni nei  $-100$  dB. Triukšmų spektre matyti (13 pav.), jog triukšmai mažiausi nuo 10 kHz, kur prasideda darbinis jutiklio dažnių ruožas.



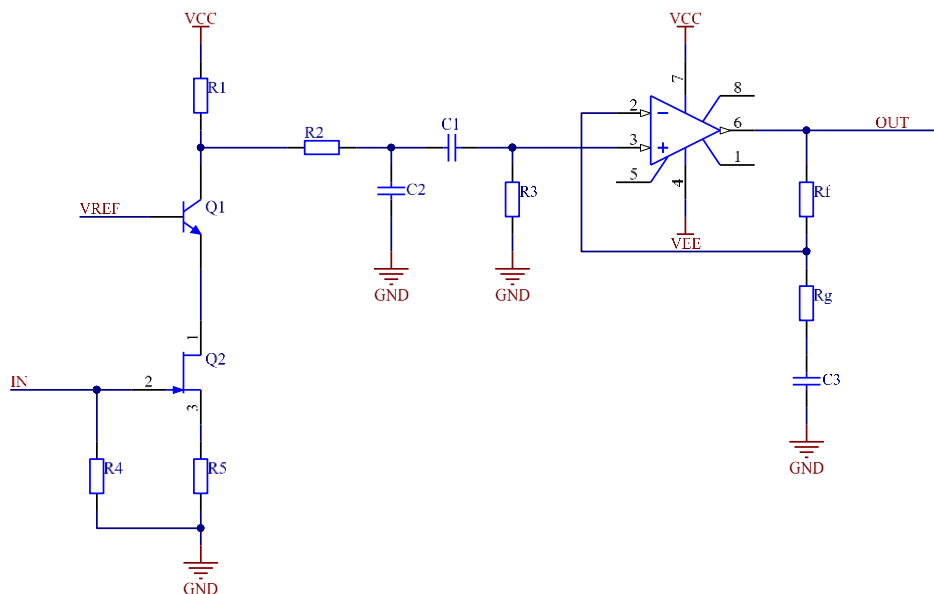
**13 pav.** AD8099 operacinio stiprintuvo iškraipymų, srovės bei įtampos triukšmų priklausomybė nuo dažnio [30]

Lauko tranzistoriai bus naudojami pirmoje pakopoje, kadangi jų triukšmai esant dideliam įėjimo impedansui yra mažiausi (1 k $\Omega$  ir daugiau). Taip yra todėl, jog triukšmų srovė mažesnė lyginant su bipoliariniais tranzistoriais. Mažiausiais triukšmais pasižymi BF862 ir 2SK170 lauko tranzistoriai. Pasirinkau naudoti 2SK170, kadangi jau anksčiau buvau projektavęs stiprintuvą su šiais tranzistoriais.

#### 2.1.1.4. Stiprintuvo principinės schemos sudarymas ir skaičiavimai

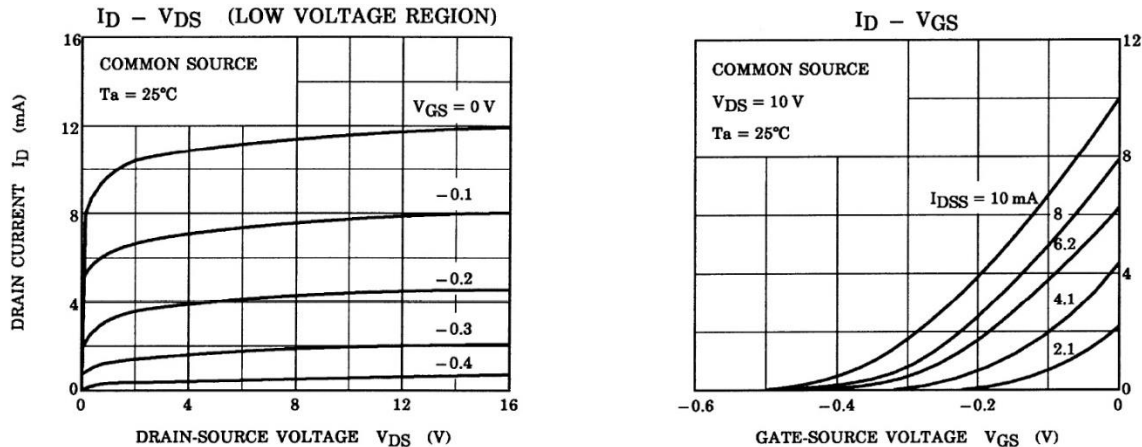
Imtuvo pradinį stiprintuvą sudaro pradinė pakopa, kurioje naudojami 4 lygiagrečiai sujungti lauko tranzistoriai bendros ištakos (*angl. common source*) scheme. Jungimas lygiagrečiai užtikrina didesnę rambybės srovę, dėl to sumažėja iškraipymai. Tačiau pagrindinė priežastis – kiekviename tranzistoriuje esantys triukšmai yra atsitiktinio pobūdžio, tarpusavyje nekoreliuoja. Dėl to triukšmai sumažėja 2 kartus arba 6 dB. Norint sumažinti Milerio parazitinių talpumą (talpumas tarp įėjimo ir išėjimo), šiems keturiems tranzistoriams kaskadiškai prijungiamas bipoliarinis tranzistorius. Tai atitinka dviejų talpumų jungimą nuosekliai. Milerio talpumo sumažinimas leidžia praplėsti dažnių juostą, dėl to taip pat sumažėja iškraipymai. Pirmą stiprintuvo pakopą yra modifikuota Wayne Colburn korekcinio stiprintuvo „The Pearl II Phono Stage“ schema [35]. Antrą pakopą sudaro operacinis stiprintuvas AD8099, o tarp pakopų naudojamas juostinis filtras. Imtuvo supaprastinta schema pateikta 14 pav.





**14 pav.** Stiprintuvo iš diskretinių elementų supaprastinta schema

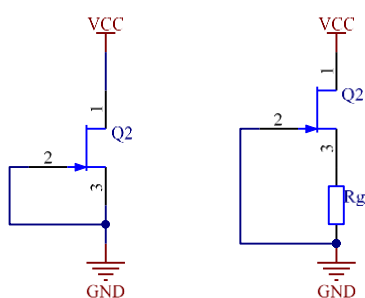
Q1 kaskadiškai sujungtas su Q2. Lauko tranzistoriui tenkanti įtampa bus VREF įtampa, atimta iš įtampos, krentančios tarp Q1 bazės ir emiterio (apie 0,65V). Ramybės srovė, tekanti per lauko tranzistorių priklausys nuo R5 sukuriamo neigiamo priešįtampio. Reikalingą priešįtampio vertę, kuriai esant tranzistoriumi tekėtų tam tikra srovė, galima rasti naudojantis 2SK170 dokumentacija.



**15 pav.** Kairėje – tekančios srovės per 2SK170 priklausomybė esant skirtingoms maitinimo įtampoms ir priešįtampiui tarp užtūros ir ištakos; dešinėje – esant skirtingoms tranzistorių srovėms kai jie pilnai pradaryti [31]

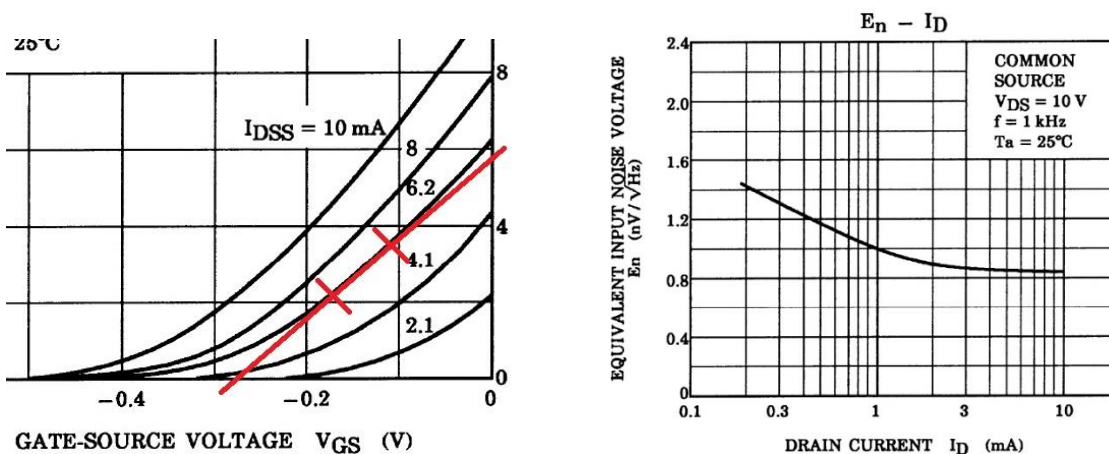
Iš grafiko kairėje matyti, kokio priešįtampio reikia norint, jog per tranzistorių tekėtų tam tikra ramybės srovė. Jei norima, jog tekėtų 4 mA srovė, reikės apie -0,2V priešįtampio (kai maitinimas apie 5V). Tuomet reikalingas rezistorius  $R=U/I=0,2/0,004=50\Omega$ . Tačiau viskas nėra taip paprasta. Dešinėje pateiktame grafike galima matyti, jog tranzistoriai turi skirtingas sroves esant tai pačiai maitinimo įtampai ir priešįtampio vertėms. Gamintojas klasifikuoja tranzistorius pagal santakos srovę, kai maitinimo įtampa 10V ir priešįtampio vertė 0V. Darbo metu bus

naudojami GR klasifikacijos tranzistoriai, kurių srovės išsibarsčiusios nuo 2,6 mA iki 6,5 mA. Todėl prieš skaičiuojant rezistoriaus vertę reikia žinoti konkrečią srovės vertę. Nuo srovės per tranzistorių priklauso ir triukšmų įtampa (16 pav. dešinėje). Didesnė srovė lemia mažesnius įtampos triukšmus. Todėl antrenkami turintys didžiausią santakos srovę. Kadangi tranzistoriai bus jungiami lygiagrečiai svarbu, kad jų srovės būtų kuo panašesnės, kadangi darbo taškas turi būti optimalus visiems tranzistoriams.



Tranzistoriai gali būti parinkti naudojant vieną iš šių schemų. Kai tranzistorius jungiamas be rezistoriaus, jungiamas ampermetras tarp maitinimo šaltinio ir santakos, ir matuojama srovė. Antruoju parenkamas rezistorius, kuriam esant tranzistorius turėtų veikti norimame darbo taške ir matuojama įtampa, krentanti ant jo ( $R_g$ ). Parinkti tranzistoriai turintys santakos srovę 6,5 mA.

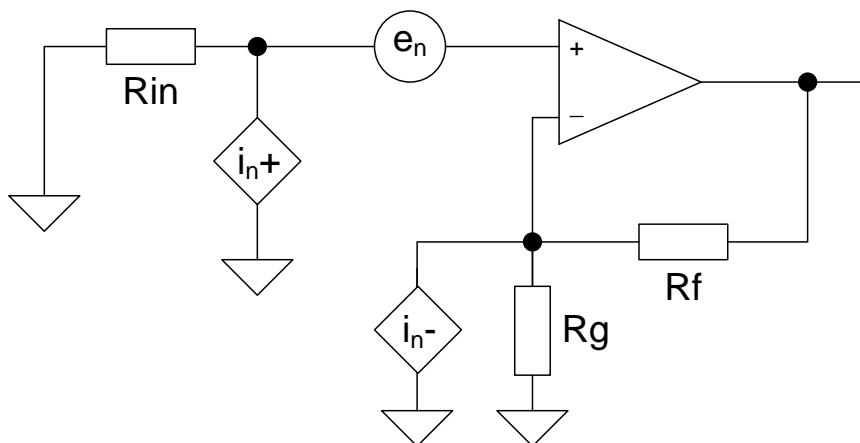
Tranzistorių darbo taškas parenkamas vietoje, kurioje charakteristika tiesiškiausia, 3 mA (tai lems mažiausius iškreipimus). Tuomet priešįtamposi vertė turėtų būti apie -0,15V. Gauname  $R_5 = 0,15 / 0,003 = 50 \Omega$ .  $R_4$  turėtų būti lygi signalo šaltinio išėjimo impedansui. Rezistorius  $R_1$  lemia stiprinimą. Tačiau viskas kiek komplikauta. Tarkime, per lauko tranzistorių teka 3 mA srovė.  $V_{cc}$  vertė 20V.  $V_{REF}$  10V. Tuomet rezistoriui  $R_1$  tenka 10V įtampa, o  $R_1$  yra 10 k $\Omega$ . Pagal Omo dėsnį srovė per  $R_1$  bus  $I = U/R_1 = 10/10000 = 1\text{mA}$ . Likę 2 mA tekės per tranzistoriaus  $Q_1$  bazę ir stiprintuvas neveiks. Todėl  $R_1$  vertė yra griežtai apibrėžta ir srovė, tekanti per ją, turėtų būti lygi srovei per lauko tranzistorių. Nagrinėjamu atveju ji turėtų būti lygi  $R_1 = 10/0,003 = 3,33(3) \text{ k}\Omega$ . Kadangi rezistoriaus vertės nepavyks gauti būtent tokios, kokios reikia, vietoje  $V_{ref}$  įtampos šaltinio naudojamas įtampos daliklis. Tuomet srovė per tranzistoriaus bazę lemia įtampos daliklio įtampą ir stiprintuvas veiks.



**16 pav.** Kairėje – pažymėta tiesiškiausia tranzistoriaus darbo dalis. Dešinėje – įtampos triukšmų priklausomybė nuo tekančios per tranzistorių srovės [31]

R2 ir C2 sudaro žemo dažnio filtrą. R2 turėtų būti lygi R1 – tuomet iškreipimai bus mažiausi. C2 gali būti apskaičiuojamas pagal norimą nukirtimo dažnį. C1 ir R3 sudaro aukšto dažnio filtrą. R3 parinkta simuliacijai metu, randant vertę, kai pradinio stiprintuvo iškreipimai mažiausi. C1 parenkamas pagal norimą nukirtimo dažnį. Svarbu jog rezistorių vertės būtų kuo mažesnės, kadangi rezistoriai generuoja triukšmų įtampą (šiluminiai ir srovės triukšmai). Kondensatoriai taip pat kuria šiluminius triukšmus – jų talpa yra atvirkščiai proporcinga triukšmams. [49]

Tolimesnis signalo stiprinimas atliekamas naudojant operacinį stiprintuvą. 2.1.1.3. skyriuje aptarti operacinio stiprintuvo triukšmai apskaičiuoti naudojantis supaprastintu modeliu, kai nevertinami grįžtamo ryšio grandinės sukuriami triukšmai. Pilnas operacinio stiprintuvo triukšmų modelis neinvertuojančiame jungime pateiktas 17 pav. [25 p.24]



**17 pav.** Operacinio stiprintuvo schema neinvertuojančiame jungime

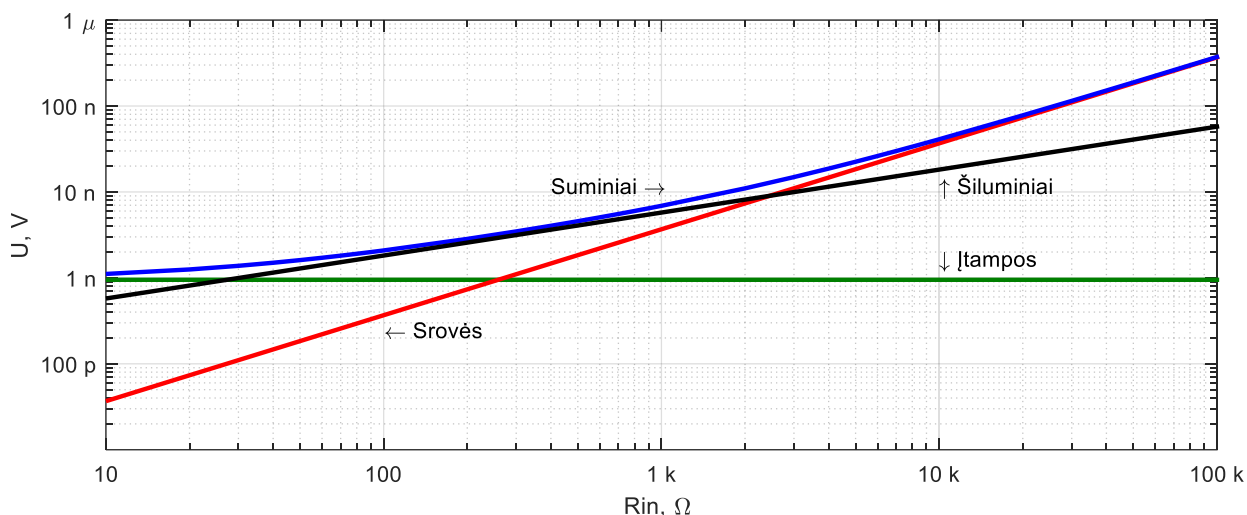
Triukšmų įtampą galima apskaičiuoti naudojantis formule:

$$e_{ni} = \sqrt{e_n^2 + (i_{n+} + R_{in})^2 + 4kTR_{in} + (i_{n-} \cdot (R_f \parallel R_g))^2 + 4kT(R_f \parallel R_g)} \quad (2.7)$$

Jei  $R_f \parallel R_g = R_{in}$  tuomet modelis supaprastėja ir triukšmus galima apskaičiuoti naudojantis 2.8 formule:

$$e_{ni} = \sqrt{e_n^2 + 2(i_n \cdot R_{in})^2 + 4kT(2 \cdot R_{in})} \quad (2.8)$$

Naudojantis 2.8 formule apskaičiuota AD8099 operacinio stiprintuvo triukšmų priklausomybė nuo įėjimo impedanso, esant 1 Hz dažnių juostai ir aplinkos temperatūrai 300 K.



**18 pav.** Operacinio stiprintuvo triukšmų priklausomybė nuo įėjimo impedanso

Iš grafiko galima matyti, jog iki  $30 \Omega$  dominuoja operacinio stiprintuvo įtampos triukšmai, nuo  $30 \Omega$  iki  $2,5 \text{ k}\Omega$  – šiluminiai triukšmai, nuo  $2,5 \text{ k}\Omega$  srovės triukšmai.

Triukšmų skaituomuo NF (*angl. Noise Figure*) parodo, kiek turimas stiprintuvas skiriasi nuo idealaus (idealus stiprintuvo NF = 0 dB). Skaičiaus vertė nurodo, kiek pablogės SNR stiprintuvo išėjime [33].

$$NF = 10 \log_{10} \left( \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{e_{ni}^2}{e_t^2} \right) \quad (2.9)$$

čia:  $SNR_{in}$  – signalo triukšmo santykis stiprintuvo įėjime,  $SNR_{out}$  – signalo triukšmo santykis stiprintuvo išėjime,  $e_{ni}$  – triukšmų įtampa stiprintuvo išėjime,  $e_t$  – šiluminiai triukšmai stiprintuvo išėjime.

NF neinvertuojančiam stiprintuvui, kurio įėjimas atviras, gali būti apskaičiuojamas naudojantis 2.10 formule [32 p.9]:

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left[ 1 + \frac{e_n^2 + (i_n \cdot R_{in})^2 + \left( \frac{i_n \cdot R_f}{G_n} \right)^2 + \frac{4kTR_f}{G_n}}{4kTR_{in}} \right] \quad (2.10)$$

čia:  $G_n$  – operacinio stiprintuvo stiprinimas kartais, apskaičiuojamas  $G_n = 1 + \frac{R_f}{R_g}$ .

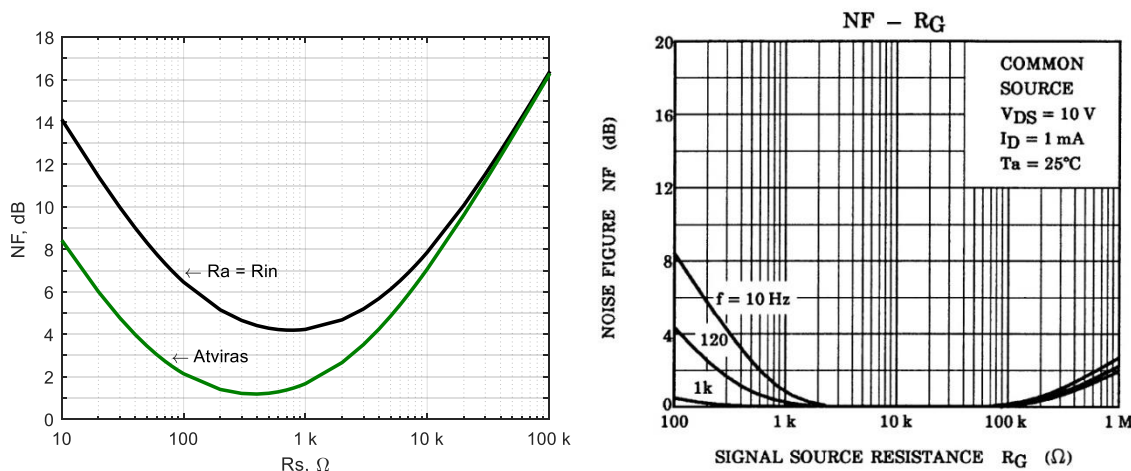
Kei įėjime prijungta apkrova, NF neinvertuojančiam stiprintuvui apskaičiuojamas pagal 2.11 formulę [32 p.9]:

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left[ 1 + \frac{R_{in}}{R_a} + \frac{R_{in}}{4kT} \left[ \left( \frac{e_n}{R_l} \right)^2 + i_n^2 + \left( \frac{i_n \cdot R_f}{R_l \cdot G_n} \right)^2 + \frac{4kTR_f}{G_n \cdot R_l^2} \right] \right] \quad (2.11)$$

čia:  $R_a$  – operacinio stiprintuvo įėjime prijungto šaltinio varža (lygiagrečiai  $R_{in}$ ),  $\Omega$ ;  $R_l$  – varža, lygi lygiagrečiai sujungtoms  $R_{in}$  ir  $R_a$  varžoms ( $R_l = R_{in} \parallel R_a$ ),  $\Omega$ .

Paprastai signalo šaltinio išėjimo ir stiprintuvo įėjimo impedansai būna suderinti ( $R_{in} = R_a$ ). Tuomet 2.11 formulę galima supaprastinti [32 p.9]:

$$NF = 10 \cdot \log_{10} \left[ 2 + \frac{e_n^2 + \left( i_n \cdot \frac{R_{in}}{2} \right)^2 + \left( \frac{i_n \cdot R_f}{G_n} \right)^2 + \frac{4kTR_f}{G_n}}{4kTR_{in}} \right] \quad (2.12)$$

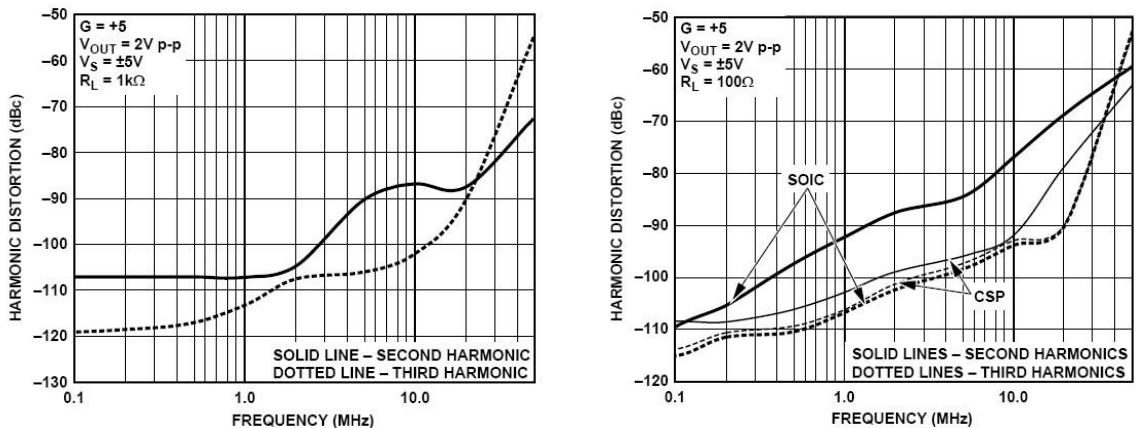


**19 pav.** Kairėje – AD8099 operacinio stiprintuvo NF; dešinėje – 2sk170 lauko tranzistoriaus NF [31]

Naudojantis NF grafiku galima rasti optimalų įėjimo impedansą, kuriam esant stiprintuvo kuriami triukšmai būtų mažiausi. Pateiktame grafike galima matyti, jog kai įėjime nėra prijungtas signalo šaltinis, stiprinimas + 1 kartas, NF yra mažiausias ties 370  $\Omega$  ir lygus 1,13 dB. Kai įėjime prijungiamas šaltinis, kurio išėjimo impedansas lygus operacinio stiprintuvo įėjimo impedansui ( $R_{in} = R_a$ ), mažiausia NF vertė 4,14 dB ties 730  $\Omega$ . Jei stiprinimas didesnis nei 1 kartas, NF išaugs, tačiau nežymiai. Kai stiprintuvo stiprinimas +40 kartų (tiek kartų reikės stiprinti) ir kai prijungtas signalo šaltinis ( $R_{in} = R_a$ ), NF mažiausias ties 820  $\Omega$  ir lygus 4,26 dB. Vadinasi, pirmos pakopos stiprintuvo išėjimo impedansas turėtų būti apie 820  $\Omega$ .

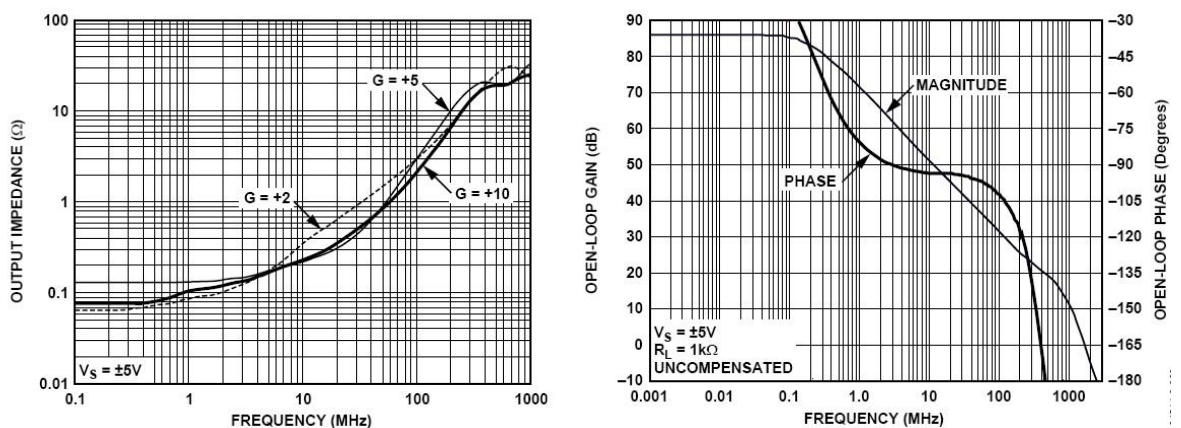
Jei būtų naudojamas mažesnius srovės triukšmus ir didesnius įtampos triukšmus turintis operacinis stiprintuvas – mažiausia NF vertė pasislinktų link didesnio impedanso. Taigi renkantis operacinį stiprintuvą svarbu atsižvelgti koks bus įėjimo impedansas. Tai leidžia gauti mažiausius triukšmus. Naudojant lauko tranzistorius NF gerokai mažesnis. Dėl šios priežasties stiprintuvas, surinktas iš diskretinių elementų išėjime generuos mažesnius triukšmus (dėl mažesnių srovės ir įtampos triukšmų). Kadangi stiprintuvo triukšmai labiausiai priklauso nuo

pirmos pakopos, operacinio stiprintuvo panaudojimas antrai pakopai daro labai mažą įtaką bendram triukšmų lygiui išėjime. Operacinio stiprintuvo privalumas – mažesni iškraipymai.



**20 pav.** AD8099 iškraipymai esant +5 kartai stiprinimui, kairėje CSP korpuse esant 1 kΩ apkrovos impedansui, dešinėje 100 Ω apkrovos impedansui SOIC ir CSP korpusuose [30]

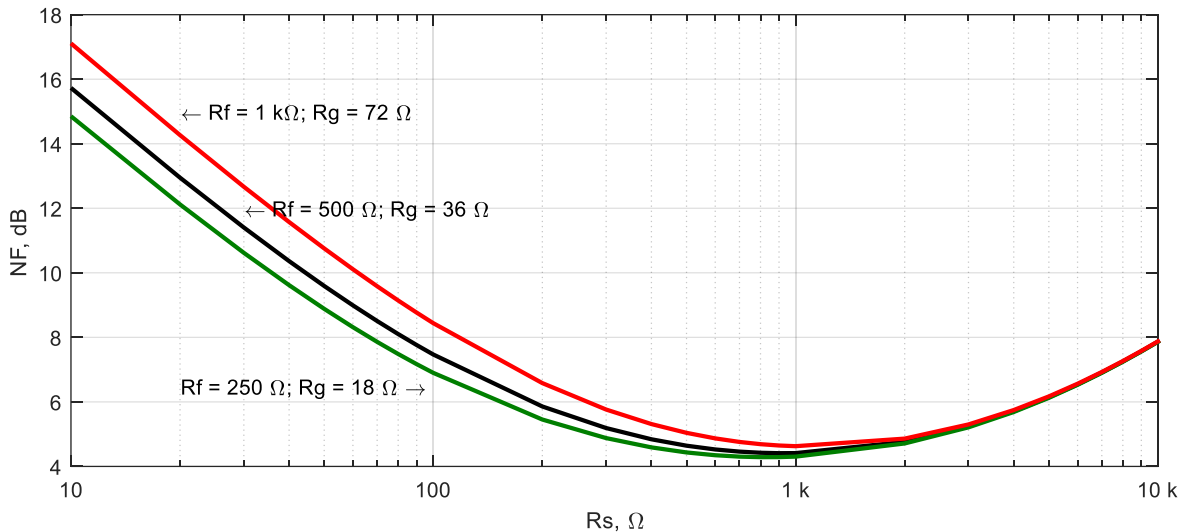
Nedideli iškraipymai yra ne ką mažiau svarbus dalykas nei nedideli triukšmai. Signalų iškraipymai neįleidžia pasiekti didelio dinaminio diapazono, taip pat kaip ir triukšmai. Operaciniuose stiprintuvuose iškraipymai priklauso nuo apkrovos impedanso, stiprinimo, signalo dažnio, įėjimo signalo amplitudės, maitinimo įtampos, operacinio stiprintuvo korpuso (jei gamintojas gamina keliuose korpusuose). 20 pavyzdyje pateikti AD8099 operacinio stiprintuvo iškraipymai esant +5 kartų stiprinimui. Kai apkrovos varža 100 Ω iškraipymai išauga maždaug nuo 300 kHz. Taip yra todėl, kadangi operacinio stiprintuvo dažnių juosta yra ribota ir jo maksimalus stiprinimas (kai nėra prijungto grįžtamo ryšio rezistorius) mažėja didėjant dažniui, taip pat esant didesniai dažniui išauga išėjimo impedansas.



**21 pav.** Kairėje – AD8099 išėjimo impedansas esant skirtingam dažniui ir stiprinimams; dešinėje – maksimalus stiprinimas keičiantis dažniui [30]

Simuliuojant stiprintuvą buvo pastebėta, jog padidėjus signalo amplitudei įėjime stipriai išauga signalo iškraipymai. Dėl šios priežasties buvo suprojektuotas dar vienas stiprintuvas, kurį

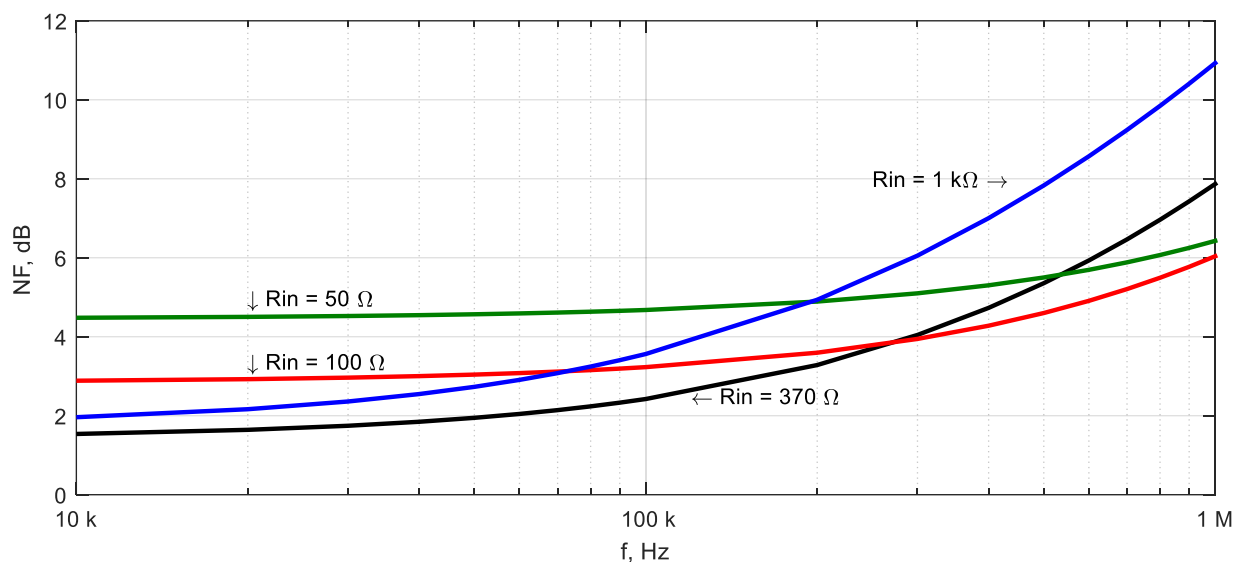
sudaro du operaciniai stiprintuvai. Abi pakopos signalą stiprina po 15 kartų neinvertuojančiame jungime, bendras stiprinimas 46 dB. 15 kartų stiprinimą galima pasiekti naudojant skirtingus rezistorius, tarkime  $R_f = 500 \Omega$ ,  $R_g = 36 \Omega$  arba  $R_f = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_g = 72 \Omega$ . NF, apskaičiuotas esant skirtingoms rezistorių vertėms (pagal 2.12 formulę), pateiktas 22 pav.



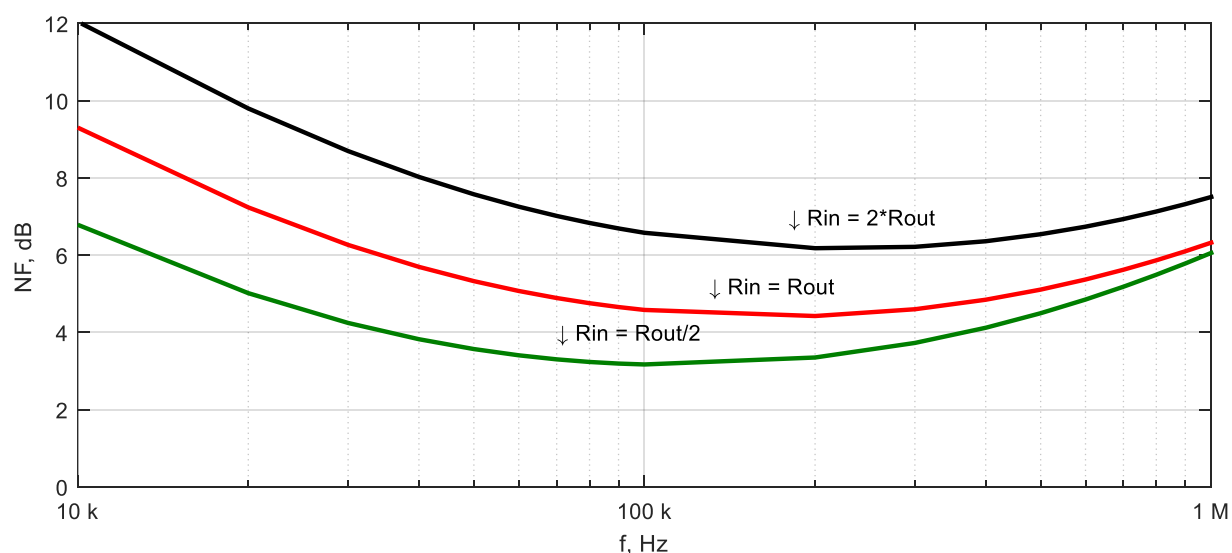
**22 pav.** NF priklausomybė keičiantis  $R_s$  ir esant skirtingoms grįžtamo ryšio rezistorių vertėms

Didesnio nominalo rezistorių panaudojimas grįžtamo ryšio grandinėje sukuria didesnius triukšmus. Tačiau egzistuoja tam tikra optimali vertė. Pirmą – grįžtamo ryšio rezistoriai jungia operacinio stiprintuvo išėjimą su 0 V potencialu taigi tai operacinio stiprintuvo apkrova, nuo kurios priklauso iškraipymai. Antra – jungiant pakopas kaskadiškai, ši išėjimo varža bus kitos pakopos įėjimo impedansas, nuo kurio priklausys kitos pakopos triukšmų skaitmuo NF (optimali vertė yra  $R_a/2$ , kadangi  $R_{in}$  nebus ir prie 15 kartų stiprinimo bus tarp 400 – 500  $\Omega$  esant grafike pateiktoms  $R_f$  ir  $R_g$  vertėms). Galiausiai – stabilumas. Yra tam tikra minimali  $R_g$  vertė, kuriai esant operacinis stiprintuvas taps nestabiliu. Atsižvelgus į šiuos faktorius variantas kai  $R_f = 500 \Omega$ , o  $R_g = 36 \Omega$  yra optimalus.

Pirmos pakopos įėjime bus prijungtas akustinės emisijos jutiklis, kurio supaprastintas išėjimo impedansas pateiktas 10 pav. Operaciniam stiprintuvui reikia parinkti  $R_{in}$ , prie kurios jo NF būtų mažiausias. Pagal 23 paveikslėlį galima matyti, jog 370  $\Omega$  įėjimo impedansas iki 300 kHz duos mažiausią NF vertę. Nuo 300 kHz mažiausi triukšmai bus naudojant 100  $\Omega$  įėjimo impedansą, o didesnio nei 1 MHz esant 50  $\Omega$  impedanui. Gauname, jog įėjimo impedansas turėtų keisti keičiantis dažniui (didėjant dažniui mažėti). Taip pat jutiklio  $R_{out}$  ir operacinio stiprintuvo  $R_{in}$  sudaro įtampos daliklį. Jei stiprintuvo  $R_{in}$  nesikeis keičiantis dažniui, amplitudė įėjime skirsis (prie skirtingų dažnių).



**23 pav.** NF kai operacinio stiprintuvo įėjime prijungtas akustinės emisijos jutiklis ir tam tikros vertės  $R_{in}$



**24 pav.** NF kai operacinio stiprintuvo įėjime prijungtas akustinės emisijos jutiklis ir talpumas  $R_{in}$

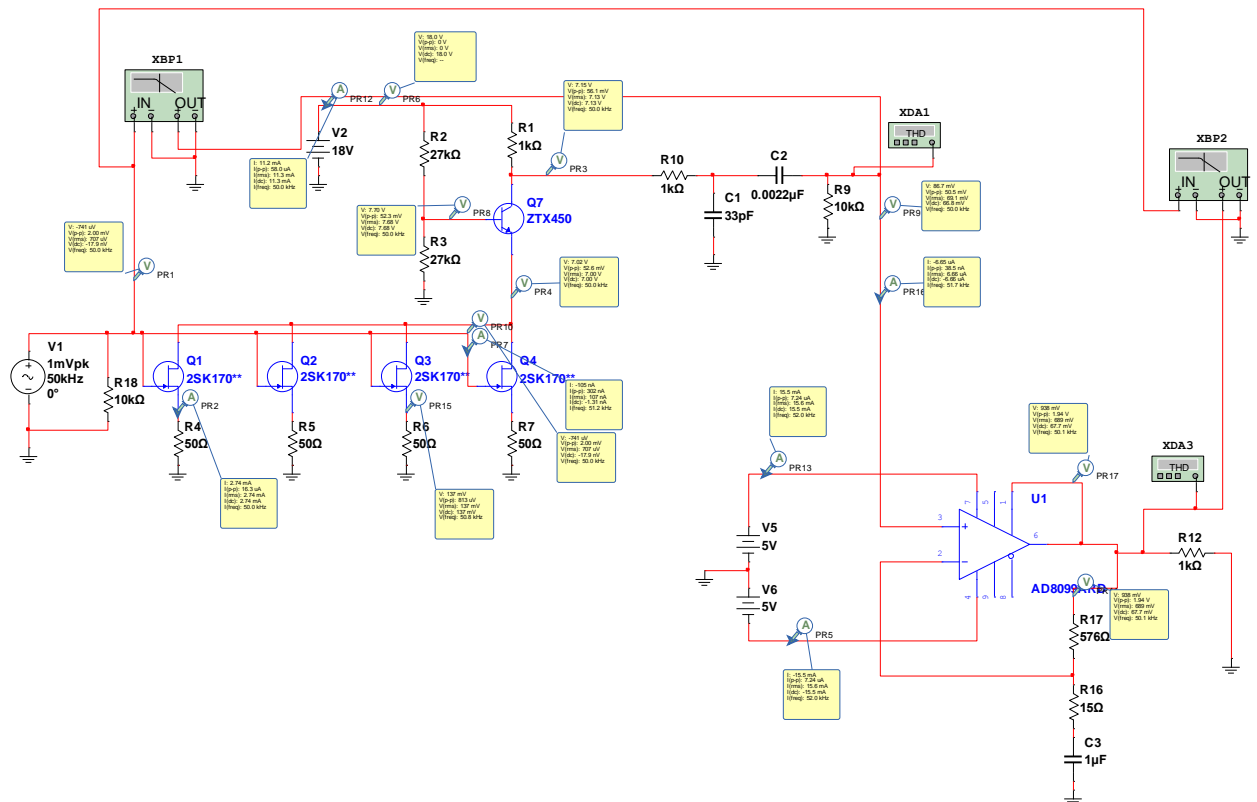
Kai operacinio stiprintuvo įėjime keičiantis dažniui keičiasi  $R_{in}$ , gaunamas optimalus variantas, t.y. nepriklausomai nuo dažnio iš jutiklio bus gaunamas tokios pačios amplitudės signalas. Kai  $R_{in} = R_{out}$ , NF dažnių ruože nuo 35 kHz iki 850 kHz neviršija 6 dB. Jei  $R_{in} = R_{out}/2$ , NF bus mažesnis, tačiau signalo amplitudė iš jutiklio taip pat bus mažesnė; reikės didesnio stiprinimo ir išėjime bus didesni triukšmai nei prieš tai aptartu atveju.

### 2.1.1.5. Stiprintuvo schemos simuliacija

Sudaryta imtuvo principinė schema simuliuojama „NI Multisim“ programiniame pakete. Kadangi programiniame pakete 2SK170 tranzistoriai buvo su 12 mA rambybės srove (turimi yra 6,5 mA), tranzistoriaus modelis buvo pakeistas (sumažinta beta reikšmė). Dėl šio pakeitimo bus

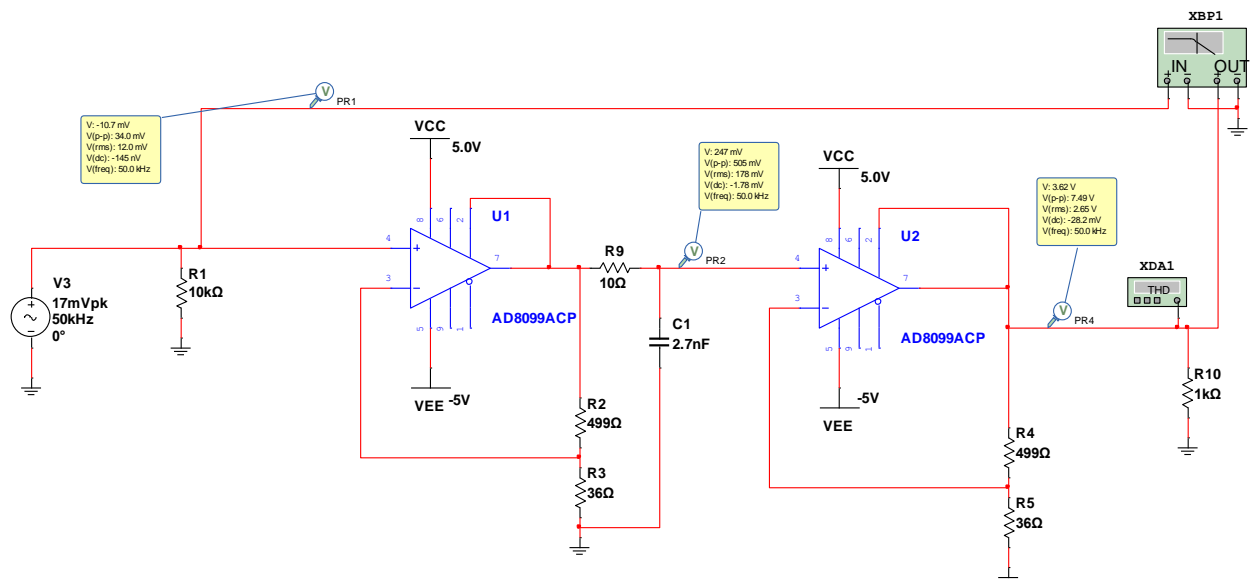


pasiektas mažiausias skirtumas tarp simuliuojamos ir realizuojamos schemos. Sudaryta principinė schema su parinktomis optimaliomis komponentų reikšmėmis pateikta 25 pav.



**25 pav.** Stiprintuvo iš diskretinių elementų ir operacinio stiprintuvo simuliacija „Multisim“ programinėje aplinkoje

Kai įėjime 50 kHz sinusinis signalas, kurio amplitudė 2 mV(p-p), išėjimo amplitudė 1,94 V(p-p), harmoniniai iškraipymai THD = 0,009%, SINAD = 80,456 dB. Triukšmų įtampa išėjime 653  $\mu$ V. Kai įėjime nuosekliai prijungiamas 1 k $\Omega$  rezistorius (toks turėtų būti jutiklio impedansas), triukšmų įtampa išauga iki 1,32 mV (dažnių juosta 10 kHz – 1 MHz). Esant realioms sąlygomis ši vertė turėtų būti 2 kartus mažesnė, kadangi triukšmai tarp keturių lygiagrečiai sujungtų tranzistorių nekoreliuos. Didinant signalo įėjimo amplitudę iškraipymai pradeda augti, kadangi vis labiau pasireiškia netiesinė tranzistorių charakteristika. Amplitudę padidinus 2 kartus (4 mV(p-p)), iškraipymai siekia 0,019% (išauga apie 2 kartus). Signalo amplitudei esant 6 mV(p-p) iškraipymai jau 0,027%. Didesnės nei 7 mV amplitudės signalai bus pradėti riboti, kadangi nebeužteks operacinio stiprintuvo maitinimo įtampos ( $\pm$ 5V). Taigi toks stiprintuvas tinkamas kai reikalingas apie 54 – 60 dB signalo stiprinimas. Dėl šios priežasties buvo suprojektuotas dar vienas stiprintuvas, skirtas ~40 dB stiprinimui, kurį sudaro tik operaciniai stiprintuvai. Simuliuojama schema pateikta 26 pav.



**26 pav.** Stiprintuvo iš operacinių stiprintuvų simuliacija „Multisim“ programinėje aplinkoje

Stiprintuvas gali stiprinti signalus, kurių amplitudė yra iki 34 mV(p-p). Tuomet iškreipimai pasiekia 0,002% ir maitinimo įtampa pradeda riboti signalą. Triukšmų įtampa esant dažnių juostai nuo 10 kHz iki 1 MHz yra 267  $\mu$ V. Tačiau tai neatspindi realios situacijos, kadangi jutiklis turės apie 1 k $\Omega$  impedansą. Kai įėjime nuosekliai prijungiamas 1 k $\Omega$  rezistorius, gaunamas 1 mV triukšmų įtampos.

Stiprintuvas sudarytas iš dviejų pakopų, kurių bendras stiprinimas 225 kartai. Abi pakopos stiprina po 15 kartų. Taip pasirinkta ne vien dėl mažesnių iškreipimų, bet ir dėl to, jog tai mažiausias stiprinimas prie kurio AD8099 yra stabilus ir nereikia naudoti išorinių grandinių stabilizavimui. Norint užtikrinti stiprintuvo stabilumą buvo panaudotas žemo dažnio filtras tarp pakopų. Jį sudaro R9 rezistorius ir C1 kondensatorius. R9 vertė buvo parinkta kiek galima mažesnė, norint gauti mažiausius triukšmus.

### 2.1.1.6. Keitiklio analoginio signalo į skaitmeninį parinkimas

Keitiklio analoginio signalo skaitmeniniu (toliau ADC) dvi pagrindinės charakteristikos yra diskretizavimo dažnis ir bitų skaičius. Kadangi analoginio signalo dažnis yra iki 1 MHz, teorinis mažiausias diskretizavimo dažnis turėtų būti didesnis nei 2 MHz (bent 2,1 MHz). Jei naudojamas 2,1 MHz diskretizavimo dažnis, ties 1,05 MHz (Naikvisto dažnis) signalas turi būti nuslopintas tiek decibelų, koks yra ADC dinaminis diapazonas. Jei ši sąlyga nebus išpildyta, tuomet po diskretizavimo signalų spektrai persidengs. Analoginis filtras gali būti iki 8 eilės (jei bus didesnės – nebus stabilus), todėl jis ir apsprendžia, koks turėtų būti diskretizavimo dažnis (pagal ADC dinaminį diapazoną, nuo kurio priklausys reikalingas slopinimas).

Reikalingas bitų skaičius apskaičiuojamas pagal stiprintuvo triukšmus. Teoriškai idealiu atveju stiprintuvai generuos apie 300  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$  triukšmų įtampą. ADC keitikliai dažniausiai turi apie 3 V atraminės įtampos šaltinį (amplitudė įėjime gali būti iki šios vertės). Dinaminis diapazonas apskaičiuojamas:

$$N_{\text{kartais}} = \frac{3V}{300 \mu\text{V}} = 10000 \text{ atskaitų} \quad (2.13)$$

Šią vertę galima perskaičiuoti į bitus:

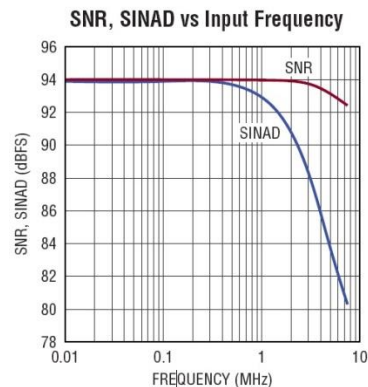
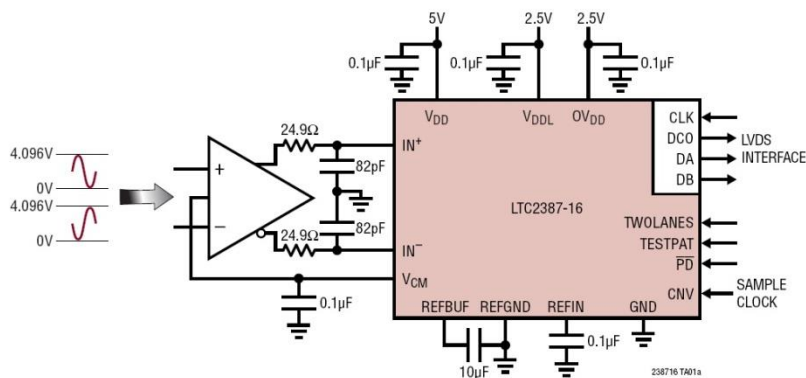
$$N_{\text{bitais}} = \log_2 10000 \approx 13,3 \text{ bito} \quad (2.14)$$

Tai reiškia, jog idealiu atveju bus pasiekta 13 bitų skiriamoji geba ir tokio keitiklio reikėtų. Tačiau viskas nėra taip paprasta. Pirma – 13 bitų keitiklio reali skiriamoji geba bus mažesnė nei 13 bitų. Antra – ADC skiriamoji geba turi būti pakankamai didelė, jog triukšmas galėtų periodines kvantavimo (apvalinimo) paklaidas paversti neperiodinėmis (*ang. Dither*). Tarkime, turime nedidelės amplitudės signalą, kurį kvantuojame. Signalo amplitudė 0,28 mV, keitiklio kvanto žingsnis 0,1 mV. Šią įtampą jis suapvalins iki 0,3 mV. Tačiau jei yra triukšmo signalas, ši vertė keitiklio išėjime skirtingais laiko momentais bus 0,3 mV, kitu 0,4 mV, dar kitu 0,2 mV ir panašiai. Suapvalinę gautas vertes iš ADC (jei jų bus daug), gausime realią įtampą, kuri buvo įėjime, nepaisant to, jog signalas užterštas triukšmu. Taip gaunama didesnė skiriamoji geba, jei diskretizavimo dažnis pakankamai didelis ir naudojamas žemo dažnio filtras. [45]

Naudojant 13 bitų keitiklį, signalas dėl triukšmo galėtų pereiti mažiausiai per du kvantus (triukšmų įtampa  $V_{\text{rms}} \sim 300 \mu\text{V}$ , tačiau pikinė bent kelis kartus didesnė). Taigi 14 bitų keitiklis būtų optimalus variantas (realiai turėtų ~13 bitų). Tačiau buvo pasirinkta naudoti 16 bitų keitiklį. Taip padaryta dėl kelių priežasčių. Pirma – suprojektavus mažesnius triukšmus turintį stiprintuvą, jį būtų galima jungti prie šio keitiklio. Tarkime, jei jutiklio išėjime signalas yra didelės amplitudės ir užtenka 20 dB stiprinimo. Antra – nepavyko rasti didelės spartos ADC (diskretizavimo dažnis tarp 4 – 20 MHz) su nuoseklia duomenų perdavimo linija. Lygiagreti duomenų linija yra nepatogus dalykas, kadangi buvo norima atskirti stiprintuvus su keitikliu atskiroje plokštėje ir perduoti daug signalų tarp plokščių yra nepatogu.

16 bitų keitiklis turi ~96 dB teotinį dinaminį diapazoną, o 8 eilės filtras 48 dB/oktavai slopinimą. Taigi jei signalo dažnis 1 MHz, prie 2 MHz slopinimas bus 48 dB, prie 4 MHz 96 dB. Tuomet gaunama minimali diskretizavimo sparta 8 MSps. Buvo norima panaudoti 10 MSps keitiklį iš neseniai išleistos Linear Technology LTC238 šeimos, tačiau prekyboje buvo tik 15 MSps versija – taigi toks ir buvo pasirinktas. Dėl didesnės keitiklio spartos bus galima pasiekti

mažesnius triukšmus, kadangi bus daugiau išrankų suvidurkinimui. Taip pat bus galima naudoti mažesnės nei 8 eilės analoginį filtrą.



**27 pav.** Kairėje – ADC apibendrinta jungimo schema; dešinėje – ADC signalo triukšmo ir signalo triukšmo plus triukšmų dažninė charakteristika [34]

Efektivus keitiklio bitų skaičius ENOB (*angl. effective-number-of-bits*) gali būti apskaičiuotas naudojantis formule:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1,76dB}{6,02} \quad (2.15)$$

Prie 1 MHz keitiklio SINAD yra apie 93 dB. Tuomet efektyvus bitų skaičius bus:

$$ENOB = \frac{93dB - 1,76dB}{6,02} \approx 15,15 \text{ bito}$$

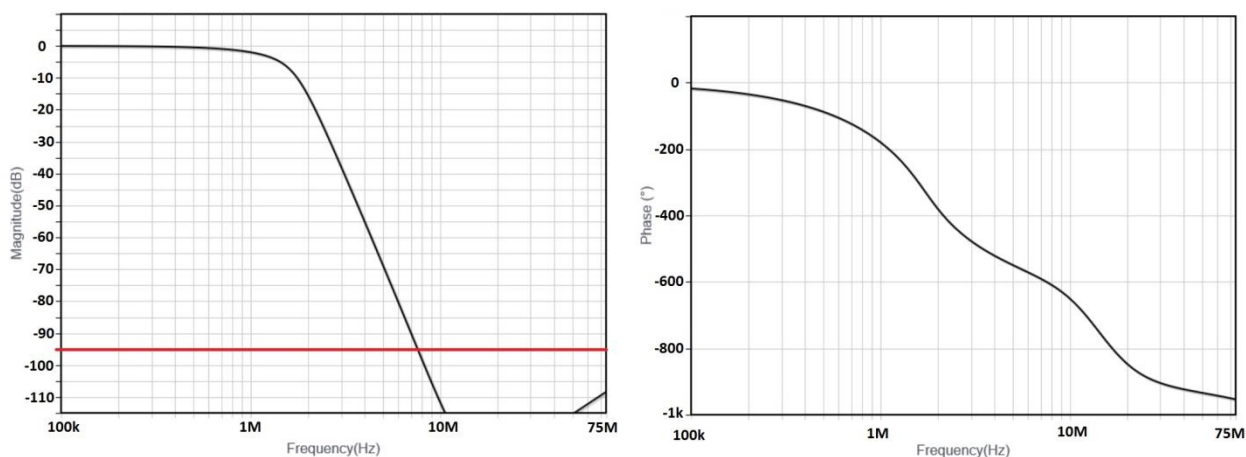
### 2.1.1.7. Analoginis filtras

Analoginis aktyvinis filtras modeliuojamas naudojant „Analog Device“ „Analog Filter Wizard“ aplinką. Filtrui parinkti operaciniai stiprintuvai ADA4899, turintys nedidelius iškreipimus, triukšmus, taip pat stabilūs prie vienetinio stiprinimo. Filtro parametrai:

- ne mažiau 94 dB slopinimas prie 7,5 MHz;
- ne didesnis nei 2dB slopinimas prie 1 MHz;
- nedideli triukšmai;
- kuo tiesiškesnė fazė.

Tiesiška fazė reikalinga, jog esant staigiems signalo šuoliams nubūtų iškreipomi jo frontai. Idealus filtras turėtų turėti tiesišką fazę. Kuo lėkštesnis bus filtras, tuo tiesiškesnė fazė bus galima pasiekti. Taip pat fazę lemia ir pasirinktas projektavo metodas – Bessel filtrai turi tiesiškesnę fazę nei Butterwoth, tačiau Bessel filtras turės mažesnę slopinimą (kai filtro eilė tokia pati). Triukšmai priklauso nuo operacinių stiprintuvų kuriamų triukšmų, naudojamų rezistorių bei kondensatorių nominalo ir filtro topologijos. Rezistoriai kurs šiluminius triukšmus. Be to, jei bus naudojami didelio nominalo rezistoriai – toks filtras bus mažiau atsparus aplinkos

triukšmams. Atlikus simuliaciją su skirtingais parametrais buvo pasirinkta naudoti 7 eilės filtra, kurio topologija tarpinė tarp Butterworth ir Bessel.



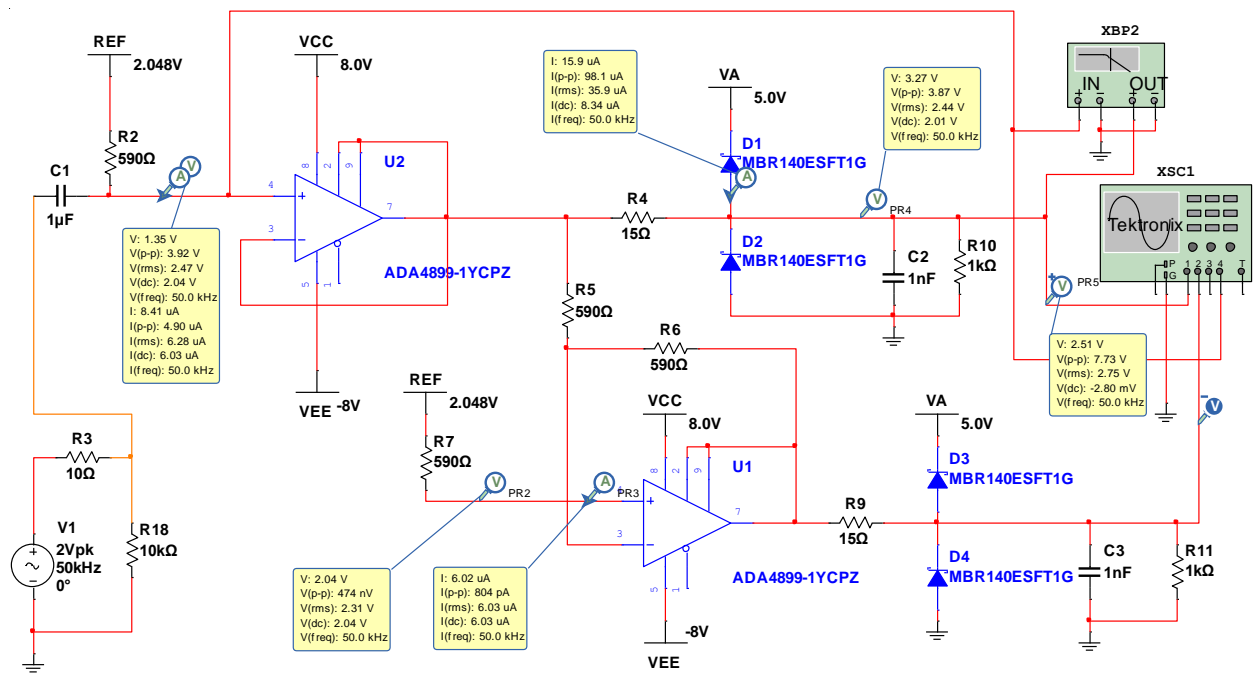
**28 pav.** Kairėje – dažninė filtro charakteristika; dešinėje – fazinė.

Filtro generuojami triukšmai siekia 15,8  $\mu\text{Vrms}$  dažnių juostoje iki 7,5 MHz. Pikiniai triukšmai 104  $\mu\text{V(p-p)}$ . Analoginio signalo į skaitmeninį keitiklio atraminės įtampos šaltinio įtampa 4,096 V ir maksimali skiriamoji geba bitais esant šiam filteriui bus:

$$N_{bitų} = \log_2 \left( \frac{4,096 \text{ V}}{104 \text{ } \mu\text{V}} \right) = \log_2(39385) = 15,26 \text{ bito} \quad (2.17)$$

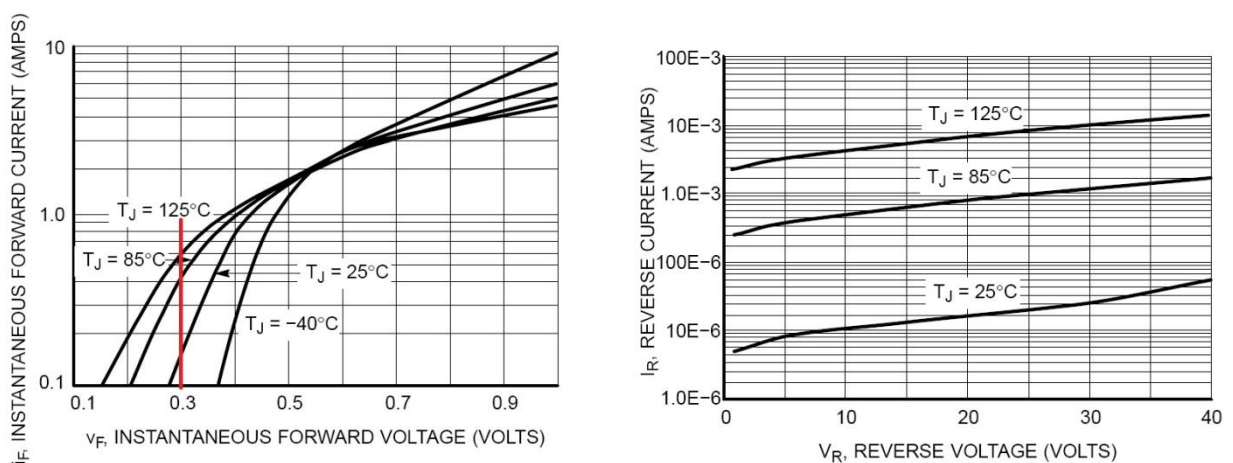
### 2.1.1.8. Keitiklio analoginio į skaitmeninį signalą įėjimo buferis

Kadangi ADC analoginiame įėjime reikalingas diferencialinis signalas, o filtro išėjime bus tik nesimetrinis signalas, reikalinga papildoma grandinė, kurios išėjime būtų invertuota nesimetrinio signalo kopija. Taip pat pagal ADC specifikaciją analoginis signalas turi būti 0 – 4,096 V diapazone. Filtro išėjime signalas bus nuo -2V iki +2V, todėl reikia pridėti ir papildomą nuolatinę įtampą. Norint užtikrinti, jog signalas ADC įėjime neviršytų leistinų ribų (-0,3V iki 5,3V) naudojami šotki diodai. Sudaryta schema yra modifikuota ADA4899 aprašyme pateikta schema [29 p.15].



29 pav. ADC analoginio signalo įėjimo buferio principinė schema

Schemos veikimas. Kondensatorius C1 atskiria nuolatinę dedamąją įtampą, kuri pridama prie signalo iš filtro. Šis kondensatorius taip pat veikia kaip aukšto dažnio filtras, todėl jo vertė parenkama pagal norimą dažnių juostą. Nuolatinė dedamoji REF gaunama tiesiai iš ADC, kadangi jis turi specialiai tam skirtą 2,048V įtampos išėjimą (CM prievadas). U2 operacinis stiprintuvas veikia kartotuvo režime, tam, jog išėjimo impedansas būtų kuo mažesnis. U1 taip pat veikia kartotuvo režime, tačiau signalas iš U2 perduodamas į invertuojantį kanalą. R4 ir C2 (invertuojančiame kanale R9 ir C3) sudaro žemo dažnio filtrą. Rezistoriai taip pat riboja srovę, tekančią per diodus. Diodų parinkimas yra kompromisas tarp įtampos, prie kurios jie prasiveria ir nuotėkio srovės.



30 pav. Kairėje – diodo prasidarymo įtampa kai per jį teka tam tikra srovė; dešinėje – nuotėkio srovės priklausomybė nuo įtampos bei temperatūros [36]

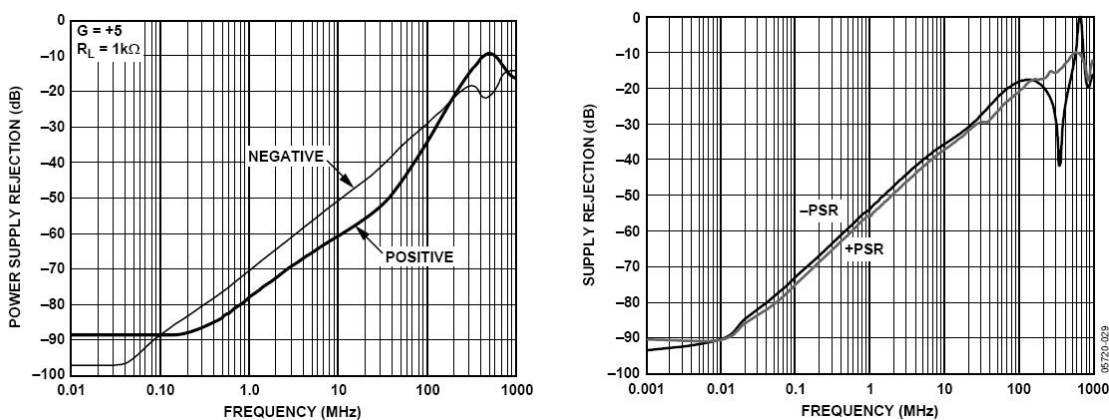
Diodai su mažesne prasidarymo įtampa turės didesnę nuotėkio srovę. Maža nuotėkio srovė reikalinga tam, jog dalis nuolatinės srovės (taip pat ir naudingo signalo), tekės į 0V potencialą. Dėl to nuolatinė dedamoji įtampa, patenkanti į keitiklį, bus mažesnė nei pridėta operacinio stiprintuvo įėjime. Simuliuojamu atveju įtampa nukrito iki 2,01 V vietoje 2,048V. Kadangi leistinos ribos viršyti ADC analoginę įtampą yra  $\pm 0,3V$ , prie šios įtampos MBR140 diodai galės praleisti apie 150 mA srovę. Srovę per diodus riboja 15  $\Omega$  rezistorius. Pagal Omo dėsnį gauname  $U = R \cdot I = 15 \cdot 0,15 = 2,25V$ . Tai didžiausias įėjimo įtampos skirtumas nuo leistinos (ir kai aplinkos temperatūra ne mažesnė nei 25 °C). Svarbiausias šios schemos parametras – tai skirtumas įtampų tarp invertuoto ir neinvertuoto signalų, kuris turėtų būti kuo mažesnis. Gauta nuolatinė dedamoji 6,42 mV.

### 2.1.1.9. Maitinimo šaltinių parinkimas

Imtuvui projektuojamas atskiras linijinis maitinimo šaltinis, o „žemės“ tarp imtuvo ir naudojamo mikrovadiklio/FPGA plokštės yra atskiriamos. Linijinis maitinimo šaltinis turi užtikrinti šias maitinimo įtampas:

- +18 V pradiniam stiprintuvui iš lauko tranzistorių;
- $\pm 5$  V operaciniams stiprintuvams;
- +5 V analoginei ADC daliai;
- +2,5V ADC atraminės įtampos šaltiniui;
- +2,5V ADC skaitmeninei daliai.

Tačiau maitinimo įtampa tik vienas iš reikalavimų. Papildomi reikalavimai – maitinimo šaltinių triukšmai, maksimali srovė, leistina įėjimo įtampa, išėjimo įtampos tolerancija, korpuso išsklaidoma šiluma, kintamos įtampos atmetimo santykis PSR (*angl. Power Supply Rejection*).

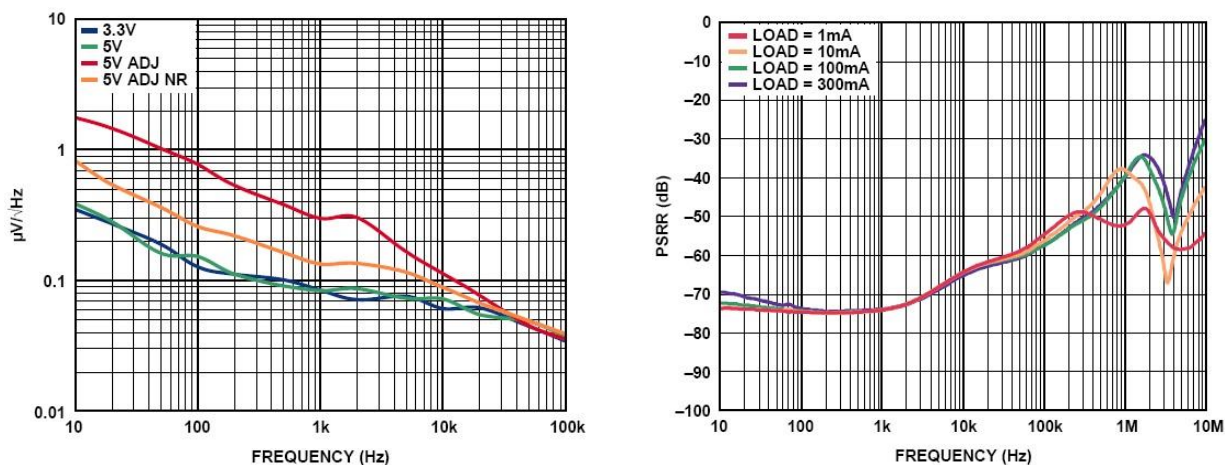


31 pav. Kairėje – AD8099 operacinio stiprintuvo PSR [30]; dešinėje – ADA4899 PSR

[29]

PSR nurodo, kiek kartų bus nuslopintas maitinimo įtampos svyravimas. Tarkime, jei maitinimo įtampa svyruoja 1 V, o operacinio stiprintuvo PSR yra -60 dB (1000 kartų), jo išėjime matysime 1 mV svyravimą. Filtre naudojami ADA4899 operaciniai stiprintuvai, kurių PSR ties 1 MHz (blogiausias atvejis) yra apie -50 dB, kartais tai būtų  $N = 10^{\left(\frac{50}{20}\right)} \approx 320$ . Kadangi filtro kuriami triukšmai yra 15,8  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ , gauname, jog maitinimo šaltinio įtampos svyravimai neturėtų viršyti  $15,8 \mu\text{V} \cdot 320 \approx 5 \text{ mV}$ . Pradiniame stiprintuve su operaciniais stiprintuvais signalo stiprinimas siekia 200 kartų. Stiprintuvo mažiausi triukšmai 266  $\mu\text{V}$ . Padalinę iš stiprinimo gauname  $\frac{266 \mu\text{V}}{200} = 1,33 \mu\text{V}$ . AD8099 PSR ties 1 MHz yra apie -70 dB (~3000 kartų), padauginę iš mažiausios įtampos vertės gauname  $1,33 \mu\text{V} \cdot 3000 \approx 4 \text{ mV}$ . Taigi dėl operacinių stiprintuvų didelio PSR, jų maitinimo šaltiniams praktiškai tinka bet koks įtampos reguliatorius.

ADC aprašyme nenurodyta PSR reikšmė. Bet kuriuo atveju ši reikšmė nebus blogesnė nei 0 dB. Reikalinga analoginė įtampa, skirta atraminės įtampos šaltinio buferio maitinimui yra 5V. Vieno kvanto vertė bus  $\frac{4,096 \text{ V}}{2^{16}} = 62,5 \mu\text{V}$ . Jei maitinimo šaltinio triukšmai bus didesni nei ši vertė, ADC išėjime bus matomi įtampos svyravimai, atsiradę dėl maitinimo įtampos triukšmų. Dėl to ADC analoginės dalies maitinimui svarbu parinkti mažatriukšmį maitinimo šaltinį. Buvo parinktas „Analog Device“ ADP7102 maitinimo šaltinis, turintis ~ 15  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$  triukšmus dažnių juostoje nuo 10 Hz iki 100 kHz, ne mažesnę nei -40 dB PSRR (*angl. Power Supply Rejection Ratio*); galimybę maitinti nuo 20V ir salyginai nedidelę kainą.



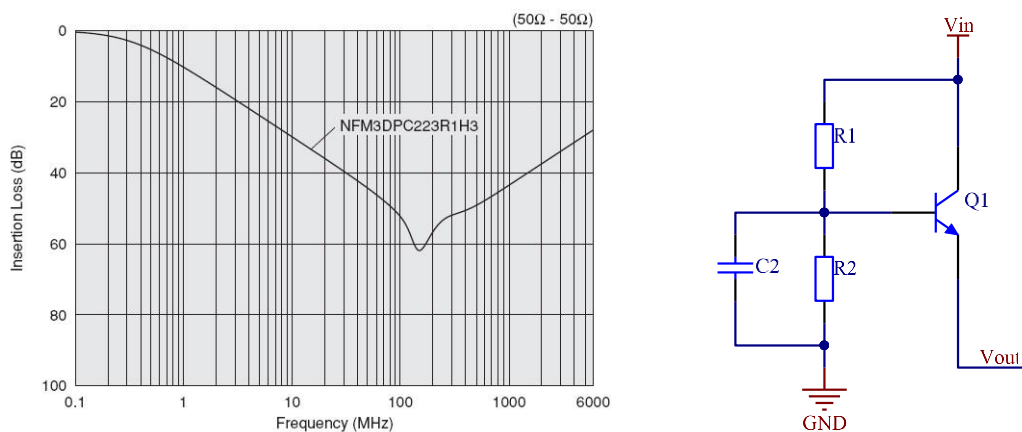
**32 pav.** Kairėje – ADP7102 triukšmų įtampa keičiantis dažniu; dešinėje – maitinimo įtampos trikdžių slopinimas keičiantis dažniui [37]

ADC atraminės įtampos šaltiniui reikalinga 2,5V maitinimo įtampa, kuri turi būti pati švariausia. Jei ši įtampa svyruos, svyruos atraminė įtampa ir kvanto reikšmė nuolat keisis. 2,5 V įtampą galima gauti papildomai reguliuojant iš ADP7102 gaunamą 5V. Buvo pasirinkta naudoti ADP150 serijos maitinimo šaltinį. Keitiklio triukšmų įtampa esant ~35 mA srovei (srovės



reikšmė iš LTC2387-16 dokumentacijos) neviršys  $10 \mu\text{Vrms}$ . PSRR dažnių juostoje iki 10 MHz neviršija -40 dB. Kadangi šis reguliatorius nuosekliai sujungtas su ADP7102, jų PSRR sumuojasi ir gaunamas didesnis nei 80dB slopinimas (10000 kartų) dažnių juostoje iki 10 MHz. 100 mV svyravimas reguliatoriaus įėjime išėjime sukurs  $10 \mu\text{V}$  įtampos pokytį (blogiausiu atveju, priklausau nuo dažnio).

Skaitmeninės dalies maitinimo šaltinis kiek skiriasi. Kadangi skaitmeniniai signalai turi staigius šuolius iš loginio vieneto į loginį nulį ir atvirkščiai, gaunami impulsai, kurie keliauja į maitinimo liniją, maitinančią ir analoginę dalį. Dėl šios priežasties maitinimo įtampa į skaitmeninės dalies įtampos reguliatorių perduodama per trijų polių kondensatorių, kuris nuslopins trikdžius iš skaitmeninės dalies ne mažiau 100 kartų.



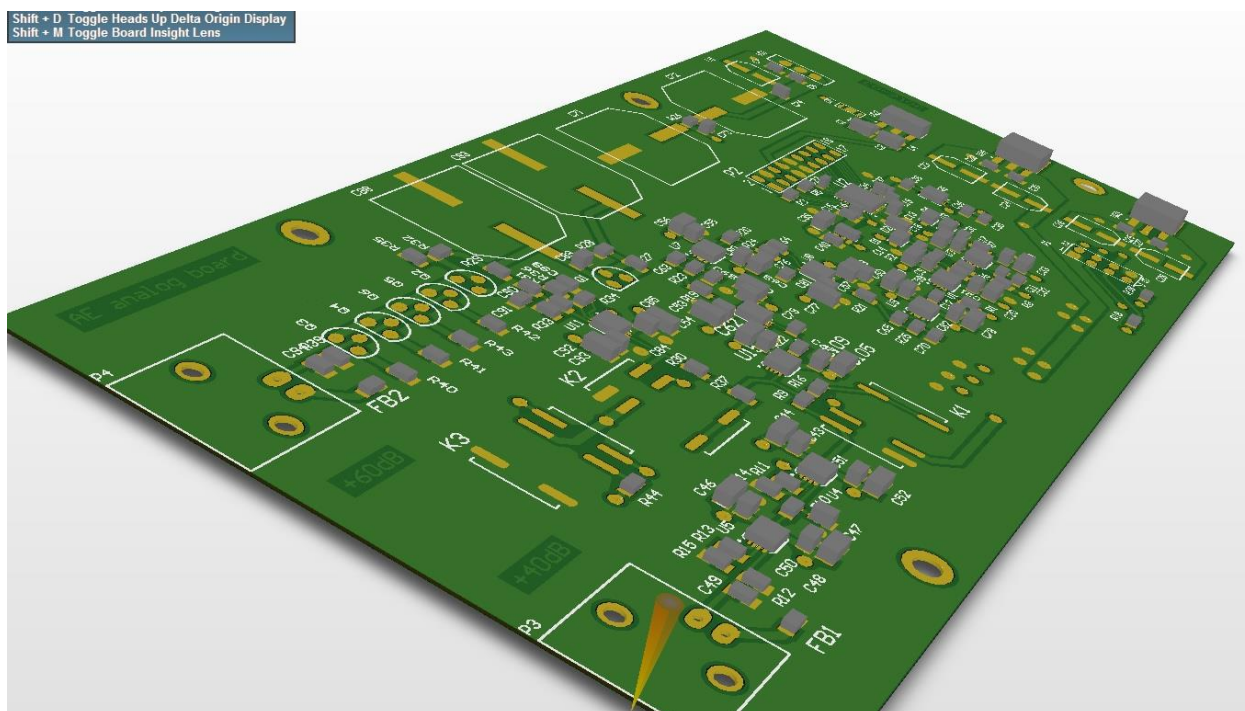
**33 pav.** Kairėje – trijų polių kondensatoriaus impedansas, dešinėje – talpumo dauginimo schema su įtampos dalikliu [38]

Maitinimas stiprintuvui iš lauko tranzistorių sudaromas per dvi pakopas. Primoji – standartinis +24V įtampos reguliatorius. Toliau ši įtampa perduodama bipoliariniam NPN tranzistoriui, sujungtam emiterinio kartotuvo režime (*angl. Emitter Follower*). Šiame jungime tranzistorius įtampos nestiprina, tik srovę, todėl turi didelį įėjimo impedansą ir nedidelį išėjimo. Sujungtoje schemeje kondensatoriaus C2 vertė bus padauginta iš tranzistoriaus srovės stiprinimo koeficiento  $\beta$ . Srovė, tekanti per rezistorių R1 į tranzistoriaus bazę jį atidaro. R2 sudaro įtampos daliklį, todėl įtampa išėjime bus lygi kuriamai įtampos daliklio, minus įtampa, krentanti tarp tranzistoriaus bazės ir emiterio (apie 0,65V). Kondensatorius C2 išlygina įtampą, patenkančią į bazę, todėl išėjime sumažėja triukšmai. Kuo didesnės bus rezistorių ir kondensatoriaus vertės, tuo labiau triukšmai bus nuslopinti išėjime. Srovė per įtampos daliklį turi būti pakankamai didelė, jog būtų išlaikoma norima įtampa ties tranzistoriaus baze (dažniausiai srovė per įtampos daliklį parenkama 10 kartų didesnė nei tekanti per tranzistoriaus bazę). Tai taip pat lems, per kiek laiko išėjime bus stabili įtampa (laikas per kurį bus užkrautas C2). Įtampa, krentanti ties

rezistoriumi R1 turi būti didesnė nei triukšmų įtampa, kadangi tik tada bus nuslopinti triukšmai. Suprojektuotoje schemoje rezistoriui tenka ~5V įtampa. [39]

### 2.1.1.10. Imtuvo spausdintinio montažo plokštės braižymas

Spausdintinio montažo plokštės braižomos „Altium“ programinėje aplinkoje. Suprojektuojamos dvi atskiros plokštės. Pirmoji iš jų skirta stiprintuvams, analoginiam filtrui ir keitikliui analoginio signalo į skaitmeninį (imtuvo plokštė). Kitoje naudojami optiniai atriškėjai ir relių valdymo tranzistoriai (pagrindinė plokštė). Šios plokštės yra maitinamos iš skirtingų maitinimo šaltinių, o žemės tarp jų – atskirtos (jog nesusidarytų triukšmingi „žemės“ kontūrai ir trikdžiai nepatektų į analoginį signalą).



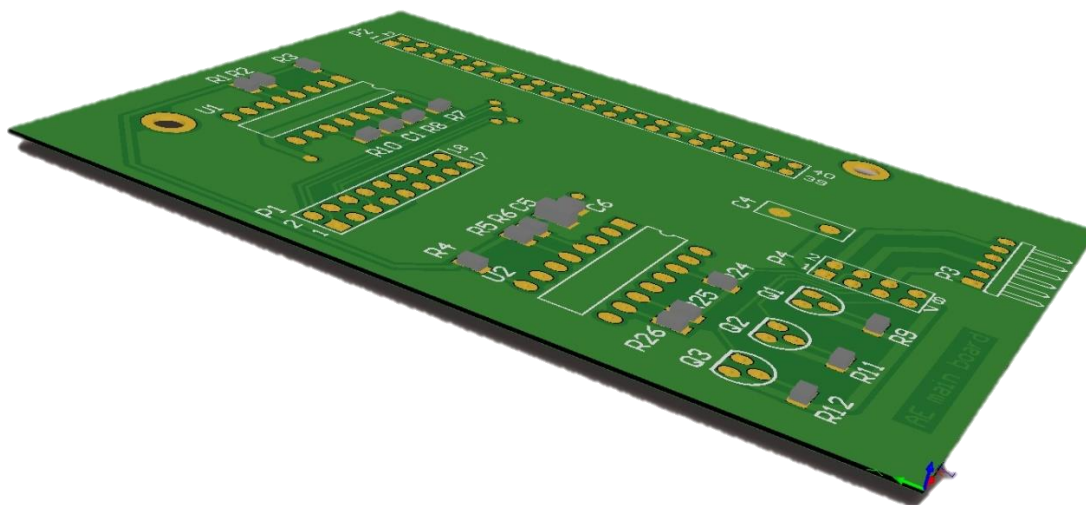
34 pav. Imtuvo plokštė

Universitete galima pagaminti tik 2 sluoksnių PCB (*angl. Printed Circuit Board*) plokštę, dėl to dalis signalų (relių valdymo ir operacinių stiprintuvų maitinimo) perduodami prilituotais laideliais. Norint tinkamai sutrasuoti tokio sudėtingumo plokštę reikėtų naudoti 4 arba 6 sluoksnių PCB. Plokštės kairėje pusėje yra ištrasuoti stiprintuvai. Ši plokštės dalis yra toliausiai nuo maitinimo reguliatorių (dėl kurių kaista visa plokštė) ir ADC duomenų perdavimo linijos – didžiausio trikdžių šaltinio. Tarpe tarp stiprintų ir ADC ištrasuotas 7 eilės aktyvinis analoginis filtras ir ADC buferis.

Trasavimo metu pirmiausia išdėliojami kritiniai komponentai ir atvedami takeliai iki jų. Vieni iš jų – maitinimo kondensatoriai prie kiekvieno iš operacinių stiprintuvų ir operacinių stiprintuvų grįžtamo ryšio elementai. Tuomet sudėliojami likę komponentai.



Antroji plokštė (pagrindinė plokštė) taip pat dvipusė. Diferencialinių (simetriniai) signalų takeliai ištrasuoti kuo arčiau vienas kito, kad būtų gaunamas kuo mažesnis kontūras, kuriuo teka srovė. „Žemių“ atskyrimui naudojamas 47 pF kondensatorius.



37 pav. Pagrindinė plokštė

### 2.1.1.11. Pasyvinių komponentų parinkimas

Norint jog schema veiktų taip kaip buvo suplanuota yra svarbu tinkamai parinkti pasyvinius komponentus. Skirtingomis technologijomis pagaminti rezistoriai turės tokius pat šiluminius tirukšmus, tačiau generuos skirtingus srovės triukšmus. Srovės triukšmai matuojami mikrovoltais/voltui. Triukšmų indeksas (TI) išreiškiamas decibelais naudojantis 2.18 formule [42 p.2]:

$$TI_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{triukšmų įtampa}}{\text{nuolatinė įtampa}} \right) \quad (2.18)$$

Jei rezistoriaus tirukšmų indeksas 0 dB, tuomet jis generuos 1  $\mu\text{V}$  triukšmų esant 1 V signalui. Jei indeksas -40 dB bus generuojama 0,01  $\mu\text{V/V}$  triukšmų įtampa. Triukšmingiausi yra angliniai rezistoriai, sukuriantys nuo -12 dB iki +6 dB triukšmų. Mažiausiai triukšmingi yra pagaminti iš vietiso metalo lydinio (-40 dB), tačiau tokie yra labai brangūs.

Analoginio signalo kelyje buvo nuspręsta naudoti „Metal Film“ technologija pagamintus rezistorius (triukšmų indeksas nuo -32 dB iki -16 dB). Šie rezistoriai gaminami užgarinant nikelio chromido sluoksnį ant keraminio pagrindo. Nuo sluoksnio storio, kuris būna nuo 10 iki 500 Angstromų, priklauso rezistoriaus varža. Plonesnis sluoksnis (didesnė varža) sukuria didesnius triukšmus, kadangi labiau pasireiškia sluoksnio netolygumas [42]. Skaitmeninėje dalyje naudojami standartiniai „Thick Film“ rezistoriai, kadangi nėra prasmės naudoti kokybiškus rezistorius.

Plokštėse naudojami elektrolitiniai ir keraminiai kondensatoriai. Elektrolitiniai kondensatoriai pasižymi dideliu nuosekliu induktyvumu (ESL), todėl lygiagrečiai jiems prijungiami nedidelės talpos keraminiai kondensatoriai. Taip sumažinamas parazitinis induktyvumas. Keraminiai kondensatoriai yra skirstomi pagal naudojamą dielektriką. Nuo to priklauso talpumo stabilumas keičiantis įtampai ir temperatūrai. Naudojami X7R ir NPO dielektrikus turintys kondensatoriai. Įdomus dalykas yra tai, jog nuo kondensatoriaus korpuso (pavyzdžiui 0805 ir 1206) priklausys jo impedansas, esant tai pačiai talpai ir dielektrikui.

Tam tikrose schemos vietose kritinis parametras yra komponentų tolerancijos. Analoginiame aktyviniame filtre naudojami rezistoriai, kurių paklaida neviršija  $\pm 0,5\%$  ir kondensatoriai, kurių paklaida neviršija  $\pm 5\%$ . Kita schemos kritinė dalis yra ADC buferio grįžtamo ryšio rezistoriai (R5 ir R6), nuo kurių priklausys nuolatinė dedamoji tarp simetrinių signalų. Parenkami  $\pm 0,1\%$  tikslumo rezistoriai.

### **2.1.2. Programuojama loginė matrica**

Programuojama loginė matrica FPGA (*angl. Field Programmable Gate Array*) atlieka tris funkcijas: duomenų nuskaitymas iš ADC, skaitmeninis filtras su decimacija (diskretizavimo dažnio mažinimas išmetant kas tam tikrą išranką) ir duomenų perdavimas mikrovaldikliui. Duomenų nuskaitymo iš ADC negalima atlikti naudojantis mikrovaldikliu, kadangi magistralės dažnis siekia 300 MHz (kai diskretizavimo sparta 15 MSps). Tai pat duomenys perduodami LVDS sąsaja, kurios turimas mikrovaldiklis nepalaiko. Skaitmeninis filtras taip pat negali veikti mikrovaldiklyje, kadangi neužtenka skaičiavimo našumo. Iš pradžių buvo norima atsisakyti mikrovaldiklio plokštės ir duomenis į SD kortelę įrašyti tiesiai iš FPGA. Tačiau neužteko laiko tam atlikti ir duomenis į ją įrašo mikrovaldiklis.

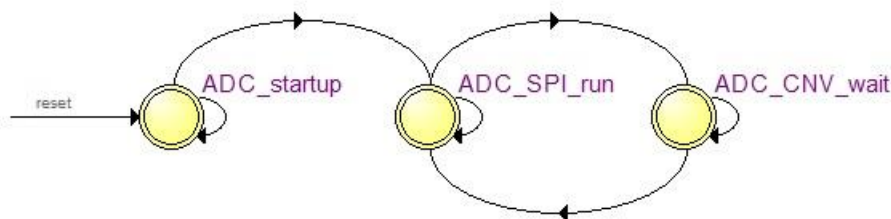
#### **2.1.2.1. FPGA programavimas**

Kadangi naudojama „Altera“ firmos programuojama loginė matrica „Cyclone V“, projekto sintezė vyksta „Quartus“ programiniame pakete. Iš pradžių parašomas kodas VHDL kalba „Modelsim“ programiniame pakete. Atliekama kodo kompiliacija ir laikinė analizė. Jeigu viskas veikia taip kaip buvo numatyta, tuomet failas keliamas į „Quartus“ programinę aplinką. Pagal VHDL kodą sukuriamas blokinis simbolis, prie kurio prijungiami norimi loginės matricos prievadai. Taip pat sukonfigūruojami žiediniai osciliatoriai ar kita loginėje matricoje esanti periferija. Galiausiai visas projektas sintezuojamas, patikrinama laikinė charakteristika ir gaunamas konfigūracinis failas, kuris įrašomas į matricą.



38 pav. Laikinė signalų analizė

Pavyzdyje pateiktas duomenų nuskaitymas iš ADC ir jų išsiuntimas mikrovaldikliui SPI sąsaja. ADC duomenis perduoda dviem magistralėmis (dvi duomenų linijos), o sinchronizacija vyksta ties teigiamu ir neigiamu taktavimo signalo frontais. Kadangi pirmus 2 taktus ADC nesiuočia duomenų, sąsaja buvo programuojama naudojant būsenos mašiną SM (*angl. State Machine*).



39 pav. Būsenos mašina duomenų iš ADC nuskaitymui

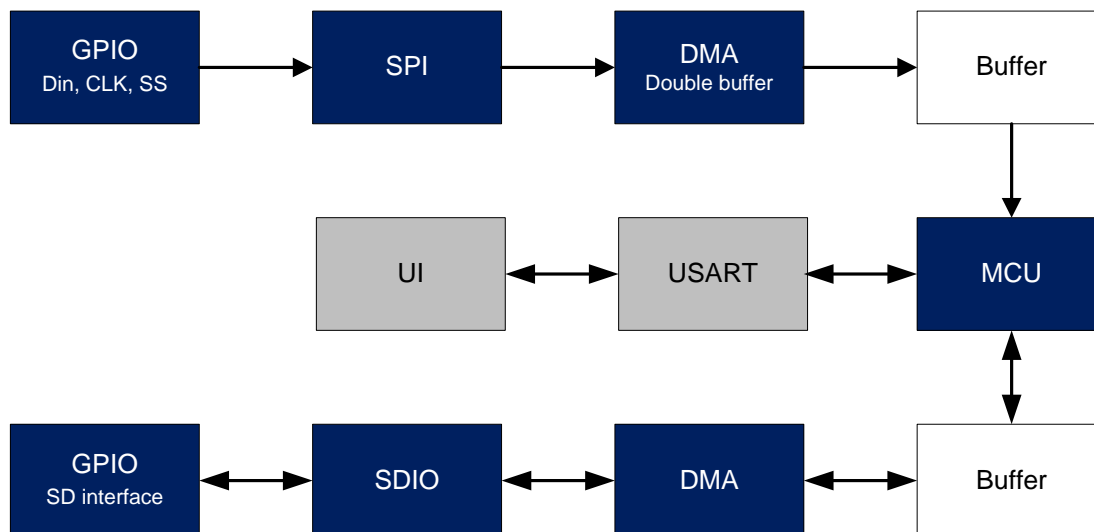
Būsenos mašina leidžia turėti panašią programą, kuri būtų mikrovaldiklyje. Pagal prieš tai buvusią būseną ir dabartinę parenkama būsima būsena. Kaip galima matyti 39 pavyzdyje, po „reset“ įvykio pereinama į „ADC\_startup“ būseną, kurios metu iš keitiklio nuskaitomi duomenys (tris keitimo ciklus). Po to pereinama į darbinį režimą, kurio dalį laukiama, kol nauji duomenys bus paruošti. Intervalai skaičiuojami naudojant skaitliuką. Nuskaičius duomenis iš ADC suformuojamas signalas, jog duomenys paruošti, ir kiti blokai gali juos nuskaityti.

### 2.1.3. Mikrovaldiklis

Sistemai buvo panaudotas „ST Microelectronics“ mikrovaldiklis „STM32F4“. Šį pasirinkimą lėmė tai, jog „ST Microelectronics“ mikrovaldikliai turi gerai parašytas bibliotekas. Dėl to galima pakankamai nesunkiai sukongfigūruoti reikalingus periferijos mazgus, ir jie beveik visada veikia taip kaip turėtų. Taip pat nesunkiai galima „pernešti“ kodą į kitas ARM šeimas su nedideliais pakeitimais (gali nežymiai skirtis periferijos mazgai, žemesnės pakopos mikrovaldikliai dažniausiai turi apribotą periferiją). Tai yra labai patogu jei, pavyzdžiui,

nepakanka naudojamo mikrovaldiklio skaičiavimo spartos arba priešingai – projektui pakanka mažesnės spartos mikrovaldiklio. Dar vienas privalumas yra SD kortelės sąsaja. Dalis prievadų yra skirti dirbti su šia laikmena, taip pat parašyta SDIO sąsajos biblioteka, kurią pasitelkus galima siųsti ir priimti komandas bei duomenis.

Mikrovaldiklio konfigūravimo schema, naudojama darbe, pateikta 40 pavyzdyje.



**40 pav.** Mikrovaldiklio periferijos konfigūravimas

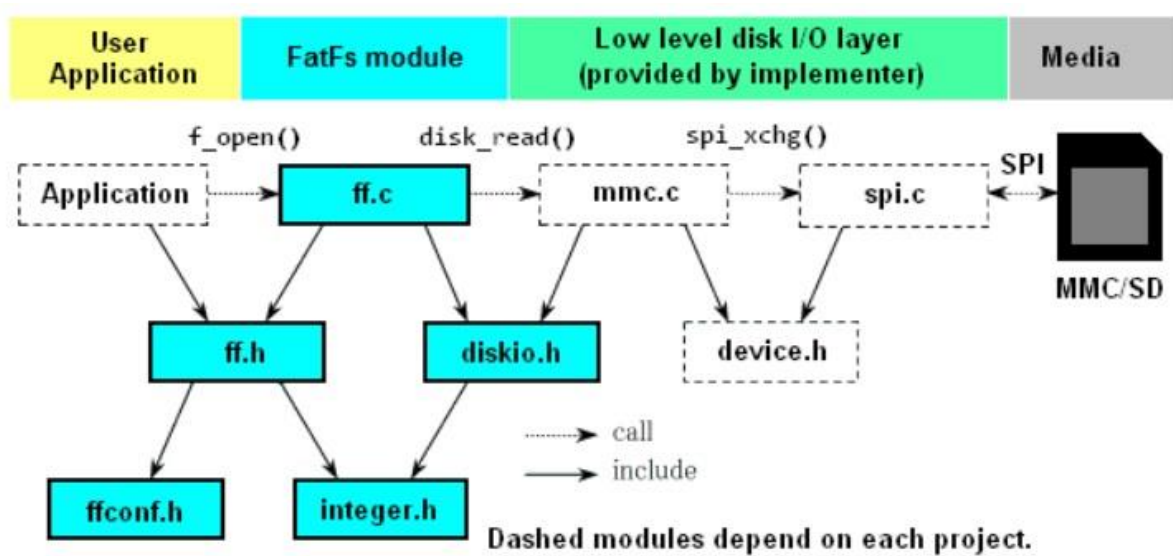
Signalai iš FPGA perduodami į SPI periferijos mazgą. Toliau gauti duomenys siunčiami tiesioginių mainų kanalu (DMA) į vieną iš dviejų buferių (gali būti interpretuojami kaip keturi). Kai užpildomas vienas iš buferių formuojama pertrauktis ir duomenys nukopijuojami į papildomą laikiną buferį. Kadangi naudojamas DMA kanalas, gaunamas lygiagretus procesų veikimas (gaunant duomenis SPI sąsaja MCU gali atlikti kitus veiksmus, pavyzdžiui, nukopijuoti duomenis). Toliau laikiname buferyje esantys duomenys kitu DMA kanalu perduodami SDIO sąsajai ir jos pagalba įrašomi į SD kortelę. Dvigubos rodyklės reiškia, jog duomenys gali būti ir nuskaitomi.

Pilki blokeliai nėra būtini – jie skirti kai reikalingas nustatymų perdavimas į mikrovaldiklį, tarkime, naujo failo sukūrimas ar rašymo į kortelę pradžia ar pabaiga.

### 2.1.3.1. Failų sistema

FAT (*angl. File Allocation Table*) yra „Windows“ platformoje naudojama failų lentelė, kurioje saugoma informacija apie įrašytus failus (jų pradžios ir pabaigos adresai, pavadinimai ir pan.). Jei failai įrašomi naudojant šį formatą į SD kortelę, kompiuteris juos atpažįsta ir failai yra matomi. Failų sistema gali būti FAT12, FAT16, FAT32. Skirtumai tarp jų yra didžiausias leidžiamas naudoti failo dydis. Naudota FAT16 sistema leidžia įrašyti iki 4 GB vientisą įrašą.

Failų sistemos biblioteka yra laisvai prieinama internete (FatFs) ir yra nemokama nekomerciniam naudojimui. Tipinė įterptinės sistemos konfigūracija naudojant šią sistemą pateikta 41 pav.



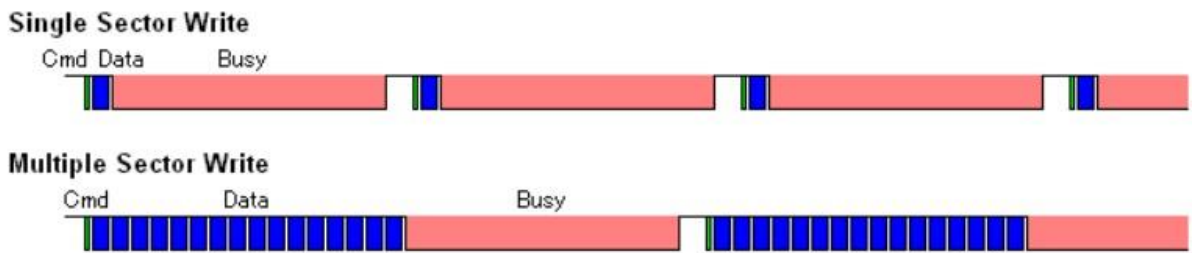
41 pav. Failų sistemos veikimo struktūra [14]

Vartotojo funkcijos (pvz. `f_read`) kreipiasi į pagrindinį failų sistemos modulį. Tuomet naudojamos „klijuojančios“ funkcijos, kurias pasitelkus pasiekiamas „ST Microelectornics“ funkcijų blokas. Tai tiesiog grupė funkcijų, kurios kreipiasi į SDIO sąsajos biblioteką, ir jų pagalba vyksta duomenų bei komandų priėmimas ir perdavimas. Taigi tai 5 pakopų sistema tarp vartotojo ir SD kortelės:

Komanda => FatFs => Diskio (klijuojančios funkcijos) => SDIO funkcijų blokas => SDIO biblioteka => SD kortelė.

Iš pradžių vyksta kortelės nuskaitymas. Informacija perduodama SPI sąsaja 400 kHz dažniu. Jei kortelė yra specifiukuota didesniai greičiui, sąsaja yra perjungiamą į 4 bitų, kurios sinchronizavimo dažnis 24 MHz. Tačiau šios spartos neužteko ir mikrovadiklio SDIO periferijos taktavimo dažnis buvo padidintas iki 42 MHz. Norint užtikrinti kuo didesnę duomenų perdavimo spartą į kortelę, reikia rašyti kuo didesniais sektoriais. Taip pat iš pradžių galima užimti norimą vietą kortelėje (prognozuojamas įrašo ilgis su atsarga) ir baigus įrašą atnaujinti failų lentelę pagal realų įrašo ilgį. Tai leidžia kas kartą neatnaujinti failų lentelės, sumažinti paruošiamų prieš rašymą komandų skaičių ir padidinti rašymo spartą.





**42 pav.** Rašymas didesniais sektoriais leidžia pasiekti didesnę duomenų perdavimo spartą [14]

## 2.2. Matavimo metodų apžvalga bei matavimo proceso modeliavimas

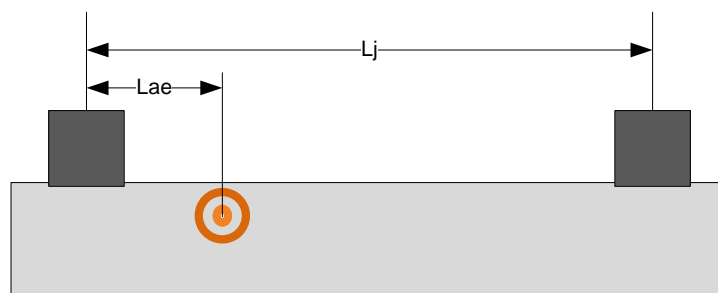
Pagal naudojamą sistemą ir jos konfigūraciją akustinė emisija gali būti matuojama keturiais metodais. Matavimo proceso modeliavimo rezultatai naudingi apdorojant išmatuotus signalus (kuriant skaitmeninius filtrus).

### 2.2.1. Matavimo metodai

Akustinė emisija gali būti matuojama keturiais metodais:

- 1) tiesinis aptikimas;
- 2) zoninis aptikimas;
- 3) koreliacijos panaudojimas;
- 4) vieno jutiklio sistema signalų parametrų matavimui.

Tiesinio aptikimo metode skaičiuojamas signalo atsklidimo laiko skirtumas tarp dviejų jutiklių. Žinant akustinių bangų sklidimo greitį medžiagoje galima apskaičiuoti, koku atstumu įvyko akustinė emisija [43 p.23].



**43 pav.** Tiesinis akustinės emisijos aptikimas

Atstumas, iki AE įvykio gali būti apskaičiuotas naudojantis formule:

$$Lae = \frac{1}{2}(Lj - \Delta T \cdot v) \quad (2.19)$$

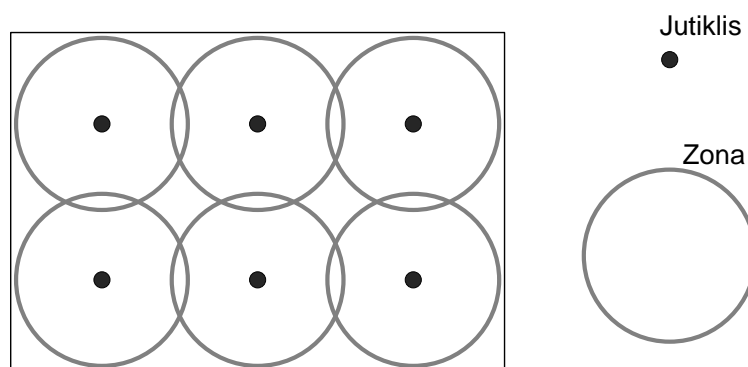
čia:  $L_j$  – atstumas tarp akustinės emisijos jutiklių;  $v$  – garso sklidimo greitis medžiagoje;  
 $L_{ae}$  – atstumas iki akustinės emisijos šaltinio.

Garso sklidimo greitis medžiagoje gali būti nustatytas sugeneruojant signalus dviem skirtingais žinomais atstumais nuo jutiklių. Svarbu nepamiršti, jog skersai ir išilgai sklindančių akustinių bangų greitis skiriasi. Tam tikrų medžiagų teoriniai sklidimo greičiai pateikti 5 lentelėje.

**5. lentelė.** Garso greitis skirtingose medžiagose

Medžiaga	Garso greitis, m/s	Garso greitis skersai, m/s	Garso greitis išilgai, m/s
Guma	60		
Oras 40 °C	355		
Oras 20 °C	343		
Švinas	1210		
Varis	4600		
Aliuminis	6000	3100	6300
Plienas	5000	3000	5700

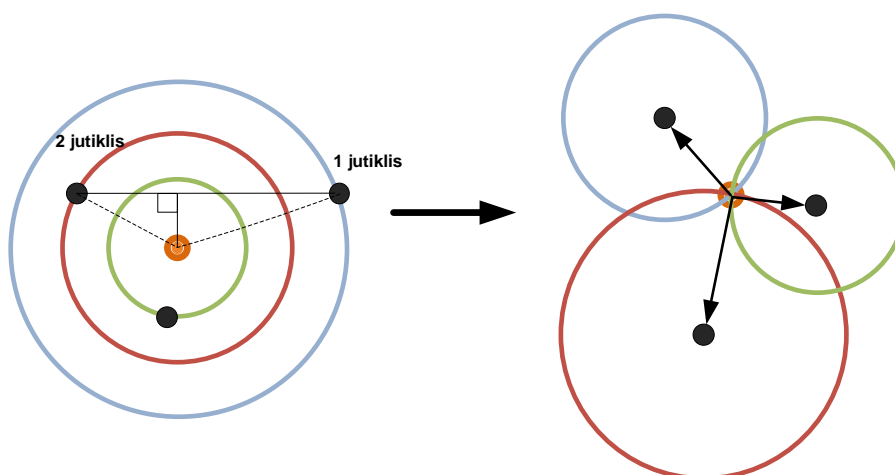
Zoninio aptikimo metu naudojamas jutiklių masyvas. Tokiu būdu kiekvienam jutikliui yra priskiriama tam tikra zona. Zonos gali būti vienos dimensijos (tiesė), dviejų dimensijų (plotas) arba trijų dimensijų (tūris). Signalo amplitudė bus didžiausia toje zonoje, kurioje įvyko akustinė emisija. Panaudojant signalus iš netoli esančių jutiklių galima patikslinti AE šaltinio vietą (remiantis signalo vėlinimu ir slopinimu). Zoninio aptikimo pavyzdys pateiktas 44 pav. [43 p.26]



**44 pav.** Zoninis aptikimas naudojant AE jutiklių masyvą

Koreliacinis aptikimas. Tai pats sudėtingiausias metodas, kuriam būtina naudoti tris arba daugiau tarpusavyje sinchronizuotų AE jutiklių. Koreliacija atliekama tarp skirtingose vietose esančių jutiklių užfiksuotų signalų, randant AE signalo užfiksavimo laiko skirtumus tarp jų. Laiko skirtumas tarp pirmo ir antro jutiklio lygus atstumų skirtumui iki AE šaltinio (atstumas nuo pirmo jutiklio iki AE šaltinio atėmus atstumą nuo antro AE jutiklio iki AE šaltinio). Žinant

atstumą tarp pirmo ir antro jutiklio, ir naudojantis trigonometrijos formulėmis bei Pitagoro teorema, galima apskaičiuoti atstumą iki AE šaltinio [43 p.24].



**45 pav.** Atstumo radimas iki AE šaltinio, žinant atstumus tarp jutiklių ir signalo priėmimo laiko skirtumą

Koreliacija tarp signalų skaičiuojama vieną signalą stumiant laiko ašyje kito atžvilgiu. Kiekvieno pastūmimo metu (laiko momentu) abu signalai yra sudauginami (dauginant tuo laiko momentu sutampančias išrankas) ir visos sandaugos sudedamos. Tokiu būdu gaunama koreliacinė funkcija kiekvieno pastūmimo metu, kurios maksimali reikšmė reiškia, jog taip pastumti signalai yra panašiausi vienas į kitą. Žinant per kiek išrankų (laiko vienetų) tuo metu yra pastumtas vienas iš signalų, galima apskaičiuoti ir signalo priėmimo laiko skirtumą tarp jutiklių.

Naudojant vieną jutiklį galima pasakyti kokio tipo akustinė emisija įvyko (su tam tikra tikimybe). Jeigu akustinės emisijos metu stipriai deformuojamas objektas (tarkime, sudaužomas stiklas), galima nustatyti medžiagos sudedamąsias dalis (su tam tikra tikimybe ir jei bus pakankamai informacijos duomenų bazėje). Tačiau nubus galima nustatyti AE šaltinio vietos.

### 2.2.2. Matavimo proceso modeliavimas

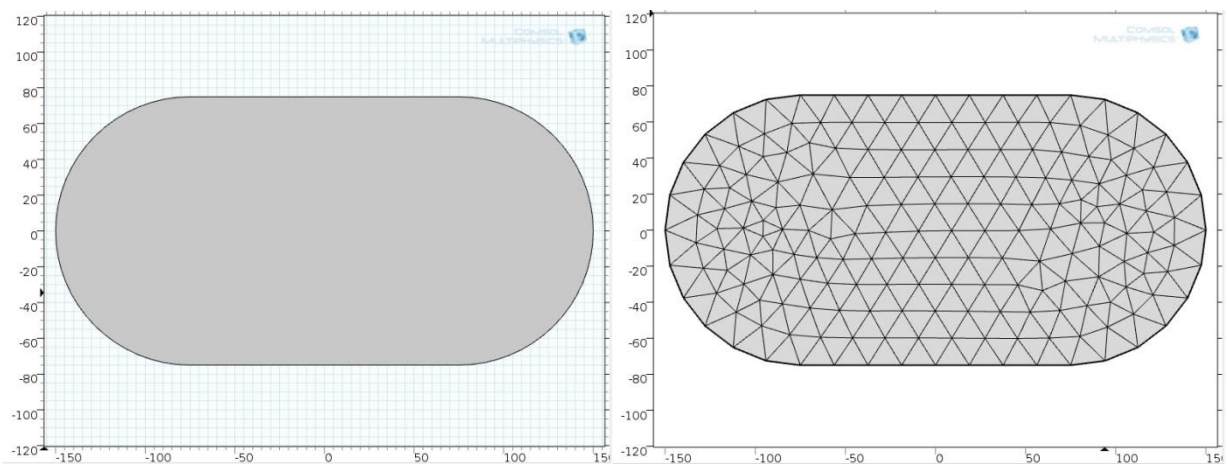
Matavimo modeliavimas atliekamas naudojant „Comsol Multiphysics“ programinį paketą. Modeliavimas vyksta naudojant baigtinių elementų metodą. Jo metu objektas padalinamas į ribotą skaičių elementų, kuriuose laikoma, jog parametrai nekinta. Modeliavimą sudaro 6 pagrindiniai etapai:

- geometrinis modelis;
- medžiagos parinkimas;
- fizikinio modelio parinkimas/nustatymai;
- baigtinių elementų tinklelio sudarymas;
- funkcijų skaičiavimas;

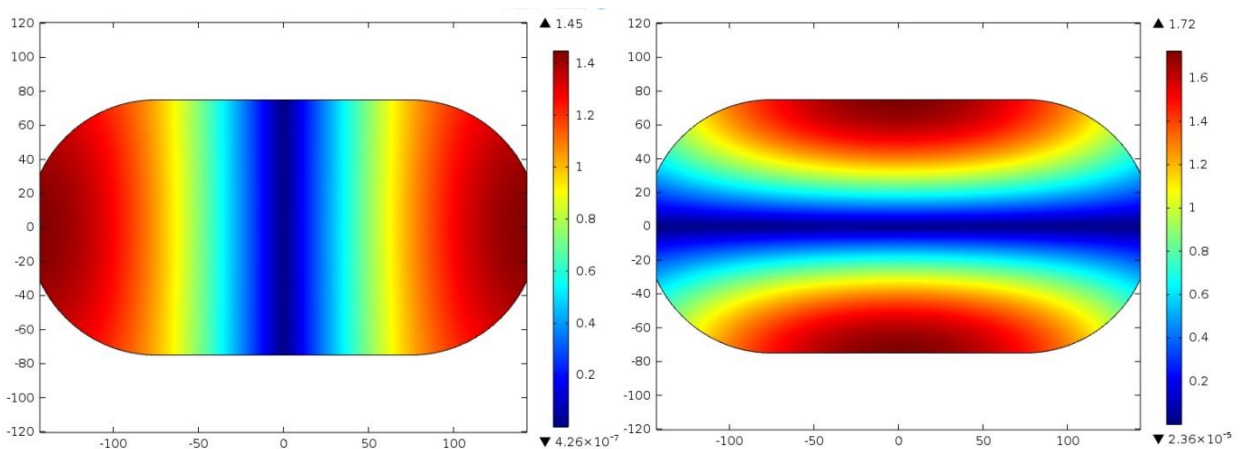
- rezultatų atvaizdavimas.

Bendras akustinės emisijos modelis yra labai sudėtingas. Jį turėtų sudaryti keli atskiri modeliai – kūno deformavimo, kuomet įvyktų kūno plastinė ar kita deformacija. Kitas modelis turėtų būti akustikos, kuris nagrinėtų, kaip sklinda akustinės bangos. Visa tai stipriai apsunkina modeliavimą. Dėl šios priežasties pasirinktas tik modų modeliavimas. Modos – tai stovinčios bangos, kurių dažnį lemia tiriamo objekto geometriniai matmenys ir garso greitis jame. Dėl modų prie tam tikrų dažnių bus iškraipomi signalai. Kiek jie bus iškraipyti priklausys nuo modos dažnio ir jutiklio pozicijos objekto paviršiuje. Objekto geometrinis modelis ir baigtinių elementų tinklas pateiktas 46 pav.

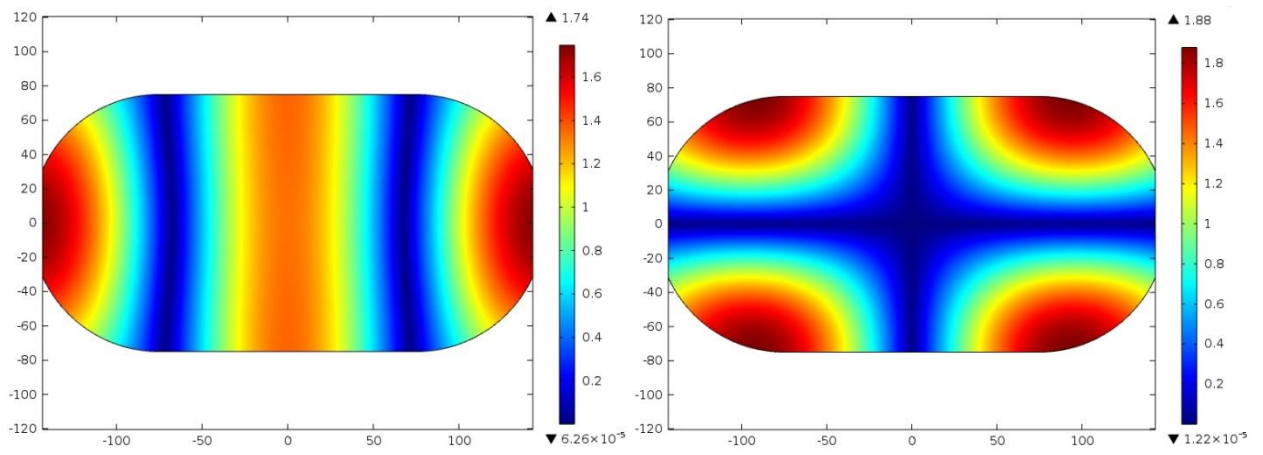
Baigtinių elementų tinklas parenkamas grubus norint, kad skaičiavimai būtų atlikti greitai. Objekto matmenys: ilgis 30 cm; plotis 15cm. Medžiaga – aliuminis, kuriame garso greitis 5000 m/s.



**46 pav.** Modeliuojamo objekto geometrinis modelis kairėje; baigtinių elementų tinklas dešinėje



**47 pav.** Pirmą modą kairėje (9,256 kHz); antrą dešinėje (17,623 kHz)

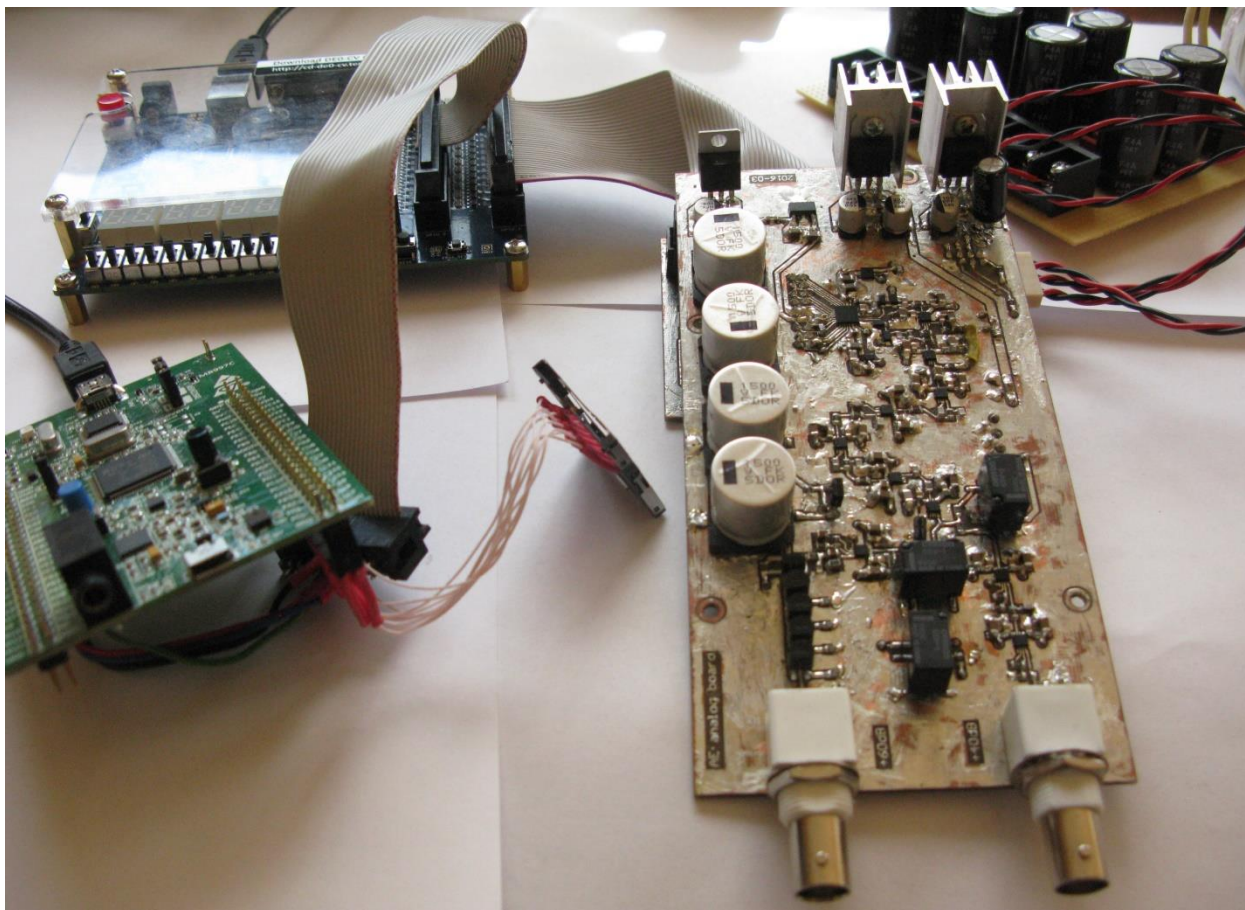


**48 pav.** Trečia moda kairėje (18,06 kHz); ketvirta dešinėje (21,376 kHz)

Tai tik pirmos keturios modos, tačiau jų skaičius yra begalinis. Iš grafikų galima matyti, jog aukštesnio dažnio modos turi daugiau energijos. Šią informaciją galima pritaikyti apdorojant AE duomenis.

### 3. TIRIAMOJI DALIS

Tiriamajoje dalyje išmatuojami sistemos parametrai, atliekami sistemos pakeitimai, analizuojami neatitikimai su gautais simuliacijos rezultatais. Surinkta sistema, naudojama matavimams atlikti pavaizduota 49 pav.



49 pav. AE matavimo sistema

#### 3.1. Sistemos tyrimas

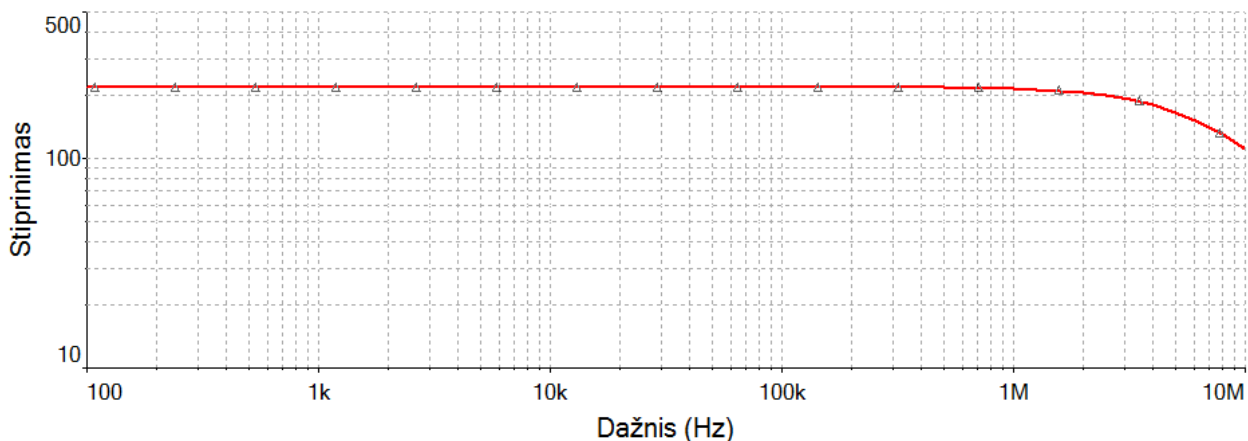
Metodinėje dalyje buvo simuliuojama imtuvo schema, sudaryta iš dviejų stiprintuvų, analoginio filtro ir ADC įėjimo buferio. Simuliacijos ir skaičiavimų metu gauti parametrai išmatuojami praktiškai. Matuojamas stiprintuvų stiprinimas, dažnių juosta, triukšmai, triukšmų spektras bei iškraipymai. Taip pat tiriama analoginio filtro dažnių juosta, išmatuojama ADC buferio išėjime esanti nuolatinė dedamoji, kokią įtaka spektrui daro FPGA ir analoginės plokštės „žemių“ atrišimas, feritų panaudojimas signalo šaltinio ir analoginės plokštės atrišimui. Sistema testuojama prie skirtingų taktavimo dažnių ir atliekami jos pakeitimai. Galiausiai atliekamas akustinės emisijos matavimas, laužant grafito lazdelę ir apskaičiuojami AE signalo parametrai.

##### 3.1.1. Stiprintuvų dažninių charakteristikų ir triukšmų tyrimas

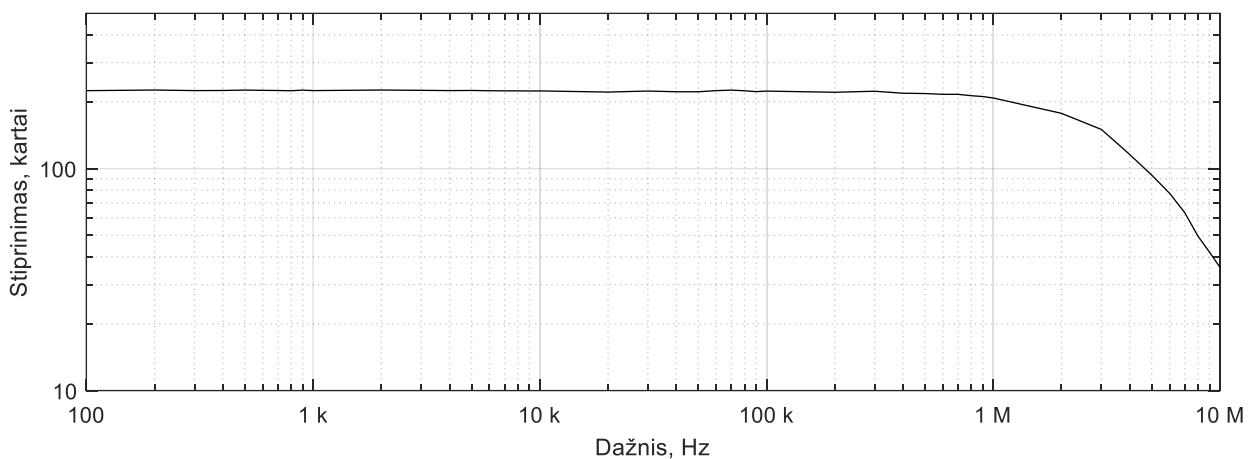
Kiekvienam iš stiprintuvų išmatuojama dažnių juosta ir triukšmai. Dažnių juostos tyrimui naudojamas sinusinis signalas iš generatoriaus ir osciloskopas, kuriame įjungta vidurkinimo

funkcija, jog triukšmai darytų kuo mažesnę įtaką. Osciloskope matuojama generatoriaus ir stiprintuvo išėjimo įtampos. Pagal santykį tarp šių įtampų apskaičiuojamas stiprinimas prie tam tikro dažnio. Šio jungimo privalumai: matoma, kokia reali įtampa tenka stiprintuvui prie tam tikros apkrovos, kompensuojamas juostos netolygumas generatoriuje, eliminuojama kebelių įtaka (kadangi naudojami tokie patys kabeliai, slopinimas esant aukštiems dažniams turėtų būti identiškas). Triukšmai matuojami kai įėjimo impedansas  $100\ \Omega$  ir  $1\ k\Omega$ .

### 3.1.1.1. Stiprintuvo iš operacinių stiprintuvų tyrimas

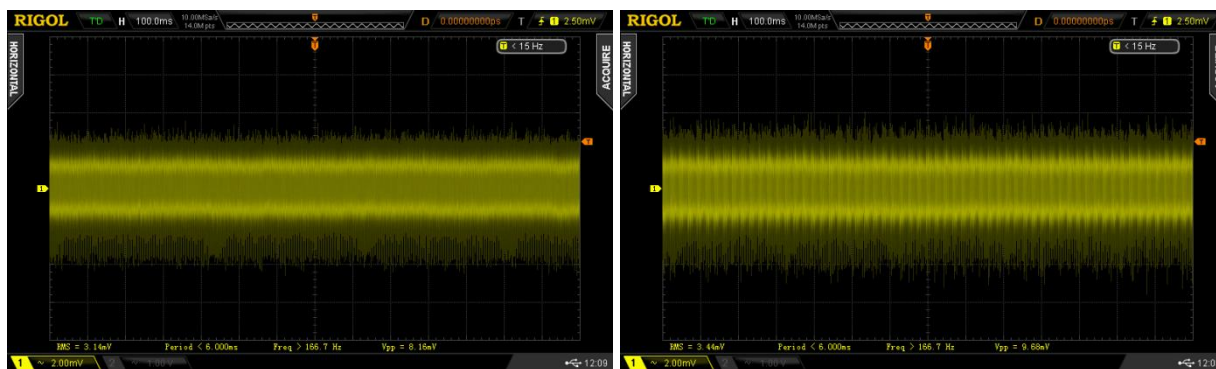


50 pav. Gauta ADCH simuliacijos metu



51 pav. Išmatuota stiprintuvo ADCH.

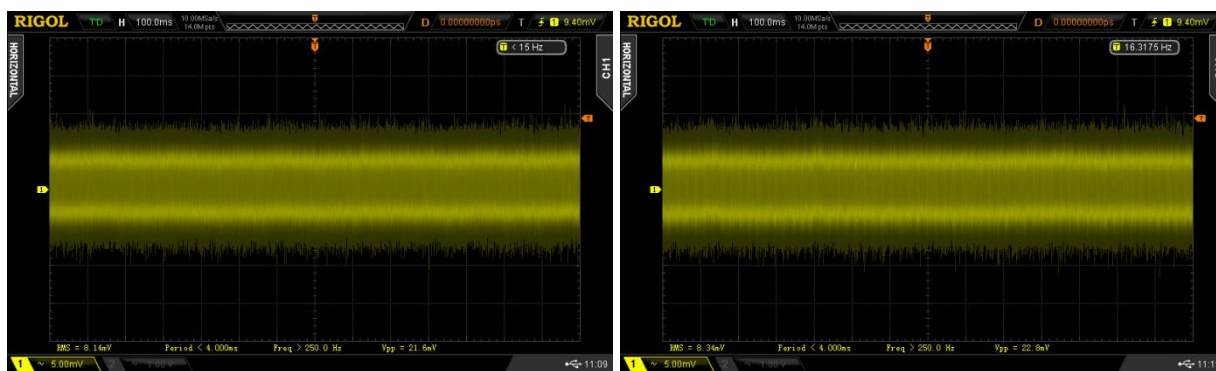
Praktiškai realizuoto stiprintuvo  $-3\ dB$  lygis (pagal įtampą) yra  $\sim 2,5\ MHz$ . Simuliacijos metu gauta vertė yra  $\sim 6\ MHz$ . Stiprintuvo triukšmai matuojami kai jo įėjimas paliekamas atviras.



**52 pav.** Kairėje – stiprintuvo triukšmai kai FPGA matrica išjungta; dešinėje – kai FPGA matrica įjungta (įėjimo impedansas 100 Ω)

Triukšmų matavimui įtaką daro ne tik tai, ar FPGA matrica įjungta ar išjungta, tačiau ir kompiuteryje veikiantis bevielis ryšys, ar prie kompiuterio prijungtas USB atmintukas, ir kiti faktoriai. Todėl objektyviai išmatuoti triukšmus yra sudėtinga. Kai išjungtas kompiuterio WiFi, kompiuteris maitinamas iš baterijos, prie tinklo nėra prijungtų maitinimo šaltinių (išskyrus osciloskopą), stiprintuvo maitinimas išjungtas, tačiau jo išėjime išmatuota ~770  $\mu$ Vrms triukšmų įtampa.

Gauti stiprintuvo triukšmai siekia 3,14 mVrms, tuo tarpu modeliuojat gaunama ~ 0,94 mVrms triukšmų įtampa dažnių juostoje nuo 1 Hz iki 8 MHz (tokia osciloskopo jungiamųjų kabelių (RP 3300) juosta esant daliklio nustatymui 1X). Esant juostai 1 MHz triukšmai pagal simuliacijos rezultatus turėtų nukristi iki 400  $\mu$ Vrms.



**53 pav.** Kairėje – stiprintuvo triukšmai kai FPGA matrica išjungta; dešinėje – kai FPGA matrica įjungta (įėjimo impedansas 1 kΩ)

Kai įėjimo impedansas 1 kΩ, simuliacijos metu gauti triukšmai juostoje 1 Hz – 8MHz yra 2,5 mVrms, išmatuoti triukšmai 8,14 mVrms. Veikiant ir FPGA matricai triukšmų įtampa siekia 8,34 mVrms. Sujungus FPGA ir analoginės plokštės „žemes“ triukšmų įtampa padidėja nuo 8,34 mVrms iki 8,5 mVrms.

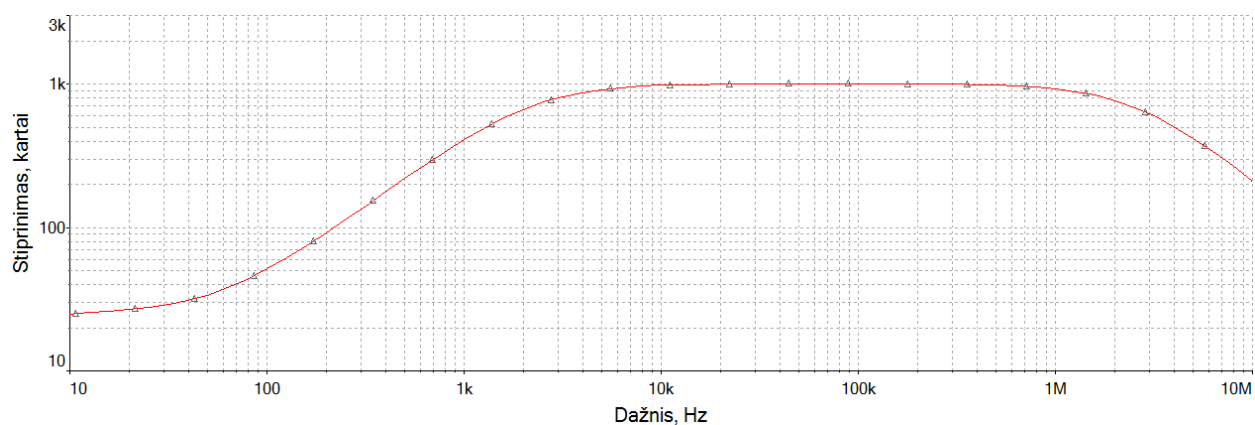


6. lentelė. Simuliacijos metu gautų ir išmatuotų parametų palyginimas

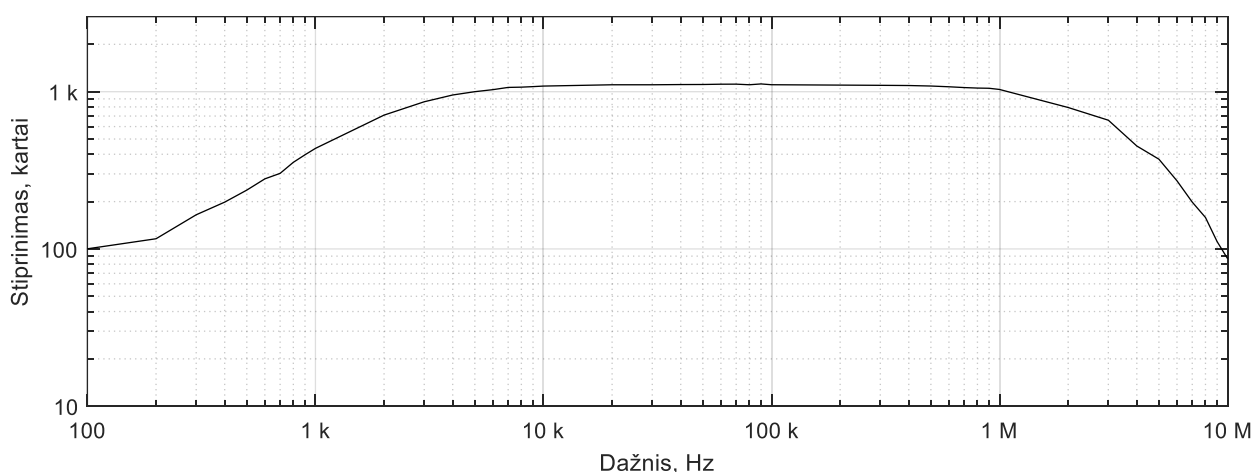
Parametrai	Teorinė	Išmatuota	Skirtumas, kartais
Dažnių juosta -3 dB, MHz	6	2,5	0,42
Stiprinimas, dB	46,84	46,86	1,00
Triukšmai ( $R_{in} = 100 \Omega$ ), mV	0,94	3,14	3,34
Triukšmai ( $R_{in} = 1 \text{ k}\Omega$ ), mV	2,5	8,14	3,26
Triukšmai išmatuoti, perskaičiuojant vienetiniam stiprinimui ( $R_{in} = 100 \Omega$ ), $\mu\text{V}$	4,28	14,25	3,33
Triukšmai išmatuoti, perskaičiuojant vienetiniam stiprinimui ( $R_{in} = 1 \text{ k}\Omega$ ), $\mu\text{V}$	11,37	36,95	3,25

### 3.1.1.2. Stiprintuvo iš diskretinių elementų tyrimas

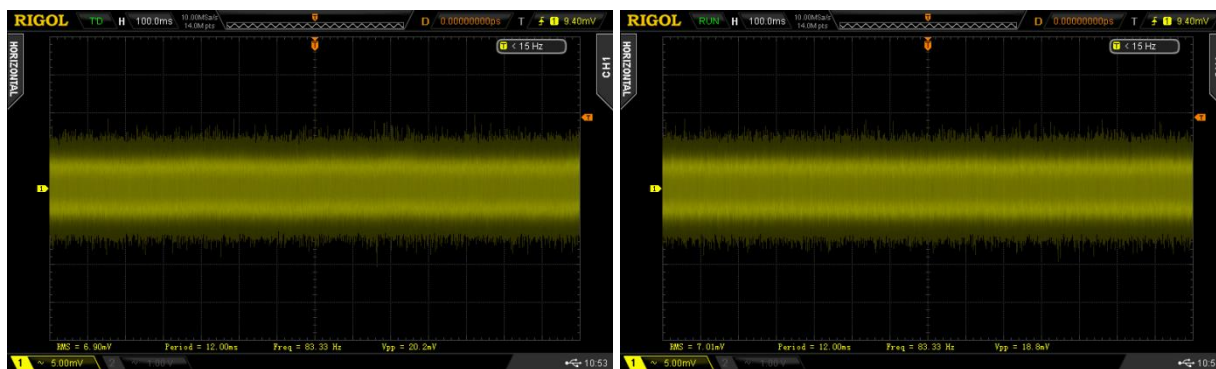
Antrojo stiprintuvo matavimai iš diskretinių elementų ir vieno operacinio stiprintuvo atliekami analogiškai kaip ir prieš tai nagrinėtam pirmajam stiprintuvui.



54 pav. Stiprintuvo teorinė ADCH

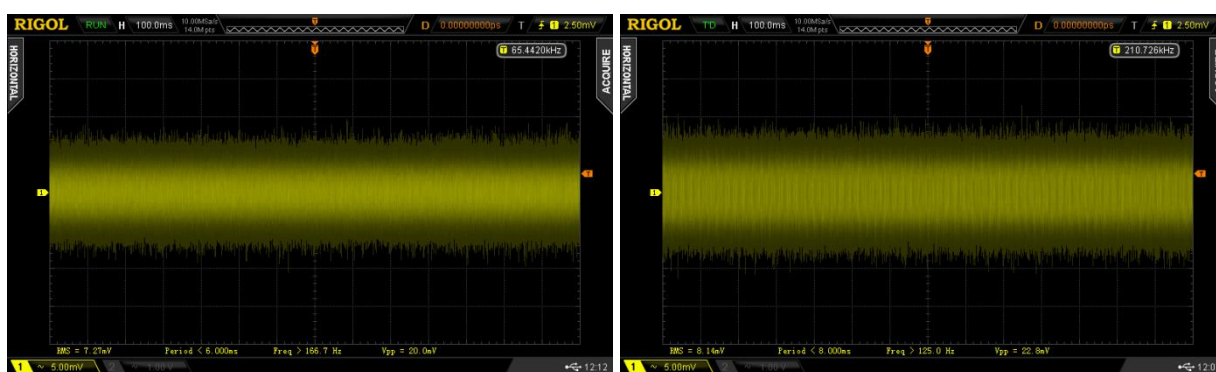


55 pav. Išmatuota stiprintuvo ADCH



**56 pav.** Kairėje – stiprintuvo triukšmai kai FPGA matrica išjungta; dešinėje – kai FPGA matrica įjungta (įėjimo impedansas 100 Ω)

Gauta stiprintuvo triukšmų įtampa apie 6,9 mVrms, simuliacijos metu gauta vertė 1,41 mVrms (dažnių juosta 1 Hz – 8 MHz). Lyginant su stiprintuvu iš operacinių stiprintuvų gautas didesnis neatitikimas, kadangi iš diskretinių elementų surinkta schema yra jautresnė aplinkos triukšmams (tranzistorių kojėlės, signalai teka plokštės takeliais kelis centimetrus). Taip pat šis stiprintuvas turi didesnę stiprinimą (60 dB).



**57 pav.** Kairėje – stiprintuvo triukšmai kai FPGA matrica išjungta; dešinėje – kai FPGA matrica įjungta (įėjimo impedansas 1 kΩ)

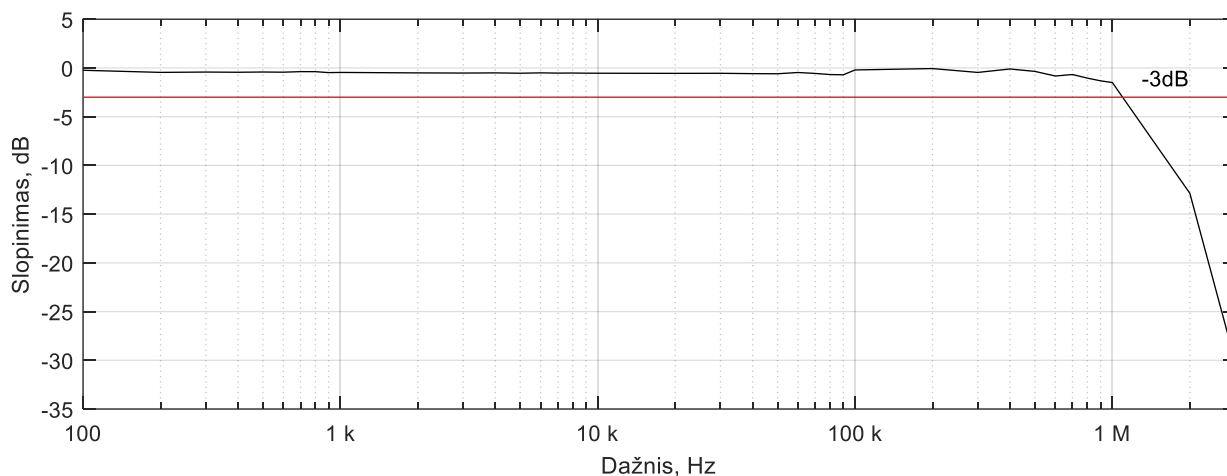
Pagal simuliacijos rezultatus triukšmų įtampa turėtų būti 1,62 mVrms (dažnių juostoje 1 Hz – 8 MHz), tačiau realiai gauti triukšmai siekia 7,27 mVrms.

**7. lentelė.** Simuliacijos metu gautų ir išmatuotų parametų palyginimas

Parametrai	Teorinė	Išmatuota	Skirtumas, kartais
Dažnių juosta -3 dB, MHz	2,7	2	0,74
Stiprinimas, dB	60,00	60,76	1,01
Triukšmai ( $R_{in} = 100 \Omega$ ), mV	1,41	6,9	4,89
Triukšmai ( $R_{in} = 1 k\Omega$ ), mV	1,62	7,27	4,49
Triukšmai, perskaičiuojant vienetiniam stiprinimui ( $R_{in} = 1 k\Omega$ ), $\mu V$	1,41	6,32	4,48
Triukšmai, perskaičiuojant vienetiniam stiprinimui ( $R_{in} = 1 k\Omega$ ), $\mu V$	1,62	6,66	4,11

### 3.1.2. Analoginio filtro ADCH matavimas

Filtro ADCH matuojama signalą perduodant per stiprintuvą iš operacinių stiprintuvų, ir randant skirtumą tarp signalo stiprintuvo ir filtro išėjimuose decibelais. Osciloskope fiksuojama, kokios amplitudės signalas patenka į stiprintuvo įėjimą ir koks yra filtro išėjime.

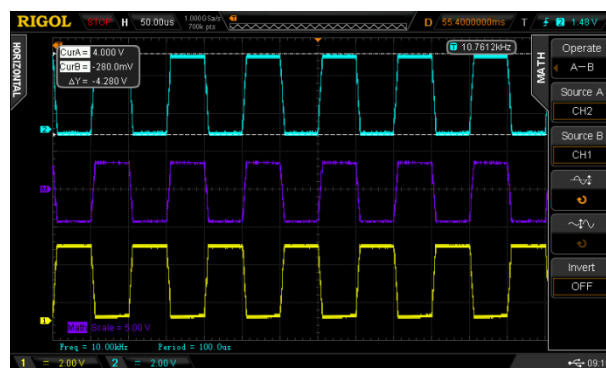
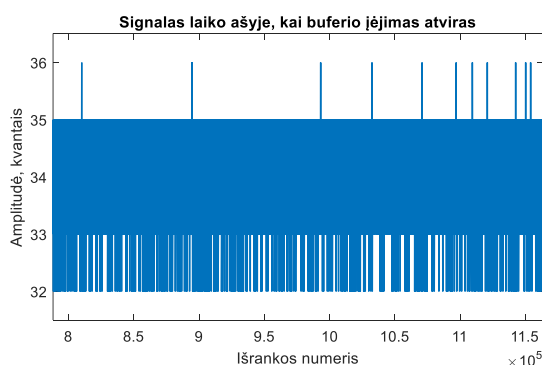


58 pav. Išmatuota filtro ADCH

Filtras slopina signalą dažnių juostoje apie 0,5 dB. Amplitudės svyravimai nuo 60 kHz yra dėl matavimo paklaidų. -3 dB slopinimas pasiekimas ties ~1,1 MHz, prie 2 MHz filtras slopina 13 dB (teorinė vertė -15 dB); prie 3 MHz apie -30 dB (teorinė vertė -40 dB). Matavimų lentelė pateikta prieduose (Priedas 3).

### 3.1.3. ADC keitiklio ir įėjimo buferio tyrimas

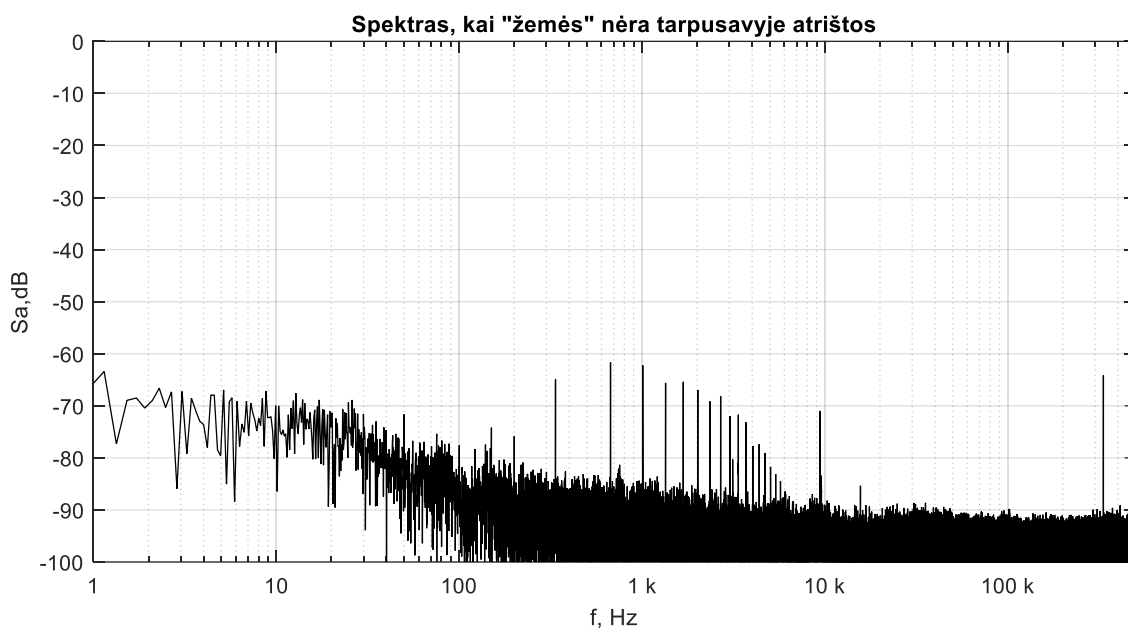
Įėjimo buferis turi tris paskirtis. Prima – ADC įėjime reikalingas diferencialinis signalas, (iš filtro gaunamas nesimetrinis signalas). Antra – ADC įėjime signalas gali įgauti vertes nuo 0 V iki 4,096 V (simetrinis 2,048 V įtampai, iš filtro – simetrinis 0 V atžvilgiu). Galiausiai – viršįtamčio ribojimas (nebūtų viršyta leistina įtampa ADC įėjime).



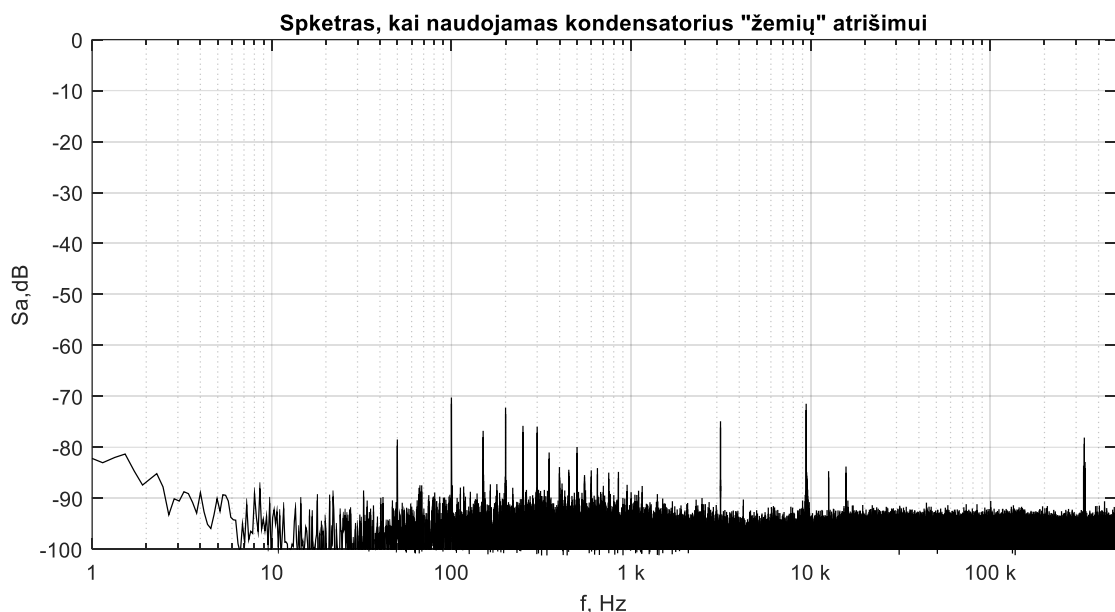
59 pav. Kairėje – nuolatinė dedamoji ADC įėjime kvantais; dešinėje – ADC buferio išėjime ribojamas signalas ir skirtuminė vertė

Nuolatinė dedamoji sudaro 34 kvantų įtampą ADC įėjime. Žinant, jog kvanto vertė yra 125  $\mu$ V, nuolatinės įtampos vertė įėjime 4,25 mV (gauta simuliacijos metu 6,42 mV). Keitiklis

veikia 1 MSps greičiu, nėra naudojamas skaitmeninis filtras ir duomenys tiesiogiai įrašomi per mikrovaldiklį į SD kortelę. Diskretizavimo sparta parinkta tokia, kadangi esant šiom sąlygom visi duomenys be praradimo bus įrašyti į laikmeną. Esant didesnei spartai dalis duomenų gali būti prarasti (dėl nedidelio duomenų buferio mikrovaldiklyje). Matavimo metu įrašomas 10 MB failas, kurį sudaro 5242880 išrankų. Tai atitinka 5,242880 sekundės įrašą. Gaunama skiriamoji geba dažnių srityje atlikus Furje transformaciją:  $1/5,24288 \approx 0,19 \text{ Hz}$ .



**60 pav.** FPGA matricos ir ADC keitiklio plokščių “žemės” tarpusavyje sujungtos

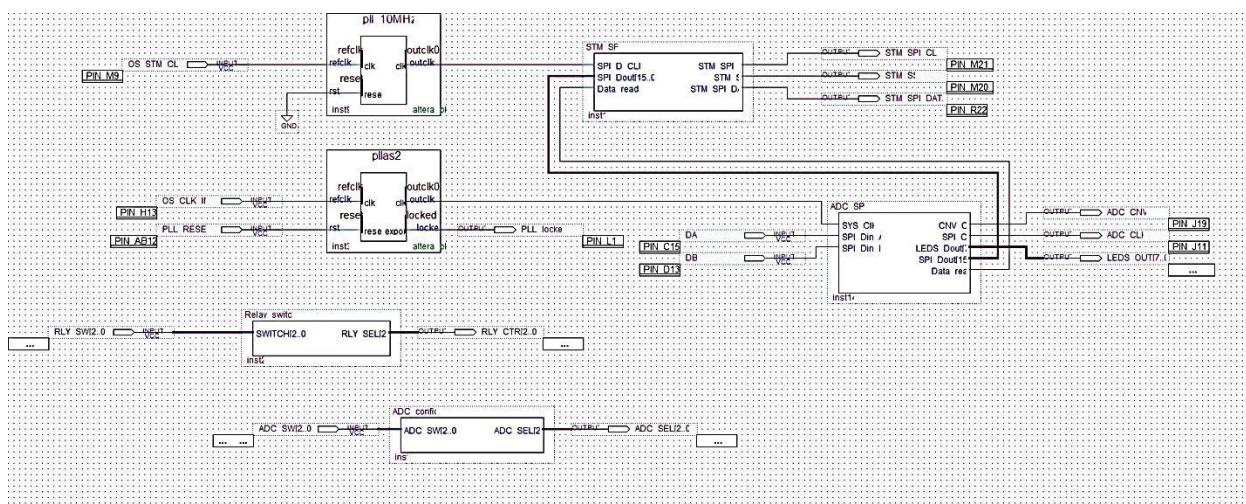


**61 pav.** FPGA matricos ir ADC keitiklio plokščių “žemės” atrištos per 47 pF kondensatorių

Atrišimas per kondensatorių padidina SNR apie 3-4 dB. Ties žemais dažniais (iki 1 kHz) SNR išauga iki 20 dB. Taip pat nelieka kai kurių harmonikų (dalis yra nuslopinama). Gautas dinaminis diapazonas nuo 3 kHz iki 500 kHz siekia ~94 dB ir atitinka keitiklio aprašyme pateiktą informaciją.

### 3.1.4. Sistemos struktūra ir papildomi tyrimai

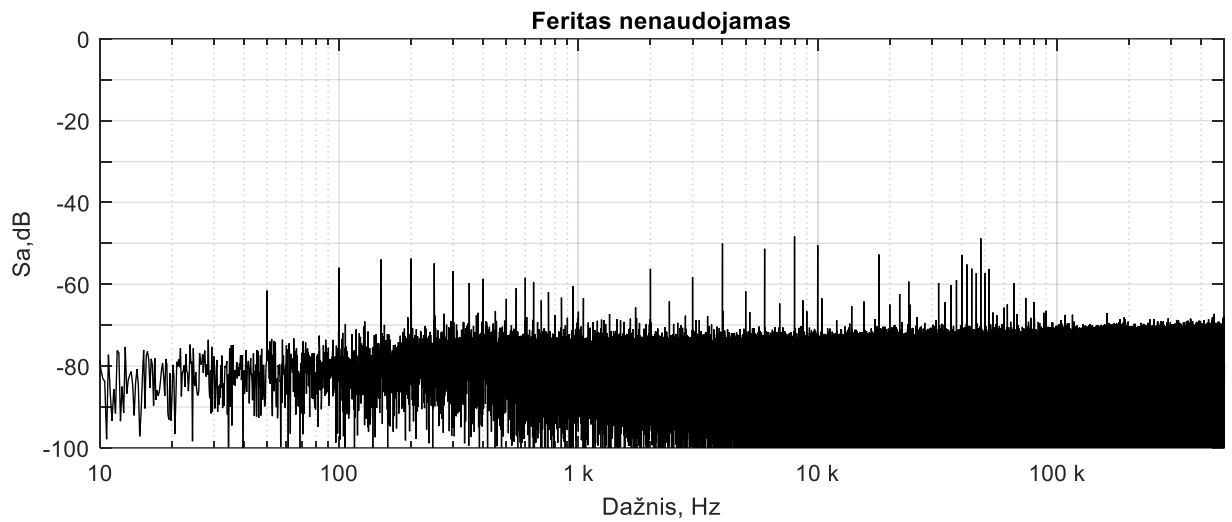
ADC buferio veikimas aptartas kai diskretizavimo sparta 1 MSps ir nenaudojamas skaitmeninis filtras. Šios sistemos struktūra FPGA matricoje pateikta 62 pav. Sistemoje naudojami du žiediniai osciliatoriai, generuojantys taktavimo signalus STM SPI ir ADC SPI blokams, kurie atitinkamai yra prijungti prie mikrovaldiklio ir keitiklio. Kai naudojama 1 MSps sparta, ADC SPI blokas taktuojamas 20 MHz dažniu (šia sparta perduodami duomenys iš keitiklio), STM SPI blokas 50 MHz dažniu (duomenys perduodami 25 MHz dažniu). Jauniausi 8 bitai, gauti iš ADC, tiesiogiai išvedami į šviesos diodus. Schemoje taip pat naudojami 2 blokeliai, valdomi išoriniais jungikliais, skirti ADC darbo režimui pakeisti arba įjungti norimą stiprintuvą ir keisti jo stiprinimą.



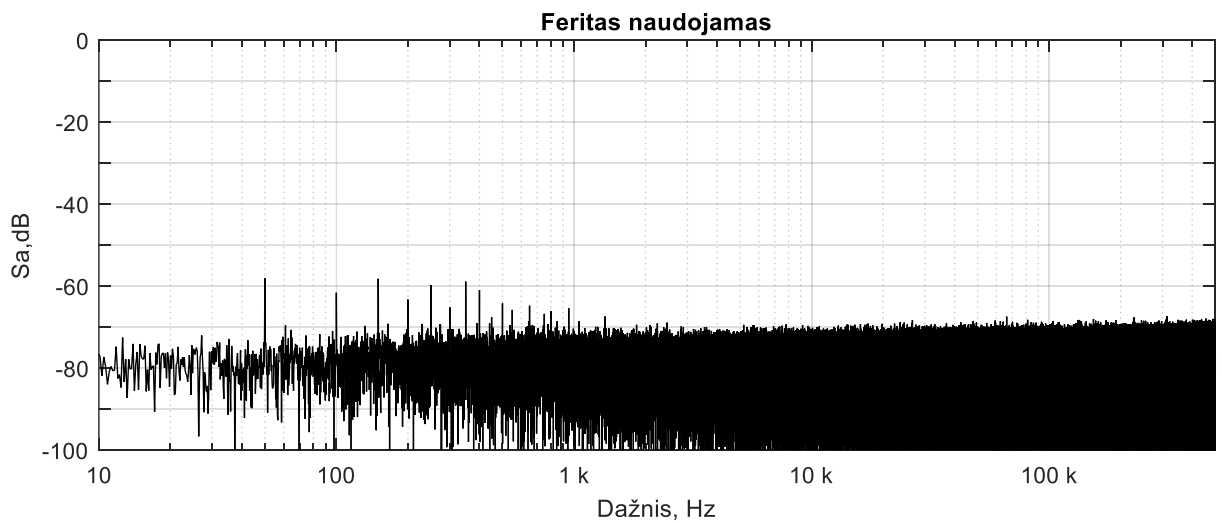
62 pav. Mazgų tarpusavio sujungimas FPGA matricoje

#### 3.1.4.1. Triukšmų spektro matavimas

Viena iš idėjų buvo panaudoti feritą įėjimo „žemėms“ atrišti. Signalas per jungtį įėjime tiesiogiai patenka į operacinio stiprintuvo įėjimą, tačiau įėjimo signalo „žemė“ sujungiama su analogine „žeme“ per feritą, kurio slopinimas prie 100 MHz yra daugiau nei 100 Ω, tačiau prie 1 MHz – mažiau nei 2 Ω. Taigi tokiu būdu gaunamas signalo šaltinio ir analoginės plokštės „žemių“ atrišimas prie aukštų dažnių. 63 ir 64 paveikslėliuose pateiktas spektras signalų, kai naudojamas ir nenaudojamas šis feritas (matavimo metu naudojamas stiprintuvas iš operacinių stiprintuvų, kurio  $R_{in} = 100 \Omega$ , stiprinimas 46 dB, įėjimas atviras).

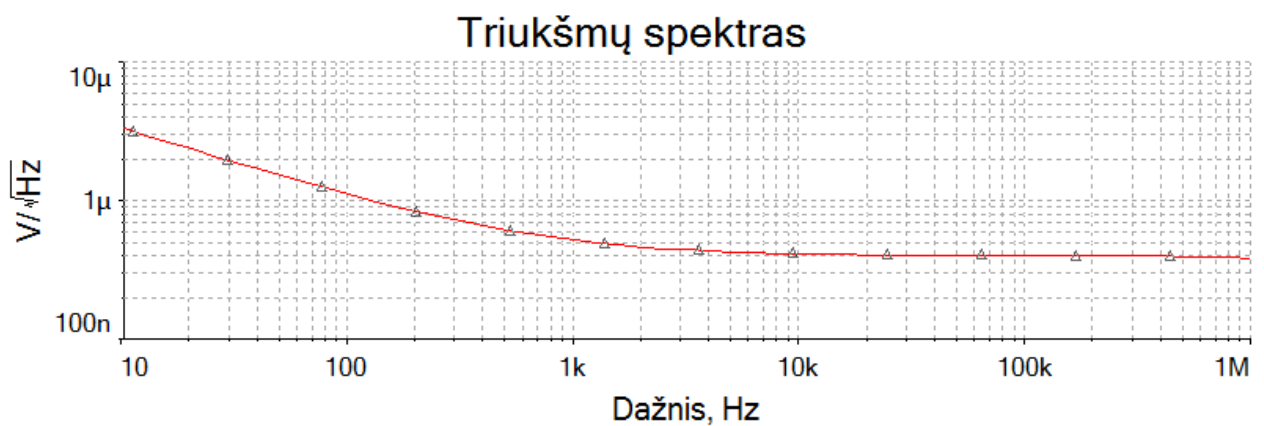


**63 pav.** Triukšmų spektras kai signalo šaltinio ir analoginės plokštės “žemės” sujungtos tiesiogiai



**64 pav.** Triukšmų spektras kai signalo šaltinio ir analoginės plokštės “žemės” sujungtos per feritą

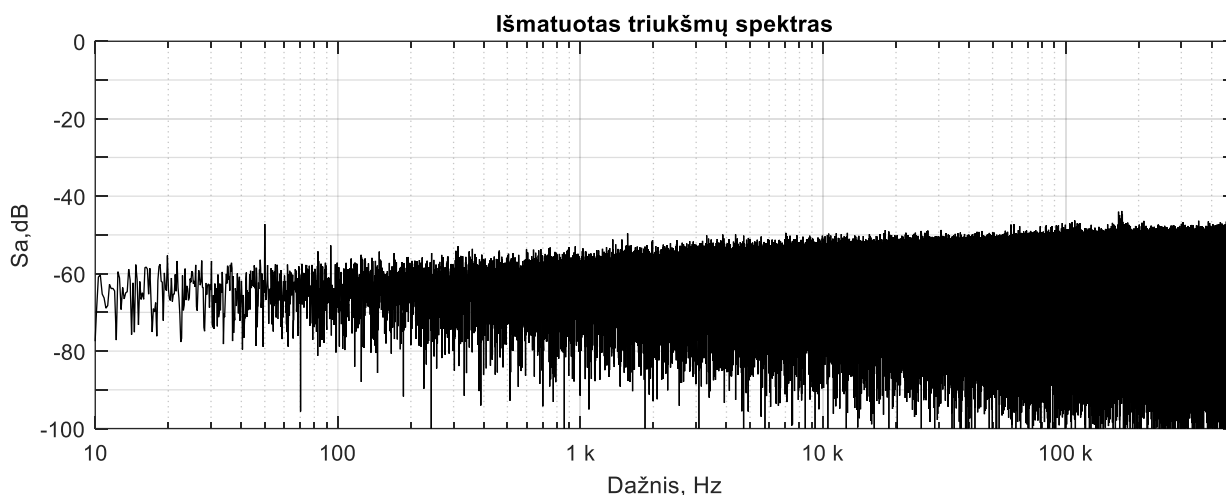
Panaudojus feritą trikdžių harmonikos yra nuslopintos dažnių juostoje nuo 1 kHz iki 500 kHz.



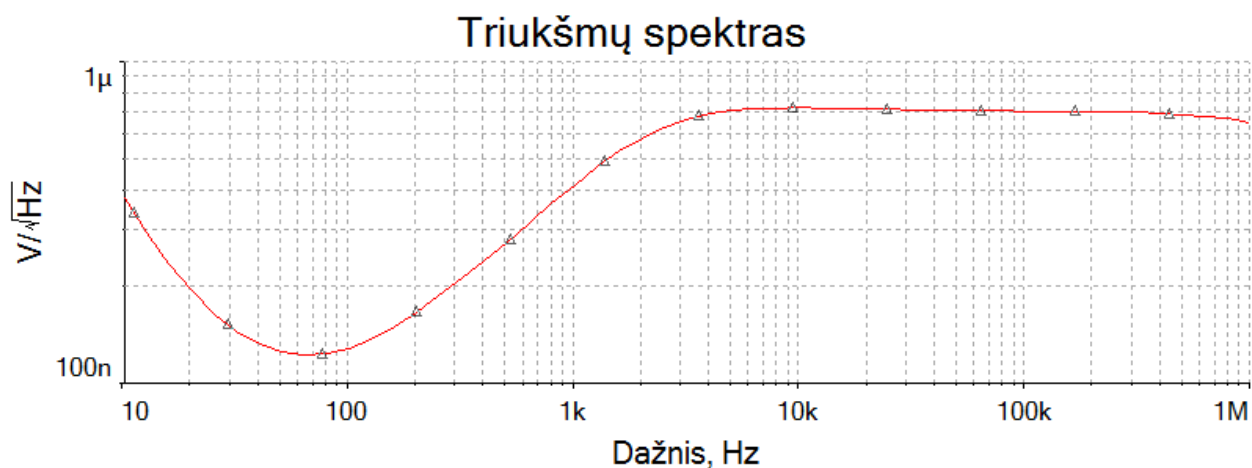
**65 pav.** Simuliacijos metu gautas triukšmų spektras

Simuliacijos metu gautame triukšmų spektre amplitudė mažėja iki  $1/f$  srities (Flikerio triukšmas), nuo 10 kHz iki 900 kHz nežymiai mažėja ir nuo 900 kHz pradeda kristi dėl žemo dažnio filtro. Tačiau išmatuotuose spektruose turi priešingą formą – nuo 10 Hz iki 500 kHz triukšmo amplitudė tolygiai auga nuo -76 dB iki -69 dB (63 ir 64 pav.).

Analogiškai kaip pirmasis stiprintuvas, tokiu pačiu principu tiriamas ir antrasis stiprintuvas, sudarytas iš diskretinių elementų. Matavimo metu naudojamas 60 dB stiprinimas, stiprintuvo įėjimas paliekamas atviras,  $R_{in} = 1 \text{ k}\Omega$ . Gautas spektras pateiktas 66 pav.



66 pav. Išmatuotas stiprintuvo iš diskretinių elementų triukšmų spektras



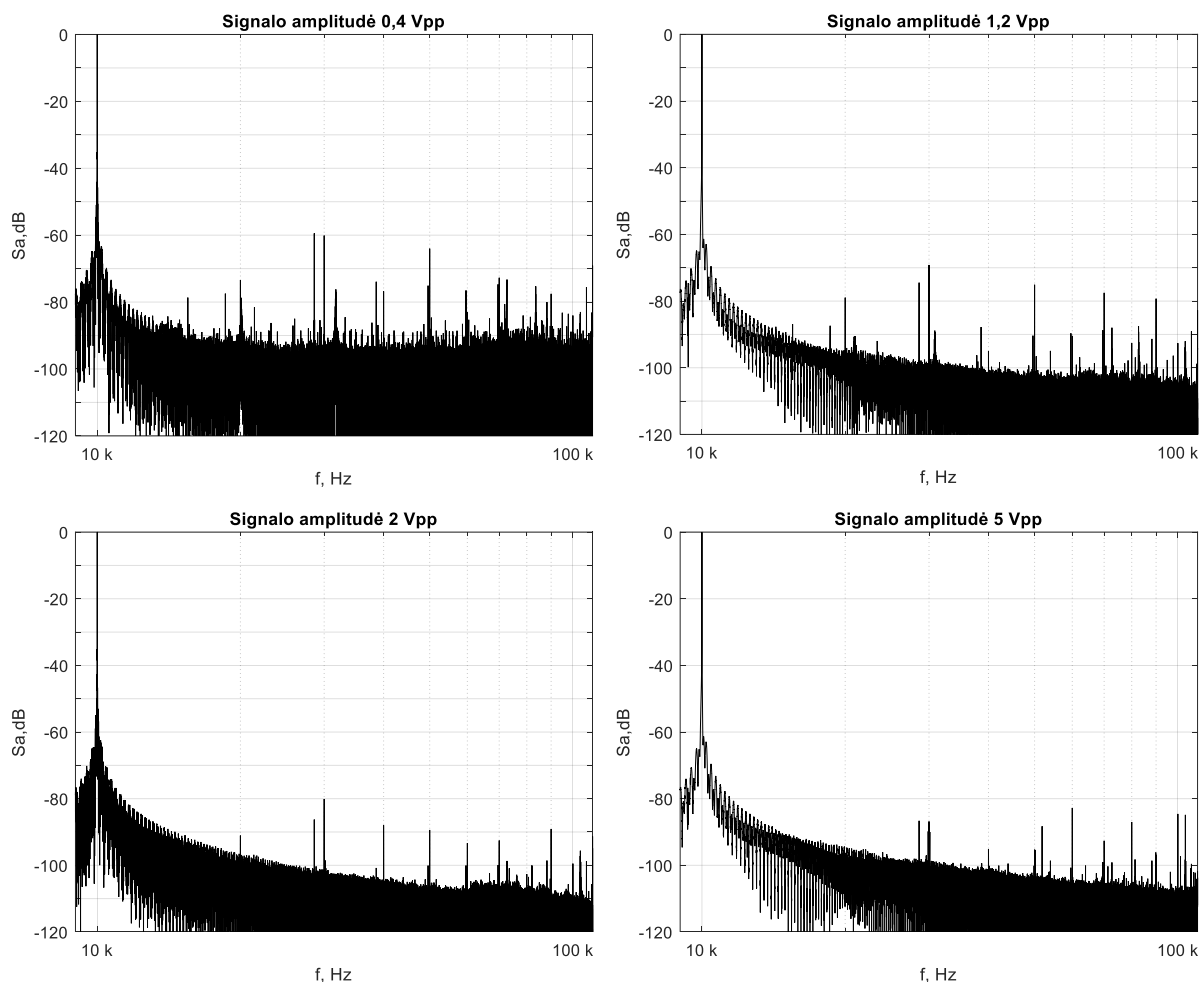
67 pav. Simuliacijos metu gautas triukšmų spektras

Simuliacijos metu gautame spektre galima matyti, jog  $1/f$  sritis yra ties  $\sim 70\text{Hz}$ , tuomet matomas aukšto dažnio filtro šlaitas iki  $\sim 6 \text{ kHz}$ . Amplitudė išlieka tolydi iki  $\sim 400 \text{ kHz}$  ir tuomet prasideda žemo dažnio filtro šlaitas. Išmatuotame spektre matomas aukšto dažnio filtro šlaitas nuo 100 Hz iki 4 kHz. Toliau triukšmų spektro amplitudė tolygiai auga. Matavimai buvo atlikti naudojant feritą „žemių“ atšimui. Viena iš prielaidų, kodėl didėjant dažniui išauga triukšmų amplitudė buvo tai, jog keičiasi kondensatoriaus impedansas, kartu ir operacinio stiprintuvo įėjimo impedansas, nuo kurio priklauso NF. Buvo išbandyta kita filtro konfigūracija,

tačiau triukšmų spektras nepakito. Kita prielaida – tai parazitinis induktyvumas, kurio impedansas didėja didėjant dažniui ir dėl to padidėja šiluminiai triukšmai.

### 3.1.4.2. Harmoninių iškraipymų matavimas

Matavimams atlikti naudojamas 10 kHz sinusinis signalas, generuojamas garso plokštės, kurios THD+N (*angl. Total Harmonic Distortion plus Noise*) yra -108 dB, išėjimo impedansas 10  $\Omega$ . Signalas per 50 k $\Omega$  atenuatorių perduodamas į stiprintuvą. Išmatuoti iškraipymai yra visos sistemos, kadangi signalas iš stiprintuvo perduodamas į filtrą, ADC buferį ir į ADC.



**68 pav.** Iškraipymų spektras naudojant 10 kHz sinusinį signalą ir esant skirtingoms jo amplitudėms

Iš grafikų matyti jog dominuoja nelyginės harmonikos, iš kurių didžiausia yra trečioji. Iškraipymų lygis priklauso nuo signalo amplitudės. Kai signalo amplitudė nedidelė, bendras THD+N lygis pakyla dėl triukšmų, kai amplitudė bus pakankamai didelė, THD+N pablogės, nes signalai bus pradėti riboti ir labiau pasireikš puslaidininkių elementų netiesiškumas. Pagrindinėje darbo dalyje THD+N yra apie 80 dB. Tai atitinka 0,01%.



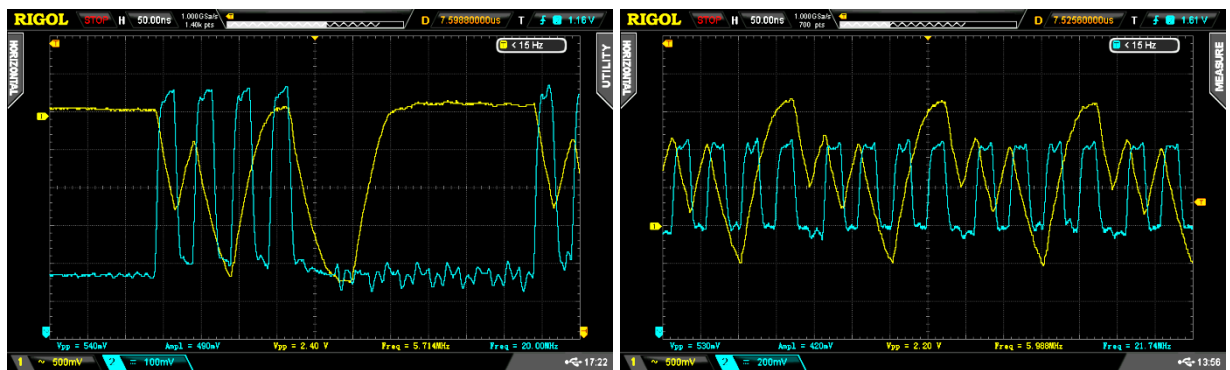
### 3.1.4.3. Diskretizavimo dažnio didinimas

Iki šiol nagrinėta sistema veikė 1 MSps sparta, tačiau maksimali keitiklio sparta yra 15 MSps. Esant tokiam nustatymui, duomenų perdavimo dažnis magistrale į FPGA matricą bus 300 MHz. Tokios spartos nepavyko pasiekti, kadangi signalai perduodami linija, kuri slopina signalus. Pagal LVDS standartą duomenų linijos banginė varža turėtų būti 100  $\Omega$ . Tačiau projektuojant sistemą į tai nebuvo atsižvelgta. Padidinus duomenų perdavimo dažnį signalai nespėja pereiti iš vieno loginio lygio į kitą ir duomenys perduodami su klaidomis.



69 pav. 100  $\Omega$  impedanso kabelis, perduoti duomenims iš keitiklio į FPGA matricą

Norint bent dalinai suderinti magistralę buvo sukonstruotas naujas duomenų perdavimo kabelis, jungiantis pagrindinę imtuvo plokštę su FPGA matrica, kurio banginė varža 100  $\Omega$ . Tačiau net ir naudojant šį kabelį nebuvo pasiekta didesnė nei 2 MSps sparta.

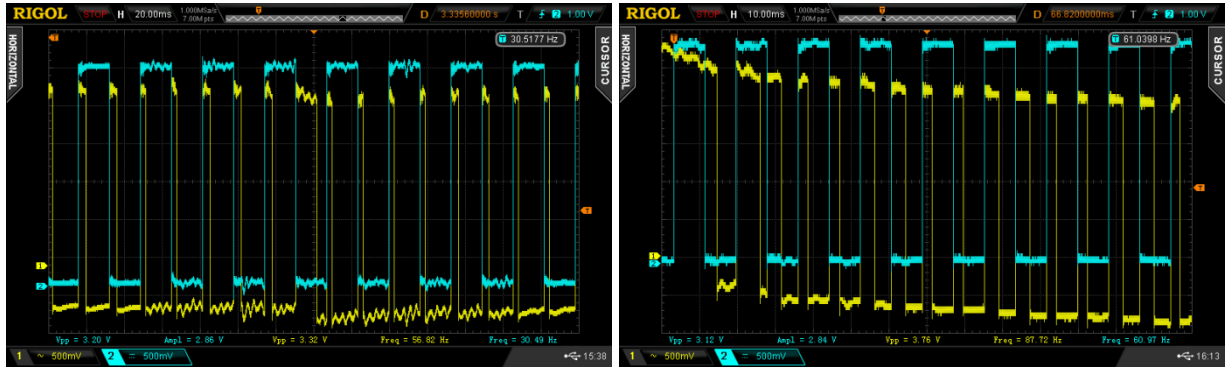


70 pav. Kairėje – duomenų perdavimas, kai keitiklis veikia 2 MSps sparta; dešinėje – po optimizuoto LVDS sąsajos taktavimo (5 MSps).

Duomenys perduodami esant teigiamam ir neigiamam sinchronizacijos signalo frontams, todėl maksimali duomenų perdavimo sparta linija yra apie 40 MHz. Tolygiai paskirstant taktavimo signalą laiko ašyje buvo pasiekta 5 MSps sparta (naudojant 44 MHz taktavimo signalą ir duomenis perduodant ir tuomet kai keitiklis atlieka keitimą). Norint perduoti duomenis didesne sparta reikėtų iš naujo suprojektuoti spausdintinio montažo plokštę. Taip pat galima naudoti papildomus buferius duomenų perdavimui. Esant 5 MSps spartai duomenų perdavimo greitis yra 10 MB/s.

### 3.1.4.4. Duomenų rašymas į atminties kortelę

Duomenų rašymo į SD kortelę trukmė kas kart varijuoja. Taip yra todėl, kadangi tam tikrais laiko periodais SD kortelėje vyksta paruošimo komandos, kurios dažniausiai užima iki 3 kartų daugiau laiko nei įprasta rašymo komanda. Kadangi mikrovaldiklyje nėra pakankamai RAM atminties, įrašymo vėlinimą sudėtinga kompensuoti (nes negalima realizuoti didelio buferio). Duomenims įrašyti naudojama 32 GB „SanDisk Extreme“ UHS-I SD kortelė.



**71 pav.** Kairėje – rašymas į SD kortelę, kai duomenų srautas 2 MB/s; dešinėje – 4 MB/s (rašoma sektoriais po 32 kB)

Vidutinė rašymo sparta į naudojamą SD kortelę ~ 8 MB/s. Kai rašoma ne iš karto pasibaigus prieš tai buvusiam), pasiekiamas 4-5 MB/s rašymo greitis. Mėlynas signalas atitinka buferio užpildymą ir paruošimą rašymui, geltonas – kiek laiko užtruko buferio rašymas į atminties kortelę (71 pav.). Mikrovaldiklyje naudojami trys 32 kB buferiai.

### 3.1.4.5. Duomenų perdavimas SPI sąsaja mikrovaldikliui

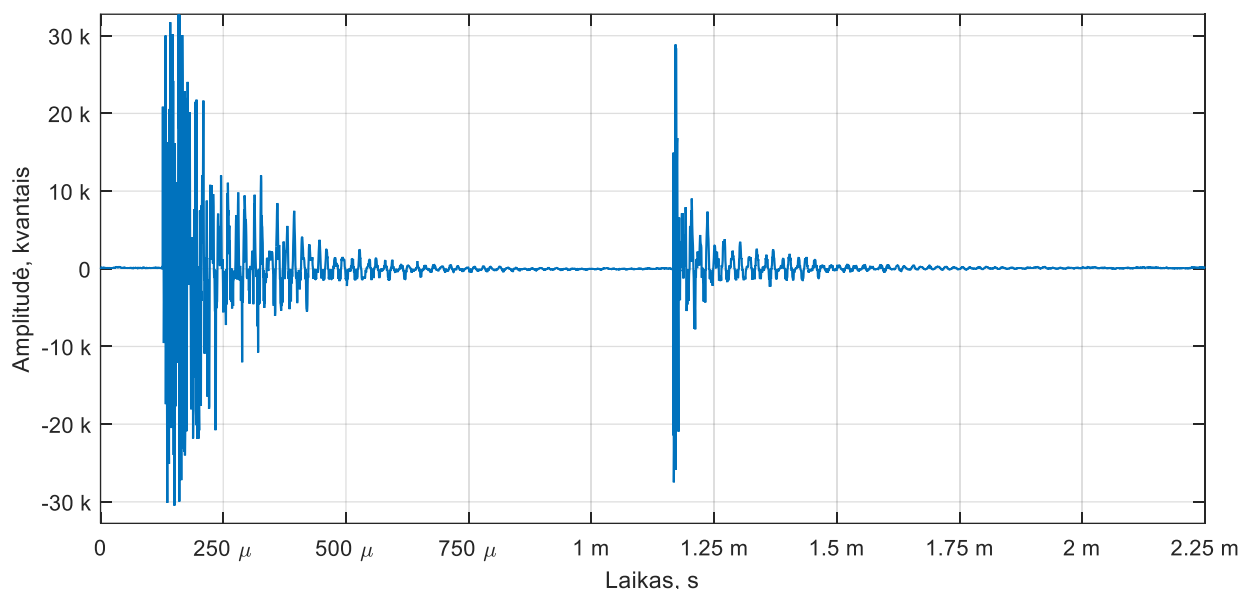
Ribota duomenų perdavimo sparta į SD kortelę nėra vienintelė problema – mikrovaldiklyje naudojamos SPI sąsajos maksimalus veikimo dažnis 42 MHz. Didžiausia duomenų perdavimo sparta gali siekti iki ~4,5 MB/s. Kai duomenų nespėjama išsiųsti, FPGA matrica praleidžia tam tikrą išranką ir ji nėra siunčiama mikrovaldikliui. Perduodant duomenis 5 MB/s sparta išmetama kas šešta išranka, kadangi neužtenka laiko jų perdavimui.



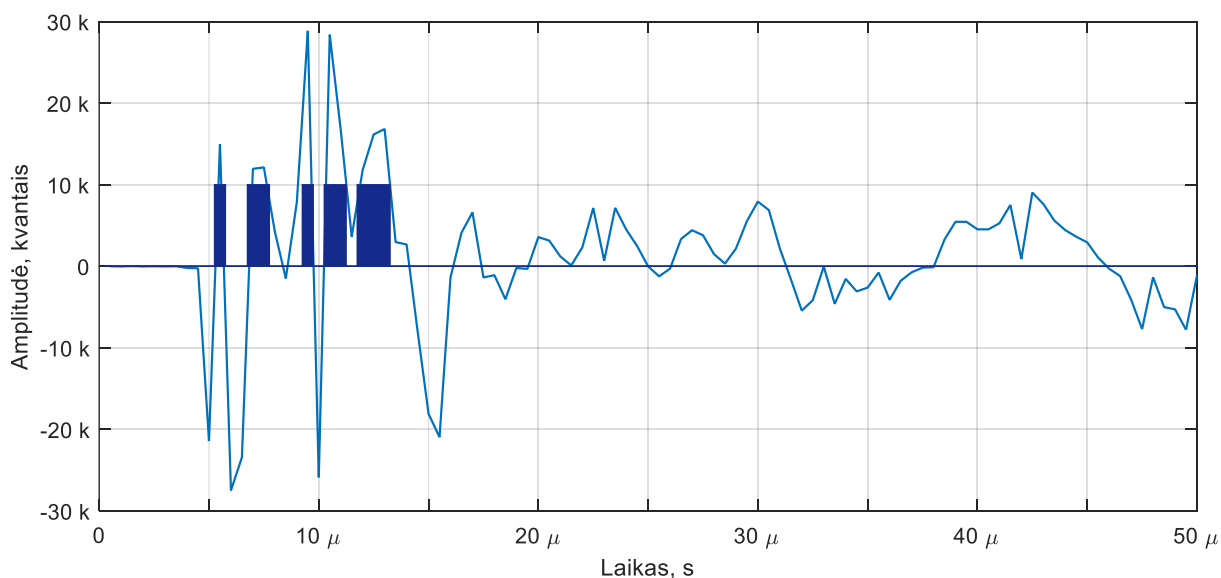
**72 pav.** Kairėje – bandymas perduoti duomenis SPI sąsaja 5 MB/s sparta; dešinėje 4 MB/s

### 3.2. Akustinės emisijos signalų matavimas

Akustinės emisija sukuriama laužant pieštuko grafito lazdelę atremtą į jutiklio paviršių. Lūžus grafitui gaunamas palčiajuostis impulsas. Jutiklio išėjime gaunamas didelės amplitudės signalas, todėl naudojamas stiprintuvas iš operacinių stiprintuvų, o jo stiprinimas nustatomas 40 dB. Gauti matavimo rezultatai pateikti 73 pav.



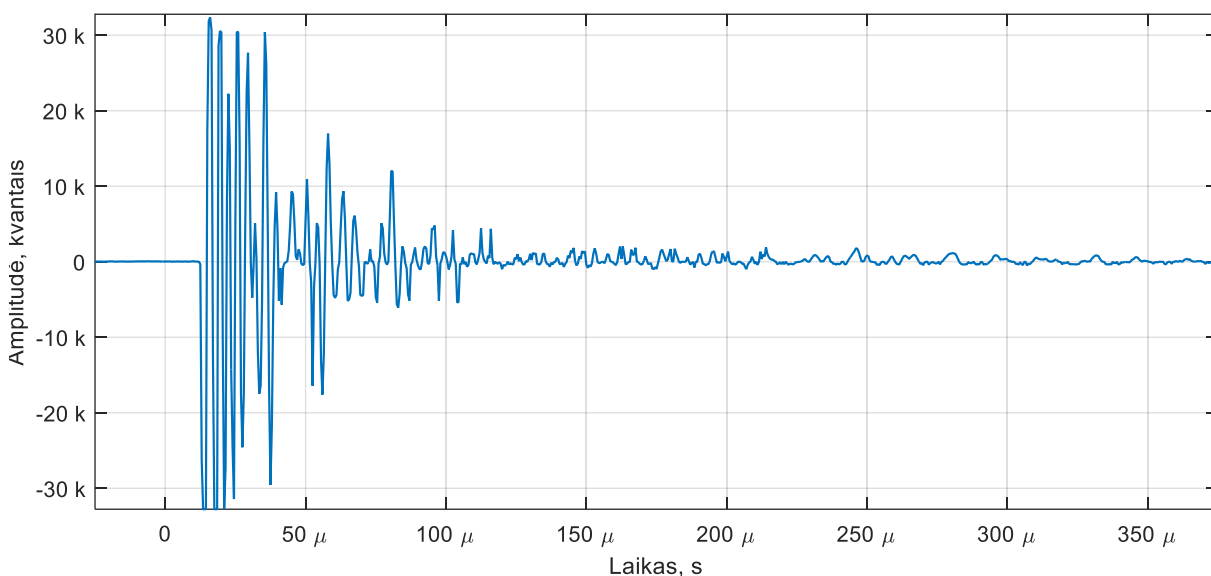
**73 pav.** Pirmasis AE signalas laiko ašyje, kai naudojama 0,7 mm. grafito lazdelė pieštuko korpuse



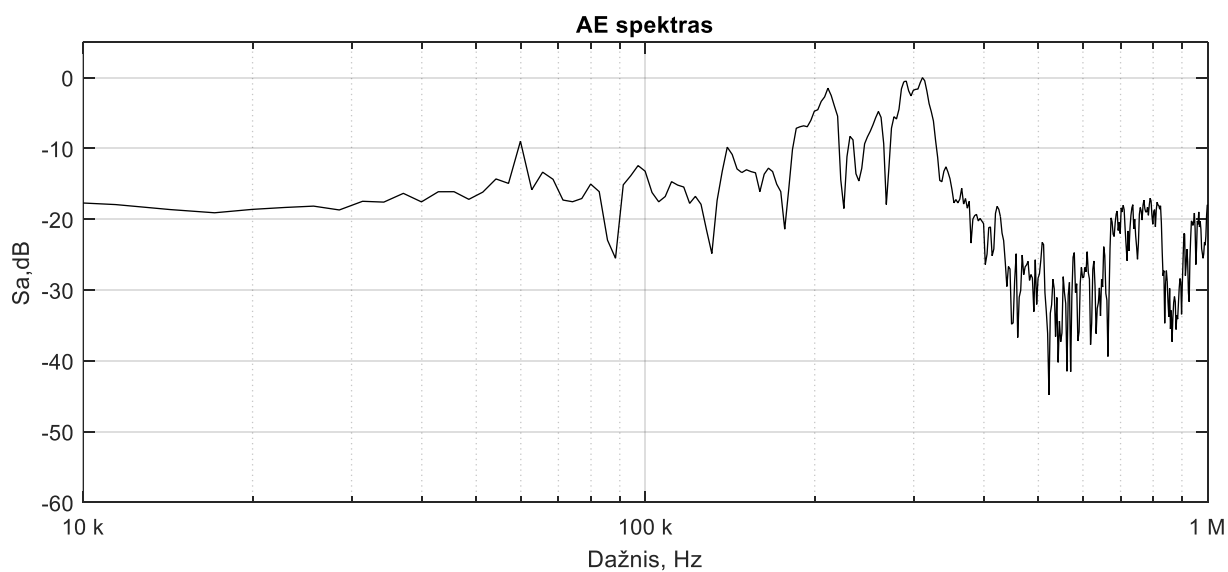
**74 pav.** Primojo AE signalo perėjimas per slenkstinę vertę (antrasis impulsas)

Atlikus pirmąjį matavimą buvo gauti du signalai. Antrasis signalas yra atspindys, susidarantis dėl pieštuko korpuso, o jo vėlinimas nuo pirmojo signalo yra apie 1 ms. Atliekant kitus matavimus nebuvo naudojamas pieštuko korpusas, o grafito lazdelė laikoma rankoje.

Analizei buvo pasirinktas antrasis signalas, kadangi jo amplitudė nėra ribojama. Atraminium slenksčiu pasirinkta 10000 kvantų vertė, kadangi parinkus mažesnę vertę, patektų signalo dalis, kuri yra netolygi.

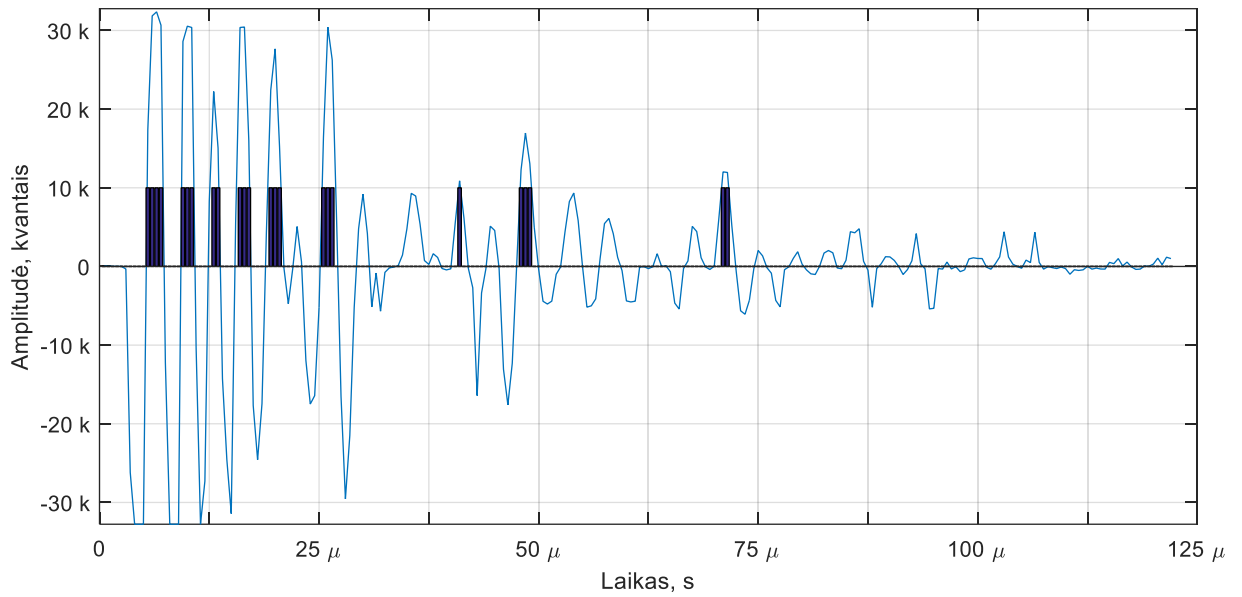


**75 pav.** Antrasis AE signalas, kurį užfiksuojujant negaunamas atspindys ir naudojama 0,7 mm grafito lazdelė



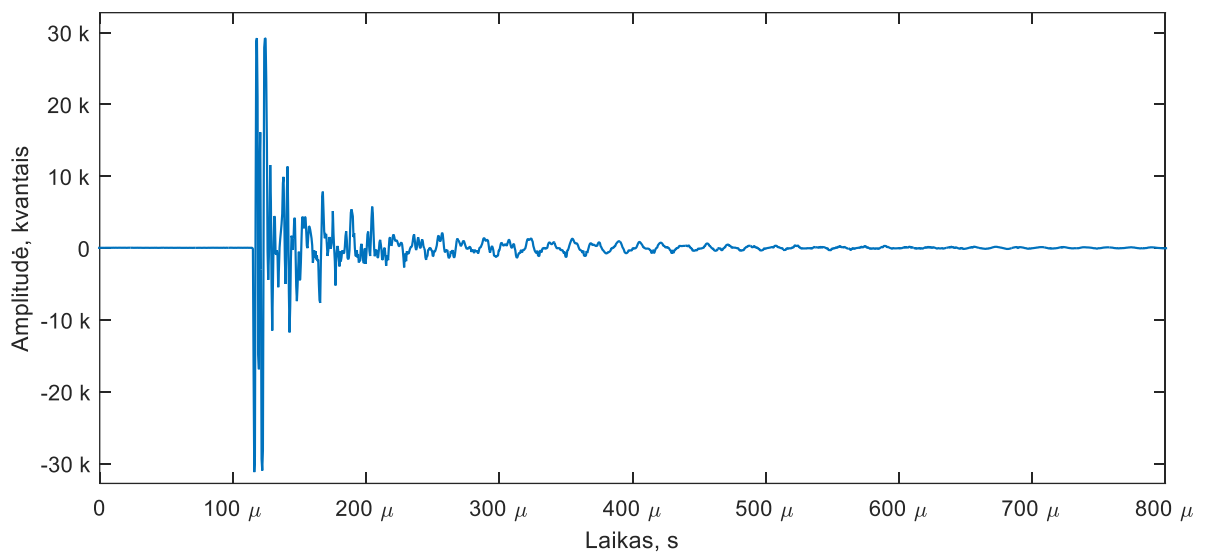
**76 pav.** Antrojo AE signalo spektras (signalas laiko ašyje pavaizduotas 75 pav.)

Iš spektro matyti, jog didžioji signalo energijos dalis yra nuo 50 kHz iki 350 kHz. Iš viso su grafito lazdele buvo atlikti septyni matavimai, ir kiekviename iš jų matomas pikas ties 60 kHz.

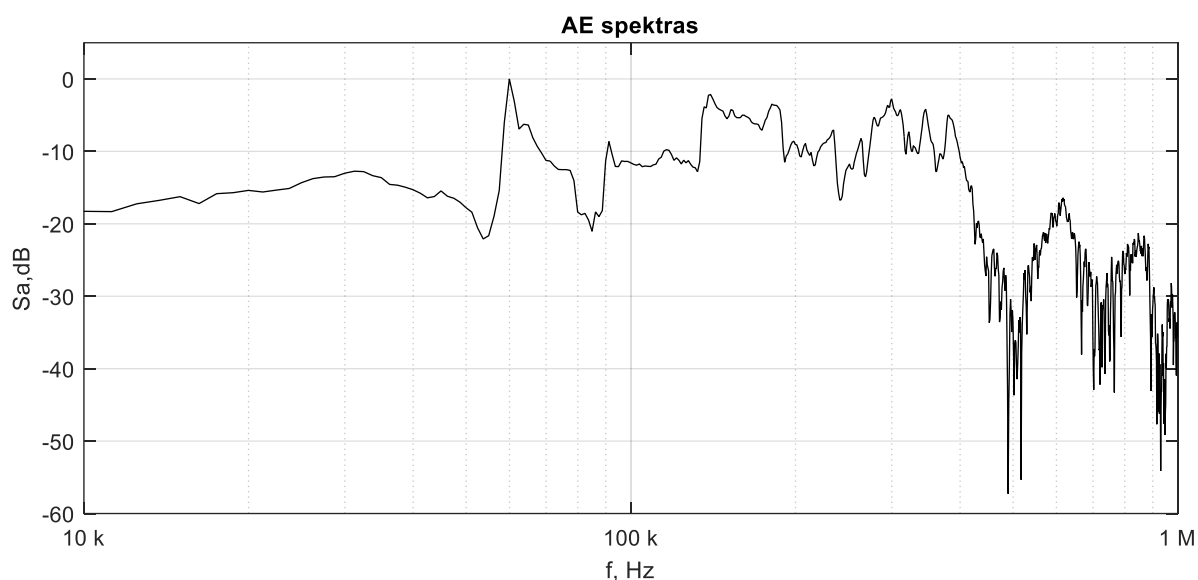


**77 pav.** Antrojo AE signalo perėjimas per slenkstinę vertę

Antrasis signalas turi daugiau perėjimų per slenkstinę įtampą lyginant su pirmuoju, nors vyksta tas pats akustinės emisijos reiškinys. Trečiasis signalas gautas naudojant 1 mm skersmens grafito lazdelę ir ją laikant rankoje.

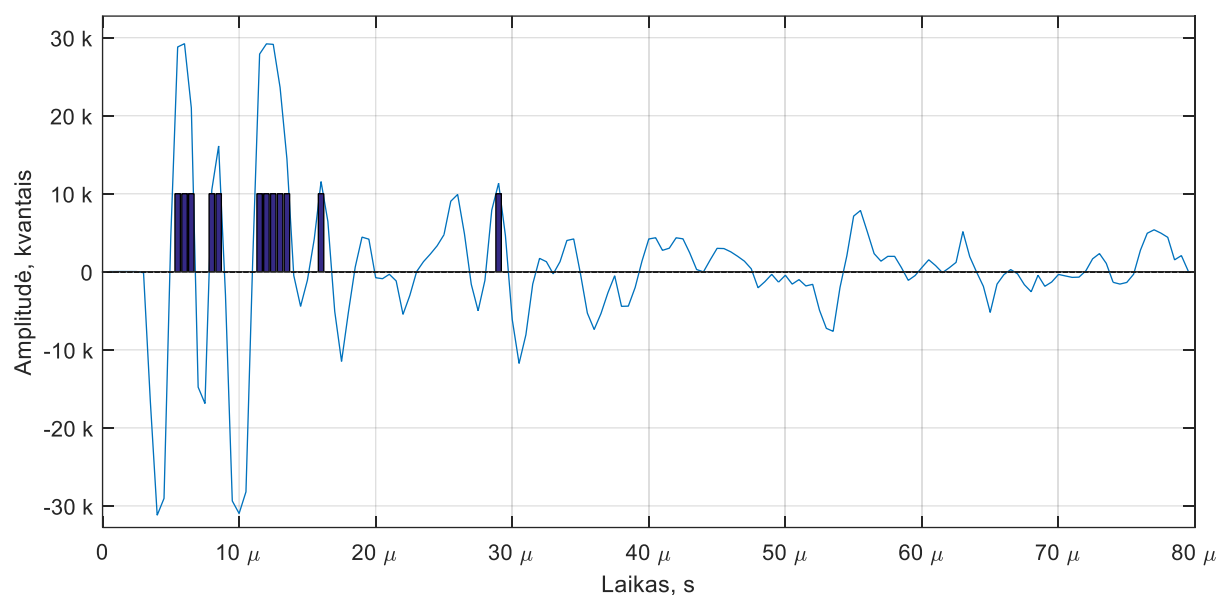


**78 pav.** Trečiasis AE signalas laiko srityje, kai naudojama 1 mm skersmens grafito lazdelė



**79 pav.** Trečiasis AE signalas dažnių srityje

Dažnių srityje galima pastebėti, jog lyginant su 0,7 mm skersmens grafito lazdele, 1 mm lazdelės pagrindė energijos dalis yra sukoncentruota iki 400 kHz (prieš tai nagrinėtu atveju iki 350 kHz). Taip pat galima matyti signalo piką ties 60 kHz dažniu. Žiūrint bendrai, buvo naudojamas nekokybiškas AE jutiklis, kadangi nėra tolygaus signalo perėjimo laiko ašyje ir matomi įvairūs lūžiai. Taip pat įtaką galėjo turėti tai, jog keitiklio išėjimo ir stiprintuvo įėjimo impedansai nebuvo suderinti (stiprintuvo įėjimo impedansas 100  $\Omega$ ).



**80 pav.** Trečiojo AE signalo perėjimai per slenkstinę vertę

### 3.3. Akustinės emisijos signalų parametrų skaičiavimas

Energijos skaičiavimo formulė:

$$E_s = \sum_{n_1}^{n_2} x^2 \quad (3.1)$$

čia  $E_s$  – signalo energija;  $n_1$  – pirmas perėjimas per slenkstinę vertę;  $n_2$  – paskutinis perėjimas per slenkstinę vertę,  $x$  – signalo išrankos vertė, V.

Vidutinės kvadratinės vertės RMS (*angl. Root Mean Square*) vertės skaičiavimo formulė:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2)} \quad (3.2)$$

čia:  $n$  – išrankų skaičius,  $x$  – signalo išranka.

Amplitudės perskaičiavimo formulė iš kvantų į įtampą:

$$U = 0,125 \mu V \cdot x \quad (3.3)$$

čia:  $x$  – išrankos vertė kvantais;  $U$  – išrankos vertė, V.

Maksimali amplitudė skaičiuojama 1  $\mu$ V atžvilgiu.

8. lentelė. Apskaičiuoti akustinės emisijos signalų parametrai

Parametrai	AE signalas		
	pirmas	antras	trecias
Didžiausia amplitudė, dB	71,1	72,1	71,2
Signalų augimo laikas, s	4 $\mu$	1 $\mu$	0,5 $\mu$
Trukmė, s	8 $\mu$	66,5 $\mu$	24 $\mu$
Signalų energija	14,06	37,5	18,75
Impulsų skaičius, kartai	5	9	5
RMS, V	0,938	0,531	0,625

Gauti signalų parametrai varijuoja, nors praktiškai turėtų nesiskirti. Taip yra kadangi buvo naudojamas nekokybiškas AE jutiklis. Tai lėmė, jog gauti signalai nėra tolydūs laiko ašyje (yra nemažai lūžių). Taigi toks jutiklis gali būti panaudotas tik AE įvykiui užfiksuoti ir nėra tinkamas signalo analizei.

## IŠVADOS

Darbo metu suprojektuota AE sistema ir išmatuoti jos parametrai. Taip pat atlikti AE matavimai laužant grafito lazdelę ir apskaičiuoti signalo parametrai. Šiam tikslui pasiekti buvo:

1. Suprojektuoti du stiprintuvai, kurių stiprinimas siekia 61 dB ir 46 dB, triukšmų įtampa esant 100  $\Omega$  impedansui atitinkamai 6,32 mV ir 3,14 mV, esant 1 k $\Omega$  impedansui 7,27 mV ir 8,14 mV (8 MHz juosta). Pirmo stiprintuvo triukšmai mažesni 2,3 ir 5,5 karto.
2. Panaudotas 16 bitų, 15 MSps keitimo spartos ADC. ADC buferiui ir aktyviniam antisanklodiniam septintos eilės filtrui parinkta topologija ir komponentai taip, jog būtų galima pasiekti teorinę ADC rezoliuciją ir kuo mažesnius signalo iškraipymus. Filtro triukšmų įtampa 104  $\mu$ V(p-p).
3. Suprojektuota imtuvo plokštė, kurią sudaro ADC, dviejų mažatriukšmių stiprintuvų bei šešių įtampos reguliatorių (trys iš jų skirti ADC) spausdintinio montažo plokštė, kurioje panaudota apie 170 komponentų. Signalo iškraipymai  $\sim$  0,01%.
4. Suprojektuota papildoma plokštė, skirta „žemių“ atrišimui su optiniais atrišėjais. Panaudoti atskiri maitinimai šioms plokštėms, mažatriukšmiai įtampos reguliatoriai su dideliu PSRR ir trijų polių kondensatorius ADC skaitmeninės dalies maitinimo izoliavimui. Tai leido pasiekti gamintojo deklaruojamą 94 dB dinaminį diapazoną.
5. Realizuota LVDS sąsaja tarp FPGA matricos ir ADC (duomenų perdavimo sparta iki 10 MB/s). SPI sąsaja tarp FPGA matricos ir mikrovaldiklio, kuriame naudojama failų sistema.
6. Perkonfigūruotas periferijos taktavimas mikrovaldiklyje leido padidinti SDIO sąsajos dažnį nuo 24 MHz iki 42 MHz ir beveik padvigubinti rašymo greitį į SD kortelę.
7. „Matlab“ programinėje aplinkoje realizuotas AE signalų apdorojimas, kurio metu apskaičiuoti ir palyginti užfiksuotų signalų parametrai.

Simuliacijos metu gautas stiprintuvų triukšmų lygis skyrėsi nuo išmatuoto praktiškai. Pagrindinė to priežastis – nebuvo naudojamas ekranavimas ir triukšmai iš aplinkos pateko į stiprintuvą. Iš diskretinių elementų surinkto stiprintuvo triukšmai buvo apie 4,5 karto didesni, o iš dviejų operacinių stiprintuvų 3,3 karto. Dažninės stiprintuvų charakteristikos praktiškai atitiko simuliuotas (kaip ir stiprinimas). Sistemos THD+N priklauso nuo įėjimo signalo amplitudės. Sistemai dirbant ties vidutine amplitude THD+N yra -80 dB. „Žemių“ atriškimas leido pagerinti SNR jutiklio darbiniam dažnių ruože 3-4 dB, o prie žemų dažnių SNR padidėjo iki 20 dB.

AE matavimo metu gauti signalai nebuvo tolygūs dėl naudojamo nekokybiško jutiklio. Apskaičiuoti signalų parametrai gerokai skiriasi, nors buvo stebimas tas pats AE įvykis.



## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Introduction to Acoustic Emission [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
[http://www.idinspections.com/?page\\_id=126](http://www.idinspections.com/?page_id=126)
2. Acoustic Emission Sensors (Vallen systems gamintojo puslapis) [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://www.vallen.de/sites/default/files/sov1212.pdf>
3. NDT resource center Equipment [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
[https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Equipment.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Equipment.htm)
4. Acoustic Emission (Universitat Politecnica de Catalunya). [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://leam.upc.edu/en/acoustic-emission>
5. Acoustic emission [interaktyvus] 2014 Lapkritis. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_emission](http://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_emission)
6. Piezoelectricity [interaktyvus] 2014 Lapkritis. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
7. Improved MEMS AE sensors in HARM technology. Sommer, R.; Freitag, M.; Schaufuss, J.; Sorger, A.; Mehner, J. [interaktyvus] 2014 Vasaris. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6808917>
8. Research on A LMS Adaptive Filtering Algorithm for Acoustic Emission Signal Processing. Lin Xu; Bing Shi; Yumei Kang; Dong Zheng; Liye Yu. [interaktyvus] 2010 Liepa. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5554276>
9. ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELING FOR CROP ACOUSTIC EMISSION SIGNAL WITH DISEASE AND WATER STRESS. Xiu-qing WANG, Shi-feng YANG, Chun-xia ZHANG. [interaktyvus] 2009 Gruodis. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5428936>
10. NDT resource center AE signal features [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
[https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\\_Signal%20Features.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Signal%20Features.htm)
11. Correlation Analysis of Cutting Force and Acoustic Emission Signals for Tool Condition Monitoring. Z.W. Zhong, J.-H. Zhou, Ye Nyi Win. [interaktyvus] 2013 Birželis. [žiūrėta 2014-12-9]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6606333>
12. No Pain, High Gain: Building a Low-Noise Instrumentation Amplifier with Nanovolt Sensitivity. Moshe Gerstenhaber, Rayal Johnson, and Scott Hunt. [interaktyvus] 2015 Gegužė. [žiūrėta 2015-06-02]. Prieiga per internetą:  
[http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/49-05/nanovolt.html?ADICID=1505\\_WW\\_EN\\_MULT\\_MULTPG\\_MULT\\_MULT\\_PG\\_ANA-DIA\\_EMAL\\_SUB\\_NONE\\_AL\\_MQL](http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/49-05/nanovolt.html?ADICID=1505_WW_EN_MULT_MULTPG_MULT_MULT_PG_ANA-DIA_EMAL_SUB_NONE_AL_MQL)
13. Pocket AE-2™: Portable 2-Channel Acoustic Emission System, [interaktyvus] 2010. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:

- [http://www.gammatecsa.com/datasheet/PAC%20-%20Pocket%20AE-2\\_46-06.pdf](http://www.gammatecsa.com/datasheet/PAC%20-%20Pocket%20AE-2_46-06.pdf)
14. FatFs - FAT file system module. ChaN, [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015-06-02].  
Prieiga per internetą:  
[http://elm-chan.org/fsw/ff/00index\\_e.html](http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html)
  15. Asset Condition Monitoring for Wind Turbines, [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
[http://www.physicalacoustics.com/content/literature/turnkey\\_systems/ACMwt\\_Solution\\_Bulletin.pdf](http://www.physicalacoustics.com/content/literature/turnkey_systems/ACMwt_Solution_Bulletin.pdf)
  16. RM0090 Reference manual. [interaktyvus] 2015 Kovas. [žiūrėta 2015-06-02]. Prieiga per internetą:  
[http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/DM00031020.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf)
  17. SDIO and SD fat access example, ST forum, [interaktyvus] 2012 Rugsėjis. [žiūrėta 2015-06-02]. Prieiga per internetą:  
[https://my.st.com/public/STe2ecomunities/mcu/Lists/cortex\\_mx\\_stm32/Flat.aspx?RootFolder=https%3a%2f%2fmy%2est%2ecom%2fpublic%2fSTe2ecomunities%2fmcu%2fLists%2fcortex%5fmx%5fstm32%2fSDIO%20and%20SD%20fat%20access%20example&FolderCTID=0x01200200770978C69A1141439FE559EB459D7580009C4E14902C3CDE46A77F0FFD06506F5B&currentviews=15670](https://my.st.com/public/STe2ecomunities/mcu/Lists/cortex_mx_stm32/Flat.aspx?RootFolder=https%3a%2f%2fmy%2est%2ecom%2fpublic%2fSTe2ecomunities%2fmcu%2fLists%2fcortex%5fmx%5fstm32%2fSDIO%20and%20SD%20fat%20access%20example&FolderCTID=0x01200200770978C69A1141439FE559EB459D7580009C4E14902C3CDE46A77F0FFD06506F5B&currentviews=15670)
  18. AD8428 parametrai, [interaktyvus] 2012 Rugsėjis. [žiūrėta 2015-06-02]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8428.PDF>
  19. LT1028 parametrai, [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1028fd.pdf>
  20. LT1115 parametrai, [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/lt1115fa.pdf>
  21. AD8250 parametrai, [interaktyvus] 2013. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8250.pdf>
  22. AD8432 parametrai, [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8432.pdf>
  23. AD8432 parametrai, [interaktyvus] 2012. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD797.pdf>
  24. LMH6626 parametrai, [interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
[https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2008/hdl\\_2072\\_13488/PFC\\_-\\_Sergi\\_Peira\\_annex.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2008/hdl_2072_13488/PFC_-_Sergi_Peira_annex.pdf)
  25. LMH6629 parametrai, [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ti.com/lit/ds/snosb18i/snosb18i.pdf>
  26. OPA1612 parametrai, [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.farnell.com/datasheets/1786960.pdf>
  27. AD745 parametrai, [interaktyvus] 2002. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD745.pdf>
  28. Comsol programinis paketas, gamintojo puslapis [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<https://www.comsol.com/>
  29. ADA4899 parametrai, [interaktyvus] 2007. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4899-1.pdf>
  30. AD8099 parametrai, [interaktyvus] 2013. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8099.pdf>
  31. 2SK170 parametrai, [interaktyvus] 2007. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.mouser.com/ds/2/408/6909-57550.pdf>
  32. Noise Analysis for High-Speed Op Amps. Application report by Texas Instruments. [interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2015-12-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ti.com/lit/an/sboa066a/sboa066a.pdf>

33. Noise figure, [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Noise\\_figure](https://en.wikipedia.org/wiki/Noise_figure)
34. LTC2387-16 parametrai, [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.farnell.com/datasheets/1999322.pdf>
35. The Pearl II Phono Stage. Wayne Colburn. [interaktyvus] 2010. [žiūrėta 2016-05-10].  
Prieiga per internetą:  
<https://www.passdiy.com/pdf/PEARL%202.pdf>
36. MBR140SFT1 parametrai, [interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per  
internetą:  
<http://www.farnell.com/datasheets/85904.pdf>
37. ADP7102 parametrai, [interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP7102.pdf>
38. NFM3DPC223R1H3 parametrai, [interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per  
internetą:  
<http://www.farnell.com/datasheets/90771.pdf>
39. Transistor Capacitance Multiplier Circuit. Ian Poole. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-05-10].  
Prieiga per internetą:  
<http://www.radio-electronics.com/info/circuits/transistor/capacitance-multiplier-circuit.php>
40. A Practical Guide to High-Speed Printed-Circuit-Board Layout. John Ardizzoni.  
interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-09/layout.pdf>
41. Wima FKP 2 serijos kondensatorių parametrai, [interaktyvus] [žiūrėta 2016-05-10].  
Prieiga per internetą:  
[http://www.wima.com/EN/WIMA\\_FKP\\_2.pdf](http://www.wima.com/EN/WIMA_FKP_2.pdf)
42. Audio Noise Reduction Through the Use of Bulk Metal® Foil Resistors — "Hear the  
Difference". Application Note AN0003. [interaktyvus] 2005. [žiūrėta 2016-05-10].  
Prieiga per internetą:  
[https://www.digikey.jp/Web%20Export/Supplier%20Content/Vishay\\_8026/PDF/Vishay\\_AN\\_AudioNoiseReduction.pdf](https://www.digikey.jp/Web%20Export/Supplier%20Content/Vishay_8026/PDF/Vishay_AN_AudioNoiseReduction.pdf)
43. Acoustic Emission Method (History. Fundamentals. Applications.). Boris Muravin.  
[interaktyvus] [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.muravin.com/ae/Muravin%20-%20Acoustic%20Emission%20Method%20-%20short%20presentation%20for%20students.ppt>
44. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in  
the Noise Floor. Walt Kester. [interaktyvus] [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-003.pdf>
45. Dither, [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Dither>
46. Register-transfer level, [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Register-transfer\\_level](https://en.wikipedia.org/wiki/Register-transfer_level)
47. Integral (gamintojo puslapis), [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per  
internetą:  
<http://www.integralmemory.com/faq/what-uhs-1>
48. Noise, [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Noise\\_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Noise_(electronics))
49. Johnson–Nyquist noise, [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%E2%80%93Nyquist\\_noise](https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%E2%80%93Nyquist_noise)
50. Piezoelectric sensor, [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016-05-30]. Prieiga per internetą:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectric_sensor)

## PRIEDAI

**Priedas 1.** Stiprintuvo, sudaryto iš dviejų operacinių stiprintuvų ADCH matavimo lentelė

f, kHz	U <sub>in</sub> , mV	U <sub>out</sub> , V	Stiprimas, kartais	Stiprinimas, dB
0,1	7,49	1,68	224,3	47,0
0,2	7,53	1,7	225,8	47,1
0,3	7,35	1,65	224,5	47,0
0,4	7,52	1,69	224,7	47,0
0,5	7,4	1,67	225,7	47,1
0,6	7,33	1,65	225,1	47,0
0,7	7,39	1,66	224,6	47,0
0,8	7,45	1,67	224,2	47,0
0,9	7,36	1,66	225,5	47,1
1	7,44	1,67	224,5	47,0
2	7,53	1,7	225,8	47,1
3	7,33	1,65	225,1	47,0
4	7,44	1,67	224,5	47,0
5	7,43	1,67	224,8	47,0
6	7,36	1,65	224,2	47,0
7	7,37	1,65	223,9	47,0
8	7,46	1,67	223,9	47,0
9	7,47	1,67	223,6	47,0
10	7,42	1,66	223,7	47,0
20	7,51	1,66	221,0	46,9
30	7,34	1,64	223,4	47,0
40	7,44	1,65	221,8	46,9
50	7,44	1,65	221,8	46,9
60	7,49	1,68	224,3	47,0
70	7,27	1,64	225,6	47,1
80	7,5	1,68	224,0	47,0
90	7,34	1,63	222,1	46,9
100	7,39	1,65	223,3	47,0
200	7,57	1,67	220,6	46,9
300	7,4	1,65	223,0	47,0
400	7,6	1,66	218,4	46,8
500	7,58	1,65	217,7	46,8
600	7,55	1,63	215,9	46,7
700	7,55	1,63	215,9	46,7
800	7,61	1,62	212,9	46,6
900	7,63	1,61	211,0	46,5
1000	7,6	1,58	207,9	46,4
2000	7,67	1,36	177,3	45,0
3000	7,4	1,11	150,0	43,5
4000	10,8	1,25	115,7	41,3
5000	10,7	1	93,5	39,4
6000	13,7	1,06	77,4	37,8
7000	13,6	0,86	63,2	36,0
8000	13,3	0,66	49,6	33,9
9000	13,1	0,55	42,0	32,5
10000	12,8	0,46	35,9	31,1

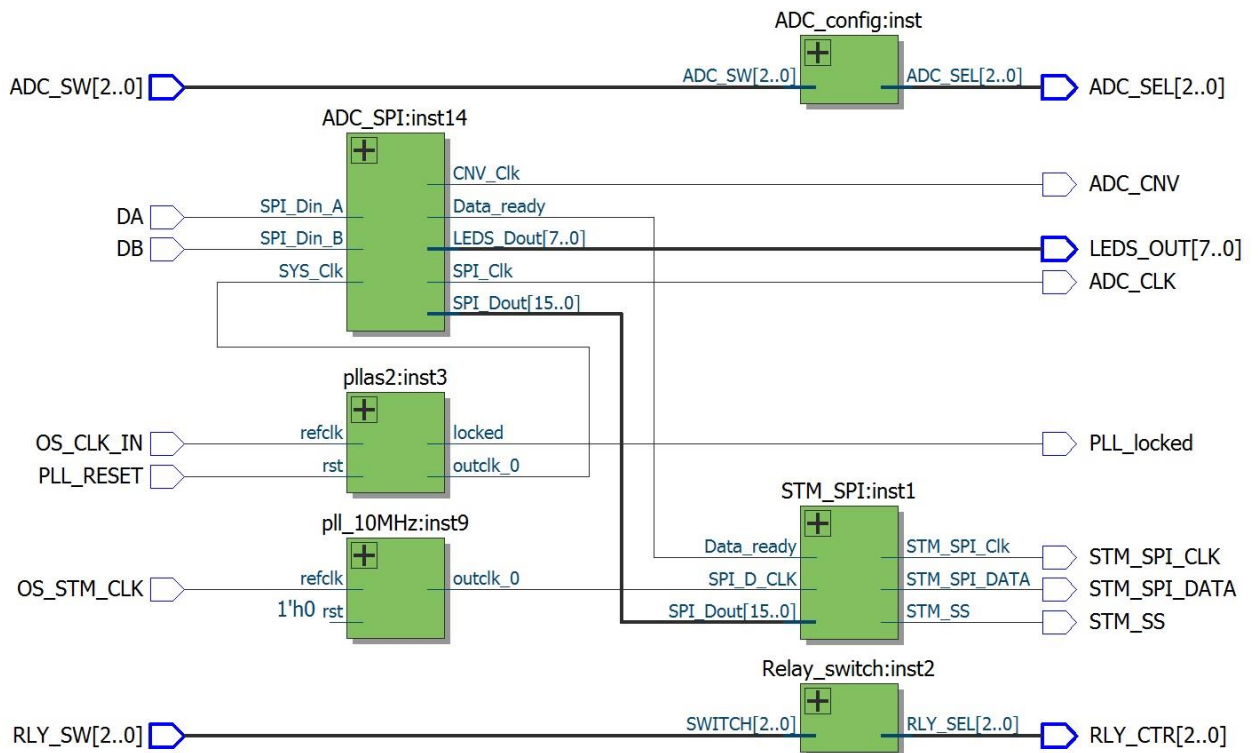
**Priedas 2. Stiprintuvo, sudaryto iš diskretinių elementų ir operacinio stiprintuvo ADCH matavimo lentelė**

<b>f, kHz</b>	<b><math>U_{in}</math>, mV</b>	<b><math>U_{out}</math>, V</b>	<b>Stiprimas, kartais</b>	<b>Stiprinimas, dB</b>
<b>0,1</b>	4,69	0,47	100,2	<b>40,0</b>
<b>0,2</b>	4,65	0,54	116,1	<b>41,3</b>
<b>0,3</b>	4,61	0,76	164,9	<b>44,3</b>
<b>0,4</b>	4,68	0,929	198,5	<b>46,0</b>
<b>0,5</b>	4,69	1,11	236,7	<b>47,5</b>
<b>0,6</b>	4,66	1,3	279,0	<b>48,9</b>
<b>0,7</b>	4,63	1,4	302,4	<b>49,6</b>
<b>0,8</b>	4,64	1,65	355,6	<b>51,0</b>
<b>0,9</b>	4,61	1,83	397,0	<b>52,0</b>
<b>1</b>	4,61	2,01	436,0	<b>52,8</b>
<b>2</b>	3,48	2,47	709,8	<b>57,0</b>
<b>3</b>	2,33	2,01	862,7	<b>58,7</b>
<b>4</b>	2,33	2,22	952,8	<b>59,6</b>
<b>5</b>	2,33	2,33	1000,0	<b>60,0</b>
<b>6</b>	2,33	2,4	1030,0	<b>60,3</b>
<b>7</b>	2,33	2,48	1064,4	<b>60,5</b>
<b>8</b>	2,33	2,49	1068,7	<b>60,6</b>
<b>9</b>	2,34	2,52	1076,9	<b>60,6</b>
<b>10</b>	2,34	2,54	1085,5	<b>60,7</b>
<b>20</b>	2,35	2,6	1106,4	<b>60,9</b>
<b>30</b>	2,35	2,6	1106,4	<b>60,9</b>
<b>40</b>	2,36	2,62	1110,2	<b>60,9</b>
<b>50</b>	2,34	2,6	1111,1	<b>60,9</b>
<b>60</b>	2,33	2,6	1115,9	<b>61,0</b>
<b>70</b>	2,32	2,59	1116,4	<b>61,0</b>
<b>80</b>	2,34	2,59	1106,8	<b>60,9</b>
<b>90</b>	2,33	2,61	1120,2	<b>61,0</b>
<b>100</b>	2,33	2,58	1107,3	<b>60,9</b>
<b>200</b>	2,37	2,61	1101,3	<b>60,8</b>
<b>300</b>	2,36	2,59	1097,5	<b>60,8</b>
<b>400</b>	2,33	2,55	1094,4	<b>60,8</b>
<b>500</b>	2,32	2,52	1086,2	<b>60,7</b>
<b>600</b>	2,28	2,45	1074,6	<b>60,6</b>
<b>700</b>	2,25	2,39	1062,2	<b>60,5</b>
<b>800</b>	2,21	2,33	1054,3	<b>60,5</b>
<b>900</b>	2,15	2,26	1051,2	<b>60,4</b>
<b>1000</b>	2,11	2,18	1033,2	<b>60,3</b>
<b>2000</b>	2,03	1,61	793,1	<b>58,0</b>
<b>3000</b>	1,67	1,1	658,7	<b>56,4</b>
<b>4000</b>	2,37	1,07	451,5	<b>53,1</b>
<b>5000</b>	3,87	1,44	372,1	<b>51,4</b>
<b>6000</b>	3,91	1,06	271,1	<b>48,7</b>
<b>7000</b>	4,03	0,8	198,5	<b>46,0</b>
<b>8000</b>	4,48	0,71	158,5	<b>44,0</b>
<b>9000</b>	4,85	0,54	111,3	<b>40,9</b>
<b>10000</b>	5,07	0,44	86,8	<b>38,8</b>

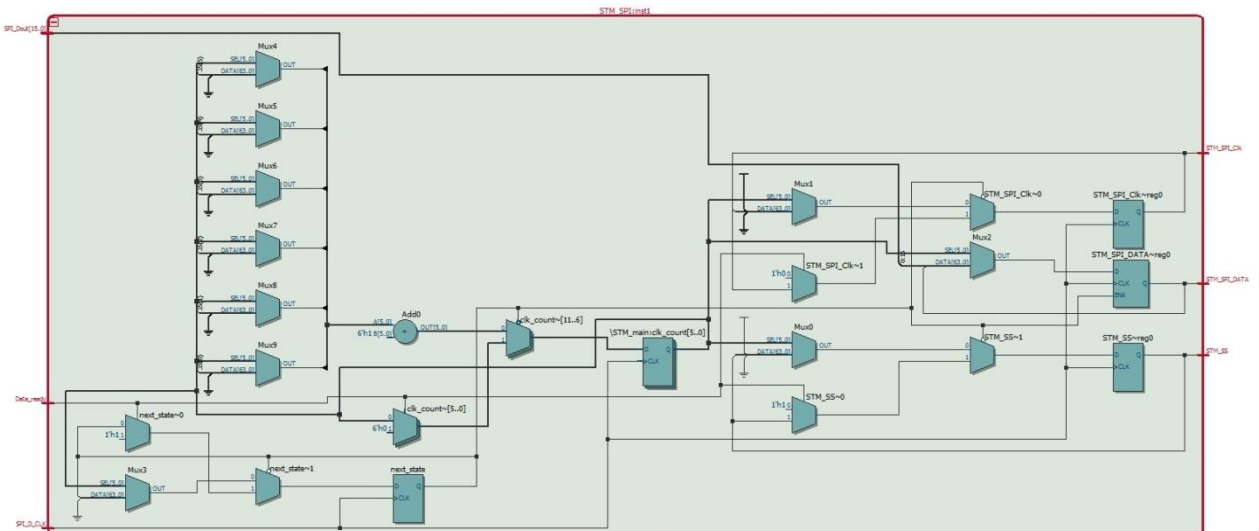
**Priedas 3. Filtro ADCH tyrimo matavimo lentelė**

<b>f, kHz</b>	<b>U<sub>in</sub>, mV</b>	<b>U<sub>out</sub>, V</b>	<b>Stiprintuvo išėjime, dB</b>	<b>Filtro išėjime, dB</b>	<b>Skirtumas (Filtro ADCH), dB</b>
0,1	6,8	1	43,6	43,3	-0,2
0,2	7,25	1,04	43,6	43,1	-0,5
0,3	6,9	0,99	43,6	43,1	-0,4
0,4	7,12	1,02	43,6	43,1	-0,4
0,5	7	1	43,5	43,1	-0,4
0,6	7,02	1	43,5	43,1	-0,4
0,7	7,11	1,02	43,5	43,1	-0,4
0,8	7,12	1,02	43,5	43,1	-0,4
0,9	7,1	1,01	43,5	43,1	-0,5
1	7,24	1,03	43,5	43,1	-0,5
2	7,28	1,03	43,5	43,0	-0,5
3	6,93	0,98	43,5	43,0	-0,5
4	7,28	1,03	43,5	43,0	-0,5
5	7,1	1	43,5	43,0	-0,5
6	6,98	0,985	43,5	43,0	-0,5
7	7,18	1,01	43,5	43,0	-0,5
8	6,86	0,97	43,5	43,0	-0,5
9	7,14	1,01	43,5	43,0	-0,5
10	6,88	0,97	43,5	43,0	-0,5
20	7,32	1,03	43,5	43,0	-0,6
30	7	0,984	43,5	43,0	-0,5
40	7,33	1,03	43,5	43,0	-0,6
50	7,13	1	43,5	42,9	-0,6
60	7,4	1,05	43,5	43,0	-0,5
70	7,2	1,01	43,5	42,9	-0,6
80	6,94	0,965	43,5	42,9	-0,7
90	7,2	1	43,6	42,9	-0,7
100	7,01	1,03	43,5	43,3	-0,2
200	7,12	1,06	43,5	43,5	-0,1
300	7,19	1,02	43,5	43,0	-0,5
400	7	1,03	43,5	43,4	-0,1
500	7,09	1	43,3	43,0	-0,4
600	7,23	0,96	43,3	42,5	-0,8
700	7,18	0,96	43,2	42,5	-0,7
800	7,05	0,89	43,1	42,0	-1,0
900	7,28	0,88	43,0	41,6	-1,3
1000	7,43	0,86	42,8	41,3	-1,5
2000	7,3	0,2	41,6	28,8	-12,9
3000	7	0,02	39,2	9,1	-30,1

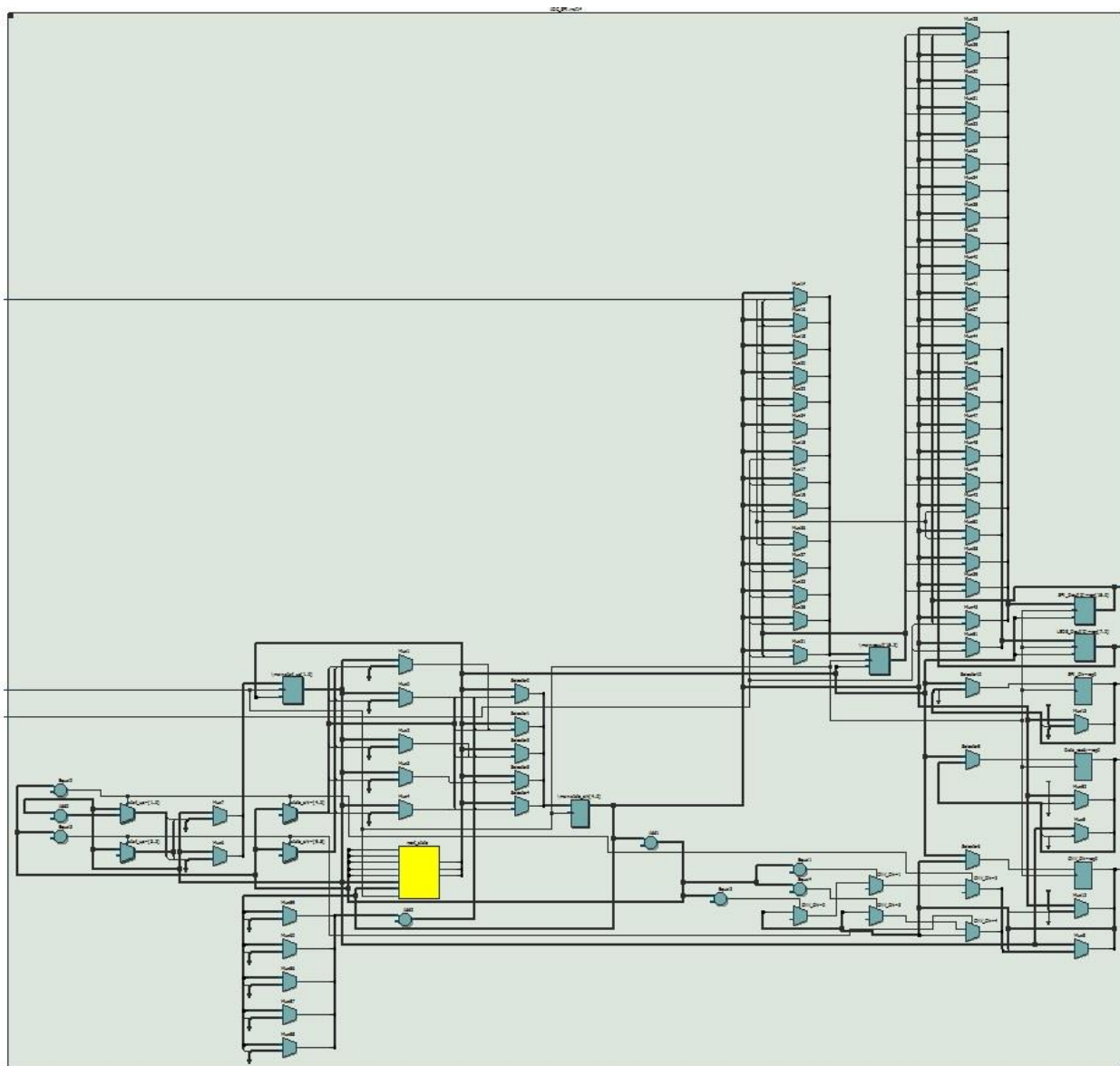
## Priedas 4. Signalų perdavimas FPGA matricioje tarp blokų



## Priedas 5. STM\_SPI blokelis RTL lygmenyje

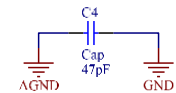
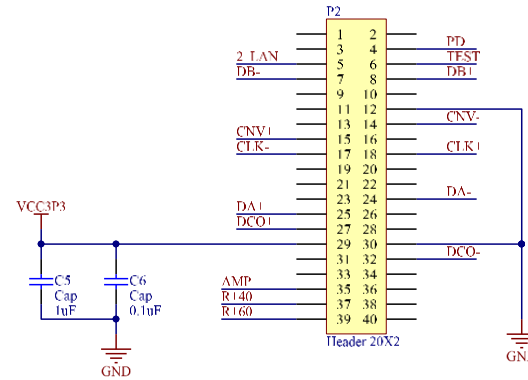
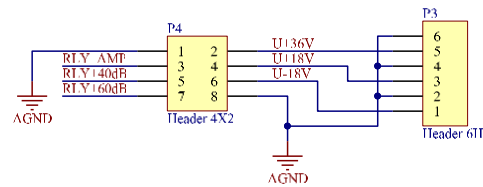
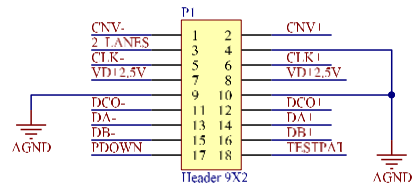
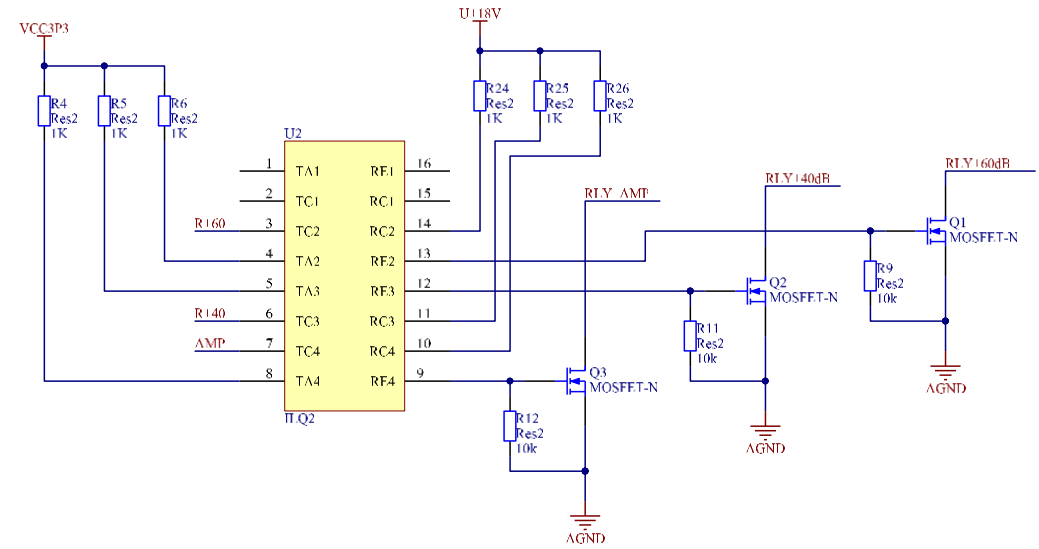
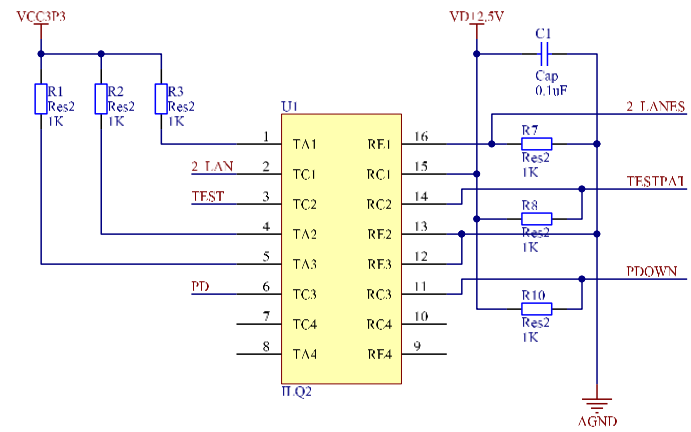


**Priedas 6.** ADC\_SPI blokelis RTL lygmenyje (geltonas blokelis – būsenos mašina)



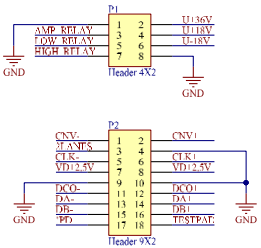
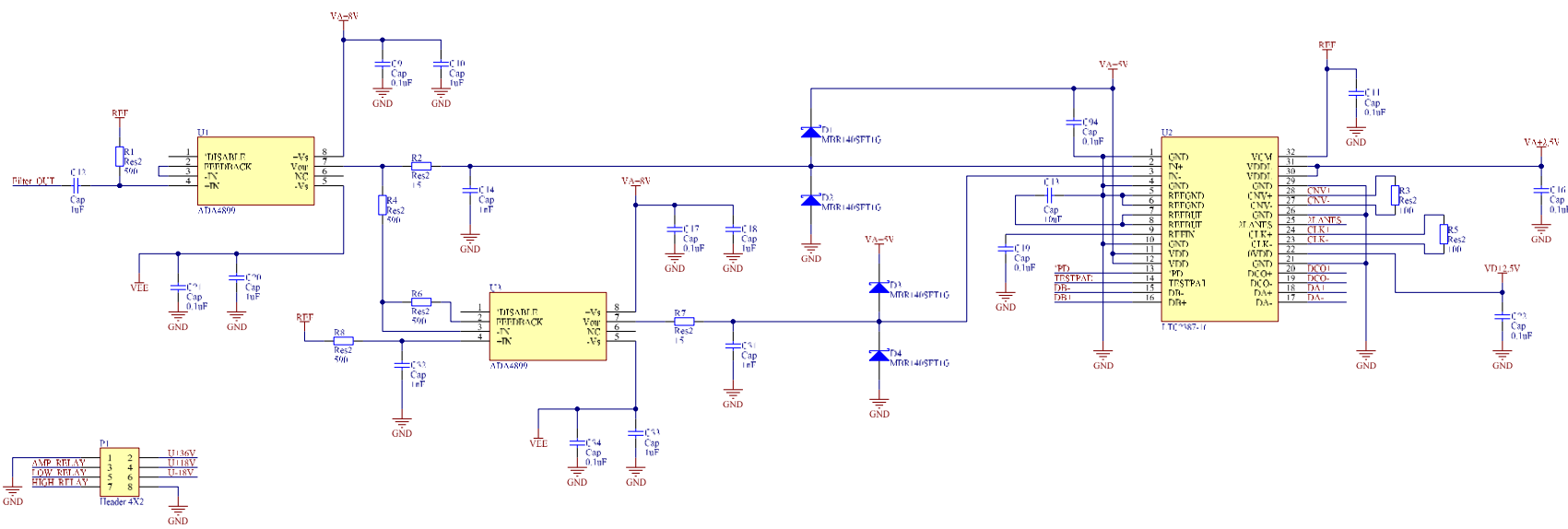


# Priedas 7. Pagrindinės plokštės principinė schema

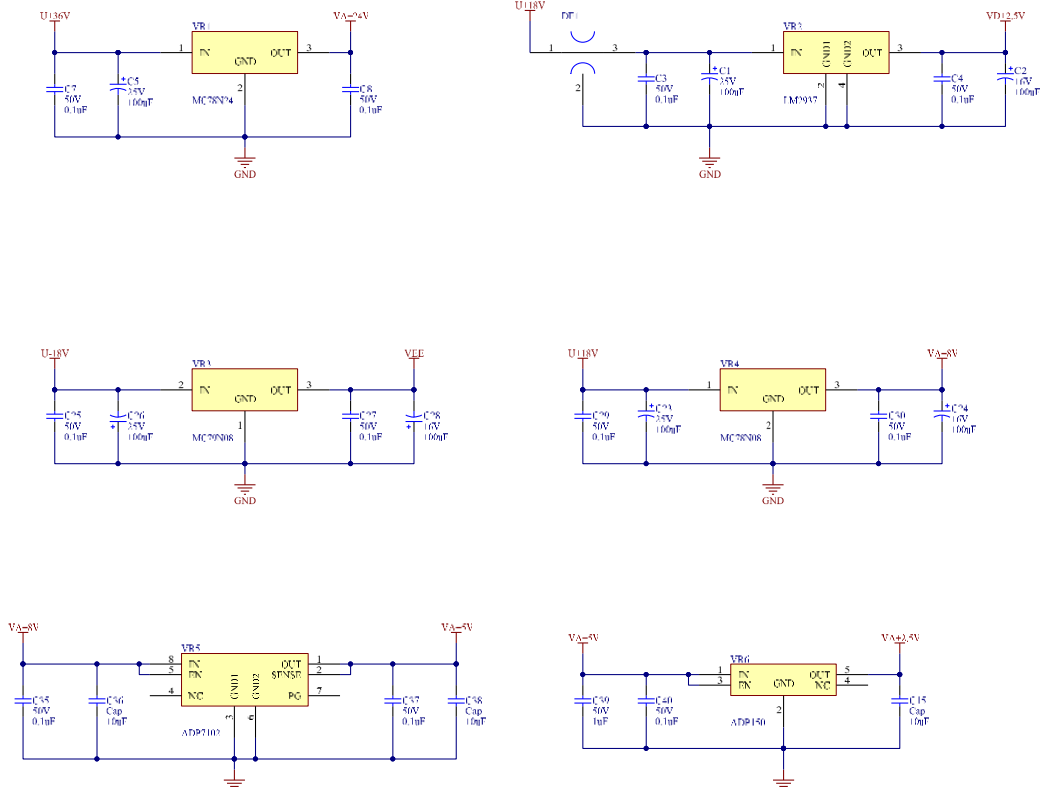
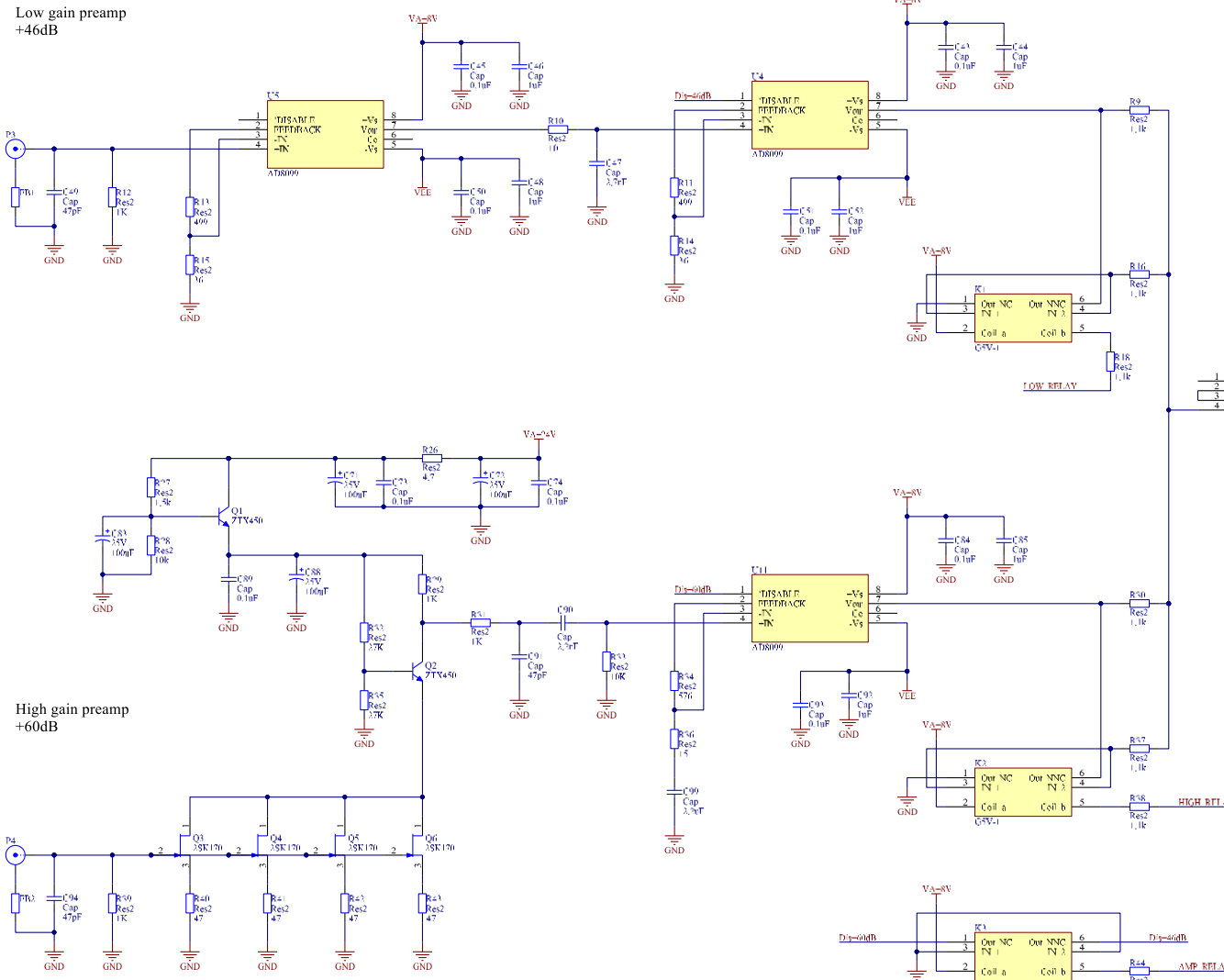


# Priedas 8. Imtuvo plokštės principinė schema

ADC section



Attenuator -6dB



Low pass filter -3dB @ 1,2 MHz

