



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Tomas Skredėnas**

**PORTATYVIOS ULTRAGARSINĖS SPEKTROSKOPIJOS  
SISTEMOS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Linas Svilainis

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**ELEKTRONIKOS KATEDRA**

**PORTATYVIOS ULTRAGARSINĖS SPEKTROSKOPIJOS  
SISTEMOS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektronikos Inžinerija (621H61002)

**Vadovas**

(            ) Prof. dr. Linas Svilainis

(            )

**Recenzentas**

(            ) Doc. dr. Paulius Kaškonas

(            )

**Projektą atliko**

(            ) Tomas Skredėnas

(            )

**KAUNAS, 2018**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir Elektronikos

(Fakultetas)

Tomas Skredėnas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos Inžinerija (621H61002)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Portatyvios ultragarsinės spektroskopijos sistemos projektavimas ir tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. Gegužės 29 d.  
Kaunas

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

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

---

Skredėnas, Tomas. Portatyvios ultragarsinės spektroskopijos sistemos projektavimas ir tyrimas. Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Linas Svilainis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, elektronikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: Ultragarsas, spektroskopija, portatyvi ultragarsinė sistema.

Kaunas, 2018. 61 p.

## **SANTRAUKA**

Šio darbo tikslas yra suprojektuoti ir iširti portatyvią ultragarsinę sistemą pritaikytą spektroskopijos tyrimams. Darbe pristatyti ultragarsinės spektroskopijos principai, apžvelgtos taikymo sritys. Atlikta rinkoje esančių ultragarsinių sistemų analizė. Parodyta, kad rinkoje siūlomos sistemos nėra portatyvios, nepalaiko bevielio duomenų perdavimo, dėl didelio lankstumo ir perteklinio valdomų parametrų kiekio pasižymi didele kaina. Analizės pagrindu sudaryti reikalavimai projektuojamai sistemai.

Sudaryta sistemos struktūra, parinkti komponentai ir topologijos funkcijų užtikrinimui. Sistema sudaryta iš trijų pagrindinių posistemų: i) žadinimo; ii) priėmimo ir skaitmenizavimo bei iii) valdymo, sinchronizacijos ir duomenų perdavimo. Posistemės suprojektuotos ir pagamintos kaip atskiri moduliai, siekiant greitai ir lanksčiai atlikti jų tyrimus. Sudaryta tyrimų metodika, suprojektuota tyrimų sistema. Pateikiama tyrimų sistemos bei metodikos analizė. Atlikti suprojektuotų ultragarsinės duomenų surinkimo sistemos modulių mazgų tyrimai, palyginti įvairūs sprendimo variantai. Naudojantis suprojektuota ultragarsinių signalų surinkimo sistema, atlikti preliminarūs ultragarsinės spektroskopijos bandymai.

Skredėnas, Tomas. Research and development of the portable ultrasonic spectroscopy system. *Master's thesis in Electronics Engineering* / supervisor Prof. Dr. Linas Svilainis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: Ultrasound, spectroscopy, portable ultrasound system.

Kaunas, 2018. 61 p.

## **SUMMARY**

The aim of this work is to design and investigate a portable ultrasound system adapted for spectroscopy research. The work presents the principles of ultrasonic spectroscopy, overviews the application areas. The analysis of the commercially available ultrasonic systems was carried out. It was shown that the systems offered on the market are not portable, do not support wireless data transmission. Commercial systems are high cost, because of the high flexibility and excessive amount of controlled parameters. Requirements for the new system design have been rectified.

The structure of the system has been designed. The system consists of three main subsystems: i) excitation; ii) receiving and digitizing, and iii) control, synchronization and communication. The aforementioned subsystems have been designed and manufactured as separate devices, in order to quickly and flexibly carry out their research. Parameters measurement system has been designed and methodology created. Analysis of the parameters measurement system and methodology is presented. Components and topologies have been selected based on parameters measurements for different solution variants. Preliminary ultrasound spectroscopy measurements have been carry out using the designed ultrasonic signaling system.

# TURINYS

IVADAS.....	7
1. LITERATŪROS ANALIZĖ .....	8
1.1. Ultragarsas.....	8
1.2. Ultragarsiniai keitikliai.....	11
1.3. Spektroskopija.....	12
1.4. Rezonansinės spektroskopijos taikymas .....	14
1.4.1 Membranų filtrų savybių nustatymas naudojant ultragarsinę spektroskopiją .....	14
1.4.2 Augalo fiziologinių parametrų nustatymas .....	16
1.4.3 Metalų bandinių storio nustatymas remiantis ultragarsinę spektroskopija.....	17
1.5. Įrenginių duomenų surinkimui apžvalga .....	19
1.5.1 NDE ultragarsinė duomenų surinkimo sistema.....	20
1.5.2 US.Box ir US-Key ultragarsinės duomenų surinkimo sistemos.....	20
1.5.3 US.Smart ultragarsinė duomenų surinkimo sistema .....	21
1.5.4 USB-350 ultragarsinė duomenų surinkimo sistema .....	22
2. SISTEMOS PROJEKTAVIMAS.....	23
2.1. Žadinimo posistemė .....	24
2.2. Priėmimo ir skaitmenizavimo posistemė .....	26
2.2.1 Stiprintuvo projektavimas .....	26
2.2.2 Filto projektavimas .....	30
2.2.3 Skaitmenizavimo mazgo projektavimas.....	31
2.3. Synchronizavimo bei valdymo posistemė.....	33
2.4. Sistemos energetinių sąnaudų bei veikimo laiko analizė .....	34
3. SISTEMOS TYRIMAI .....	36
3.1. Matavimo sistemos ir metodikos analizė .....	36
3.2. Posistemių tyrimas .....	42
3.2.1 Ultragarsinių signalų priėmimo posistemės tyrimas .....	42
3.2.2 Valdymo ir synchronizacijos posistemės tyrimai.....	49
3.2.3 Žadinimo posistemės tyrimai .....	50
3.3. Rezonansinės spektroskopijos bandymai naudojant sistemą .....	52
4. SISTEMOS PROTOTIPO PROJEKTAVIMAS.....	56
4.1. Išmaniojo įrenginio programinės įrangos projektavimas .....	57
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	58
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....	59

## IVADAS

Ultragarsinė spektroskopija yra technika, plačiai paplitusi kietojo kūno fizikoje. Spektroskopijos metu yra naudojamos akustinės bangos pagrindinėms fizikinėms medžiagų savybėms nustatyti. Medžiagos fizikinės savybės ultragarsinės spektroskopijos metu nustatomos remiantis amplitudiniais bei faziniais pokyčiais, ultragarsinių bangų spektre. Ultragarsinė spektroskopija iš kitų naudojamų matavimo metodų išsiskiria nedestruktyviais, greitais, bandinio tyrimais bekontakčiu būdu, realaus laiko matavimais, metodo pritaikymu ne laboratorinėmis sąlygomis [1]. Ultragarsinė spektroskopija dėl akustinių bangų slopinimo dažniausiai atliekama skysčiuose panaardinus tiriamąjį objektą. Tačiau kontaktinio skysčio panaudojimas dažnai yra negalimas dėl aplinkos, tiriamosios medžiagos reakcijos į kontaktinį skystį. Besivystant šiuolaikinėms technologijoms, atsiranda vis daugiau metodų „ištraukti“ naudingą signalą iš triukšmų [2]. Pasitelkiant spektroskopijos metodą gali būti nustatomas bandinio storis, porėtumas, ultragarso greitis medžiagoje bei kiti medžiagos parametrai. Tai pat T.Gomez [1,3,4,5,6] ir S. Knapik [4,5,6] atliko augalų lapų tyrimus kuriuose ultragarsinės spektroskopijos metodu, nustatomi pagrindiniai augalo parametrai: reliatyvus vandens kiekis, tūgoro slėgis, vandens potencialas. Tie patys mokslininkai atliko membranų storio matavimų tyrimus bei parodė kad pasitelkiant ultragarsinės spektroskopijos metodus galimas  $\mu\text{m}$  eilės bandinio storio nustatymas [1]. Ultragarsinės spektroskopijos tyrimai dažniausiai atliekami laboratorinėmis sąlygomis. Naudojami laboratoriniai prietaisai, brangūs, didelių gabaritų, neportatyvūs. Portatyvios, mažos galios ultragarsinės duomenų surinkimo sistemos kuri leistų duomenis surinkti greitai, patikimai, nereikalautų išorinio maitinimo šaltinio bei turētu galimybę būti susieta su išmaniaisiais įrenginiais nėra.

Magistro baigiamojo darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti portatyvią ultragarsinių signalų surinkimo sistemą skirtą oru sklindančio ultragarso taikymui spektroskopijoje. Sistema turi tikti matavimams lauko sąlygomis, t.y. būti portatyvinė, pasižymėti minimaliomis energetinėmis sąnaudomis, minimaliais gabaritais, svoriu. Siekiant patrauklumo rinkoje, sistemos savikaina turi būti ribojama.

Tikslui pasiekti keliami uždaviniai:

-Atlikti literatūros analizę: ultragarso spektroskopija, jos taikymas, esminiai elektronikos parametrai suformuoti techninius reikalavimus sistemai

-Suprojektuoti sistemos maketą ir jį pagaminti

-Parengti programinę įrangą mikrovaldikliui bei išmaniajam įrenginiui

-Ištirti sistemos veikimą.

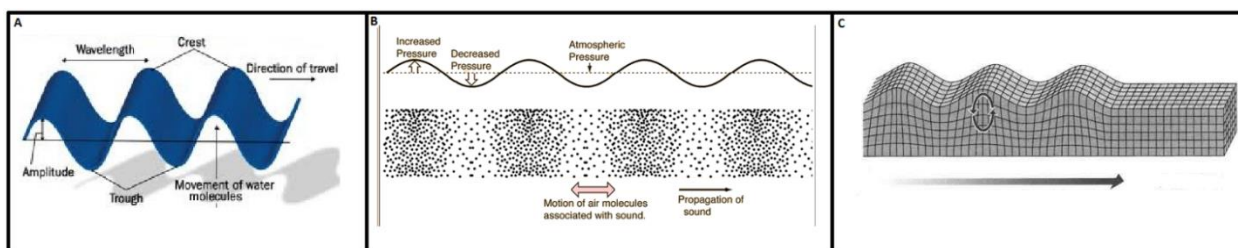
# 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

## 1.1. Ultragarsas

Ultragarsas yra žmogaus girdimumo ribą viršijančios akustinės bangos kurios dėl dalelių vibracijos perneša mechaninę energiją [7]. Pagal dažnių diapazoną ultragarsinės bangos gali būti skirstomos į tris rūšis [2]:

- Žemo dažnio ultragarsas, virpesių dažnis 20 kHz – 100 kHz.
- Vidutinio dažnio ultragarsas, virpesių dažnis 100 kHz- 10 MHz.
- Aukšto dažnio ultragarsas, virpesių dažnis 10 MHz- 10 GHz.

Ultragarsinės bangos skysčiuose bei dujose sklinda išilginių bangų pavidalu. Kietuose kūnuose ultragarsas gali sklirti paviršinių, skersinių ar išilginių bangų pavidalu žr. 1.1Pav.



1.1 Pav. Ultragarsinių bangų pavyzdžiai, kairėje - skersinės, viduryje – išilginės, dešinėje – paviršinės ultragarsinės bangos [2].

Ultragarsinės bangos apibūdinamos bangų sklidimo greičiu, akustinis slėgiu, bangų ilgiu, akustiniu impedansu, slopinimo koeficientu bei atspindžio koeficientu. Šie parametrai yra įtakojami terpės, kurioje sklinda ultragarsinė banga, savybių.

Ultragarso bangų sklidimo greičio nustatymas yra vienas pagrindinių veiksnių atliekant ultragarsinius matavimus ar tyrimus [2,7,8,9]. Naudojantis ultragarso sklidimo greičiu gali būti apskaičiuojamas ultragarsinių bangų sklidimo kelias, medžiagos kurioje sklinda ultragarsinė banga tankis. Ultragarsinių bangų sklidimo greičiui išreikšti naudojama formulė:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho k}}, \quad (1.1)$$

čia  $\rho$  - medžiagos tankis,  $E$  - Jungo modulis,  $k$ - tamprumo koeficientas. Pagal pateiktą formulę matyti, kad ultragarso greitis didėja mažėjant medžiagos tankiui bei didėjant medžiagos tvirtumui. Dujinės aplinkos pasižymi mažu medžiagos tankiu bet taipogi ir mažu tvirtumo koeficientu. Dėl šios priežasties mažiausias ultragarsinių bangų greitis išvystomas dujinėse medžiagose, bei skysčiuose, didžiausias ultragarsinių bangų greitis pasiekiamas kietose medžiagose. Šis parametras leidžia įvertinti bandomosios medžiagos molekulinės struktūros savybes.



Ultragarso greitis tai pat naudojamas norint apskaičiuoti ultragarsinės bangos ilgį. Iš pagrindinio fizikos kurso žinome kad monochromatinės bangos laike ir erdvėje nusakantys parametrai yra bangos ilgis, dažnis ar periodas [7,8]. Bangos ilgis gali būti apskaičiuojamas remiantis:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT. \quad (1.2)$$

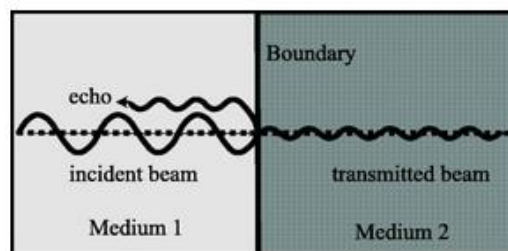
čia  $c$ - bangos sklidimo greitis,  $f$ - bangos dažnis,  $T$ -periodas. Pagal ultragarsinių bangų ilgį, atitinkamai dažnį parenkamos skirtingos tiriamosios medžiagos ir atvirkščiai.

Sklisdama, akustinė banga sukelia dalelių virpesius. Dalelės yra priverstos judėti aplink savo ramybės būsenos padėtį. Šis medžiagos priešinimasis akustinių bangų sklidimui vadinamas medžiagos akustine varža. Akustinė varža plokščiosioms bangoms keliaujančioms neslopinamąją terpę, garso slėgis  $p$  bei bangų greitis  $c$ , medžiagoje susiejami naudojantis formule [7,8,9]:

$$Z = \rho c. \quad (1.3)$$

Akustinis impedansas parodo koks garso slėgis yra generuojamas esant atitinkamai dažnio dedamajai [8][9]. Tai yra svarbus parametras apibūdinantis skirtingas terpes. Norint perduoti kuo daugiau akustinių bangų energijos iš vienos terpės į kitą svarbu, kad impedansai būtų kuo panašesni.

Ultragarsinės bangos kirsdamos dviejų skirtingų terpių ribą atsispindi priklausomai nuo terpių akustinės varžos skirtumo žr. 1.2 Pav. Kuo didesnis akustinės varžos skirtumas, tuo didesnis procentinis energijos kiekis atsispindi, savo ruožtu mažesnis ultragarsinių bangų energijos kiekis pereina į antrąją terpę. Atspindys susidaro dėl nevienodo ultragarsinių bangų greičių skirtumo pereinant iš pirmosios į antrąją terpę.



### 1.2 Ultragarsinio signalo atspindys kertant dviejų skirtingų terpių ribą [2]

Nustatyti atsispindėjusios ultragarsinės bangos energijos kiekį galima naudojantis atspindžio koeficientu. Atspindžio koeficientas apskaičiuojamas remiantis formule [2,7,9,10]:

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad (1.4)$$

čia  $Z_1$  – pirmosios aplinkos impedanso vertė,  $Z_2$ -antrosios aplinkos impedanso vertė. Atspindžio koeficientas padaugintas iš 100 tiesiogiai nurodo atspindėta ultragarsinės energijos dalį procentais.

Norint perduoti kuo daugiau ultragarsinės energijos į antrąją terpę privaloma kuo labiau suderinti abiejų terpių akustinės varžos vertes [2].

Dar vienas siunčiamų ultragarsinių bangų energijos praradimas pasireiškia dėl ultragarsinių bangų slopimo. Sklisdama terpėje ultragarsinė banga sukelia dalelių virpesius dėl kurių dalis ultragarsinių bangų energijos yra sugerama [8,9,10]. Tai pat sklindančioms terpėje ultragarsinės bangoms pasireiškia difrakcijos efektas dėl kurio keliaudamos ultragarsinės bangos yra išskaidomos erdvėje. Ultragarsinių bangų slopimas aprašomas formule:

$$A(z) = A_0 e^{-\mu_A z}, \quad (1.5)$$

čia  $\mu_A$  - amplitudinis slopinimo koeficientas, matavimo vienetas  $\text{cm}^{-1}$ ,  $A_0$  atraminės įtampos vertė. Dažniausiai ultragarsinių bangų slopinimas išreiškiamas decibelais. Šiam tikslui pasiekti pasinaudojama formule:

$$A_z (db) = 20 \log_{10} \left( \frac{A(z)}{A_0} \right). \quad (1.6)$$

Ultragarsinių bangų amplitudinis slopinimas nėra išvengiamas, jis priklauso nuo terpės savybių kurioje sklinda ultragarsinė banga.

Dažnai sutinkamas energijos pernešimo parametras ultragarsinėms bangoms yra akustinis stipris. Šis parametras nurodo energijos dalį pernešama per laiko vienetą, dažniausiai 1 sekundę, apibrėžtam ploto vienetui, pavyzdžiui kvadratiniam centimetrui. Medicinos tikslams pritaikytam ultragarsui akustinis stipris išreiškiamas vatais kvadratiniam centimetrui ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Tolimosios zonos ultragarsinėms bangoms akustinis stipris išreiškiamas formule [8,9,10]:

$$I = \frac{p^2}{2Z}, \quad (1.7)$$

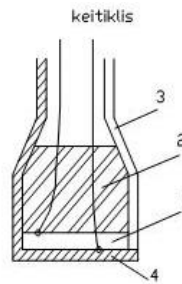
čia  $p$  - akustinių bangų sukeliama slėgis medžiagos paviršiuje,  $Z$  medžiagos akustinė varža.

Remiantis žinomos terpės savybėmis bei pagrindiniais ultragarsinių bangų parametrais nustatomas reikiamas ultragarsinių bangų dažnis, ultragarsiniams keitikliams naudojami tinkami derinamieji sluoksniai norint tyrimams panaudoti didžiausią galimą ultragarsinių bangų pernešamą energijos dalį.

Pasinaudojus šiomis akustinėmis bangomis galimas neardomasis medžiagos fizinių savybių nustatymas. Medžiagos fizinių savybių nustatymas ultragarso pagalba leidžia vartotojui išanalizuoti bandinį greitai bei tiksliai. Matavimų skaičius nėra ribotas, todėl bandymus galima atlikti skirtingose bandinio vietose ar tirti skirtingus bandinius, taip renkant vidutinius duomenis apie bandinio fizinius parametrus. Bandymai gali būti atlikti neinvaziniu, bekontakčiu būdu nepažeidžiant tiriamosios medžiagos. Ši savybė yra labai svarbi pastoviam medžiagos matavimo procesui.

## 1.2. Ultragarsiniai keitikliai

Vienas iš pagrindinių ultragarsinės sistemos sudedamųjų dalių yra ultragarsinių bangų keitiklis. Paprastai ultragarsiniai keitikliai gali tiek priimti ultragarsines bangas tiek jas siųsti. Priimtos ultragarsinės bangos yra paverčiamos į elektrinius signalus ar atvirkščiai. Ultragarsiniam keitikliui gali būti panaudotas pjezoelektrinis, magnetostrickcinis ar elektrinio lauko efektas. Dažniausiai ultragarsinėms bangoms generuoti ar priimti naudojami pjezoelektriniai keitikliai. Praktikoje dažniausiai naudojami vieno elemento keitikliai žr. 1.3 Pav. Keitiklį sudaro: [1] pjezo elementas, [2] demferis, [3] korpusas, [4] apsauginis sluoksnis [2].

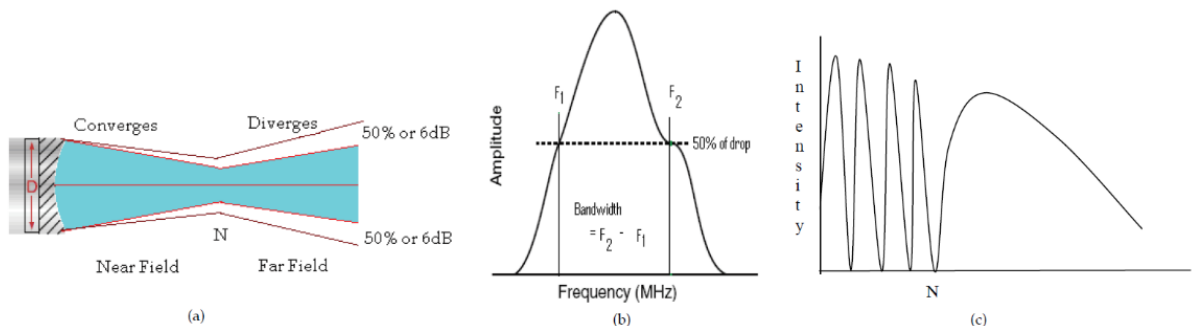


1.3 Pav. Pjezoelektrinio ultragarsinio keitiklio vidinė struktūra.

Pjezo elemento plokštumos metalizuojamos, prijungiami signaliniai laidai. Korpusas palaiko keitiklio mechaninę struktūrą, apsaugo nuo mechaninio poveikio bei atlieka ekrano funkciją [2,11,12]. Keitiklio garso laukas skirstomas į Frenelio, artimąją zoną bei Frauhferio, tolimąją zoną [11,12,13]. Artimojoje zonoje keitiklio intensyvumas nėra pastovus dėl šios priežasties dažniau naudojama tik keitiklio tolimoji zona 1.4 Pav. Artimosios zonos ilgis  $N$

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (1.8)$$

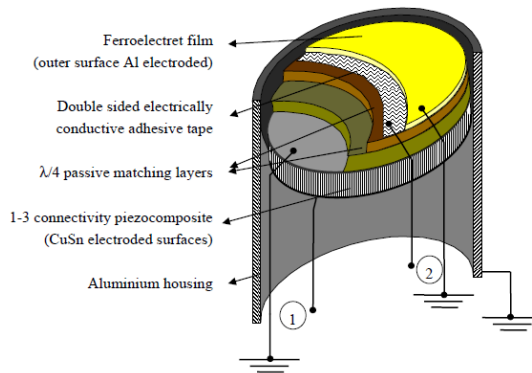
čia -  $D$  elemento diametras,  $\lambda$  – bangos ilgis.



1.4 Pav. A- ultragarsinio keitiklio artimoji bei tolimoji zona, B- keitiklio juostos plotis, C keitiklio intensyvumas pasiskirstymas priklausomai nuo artimosios zonos  $N$  ilgio [8].

Darbe numatomi ultragarsinės spektroskopijos tyrimai naudos oro terpę. Akustinis piezoelemento impedansas gali siekti 37 MRayl tuo tarpu oro akustinis impedansas yra 400 Rayl.

Ultragarsinio keitiklio apsauginių sluoksnių storis ir medžiaga (1.5 Pav.) parenkama taip, kad darbo dažnių diapazone tiriamos terpės ir keitiklio akustiniai impedansai būtų suderinti [11]. Tik tokiu atveju akustinė energija efektyviai bus perduodama į terpę.

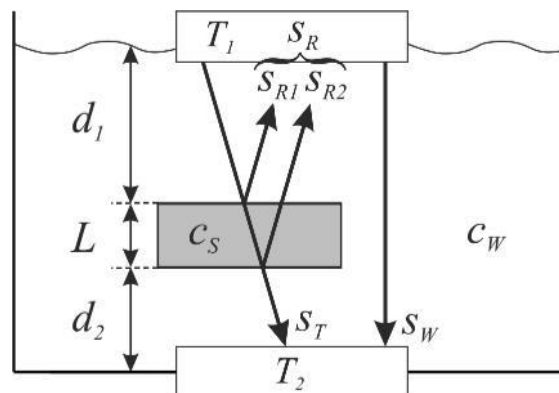


1.5 Pav. Ultragarsinio keitiklio struktūra naudojant akustinio impedanso suderinimo medžiagas [1]

Derinimui į oro terpę naudojamos porėtos medžiagos, naudojama keletas derinamųjų medžiagos sluoksnių.

### 1.3. Spektroskopija

Ultragarsinė spektroskopija naudoja signalo analizę dažnių srityje. Kadangi daugeliu atvejų sklaidimas priklauso nuo bangos ilgio, šis metodas teikia naują informaciją, palyginus su analize laiko srityje. Analizėje remiamasi amplitudės ar fazės spektru [1,3,4,5]. Rezonansinė ultragarsinė spektroskopija analizuoja bangų interferenciją bandinio sluoksniuose ar struktūroje. Taikoma bekontaktiam, neinvaziniam medžiagos fizinių parametrų matavimui. Gali būti nustatomas ultragarsiniu bangų slopinimas, sklaidimo greitis, bandinio storis, tankis. Ultragarsinių bangų greičiui bei bandinio storiui nustatyti akustinės bangos perleidžiamos per tyrimų objektą žr. 1.6 Pav., matuojamas ultragarsinių bangų fazinis pokytis, energijos nuostoliai sukelti tyrimų objekto.



1.6 Pav. Ultragarsinių bangų panaudojimas bandinio parametru nustatymui [20]

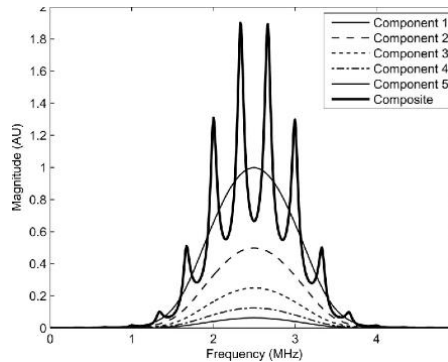
Išsiųstas akustinis signalas iš  $T_1$  pasiekęs tyrimų objektą atsispinti nuo jo paviršiaus ir grįžta atgal į ultragarsinį keitiklį, šis signalas pažymėtas  $S_{R1}$ . Tuo pat metu gaunamas signalas kuris atsispindi nuo bandinio apatinės dalies, šis signalas pažymėtas  $S_{R2}$ . Galiausiai priimamas  $S_T$  signalas kuris praėjęs pro bandinį pasiekia ultragarsinį keitiklį  $T_2$ . Pašalinus bandinį gaunamas signalas  $S_W$ . Signalo paskirtis yra įvertinti ultragarsinių bangų greiti naudojamoje terpėje kai tikslus atstumas tarp ultragarsinių keitiklių  $T_1$  ir  $T_2$  yra žinomas. Vienu metu nustatomi bandinio storis bei greitis pagal priimtus signalus  $S_{R1}$ ,  $S_{R2}$ ,  $S_T$  ir  $S_W$ :

$$C_s = C_w * \left( \frac{2(t_w - t_T)}{t_{R2} - t_{R1}} + 1 \right), \quad (1.9)$$

$$L = \frac{C_w}{2} (2(t_w - t_T) + (t_{R2} - t_{R1})), \quad (1.10)$$

čia  $C_s$  ultragarsinių bangų greitis bandinyje,  $L$  - bandinio storis  $t_w$ ,  $t_T$ ,  $t_{R2}$ ,  $t_{R1}$  išmatuoti laiko momentai  $S_{R1}$ ,  $S_{R2}$ ,  $S_T$ , bei  $S_W$  signalams. Kai bandinio storis yra pernelyg mažas pasireiškia signalų persidengimo laiko ašyje efektai. Dėl šios priežasties nėra galimybės tinkamai nustatyti priimtų atspindžių laiko momentų. Šiai problemai išspręsti pasinaudojama ultragarsinės spektroskopijos metodais.

Kai tiriamojo bandinio storis yra per mažas pasireiškia signalų persidengimas dėl kurio spektre atsiranda konstruktyvi ar destruktyvi interferencija 1.7 Pav.



1.7 Pav. Dėl signalų persidengimo spektre atsiranda maksimumai bei minimumai [1]

Atspindžio koeficientas apsprendžiamas terpių impedansais  $Z_2$  bei  $Z_1$ :

$$R = \frac{Z_1^2 - Z_2^2}{Z_1^2 + Z_2^2 + 2iZ_1Z_2 \cot k_2 d}, \quad (1.11)$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{C_2} + i\alpha, \quad (1.12)$$

$$Z_2 = Z_2' + iZ_2'', \quad (1.13)$$

čia  $Z_1$  pirmosios,  $Z_2$  antrosios terpės akustinis impedansas,  $C_2$  ultragarsinių bangų greitis bandinyje,  $d$  bandinio storis,  $\alpha$  ultragarsinių bangų slopinimo koeficientas. Tiesioginio praėjimo koeficientas plono tiriamojo objekto su impedansu  $Z_2$  patalpinto terpėje su impedansu  $Z_1$  išreiškiamas formule:

$$T = \frac{4}{2 + 2\cos^2 k_1 t + ((Z_2^4 + Z_1^4) / Z_2^2 Z_1^2) \sin^2 k_1 t} \quad (1.14)$$

Daugkartiniai atspindžiai tiriamajame bandinyje persiklos, priklausomai nuo signalų fazių, šis persidengimas sukels konstruktyvią arba destruktivią interferenciją spektre (vieniems dažniams fazė sutaps, kities – bus priešingo ženklo). Spektrinių maksimumų ir minimumų pasikartojimo periodas priklausys nuo medžiagos storio bei akustinio greičio. Galime daryti išvadą, kad signalų spektras suteikia informacijos apie bandinio parametrus. Priklausomai nuo bandinio storio bandinys dėl konstruktyvių bei destruktivių efektų spektre stebėsime rezonansinius dažnius. Pagal šiuo rezonansinius dažnius galimas bandinio storio nustatymas. Bandinio rezonansinis dažnis:

$$f_0 = \frac{c \cdot n}{2 \cdot h}, \quad (1.15)$$

čia  $c$  yra ultragarsinių bangų greitis medžiagoje,  $h$  bandinio storis,  $n$  yra bangos numeris.

Apibendrinant ultragarsinę spektroskopiją yra sparčiai tobulėjantis ultragarsines bangas naudojantis metodas [1,3,4,5,6]. Atsiranda vis daugiau naujų sprendimų bandinių parametrų nustatyti tobulėjant naudojamai elektronikai dėl kurios vis didinama signalas triukšmas riba, tobulėjant akustiniams keitikliams.

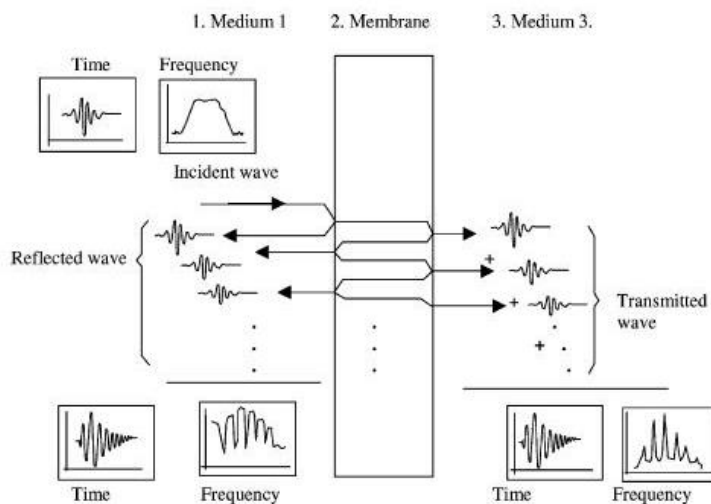
## **1.4. Rezonansinės spektroskopijos taikymas**

Ultragarsinė spektroskopija yra plačiai taikomas metodas bandinio parametrų nustatymui. Ultragarsinės sistemos projektavimui išanalizuoti ultragarsinės spektroskopijos pagalba atlikti tyrimai. Išanalizuojant skirtingus ultragarsinės spektroskopijos taikymus, surenkama informacija apie naudotą dažnių juostą, priimtų ultragarsinių bangų stiprinimo koeficientą, ultragarsinių bangų žadinimo metodą, žadinimui naudojamą įtampos lygį, panaudotą antisanklodinio filtrą, bei reikalinga sistemai dažnių juostą.

### **1.4.1 Membranų filtrų savybių nustatymas naudojant ultragarsinę spektroskopiją**

Tomás E. Gómez [1] pasinaudodamas plačiajuoste ultragarsinės spektroskopijos technika atliko filtruojančių membranų tyrimus. Technika naudoja slopinimo koeficiento bei ultragarsinių bangų greičio duomenis. Panaudojant Furje transformacija yra remiamasi dažnių srities analizę. Mėginio tankis, storis bei ultragarsinių bangų slopinimas apskaičiuojamas iš perduodamų bei atsispindėjusių ultragarsinių impulsų perleistų per mėginį. Ultragarsinė banga pasiekusi mėginį atsispindi nuo jo, dalis

bangos grįžta atgal, dalis prasiskverbia į tiriamąjį mėginį. Ultragarsinė banga mėginyje pasiekusi terpių riba tarp mėginio apatinės dalies bei aplinkos terpės atsispindi. Šiuo metu dalis ultragarsinės bangos energijos atsispindi nuo mėginio apatinės dalies bei palieka mėginį pereidama į aplinkos terpę. Šis procesas kartojasi nes kiekvienoje aplinkos terpių sankirtoje dėl skirtingo ultragarsinio impedanso gaunamas ultragarsinės bangos atspindys žr. 1.8 Pav.

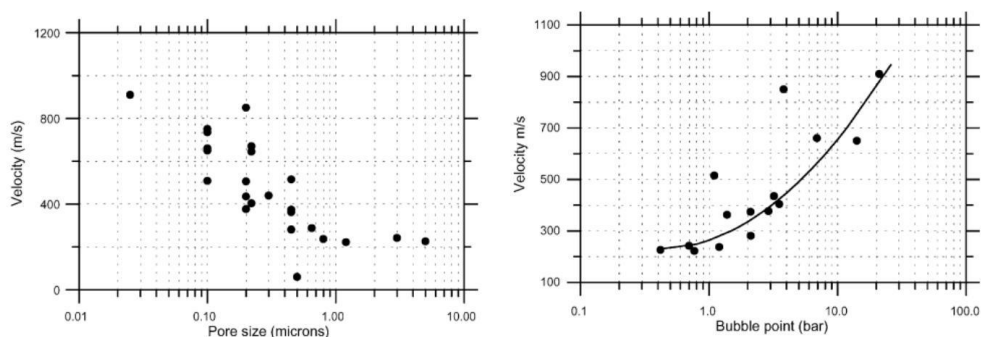


1.8 Pav. Schematinė iliustracija, ultragarsinių bangų atspindžiai ploname bandinyje [1]

Matavimo sistemai naudojami du specialūs ultragarsiniai keitikliai pritaikyti oro terpės spektroskopijai. Pirmasis ultragarsinis keitiklis naudojamas kaip imtuvas antrasis kaip siūstuvus.

Keitikliai išdėstomi statmenai vienas kitam 2 cm atstumu vienas nuo kito. Pasiūstas stačiakampio formos aukštos įtampos impulsas į siūstuvą sugeneruoja ultragarsinių bangų impulsą.

Ultragarsinės bangos perėjusios per mėginį priimamos imtuvo pagalba. Priimtas signalas sustiprinamas 110 dB bei skaitmenizuojamas oscilografu. Bandinių rezonansiniai dažniai pasiskirstė 0.3 MHz - 2.36 MHz ribose. Išanalizavus 23 membranų filtrų bandinius nustatyta: membranos storis, ultragarsinių bangų greitis, porėtumas, burbuliavimo taškas, porų dydis žr. 1.9 Pav.

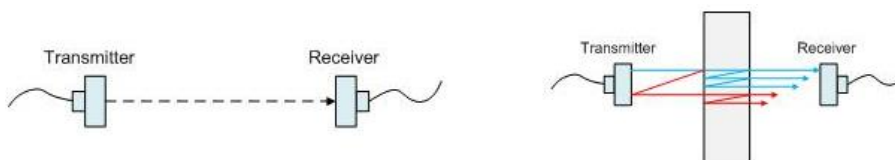


1.9 Pav. Porų dydžio priklausomybė nuo ultragarsinių bangų greičio kairėje, burbuliavimo taško priklausomybė dešinėje [1].

Apžvelgtame metode išanalizuotos 23 filtrų membranos. Pagrindiniai membranų parametrai pateikti gamintojo: membranos storis, burbuliavimo taškas, bei porų dydis palyginti su ultragarsinės spektroskopijos metodu gautais duomenimis.

#### 1.4.2 Augalo fiziologinių parametrų nustatymas

Palaikyti optimalų mikroklimatą sudėtinga neturint grįžamojo ryšio apie augalo fiziologinę būseną. Šiam tikslui atliekami įvairūs augalo fiziologinės būsenos įvertinimo tyrimai. Augantis portatyvumo bei bekontakčių matavimo poreikis paskatino augalo fiziologinius parametrus stebėti pasitelkiant ultragarsinę spektroskopiją [4,5,6,23]. Augalo fiziologiniams matavimams atlikti naudojamos ultragarsinės bangos yra išsiunčiamos iš siųstuvo bei priimamos per imtuvą žr. 1.10 Pav.



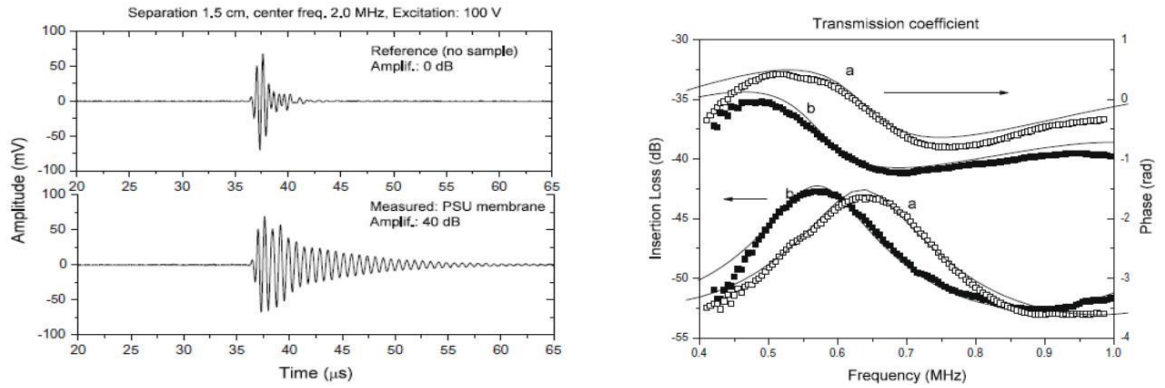
1.10 Pav. Ultragarsiniai keitikliai, ultragarsinis siųstuvas ir ultragarsinis imtuvas (kairėje), ultragarsiniai keitikliai kai tarp jų patalpintas bandinys (dešinėje) [20]

Matavimams naudojami 0.3 MHz-1.2 MHz ultragarsiniai keitikliai. Matavimai atliekami oro terpėje užtikrinant augalo vientisumą. Keitikliai pastatomi 2 cm atstumu vienas nuo kito. Ultragarsinių bangų siųstuvas žadinamas stačiakampiais įtampos impulsais, 100 V - 400 V ribose. Priimtos ultragarsinės bangos sustiprinamos 59 dB bei filtruojamos su 10 MHz žemo dažnio filtru. Išsiuntus signalą iš siųstuvo bei jį priėmus imtuvu, nustatomas signalo vėlavimas.

Šiam tikslui pasiekti reikalingas tikslus ultragarsinių bangų greitis tyrimams naudojamoje terpėje. Norint nustatyti tikslų ultragarso greitį, bei bandinio slopinimo koeficientą ultragarsinis signalas pasiunčiamas iš siųstuvo žinomu atstumu į imtuvą neįterpiant bandomosios medžiagos.

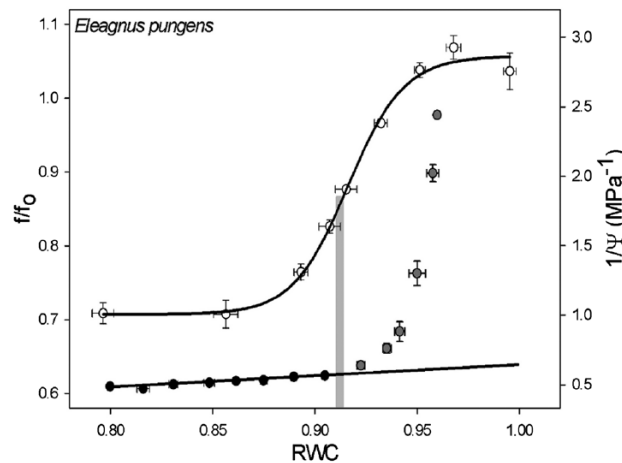
Įterpus bandinį tarp siųstuvo bei imtuvo pasiunčiamas bei priimamas ultragarsinis signalas. Kadangi įterptas bandinys ir naudojamoji terpė turi skirtingą akustinę impedansą gautas signalo sklidimo laikas yra skirtingas, lyginant jį su signalo sklidimo laiku be bandinio. Pasinaudojant ultragarsinio signalo greičiu terpėje bei žinant ultragarsinio signalo vėlavimo laiką galimas bandinio storio nustatymas. Augalo fiziologinių parametrų nustatymui panaudoti ultragarsiniai signalai pateikiami 1.11 Pav.





1.11 Pav. Ultragarsiniai signalai. Viršuje priimtas ultragarsinis signalas be bandinio. Apačioje priimtas ultragarsinis signalas su bandiniu (kairė). Amplitudės ir fazės poslinkio spektrai. a) vandens kiekis pradiniu laiko momentu, b) vandens kiekis po 10min [3]

Nustačius bandinio storį, žinant akustinių bangų greitį bei remiantis amplitudės ir fazės pokyčio spektrų duomenimis, galimas augalo fizinių parametrų įvertinimas. [4,5,6]. Pvz. santykinis drėgmės kiekis RWC gali būti nustatomas, analizuojant rezonansinio dažnio pokytį žr. 1.12 Pav.



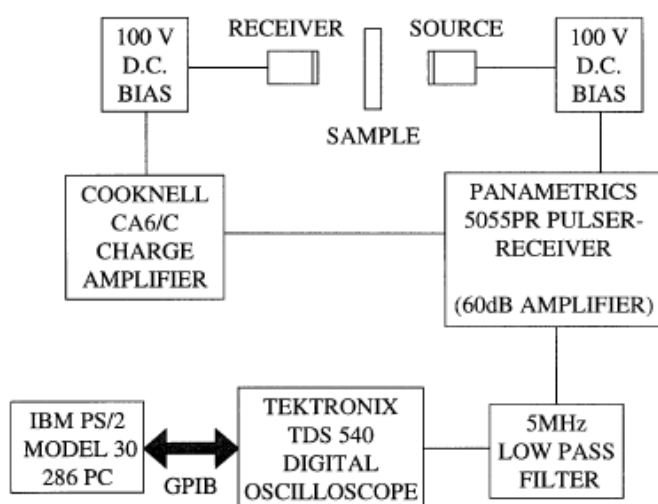
1.12 Pav. Santykinio vandens kiekio (RWC) bei vandens potencialo ( $\psi$ ) ryšys su ultragarsinės spektroskopijos rezonansinio dažnio pokyčiu [23]

Matome, kad ultragarso spektroskopija leidžia efektyviai ir neinvaziniu būdu vertinti augalo fiziologinę būseną. Šis metodas užtikrintų ne tik efektyvų vandens resursų naudojimą bet ir leistų vertinti augalo streso būseną bei tausotų žmogaus laiką, kadangi rezultatai gaunami operatyviai ir matavimas gali būti kartojamas daug kartų [4,5,6].

### 1.4.3 Metalų bandinių storio nustatymas remiantis ultragarsinę spektroskopija

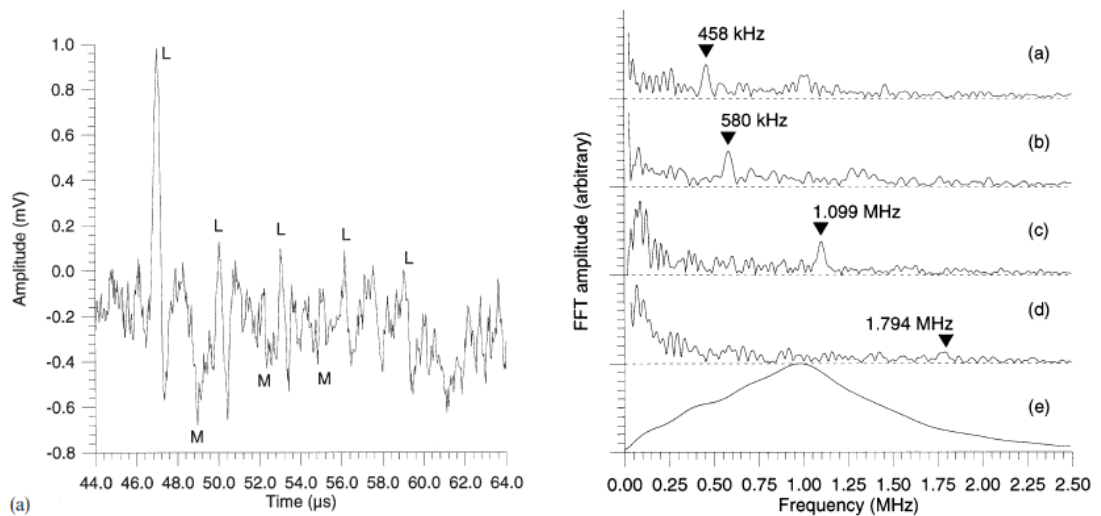
W.M.D Wright bei D.A. Hutchins naudodamiesi ultragarsinės spektroskopijos metodais atliko bandymus su skirtingo storio aliuminio bandiniais norėdami nustatyti bandinių storį bei įrodyti, kad šiam tikslui pasiekti ultragarsiniai matavimai gali būti atliekami oro terpėje [14]. Tyrimams atlikti buvo panaudoti ultragarsiniai keitikliai kurių dažnių juostos plotis siekia 800 kHz, dažnių juosta

200 kHz – 1 MHz riboje. Keitikliai pastatomi statmenai vienas kitam 25 mm atstumu vienas nuo kito. Pirmasis ultragarsinis keitiklis žadinamas stačiakampiais 300 V impulsais pasinaudojant Panametrics 5055PR ultragarsinių bangų žadinimo bei priėmimo sistema. Antrasis ultragarsinis keitiklis prijungtas prie Cooknell Ca6/C stiprintuvo. Gauti elektriniai signalai iš keitiklio sustiprinami 60 dB. Darbo taškui nustatyti naudojami nuolatinės 100 V įtampos šaltiniai prijungti prie ultragarsinių keitiklių. Sustiprintas ultragarsinis signalas perleidžiamas pro 5MHz žemo dažnių filtrą aukšto dažnio triukšmo dedamosios pašalinti. Signalas po filtro patenka į Tektronix TDS 540 skaitmeninį oscilografą kuriame ultragarsinis signalas yra skaitmenizuojamas bei perduodamas į kompiuterį. Naudota bandymams sistema pateikiama 1.13 Pav.



1.13 Pav. Ultragarsinių signalų surinkimui, apdorojimui bei perdavimui, naudota sistemos struktūrinė schema [14].

Išsiustas ultragarsinių bangų signalas sklisdamas per aliuminio bandinį yra vėlinamas dėl pasikeitusios terpės parametrų kurioje sklinda ultragarsinė banga. Bandinio storio nustatymui pakanka žinoti tikslų ultragarso greitį tarp ultragarsinių keitiklių, atstumą tarp jų bei ultragarsinių bangų vėlinimo laiką bandinyje. Tačiau toks matavimo metodas dažnai reikalauja papildomų atraminių matavimų. Papildomai, vėlinimo laiko matavimo tikslumas tiesiogiai atsilies į bandinio storio paklaidas. Dėl šių priežasčių mokslininkai bandinio storį įvertino pasitelkiant gautus signalus dažnių ašyje žr. 1.14 Pav.



1.14 Pav. Kairėje, priimtas ultragarsinis signalas perskildęs per 9.7mm storio aliuminio bandinį. L- išilginių bangų atspindžiai, M- paviršinių bangų atspindžiai. Dešinėje Ultragarsinių signalų dažnių sritis esant skirtingiems bandinių storiams, a-6.4mm, b-5mm, c-2.7mm, d-1.7mm, e- naudotų ultragarsinių keitiklių dažninė charakteristika [14].

Pasinaudojus gautų signalų analize dažnių ašyje matomas bandinio savasis rezonansinis dažnis kuris tiesiogiai koreliuoja su bandinio storiu. Rezonansiniui dažniui išskirti pasinaudota signalo vidurkinimu, triukšmo dedamosioms signalo spektre sumažinti. Pateiktame paveikslėlyje pastebime kad (d) atveju tikslų rezonansinį dažnį nustatyti sunku. Dažnio dedamoji nepatenka į ultragarsinio keitiklio dažnių diapazoną. Šiai problemai išspręsti mokslininkai pasiūlė galimybę padidinti priimamų ultragarsinių signalų stiprinimą, padidinti žadinimo įtampą arba parinkti platesnės dažnių juosto ultragarsinį keitiklį.

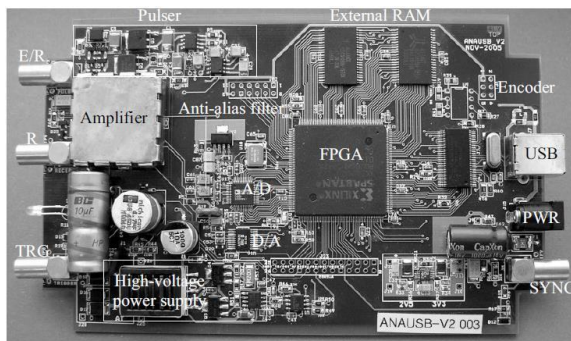
Atlikus ultragarsinės spektroskopijos metodų apžvalgą nustatyta, kad projektuojamos ultragarsinės sistemos dažnių juosta turi siekti 3 MHz ribą. Priimtoms ultragarsinėms bangoms reikalingos dvi stiprinimo reikšmės: 0 dB (nesant bandinio) bei 40 dB (patalpinus bandinį). Ultragarsinė sistema turi turėti galimybę generuoti stataus fronto (užtikrinančio iki 3 MHz juostą) aukštos įtampos (iki 400 V) impulsą.

### 1.5. Įrenginių duomenų surinkimui apžvalga

Ultragarsiniai nedestruktyvūs bei bekontakčiai matavimai tampa industriniu standartu aviacijoje, maisto pramonėje, inžinerijos srityje [1,2,5,6,12]. Šiems matavimams naudojamos ultragarsinių duomenų surinkimui bei saugojimui skirtos sistemos. Norint geriau įsisavinti šiuo metu rinkoje esančius produktus bei nustatyti vyraujančius ultragarsinių sistemų parametrus atliekama esančių ultragarsinių sistemų analizė.

### 1.5.1 NDE ultragarsinė duomenų surinkimo sistema

Vienas iš naudojamų sistemos pavyzdžių yra NDE System ultragarsiniams matavimams skirta sistema. Sistemos pagrindą sudaro 160x100 mm spausdintinio montažo plokštė su programuojama logika „FPGA“ bei papildomomis signalų apdorojimo funkcijomis žr. 1.15 Pav. Sistemoje įterptas aukštos įtampos keitiklis generuojantis nuo 50 V iki 400 V nuolatinę įtampą, bei impulsų formuotuvą naudojamas ultragarsinių bangų žadinimui. Žadinimo impulsai yra stačiakampio formos, integruota galimybė impulsus siųsti pliūpsnio (angl. Burst) režimu. Sistemoje naudojamas 80 MS/s diskretizavimo dažnis. Pralaidos dažnių juosta nuo 0.3 MHz iki 30 MHz.

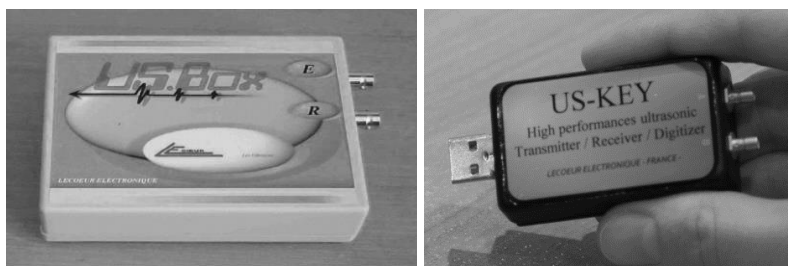


1.15 Pav. NDE ultragarsinė duomenų surinkimo sistema [15]

Sistema pažymi 2.5 W galios suvartojimu normalaus darbo režime, palaiko standartinę antros kartos USB duomenų sąsają. Sistemoje numatytas programuojamas iki 80 dB ultragarsinių bangų stiprinimo koeficientas. Sistemos darbui užtikrinti reikalingas kompiuteris kuris prijungtas per USB sąsają sukonfigūruoja atitinkamus sistemos parametrus [15]. Sistemos kaina nenurodoma. Sistema netinka oro spektroskopijos tyrimams, nes apatinė dažnių riba yra per aukštai (300 kHz vietoj 200 kHz), diskretizavimo dažnis ir maksimali pralaidos juosta pertekliniai: apdorojamų duomenų kiekis ir triukšmas bus per dideli. Papildomai sistemai reikalingas išorinis maitinimo šaltinis, nėra galimybės duomenų perdavimas bevieliu ryšiu.

### 1.5.2 US.Box ir US-Key ultragarsinės duomenų surinkimo sistemos

Prancūzijos kompanija Lecoeur Electronique sukurta 1993 metai bei specializuojasi elektronikos įrangos kūrimu ultragarsiniu tyrimų srityje. Kompanija siūlo ultragarsines sistemas US.Box ir US-Key [16, 22]. Ultragarsinė duomenų surinkimo sistemos privalumas mobilumas bei portabilumas žr. 1.16 Pav. Sistema turi siuntimo bei priėmimo išvadus. Sistemos dažnių juostos plotis siekia nuo 540 kHz iki 25 MHz (US Key - iki 18 MHz). Sistemoje naudojamas 12 bitų analogas kodas keitiklis. Maksimalus diskretizavimo dažnis siekia 160 MHz (US Key - 80 MHz). Sistema komunikavimui su išoriniais prietaisais turi antros kartos USB duomenų perdavimo liniją. Ultragarsinėje sistemoje tai pat įterptas aukštos įtampos maitinimo šaltinis. Šaltinio maksimali įtampos vertė siekia 230 V.



1.16 Pav. Lecoeur Electronique, US.Box (kairė) ir US key duomenų surinkimo sistemos [16,22].

Papildomai US.Box sistemoje numatyti 3 analoginiai bei 6 skaitmeniniai. Sistemos darbui reikalingas išorinis energijos šaltinis, 5 V įtampa, atskirai iš maitinimo šaltinio. Sistemos kaina nenurodoma. Sistema netinka oro spektroskopijos tyrimams, nes apatinė dažnių riba yra per aukštai (540 kHz vietoj 200 kHz), be to, maksimali žadinimo įtampa yra per žema (230 V vietoj 400 V), diskretizavimo dažnis ir maksimali pralaidos juosta pertekliniai: apdorojamų duomenų kiekis ir triukšmas bus per dideli.

### 1.5.3 US.Smart ultragarsinė duomenų surinkimo sistema

Tai dar viena Lecoeur Electronique kompanijos siūloma ultragarsinė surinkimo sistema. Sistemos pagrindinis aspektas yra mobilumas. Šiam tikslui pasiekti sistema turi integruota 2600 mAh talpos baterija sistemos maitinimui, bei integruotą Bluetooth modulį sistemos komunikacijos užtikrinimui su Android platformos prietaisais 1.17 Pav.

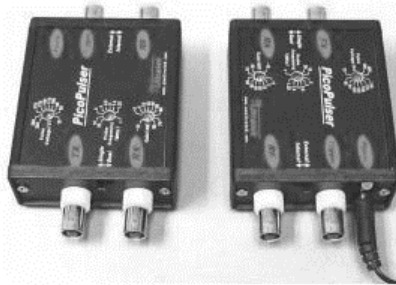


1.17 Pav. Bevieliu ryšiu komunikuojanti US.Smart ultragarsinė duomenų surinkimo sistema [17].

Sistemos pralaidos juosta siekia nuo 540 kHz iki 18 MHz. Naudojamas 8 bitų analogas kodas keitiklis. Sistemoje numatytas iki 3 dB stiprinimo koeficientas. Sistema turi integruotą aukštos įtampos šaltinį bei stačiakampių impulsų formuotuvą. Maksimali ultragarsinių bangų žadinimo įtampos vertė siekia 250 V. Sistemos kaina 1980€, gamintojas prie sistemos papildomai prideda planšetinį kompiuterį Samsung Galaxy Tab3 (kaina rinkoje ~150€) [17]. Sistema netinka oro spektroskopijos tyrimams, nes apatinė dažnių riba yra per aukštai (540 kHz vietoj 200 kHz), naudojamas 8 bitų analogas – kodas keitiklis neužtikrins reikiamos skyros.

#### 1.5.4 USB-350 ultragarsinė duomenų surinkimo sistema

Kompanijos Ultratek Ultragarsinė sistema yra nešiojama, mažų gabaritų žr. 1.18 Pav. Sistemoje esantis aukštos įtampos maitinimo šaltinis generuoja nuo 70 V iki 300V nuolatinę įtampą, įtampos vertė keičiama potenciometro pagalba. Naudojantis sistema gali būti suformuoti stačiakampiai signalai kurių impulso plotis keičiamas potenciometru 30 ns – 480 ns ribose.



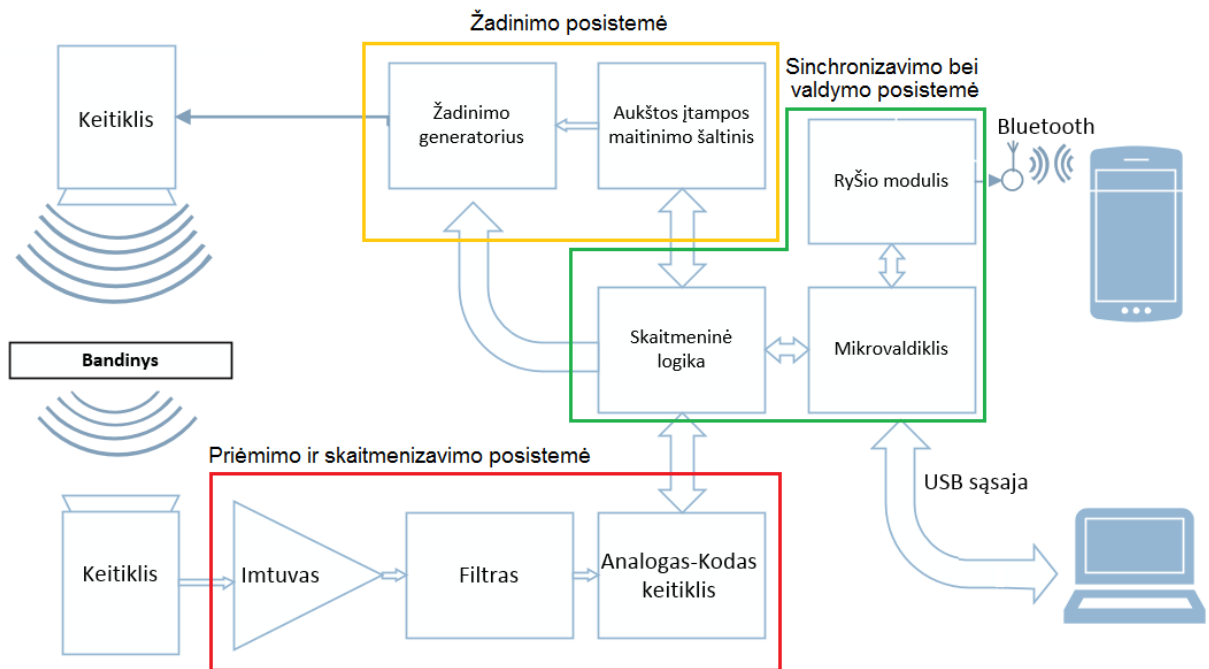
1.18 Pav. „Ultratek“ ultragarsinė duomenų surinkimo sistema [18].

Sistemoje integruotas 80 dB priimtų ultragarsinių signalų stiprintuvas. Sistemos diskretizavimo dažnis 25 MSPS, dažnių juosta 10 MHz, panaudotas analogas kodas keitiklis 8 bitų. Sistemai reikalingas 9 W galios išorinis maitinimo šaltinis. Gamintojas deklaruoja kad sistemos kaina yra mažiausia rinkoje. Pateikus užklausą apie sistemos kainą, gamintojas nurodė 4733€ kainą (įskaitant programinę įrangą) [18]. Sistema netinka oro spektroskopijos tyrimams, nes maksimali žadinimo įtampa yra per žema (300 V vietoj 400 V), sistemai reikalingas išorinis maitinimo šaltinis, nėra galimybės duomenis perduoti bevieliu ryšiu, naudojamas 8 bitų analogas – kodas keitiklis neužtikrins reikiamos skyros.

Išanalizavus siūlomų ultragarsinių sistemų rinką daroma išvada kad rinkai patrauklios ultragarsinės sistemos, skirtos matuoti dujų aplinkoje, šiuo atveju oro, nėra. Išanalizuotos ultragarsinės sistemos reikalauja išorinių maitinimo šaltinių todėl praktiškai jos negali būti panaudotos aplinkoje kurioje nėra elektros tinklo. Didžioji dalis sistemų pasižymi aukšta kaina todėl praranda patrauklumą rinkoje. Atlikus ultragarsinės spektroskopijos metodų apžvalgą nustatyta, kad projektuojamos ultragarsinės sistemos dažnių juosta turi siekti 3 MHz ribą. Priimtoms ultragarsinėms bangoms reikalingas keičiamas stiprinimo koeficientas: 0 dB bei 40 dB. Ultragarsinė sistema turi turėti galimybę generuoti stačiakampius aukštos įtampos (iki 400 V) impulsus ultragarsinių signalų stiprinimui. Nustatyta, kad sistemoje naudojamo analogas - kodas keitiklio diskretizavimo dažnis turi būti didesnis nei 6MHz norint tenkinti Naikvisto dažnių teoremą.

## 2. SISTEMOS PROJEKTAVIMAS

Norint nustatyti medžiagos fizinius parametrus pasitelkiant akustines bangas reikalinga ultragarsinė duomenų surinkimo sistema. Ultragarsinės sistemos paskirtis žadinti ultragarsinius signalus, juos išsiųsti bei priimti. Sistema turi turėti galimybę gautus duomenis surinkti, apdoroti, išsaugoti bei perduoti į kitą įrenginį bevieliu ryšiu žr. 2.1 Pav. Sistema projektuojama atsižvelgiant į ankstesniuose skyriuose iškeltus reikalavimus.



2.1 Ultragarsinės sistemos struktūrinė schema

Ultragarsinę sistemą sudaro 9 pagrindinės dalys: programuojamas aukštos įtampos šaltinis, žadinimo generatorius, ultragarsinių keitiklių pora, filtras, ultragarsinių signalų priėmimo įrenginys, aukštos įtampos šaltinis, signalų synchronizavimo įrenginys, mikrovaldiklis bei bevielio ryšio modulis. Išskiriamos trys posistemės: žadinimo, priėmimo bei valdymo. Tyrimų metu tiriamasis bandinys įterpiamas tarp dviejų ultragarsinių keitiklių. Pagal užsakymą pagaminti bei oro terpei pritaikyti ultragarsiniai keitikliai pateikiami 2.2 Pav.



2.2 Pav. Ultragarsinėje sistemoje naudojami ultragarsiniai keitikliai

Paveikslėlyje pateikti ultragarsiniai keitikliai kurių centrinis dažnis yra 650 kHz. Keitiklių matmenys yra 25x45 mm. Keitiklių akustinis impedansas priderintas oro akustiniui impedansui.

Ultragarsiniai keitikliai bus išdėstyti statmenai vienas kitam ~ 2 cm atstumu [1,3,4] vienas nuo kito bei naudojami priimti ultragarsinių bangų signalus bei juos žadinti.

Ultragarsinio signalo suformavimui ultragarsinių bangų keitiklis lėtai užkraunamas 400 V įtampa naudojant aukštos įtampos šaltinį. Po užkrovimo keitiklis staigiai iškraunamas tranzistoriaus pagalba, tokiu būdu keitiklį sužadinant. Pasiuntus ultragarsinių bangų signalą, dalis pro bandinį prasiskverbęsio signalo patenka į priimančią ultragarsinį keitiklį. Priimtas signalas stiprinamas operacinio stiprintuvo pagalba, paverčiamas į skaitmeninį kodą naudojant 10 MHz diskretizavimo dažnio, 12 bitų keitiklį analogas - kodas. Skaitmenizuotas signalas 10 MHz dažniu perduodamas į valdymo įrenginį bei ten laikinai saugomas FiFo tipo buferyje. Buferei užsipildžius duomenų surinkimo procesas baigiamas duomenis 158 kHz dažniu perduodant mikrovaldikliui. Mikrovaldiklis gautus duomenis persiunčia Bluetooth ryšiu pasinaudodamas ryšio moduliui ar USB sąsaja.

## 2.1. Žadinimo posistemė

Norint suprojektuoti ultragarsinę sistemą skirta medžiagų fizinių parametru tyrimams reikalingas ultragarsinių bangų žadinimo įrenginys. Pjezoelektrinis kristalas ar sintetinis polimeras paveiktas išorinio elektrinio lauko keičia savo formą [11,12,13]. Dėl šios priežasties paveiktus pjezoelektrinį elementą aukštos įtampos impulsu, kristalas pakeis savo formą, taip sugeneruodamas ultragarsinių bangų impulsą.

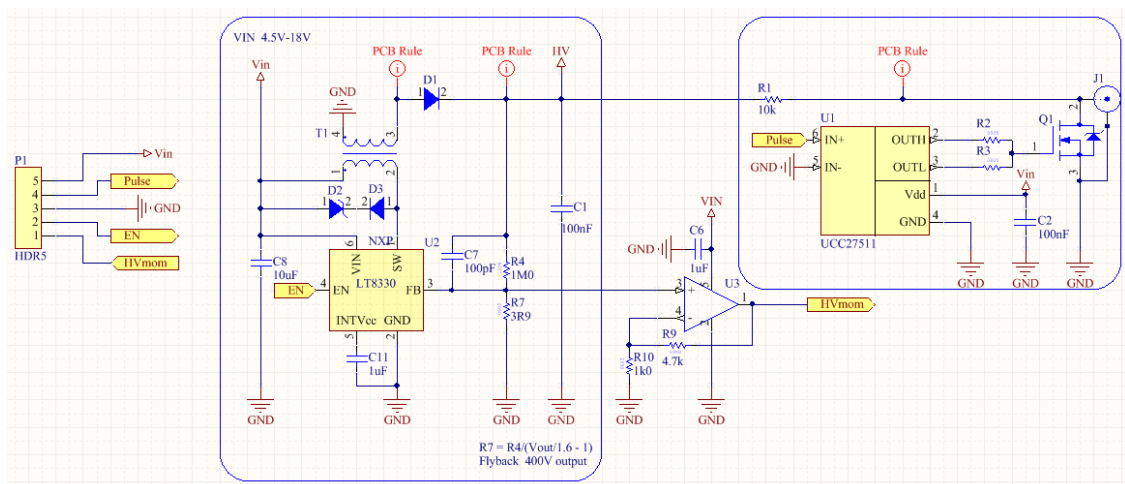
Ultragarsinio keitiklio žadinimui suprojektuojamas 400 V išėjimo įtampos maitinimo šaltinis. Šaltinio pagalba ultragarsinis keitiklis užkraunamas iki 400 V įtampos vertės. Reikiamu laiko momentu ultragarsinis keitiklis šuntuojamas į žemę tranzistoriaus pagalba. Greitai pasikeitus potencialui ultragarsiniame keitiklyje suformuojamas ultragarsinių bangų impulsas.

Aukštos įtampos šaltiniui pasirinkta naudoti „Flyback“ tipo topologija. Valdančioji mikroschema pasirinkta LT8330 kuri užtikrina iki 90% naudingumo koeficientą, turi grįžtamojo ryšio grandinę, yra mažų gabaritų 3.1 x 2.35 mm. Norint mikrovaldiklio pagalba stebėti aukštos įtampos maitinimo šaltinio išėjimo įtampą, šaltinio grįžtamojo ryšio grandinės įtampos vertė sustiprinama operaciniu stiprintuvu ir išvedama į išorinį plokštės išvadą.

Pasinaudojant Altium Designer programinės įrangos pagalba nubraižoma principinė aukštos įtampos keitiklio schema žr. 2.3 Pav. Mikroschemos pagalba generuojami srovės impulsai per

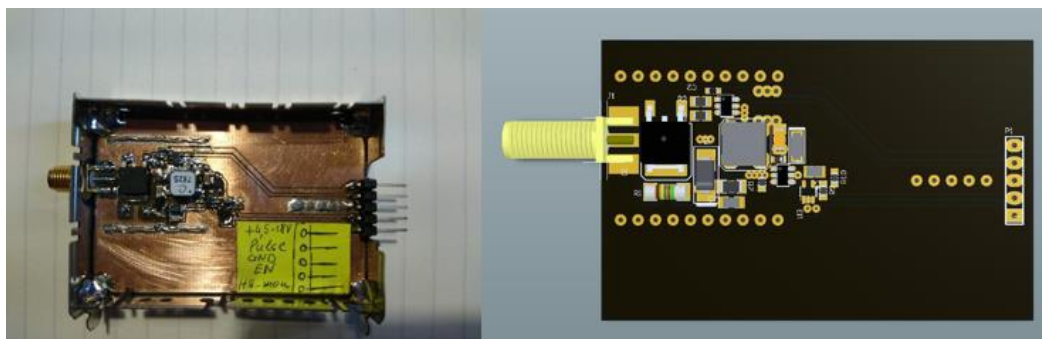


transformatoriaus pirminę apvija. Srovės impulso nutraukimo metu dėl induktyvumo savybių gaunamas aukštos įtampos impulsas transformatoriaus antrinėje apvijoje.



2.3 Pav. Aukštos įtampos šaltinio principinė schema nenaudojant kodas – analogas keitiklio

Sugeneruoti įtampos impulsai išlyginami diodo D1 bei kondensatoriaus C1 pagalba. Grįžtamojo ryšio grandinę sudaro varžų daliklis R4 ir R7. Papildomai grįžtamoji ryšio grandinei valdyti panaudojamas kodas - analogas keitiklis. Keičiant kodas - analogas valdiklio išėjimo įtampos vertę gali būti keičiama aukštos įtampos maitinimo šaltinio išėjimo įtampa. Valdancioji mikroschema nuo viršįtampių apsaugoma D3 ir D2 elementais. Šuntuojamojo tranzistoriaus valdymui panaudojamas UCC27511 valdiklis. Maitinimo šaltinio spausdintinio montažo plokštė pateikiama 2.4 Pav.



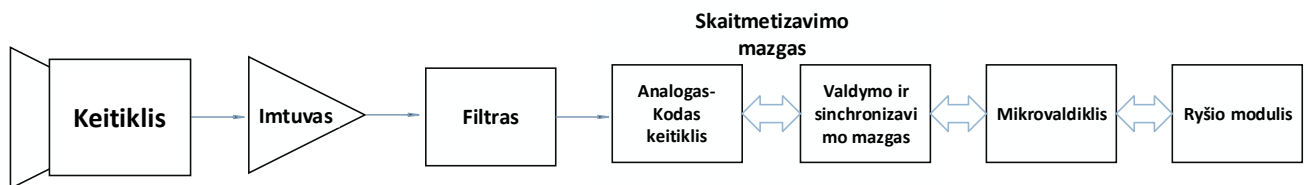
2.4 Pav. Aukštos įtampos maitinimo šaltinio spausdintinio montažo plokštės 3D modelis dešinėje, realus ultragarsinių bangų žadinimo įrenginys kairėje.

Spausdintinio montažo plokštės gabaritai yra 62x40 mm, parinkti taip, kad būtų galima talpinti į standartinę ekranavimo dėžutę. Užkrovus ultragarsinį keitiklį iki 400 V įtampos, aukštos įtampos šaltinis atjungiamas skaitmeninės logikos, taip išvengiama aukštos įtampos keitiklio trukdžių.

## 2.2. Priėmimo ir skaitmenizavimo posistemė

Projektuojant ultragarsinių bangų priėmimo bei apdorojimo įrenginį remiantis [1-15] šaltinių analizę nustatomi pagrindiniai reikalavimai projektuojamai sistemai. Nustatyta, kad reikiamas ultragarsinių keitiklių dažnių juostos plotis siekia iki 1.2 MHz. Priimtos ultragarsinės bangos imtuve, kai nėra įterptas analizuojamas bandinys turi būti sustiprinamos 0 dB, įterpto analizuojamo bandinio atveju stiprinimas turi būti iki 40 dB. Remiantis šiais duomenimis suprojektuojama ultragarsinės bangų priėmimo ir apdorojimo įrenginys.

Duomenų surinkimo sistemą naudojama ultragarso matavimams atlikti paprastai sudaro: ultragarsinių bangų keitiklis, imtuvas, filtras, analogas-kodas keitiklis, mikroprocesorinis įrenginys bei atvaizdavimo ar išvedimo įrenginys žr. 2.5 Pav.



### 2.5 Apibendrinta ultragarsinių signalų priėmimo bloko struktūra

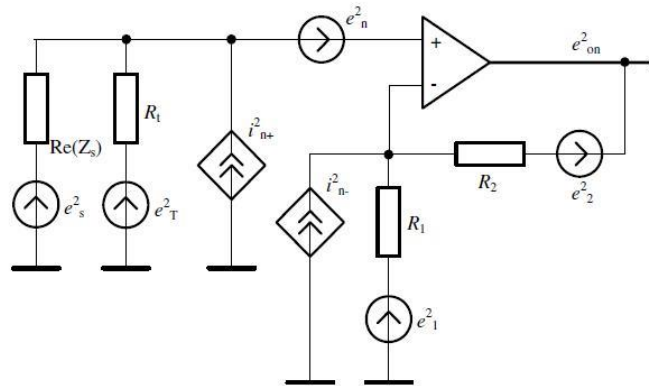
Ultragarsinių bangų keitiklis yra skirtas konvertuoti mechanines ultragarsines bangas į elektrinius signalus. Priimtas analoginis signalas sustiprinamas iki reikiamo lygio pasinaudojant stiprintuvo pagalba. Sustiprintas analoginis signalas praleidžiamas per žemo dažnio filtrą, norint pašalinti pašalines aukšto dažnio triukšmo dedamąsias. Perėjas per žemo dažnio filtrą analoginis signalas patenka į analogas - kodas keitiklį, kuriame yra paverčiamas į skaitmeninį kodą. Skaitmeninis kodas perduodamas į skaitmeninę logiką kurioje yra saugomas. Mikrovaldiklis nuskaito išsaugotus duomenis skaitmeninėje logikoje ir juos besinaudodamas ryšio moduliui perduoda į išorinį įrenginį.

#### 2.2.1 Stiprintuvo projektavimas

Priimtos mechaninės ultragarsinės bangos ultragarsiniame keitiklyje paverčiamos elektriniais signalais. Naudojant itin gerai oro terpei suderintus ultragarsinius keitiklius, signalo tarp keitiklių perdavimo nuostoliai nedideli. Tačiau tarp keitiklių patalpinus tiriamąjį objektą, slopinimas ženkliai išauga. Tokiu atveju reikalingas priimtų ultragarsinių signalų stiprinimas. Preliminarūs tyrimai parodė, kad reikalingas maksimaliai 40 dB stiprinimas.

Projektuojant ultragarsinių bangų analoginio signalo stiprintuvą pagrindinis dėmesys skirtas stiprintuvo įnešamam triukšmo lygiui. Papildomas triukšmo šaltinis - analoginio signalo stiprintuvas,

pablogins gautus duomenis, taip sumažindamas ultragarsinės sistemos jautrumą. Dėl šių priežasčių renkantis signalo stiprintuvą atlikti matematiniai įnešamo triukšmo skaičiavimai. Triukšmų lygis skaičiuotas remiantis Pav.2.6 pateikiama schema [19,25].



2.6 Pav. Ekvivalentinė schema stiprintuvo triukšmų skaičiavimui [19]

Triukšmų lygis stiprintuvo išėjime  $e_{on}$  susideda iš paties stiprintuvo generuojamų vidinių triukšmų įtampos triukšmo šaltinio  $e_n^2$ , srovės triukšmų šaltinių  $i_{n+}^2$ ,  $i_{n-}^2$  generuojamos įtampos bei išorinių temperatūrinių triukšmų šaltinių  $e_s^2$ ,  $e_T^2$ ,  $e_1^2$ ,  $e_2^2$ . Temperatūriniai triukšmai generuojami  $Re(Z_s)$ ,  $R_t$ ,  $R_1$  ir  $R_2$  elementuose ir apskaičiuojami remiantis formule:

$$e = \sqrt{4 * k * T * R_z} \quad (2.1)$$

čia  $k$  - Bolcmano konstanta,  $T$  - absoliutinė temperatūros vertė,  $R_z$  - elemento impedanso realioji dalis.

Bendras triukšmo lygis stiprintuvo išėjime [19]:

$$e_{on} = \sqrt{\left(\frac{G * R_t}{R_t + Z_s}\right)^2 * e_s^2 + \left(\frac{G * Z_s}{R_t + Z_s}\right)^2 * e_T^2 + \left(\frac{G * R_t * Z_s}{R_t + Z_s}\right)^2 * i_{n+}^2 + G^2 * e_n^2 + (G - 1)^2 * e_1^2 + e_1^2 + R_2^2 * i_{n-}^2} \quad (2.2)$$

čia  $G$  – stiprintuvo stiprinimo koeficientas kuris yra apskaičiuojamas:

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2.3)$$

Vienetinio stiprinimo dažniams stiprinimo juosta (angl. Gain-Bandwidth) apsprendžia maksimalų darbo dažnį esant mažos amplitudės signalui. Kadangi reikalingas 40 dB stiprinimas, o planuojama pralaidos juosta yra 3 MHz, operacinio stiprintuvo GBW turi būti ne mažiau 300 MHz. Išėjimo signalo augimo greitis SR apsprendžia maksimalų darbo dažnį esant didelės amplitudės signalui. Tarus, kad išėjimo amplitudė turi būti 2 Vpp (filtravimo ir derinimo grandyse netenkama 6 dB), SR turi būti ne mažiau 100 V/μs. Imtuvui reikalingas jautrumas bus užtikrinamas, jeigu nuosavi stiprintuvo triukšmai bus minimalūs. Simuliacijų pagalba nustatyta, kad keitiklio ir darbo srove užduodančios varžos triukšmu tankis yra 2.6 nV/√Hz. Jei maksimalus stiprintuvo triukšmas neviršys šios reikšmės, stiprintuvo triukšmų įtaka bus minimali. 2.2 lentelėje pateikiamas kandidatų imtuvo

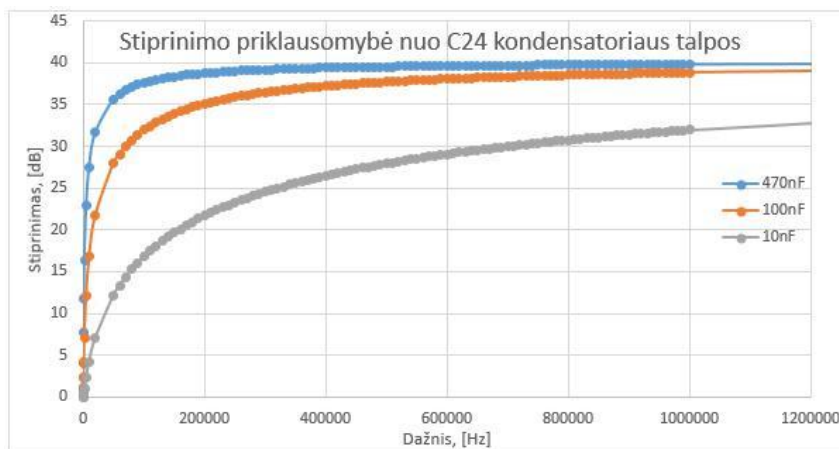
schemai parametru palyginimas. Atrinkti tik vienpoliario maitinimo („Single supply“) operaciniai stiprintuvai.

2.2 lentelė. Mažatriukšmių stiprintuvų parametru palyginimas

Tipas	Maitinimo įtampos ribos	Vidiniai įtampos triukšmai ( $e_n$ )	Vidiniai srovės triukšmai ( $i_n$ )	Optimali varža ( $R_{opt}$ )	Vienetinio stiprinimo juostos plotis ( $GBW$ )	Išėjimo signalo augimo greitis ( $SR$ )
LMH6624	5 V-12 V	0,92 nV/ $\sqrt{Hz}$	2.3 pA/ $\sqrt{Hz}$	400 $\Omega$	1.5 GHz	400 V/ $\mu s$
LMH6629	2.7 V-5.5 V	0,69 nV/ $\sqrt{Hz}$	2.6 pA/ $\sqrt{Hz}$	265 $\Omega$	900 MHz	1600 V/ $\mu s$
OPA847	3.7 V-6 V	0,85 nV/ $\sqrt{Hz}$	3.5 pA/ $\sqrt{Hz}$	262 $\Omega$	3.9 GHz	950 V/ $\mu s$

Ultragarsinių bangų stiprintuvus buvo pasirinktas pagal gamintojo specifikuojamą triukšmų kiekį, energijos sąnaudas ir korpuso tipą. Žinomas triukšmų lygis stiprintuvo išėjime daro įtaka analogas-kodas keitiklio skilčių skaičiaus kiekiui, diskretizavimo dažnio pasirinkimui [19].

Stiprintuvo realizacijai žr. 2.8 Pav. pasiūlyta naudoti LMH6629MF operacinį stiprintuvą. Šis stiprintuvus pasirinktas dėl mažos suvartojamos srovės ir mažų nuosavų triukšmų. Gamintojo pateiktai duomenimis įtampos triukšmo šaltinio vertė  $e_n = 0.69 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$ , srovės šaltinių  $i_{n+} = i_{n-} = 2.6 \text{ pA}/\sqrt{Hz}$ . Grįžtamasis ryšys sudaromas  $R_{15} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{16} = 10 \text{ }\Omega$  rezistoriais bei kondensatoriumi  $C_{24} = 470 \text{ nF}$ . Kondensatoriaus paskirtis eliminuoti nuolatinės dedamosios stiprinimą. Naudojamo kondensatoriaus talpos vertė apriboja žemo dažnio signalų stiprinimą. Stiprinama dažnių sritis priklausomai nuo  $C_{24}$  kondensatoriaus talpos pateikiama 2.7 Pav.



2.7 Pav. Stiprinama dažnių sritis priklausomai nuo kondensatoriaus  $C_{24}$  talpos

Pateiktame paveikslėlyje pastebime, kad didėjant kondensatoriaus talpai žemo dažnio signalų stiprinimas didėja.

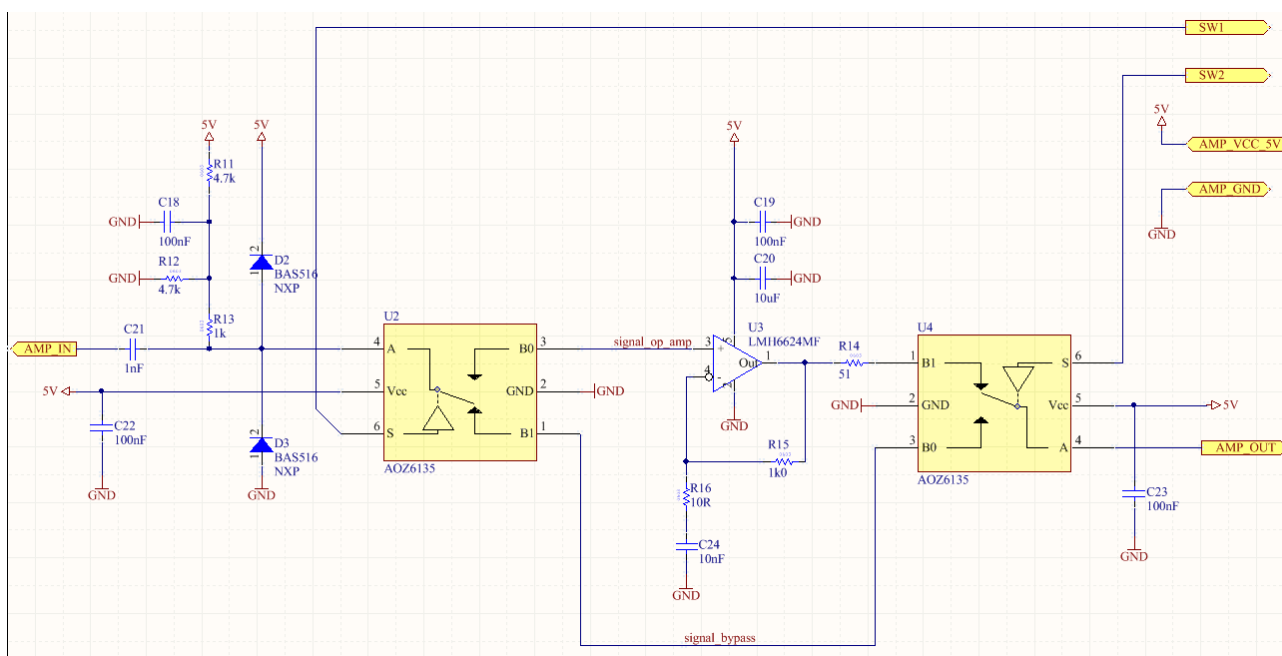
Projektuojant ultragarsinių bangų stiprintuvą panaudoti AOZ6135 analoginiai jungikliai. Jungiklių paskirtis atjungti ultragarsinių bangų stiprintuvą, norint gauti 0 dB stiprinimo koeficientą.

Lentelėje 2.1 pateikiami kandidatai analoginiams raktams. Kandidatai buvo atrinkti kurių pralaidos juosta viršija 10 MHz, parazitinis talpumas yra mažesnis nei 50 pF, o rakto kanalo varža neviršija 5  $\Omega$ .

2.1 lentelė. Analoginių raktų palyginimas

Tipas	Pralaidos juosta (-3dB)	Parazitinis talpumas	Kanalo varža	Persijungimo laikas
TS5A3160	100 MHz	55 pF	1 $\Omega$	15 ns
SN74LVC1G3157	340 MHz	17.3 pF	3 $\Omega$	0.5 ns
AOZ6135	180 MHz	40 pF	1.2 $\Omega$	60 nS

Preliminariais spektroskopijos taikymo tyrimais [1,3,4,5,6,20] nustatyta, kad priimto signalo lygis, nesant tiriamos medžiagos tarp keitiklių yra 1 Vpp, kuomet žadinama 400 V įtampa. Kadangi AKK jėgimo diapazonas yra 1 Vpp, stiprinimo šiuo atveju nereikia. Įterpus bandinį priimto signalo lygis krenta 40dB. Todėl turi būti numatyta galimybė stiprinimą keisti. Tuomet stiprinimo valdymui pasirinktas sprendimas, kuomet stiprintuvas atjungiamas naudojant analoginius raktus.

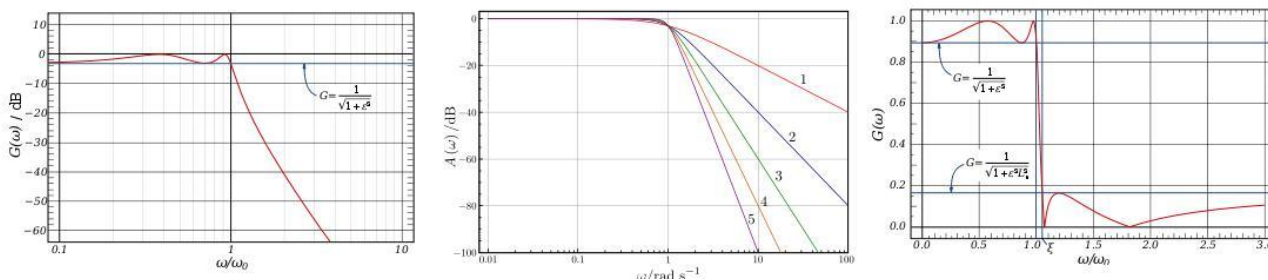


2.8 Pav. Suprojektuota stiprintuvo schema, kuomet užtikrinamas 40 dB ar 0 dB stiprinimas

Panaudojami D2 ir D3 diodai apsaugai nuo viršįtampių C21 kondensatorius neleidžia nuolatinei dedamajai patekti į ultragarsinių bangų imtuvą. Numatoma ištirti imtuvo parametrus naudojant Lentelėse 2.1 ir 2.2 nurodytus komponentus.

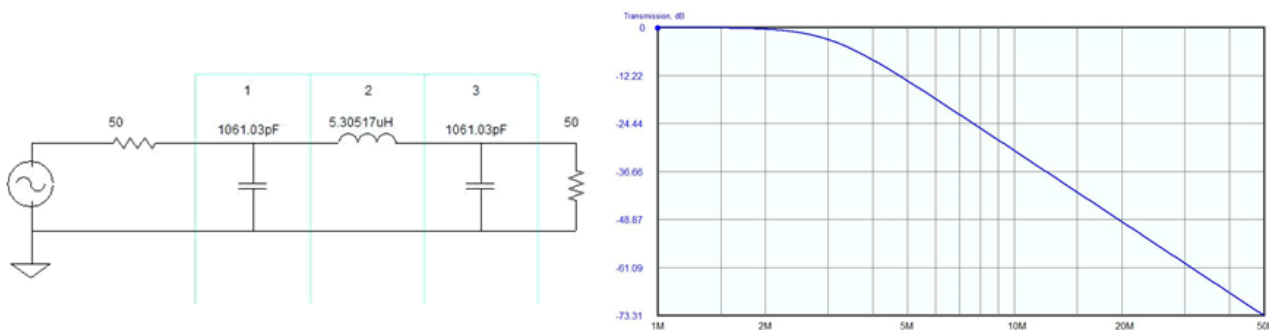
## 2.2.2 Filtro projektavimas

Prieš analogas kodas keitiklį panaudojamas žemo dažnio antisanklodinis filtras. Filtro paskirtis yra pašalinti aukšto dažnio pašalines triukšmo dedamąsias iš signalo. Panaudotas filtras neleidžia triukšmui kuris yra už pirmosios Naikvisto zonos ribų persikloti su pirmosios Naikvisto zonos signalais. Apsauginio filtro projektavimui galimi keli skirtingi filtro tipai. Pagrindiniai naudojami filtrų tipai yra: Čebyševio (angl. Chebyshev), Batervorto (angl. Butterworth) bei Kauerio (angl. Cauer). Filtrų amplitudinės charakteristikos pateikiamos 2.9 Pav.



2.9 Pav. Filtrų amplitudės charakteristikos, (kairė) Čebyševio, (viduryje) Batervorto, (dešinė) Kauerio.

Pasirinktas Batervorto (angl. Butterworth) tipo filtras dėl savo palyginti tiesinės amplitudinės perdavimo charakteristikos bei mažų fazinės charakteristikos iškreipimų. Filtras parenkamas trečiosios eilės norint išgauti norimą slopinimą. Filtras suprojektuojamas pasitelkiant „Elsie“ programinės įrangos paketą, apsauginio filtro pjūvio dažnis  $f_a$  parenkamas 3 MHz vertės tam, kad naudingos signalo dažnio dedamosios nebūtu slopinamos žr. 2.10 Pav.



2.10 Pav. Suprojektuoto filtro struktūra (kairėje), filtro amplitudės dažninė perdavimo charakteristika (dešinėje)

Trečios eilės filtro panaudojimas užtikrina apytiksliai 50 dB slopinimą per dekadą. Kaip jau minėta anksčiau filtro pjūvio dažnis pasirinktas ties 3 MHz dažnio dedamosios riba, aukšto dažnio dedamųjų pašalinimui.

### 2.2.3 Skaitmenizavimo mazgo projektavimas

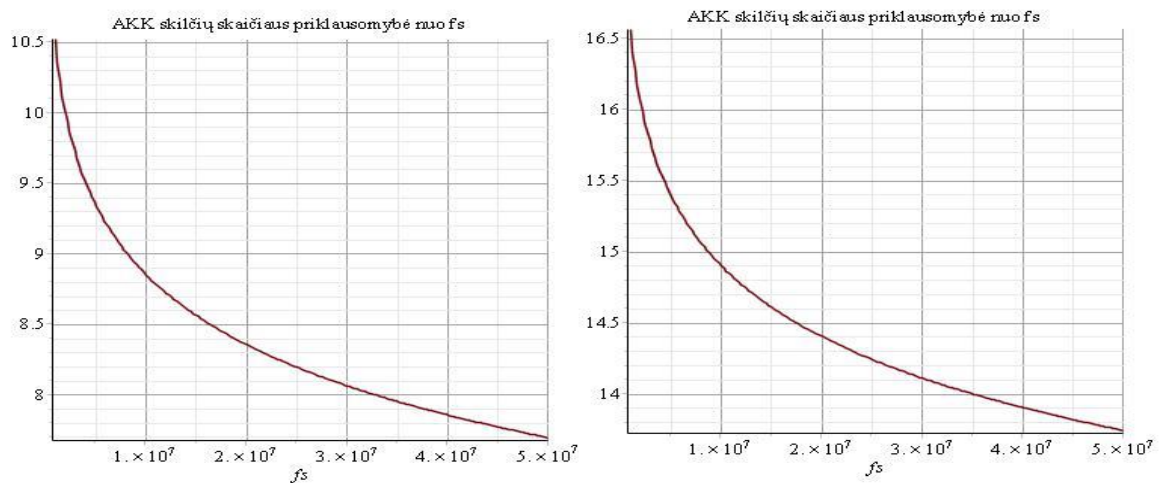
Analoginiame keitiklyje priimtas ultragarsinis signalas po filtro turi būti diskretizuojamas, skaitmenizuojamas bei perkeliamas į atminties lustą duomenų išsaugojimui. Pasirenkant analogas kodas keitiklį nustatomas reikalingas analogas - kodas keitiklio skilčių kiekis, diskretizavimo dažnis, nustatomas triukšmų lygis. Keitiklio analogas – kodas panaudojimas projektuojamos ultragarsinės sistemos triukšmą papildo kvantavimo triukšmu  $N_{0Q}$  bei laiko skalės netolygumo triukšmais  $N_{0J}$ . Bendra išraiška apibendrinanti projektuojamos sistemos triukšmų kiekį pateikiama formulėje:

$$N_0 = N_{0A} + N_{0Q} + N_{0J}. \quad (2.4)$$

Analoginiai triukšmai  $N_{0A}$  yra įnešami stiprintuvo apskaičiuojami naudojant (2.2) formulę. Kvantavimo triukšmai gali būti apskaičiuojami kaip:

$$N_{0A} = \sqrt{\frac{V_{ref}^2}{0.5 * f_s * 2^{2 * bit} * 12}}, \quad (2.5)$$

čia  $V_{ref}$  – atraminė analogas kodas įtampos vertė,  $f_s$  – diskretizavimo dažnis,  $bit$ - analogas kodas keitiklio skilčių skaičius. Prilyginus analoginius projektuojamos sistemos triukšmus  $N_{0A}$  analogas – kodas keitiklio kvantavimo triukšmams  $N_{0Q}$  nubrėžiama diskretizavimo dažnio priklausomybė nuo naudojamų analogas - kodas skilčių skaičiaus žr. 2.11 Pav. [19,20]. Reikiamas analogas - kodas keitiklio skilčių kiekis yra priklausomas nuo diskretizavimo dažnio. Kadangi kvantavimo triukšmas tiesiogiai prilyginamas analoginiams projektuojamos ultragarsinės sistemos triukšmams, ultragarsinio stiprintuvo stiprinimo koeficientas  $G$  daro įtaką analogas - kodas keitiklio skilčių kiekiui.



2.11 Pav. Analogas - kodas keitiklio skilčių skaičiaus kiekis priklausomai nuo pasirinkto diskretizavimo dažnio. Kairėje esant stiprinimo koeficientui  $G=100$ , dešinėje  $G=10$ .

Pagal pateiktus grafikus darome išvadą, kad norint padidinti analogas - kodas keitiklio skyrą reikia mažinti triukšmo kiekį arba mažinti diskretizavimo dažnį.



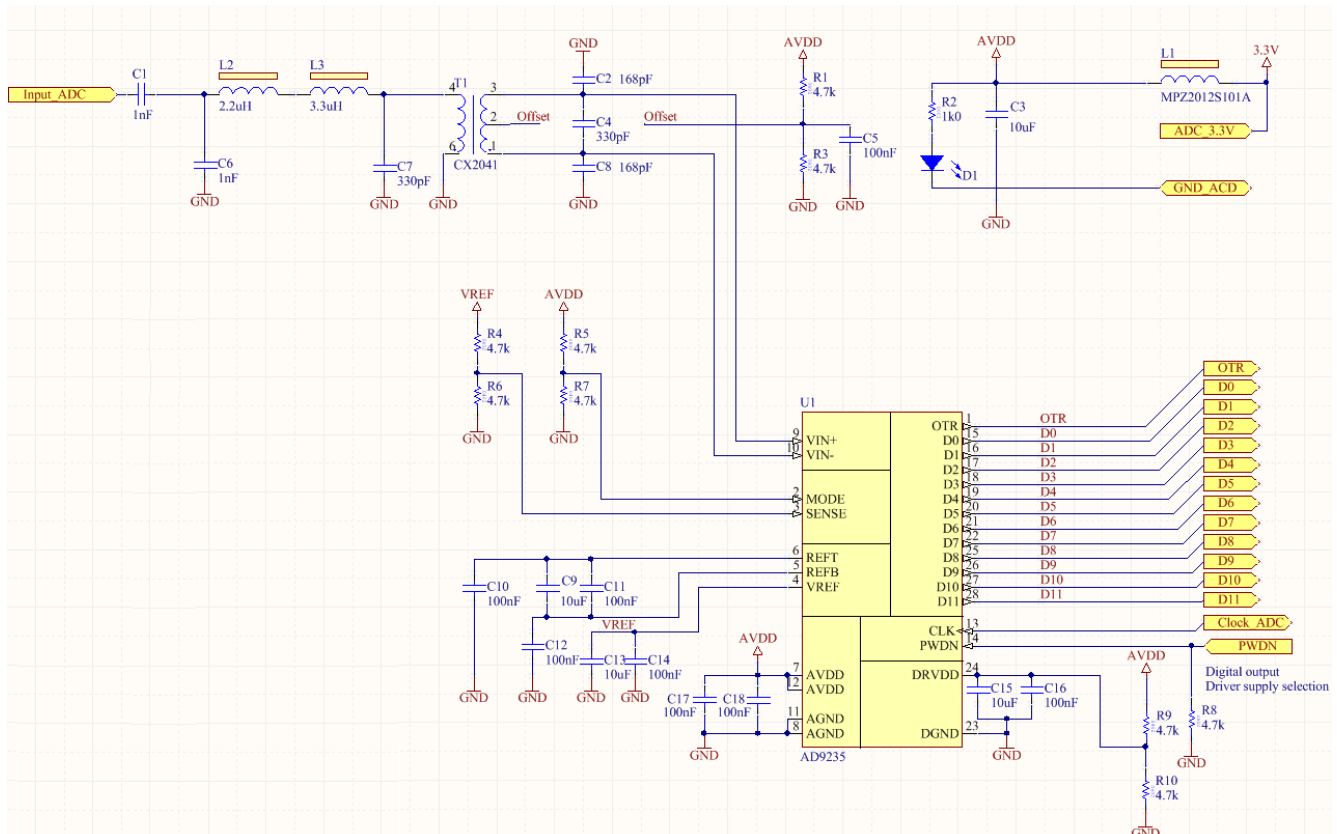
Pagal ultragarsinių keitiklių darbo diapazoną, analoginį triukšmo kiekį  $N_{OA}$  bei remiantis Naikvisto kriterijumi parenkamas 10 MHz diskretizavimo dažnis.

Analogas - kodas keitiklis turi užtikrinti minimalias energijos sąnaudas. Minimalus tinkamas keitiklio skilčių skaičius yra 10 bitų. Analogine juosta turi būti ne mažesnė nei 5 MHz. Analogas - kodas keitiklių palyginimas pateikiamas 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Analogas – kodas keitiklių parametrų palyginimas

Tipas	Signalas-triukšmas santykis	Suvartojama galia	Juostos plotis	Maitinimo įtampa	Skilčių skaičius	Diskretizavimo dažnis
MAX1184	59.5 dB	105 mW	400 MHz	2.7 V-3.6 V	10	20 MHz
ADS804	69 dB	180 mW	270 MHz	4.7 V-5.3V	12	10 MHz
ADS805	68 dB	300 mW	270 MHz	4.7 V-5.3 V	12	10 MHz
AD9235	70 dB	100 mW	350 MHz	2.5 V-3.3 V	12	20 MHz

AKK keitiklis AD9235 užtikrina reikiamą diskretizavimo dažnį, palyginti mažas 100 mW energijos sąnaudas nereikalauja 5 V linijos bei užtikrina geriausią signalas triukšmas santykį. Pasitelkus įrangos paketą „Altium Designer“ sudaroma keitiklio principinė schema žr. 2.12 Pav.

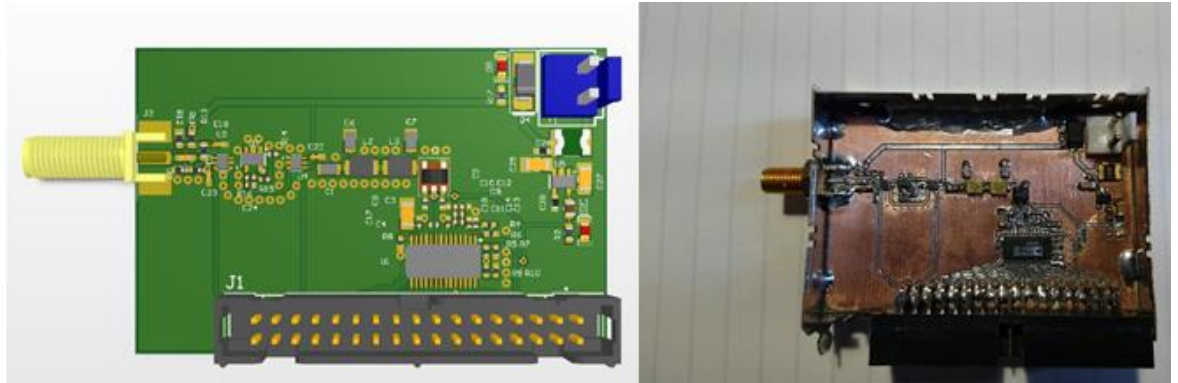


2.12 Pav. Analogas - kodas keitiklio principinė schema

AKK keitiklio duomenų išvestis dvejetainė. Keitiklis turi vidinį atraminės įtamos šaltinį.



Pasirinkus ultragarsinių bangų stiprintuvą ir analogas kodas keitiklį suprojektuota ultragarsinės sistemos duomenų priėmimo dalies maketo spausdintinio montažo plokštė 2.13 Pav.



2.13 Pav. Ultragarsinės sistemos duomenų priėmimo plokštės 3D modelis kairėje, realus pagamintas maketas dešinėje

Priėmimo dalies maketo spausdintinio montažo plokštės gabaritai yra 62x40 mm, parinkti pagal ekranuojančią dėžutę. Plokštėje numatytos apsaugos nuo viršįtampių, tam tikslui panaudotas atsistatantis saugiklis bei stabilitronas. Duomenys išvedami per 2x17 kontaktų jungtį. Ultragarsinis keitiklis prie duomenų priėmimo sistemos jungiamas per SMA tipo jungtį.

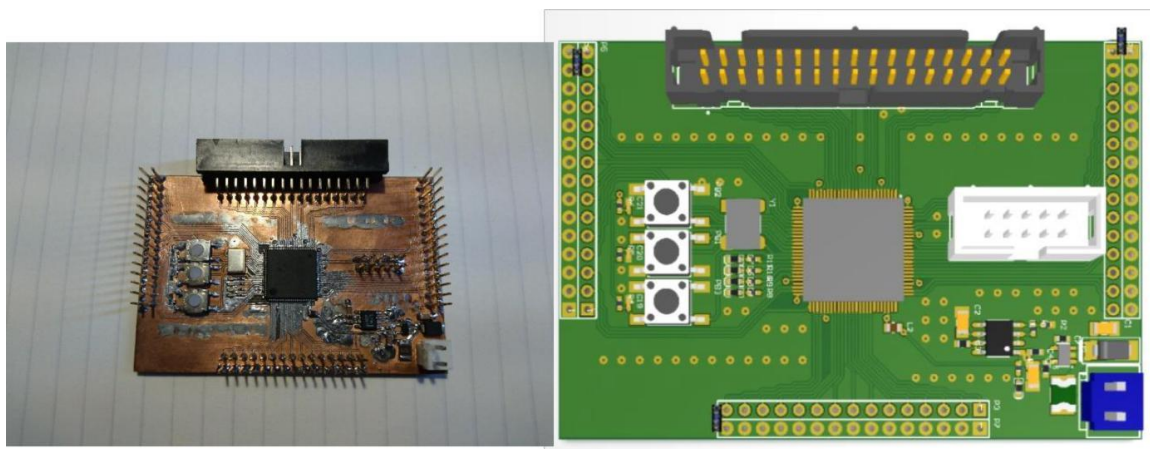
### 2.3. Sinchronizavimo bei valdymo posistemė.

Nors ir duomenų srautas iš analogas - kodas keitiklio nedidelis (10 Ms/s), mikrovaldiklis negali priimti tokio duomenų srauto bei jį perduoti toliau. Dėl šios priežasties duomenų surinkimui ir išsaugojimui iš AKK pasinaudojama buferiu, realizuotau programuojama logika (CPLD). Pasirinkta Lattice MachXO2-1200ZE mikroschema. Galinti veikti iki 104 MHz taktiniu dažniu. MachXO2-1200 šeimos gaminiuose galima iki 64 kb vidinė atmintis.

Apdorojimo įrenginio paskirtis - surinkti gaunamus duomenis iš AKK. Surinkti duomenys talpinami į vidinę programuojamos logikos atmintį. Duomenys iš programuojamos logikos atminties perduodami mikrovaldikliui. Gauti duomenys bevieliu ryšiu persiunčiami į atvaizdavimo įrenginį.

Pasinaudojus Altium Designer programinę įrangą nubraižoma spausdintinio montažo plokštė, atsakinga už duomenų iš AKK surinkimą ir saugojimą žr. 2.14 Pav. Suprojektavus skaitmeninės logikos plokštę pereinama prie programavimo darbų. Šiam tikslui pasitelkiamas Lattice Diamond programinis įrangos paketas. Programavimo darbai pradėti realizuojant FIFO tipo atminties bloką programuojamoje logikoje. Atmintyje numatytos celės dydis prilyginamas 12-kai bitų dėl analogas kodas keitiklio skilčių skaičiaus. Maksimalus celių kiekis yra 4096. Šiam kiekiui realizuoti panaudojami 6 EBR „Embedded Block RAM“ programuojamos logikos blokai. Sugeneravus

atminties bloką gaunama 12bit x 4096 celių atminties talpos vertė. Kadangi diskretizavimo dažnis žinomas 10 MSPS, maksimali įrašo trukmė yra 409 μs. Remiantis [1,3,4,5,6] šaltiniais, šio laiko visiškai pakanka vieno tyrimo metu gautų duomenų priėmimui bei išsaugojimui.



2.14 Pav. Programuojamos logikos pagaminta spausdintinio montažo plokštė - kairėje, trimatis plokštės modelis - dešinėje

Skaitmeninė logika yra atsakinga už sistemoje naudojamų modulių konfigūracija bei valdymą. Sistemos komunikacijai su išoriniais prietaisais Bluetooth ar USB ryšiu, gaunamų komandų apdorojimui pasirinkta naudoti mikrovaldiklį. Mikrovaldiklio pasirinkimui dėmesys atkreiptas į suvartojamos galios kiekį. Projektuojamos sistemos prototipui pasirinktas STM32F103C6T6 mikrovaldiklis dėl 72 MHz taktinio dažnio, mažų galios sąnaudų, tiesioginės USB sąsajos palaikymo.

Ultragarsinės sistemos projektavimui reikalinga užtikrinti bevielį duomenų perdavimą išoriniams prietaisams. Šiam tikslui pasinaudojama Bluetooth bevieliu modulių HC-06. Modulis pasižymi nedidele kaina, bei patogia UART tipo komunikacija su mikrovaldikliu. Modulio suvartojama srovė susijungimo metu su išmaniuoju prietaisu siekia 35 mA, prisijungimo būsenoje 8 mA, modulį maitinant iš 3.3 V įtampos šaltinio.

## 2.4. Sistemos energetinių sąnaudų bei veikimo laiko analizė

Norint užtikrinti sistemos portabilumą reikalinga, kad suprojektuota ultragarsiniu duomenų surinkimo sistema turėtų integruotą energijos šaltinį. Šaltinio pasirinkimui išmatuojamas sistemos suvartojamas energijos kiekis skirtingais sistemos darbo etapais. Pagrindiniai sistemos darbo etapai: duomenų surinkimo etapas, sistemos prisijungimo prie išorinio prietaiso etapas, duomenų persiuntimo į išorinį prietaisą etapas, sistemos budėjimo režimas. Duomenų surinkimo etapo metu suvartojama iki 100 mA srovė, matavimas trunka iki 0.5 s. Tuomet suvartojamas energijos kiekis:

$$E_{surinkimo} = 3.6V * 100mA * 0,5s = 180mJ. \quad (2.6)$$

Sistemos prisijungimo prie išorinio įrenginio metu sistema suvartojama srovės vertė yra 40 mA, prisijungimas trunka apytiksliai 1 s. Šiame etape suvartojama energija:

$$E_{prisijungimo} = 3.6V * 40mA * 1s = 144mJ. \quad (2.7)$$

Sistemos duomenų perdavimo metu suvartojama 8 mA srovė. Duomenų perdavimas trunka iki 2 s. Perdavimo metu suvartojama energija:

$$E_{perdavimo} = 3.6V * 8mA * 2s = 57.6mJ. \quad (2.8)$$

Budėjimo režimu suvartojama 1 mA srovė, per parą budėjimui tenkanti energijos dalis:

$$E_{budėjimo} = 3.6 * 1mA * 86400s = 311.04J. \quad (2.9)$$

Tarus, kad per parą atliekama 20 matavimų, suvartojamas sistemos energijos kiekis per parą:

$$E_{24h} = 20 * E_{surinkimo} + 1 * E_{prisijungimo} + 20 * E_{perdavimo} + E_{budėjimo} = 315,936J \quad (2.10)$$

Baterijos talpa yra 2700 mAh. Baterijoje saugoma energijos dalis:

$$E_{Baterijos} = 2.7 Ah * 3.6V * 3600 = 34992 J \quad (2.11)$$

Baterijos tarnavimo laikas vienam pakrovimui gaunamas baterijos energija padalinus iš sistemos per parą suvartojamo energijos kiekio:

$$Trukmė = \frac{E_{Baterijos}}{E_{24h}} = 112 \text{ parų} \quad (2.12)$$

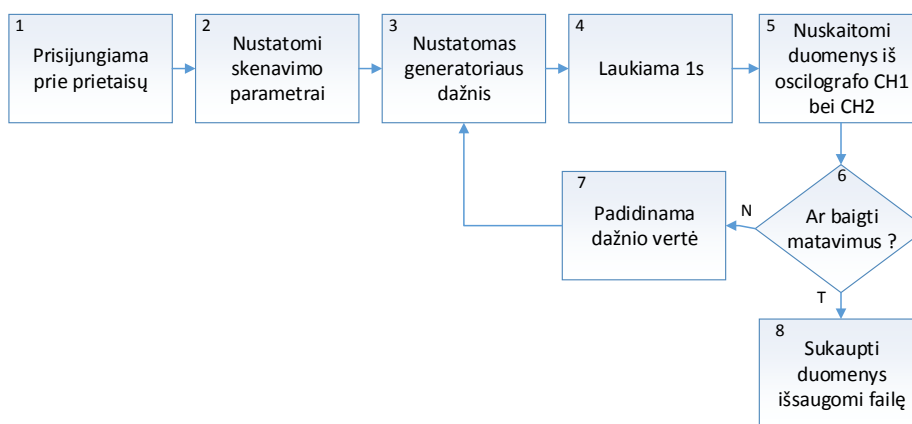
Tuomet sistemos tarnavimo laikas nuo vieno pakrovimo yra 112 parų. Skaičiavimuose neatsižvelgta į netiesinį baterijos įtampos kitimą jai išsikraunant, baterijos talpos mažėjimo netiesiškumą. Dėl šių priežasčių sistemos veikimo trukmė gali keistis.

### 3. SISTEMOS TYRIMAI

Suprojektavus ultragarsinę duomenų surinkimo sistemą būtina įsitikinti sistemos darbo kokybę, našumu. Reikalinga išanalizuoti sistemos elgseną, parinkti geriausiai derančius komponentus tarpusavyje. Pagrindiniai sistemos aspektai yra sistemos generuojamas triukšmų kiekis, priimto signalo paklaidos vertė, sistemos stabilumas, sistemoje naudojamų modulių sinchronizacija.

#### 3.1. Matavimo sistemos ir metodikos analizė

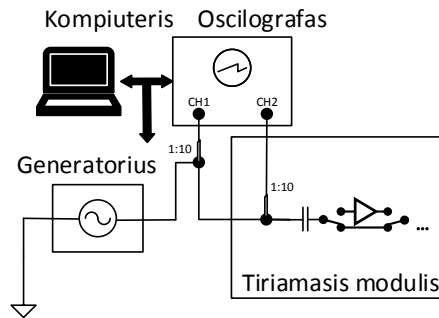
Šioms savybėms užtikrinti panaudojami laboratoriniai prietaisai: Rigol DG1022 signalų generatorius, Rigol DS4034 oscilografas, MCP M10-QP305 maitinimo šaltinis. Laboratoriniai prietaisai valdomi pasinaudojant Matlab programinės įrangos pagalba. Tyrimų automatizavimui, parengta programinė įranga Matlab terpėje leidžia valdyti generatoriaus parametrus bei duomenų surinkimą iš oscilografo. Pagrindinis tyrimų sistemos veikimo algoritmas pateiktas 3.1 Pav.



3.1 Pav. Tyrimams panaudotos sistemos programos kodo algoritmas

Pirmajame žingsnyje programinės įrangos paketas Matlab prisijungia prie laboratorinių prietaisų bibliotekos Visa pagalba. Prisijungus prie prietaisų antruoju žingsniu nustatomi matavimams naudojami parametrai: matavimo ribos, generatoriaus amplitudė, generatoriaus pradinis dažnis, oscilografe duomenų kaupimui naudojamas lango dydis bei kiti parametrai. Trečiuoju žingsniu yra nustatomas generatoriaus dažnis. Po nustatyto generatoriaus dažnio yra laukiama 1 s norint užtikrinti stabilų dažnio nustatymą. Penktuoju žingsniu nuskaitomi duomenys iš oscilografo pirmojo bei antrojo kanalų. Jei generatoriaus dažnio vertė nėra galutinė, dažnio vertė padidinama bei vėl grįžtama į trečiąjį žingsnį. Kai duomenys sukaupiami iš viso norimo dažnio diapazono, duomenų failas yra išsaugomas kompiuterio atmintyje. Išsaugoti duomenys užkraunami Matlab programinės įrangos aplinkoje, kurioje jie yra apdorojami.

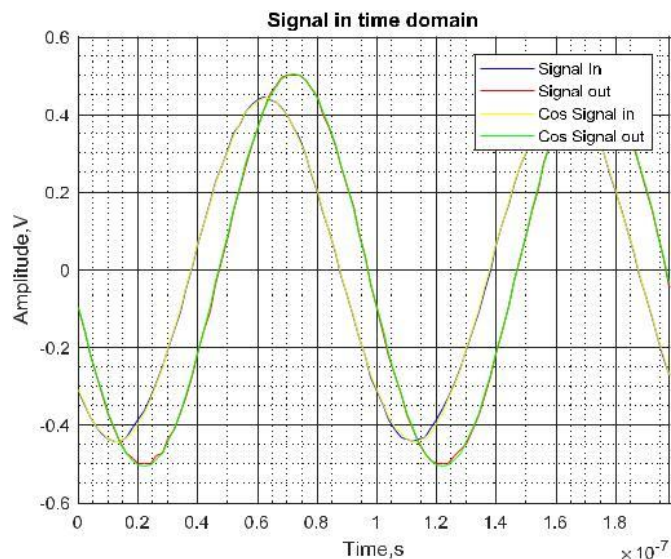
Preliminarūs tyrimai atlikti siekiant nustatyti pačios sistemos tyrimo įrangos kokybę. Pirmuoju bandymu į oscilografo pirmąjį kanalą pateikiamas signalas tiesiai iš generatoriaus. Tas pats signalas tiesiai nuo oscilografo jungties yra atšakojamas ir jungiamas į tiriamojo mazgo įėjimą žr. 3.2 Pav.



3.2 Pav. Matavimo sistemos pirmoji sujungimo konfigūracija

Signalas nuo ultragarsinės sistemos įėjimo atšakojamas ir pateikiamas į antrąjį oscilografo kanalą. Atliktas duomenų surinkimas 10 kHz – 10 MHz dažnių ruože 10 kHz žingsniu. Surinktų duomenų apdorojimui parengta kita programinė įranga, skirta dažninių charakteristikų (amplitudės ir fazės), netiesinių iškreipymo koeficiento skaičiavimui iš surinktų duomenų. Nustatoma bei gauti signalai laiko ašyje žr. 3.3 Pav. Signalų amplitudės bei fazės nustatymui naudotas SWC („sine wave correlation“) algoritmas [21]. SWC algoritmas reikalauja griežtos sinchronizacijos tarp skaitmeninės generatoriaus skalės bei keitiklio analogas kodas. Tam tikslui generatoriaus vidinis taktinis dažnis išvestas į išorę ir paduotas į oscilografą. Oscilografas perjungtas į išorinį sinchronizacijos režimą.

Žemiau pateikiamas SWC veikimo pavyzdys: matome, kad originalus signalas (raudona kreivė) sutampa su SWC rezultatu naudojantis gautu signalu.



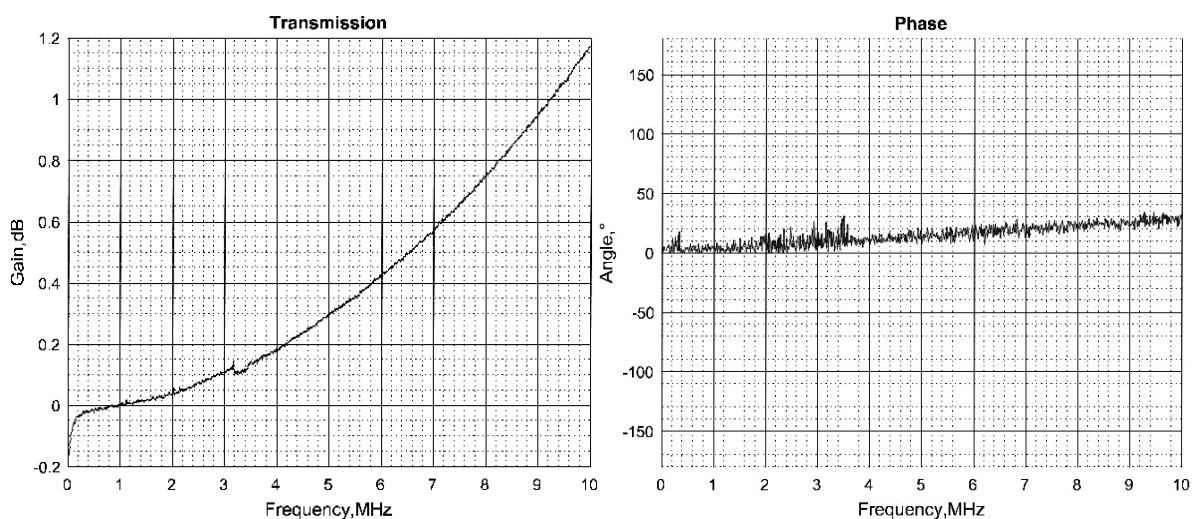
3.3 Pav. Signalai laiko ašyje, pirmoji matavimo sistemos konfigūracija

Įeinančiam bei išeinančiam signalui papildomai nubraižomas idealus kosinuso signalas. Papildomi kosinuso signalai nubraižomi remiantis žinomu signalo dažniu, amplitude bei signalo faze.

Šie signalai leidžia nustatyti ar tyrimo metu gauti signalai atitinka teorinius kosinuso signalus pagal surinktus parametrus iš generatoriaus bei oscilografo. Jei signalo fazė ar amplitudė yra nustatyta gerai teorinis kosinuso signalas persidengia su gautuoju signalu.

Toliau nustatomas perdavimo koeficiento vertė priklausomai nuo dažnio žr. 3.4 Pav.

Pagal 3.2 Pav. schemą atliktiems tyrimams idealiu atveju tikimasi gauti 0 dB stiprinimą, 0° fazės poslinkį bei 0 % netiesinius iškreipimus visame dažnių ruože. Pagal perdavimo funkcijos grafiką, pastebimas stiprinimo augimas priklausomai nuo dažnio vertės. Šis stiprinimas nėra galimas nes praktiškai įėjimo signalas yra pateikiamas į abu oscilografo kanalus. Nustatyta kad stiprinimo augimas yra netinkamos apkrovos įtakos veiksnys. Dėl šios priežasties matavimams naudojamuose RG-58 koaksialiniuose kabeliuose atsiranda signalo atspindžiai. Būtent dėl šių atspindžių įtakos gaunami netolygumai aukštesniuose dažniuose.

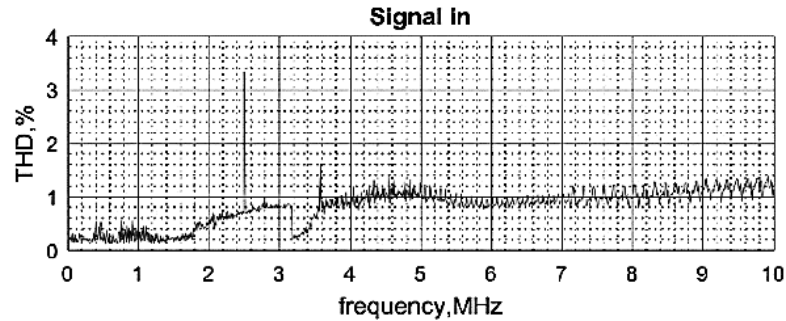


3.4 Pav. Matavimo sistemos amplitudės (kairė) ir fazės (dešinė) perdavimo charakteristika, pirmoji sistemos konfigūracija

Didžiausi fazės netolygumai užfiksuoti 1.8 MHz - 4 MHz ribose. Šios fazinės charakteristikos forma gali būti įtakota matavimams naudojamuose kabeliuose pasireiškiančiais signalo atspindžiais. Papildomai apskaičiuojamas netiesinių iškreipimų koeficientas kiekviename išmatuotame taške žr. 3.5 Pav. Netiesinių iškreipimų koeficientas apskaičiuojamas remiantis 3.1 formulę. Netiesinių iškreipimų koeficiento skaičiavimui naudojama 10 pirmųjų pagrindinio dažnio harmonikų.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{10}^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

čia  $V_1$  – gauto signalo amplitudė,  $V_n$  n-toji signalo harmonikos amplitudė.

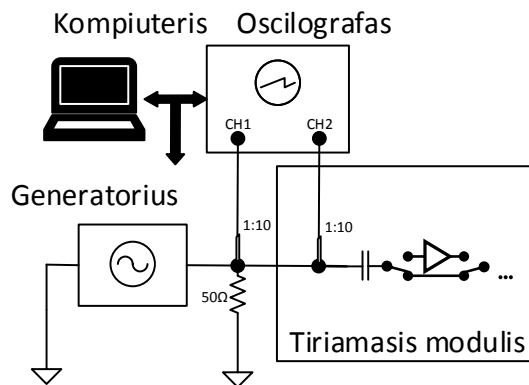


3.5 Pav. Matavimo sistemos netiesiniai iškraipymai 10 kHz-10 MHz dažniu ruože, pirmoji sistemos konfigūracija

Kadangi įėjimo signalas patenka į abu oscilografo kanalus įėjimo bei išėjimo netiesinių iškraipymo grafikai identiški. Gautame netiesinių iškraipymų grafike pastebime, kad iškraipymų lygis varijuoja apie 1 %. Galime pastebėti du netiesinių iškraipymų pikus ties 2,5 MHz bei 3,57 MHz.

Didžiausi netiesiniai iškraipymai pastebimi nuo 2 MHz dažnių ribos. Netiesinių iškraipymų lygis gali būti įtakotas naudojamuose kabeliuose pasireiškiančiais atspindžiais. Dėl šios priežasties tyrimai kartojami paeitus kabelių sujungimo konfigūraciją.

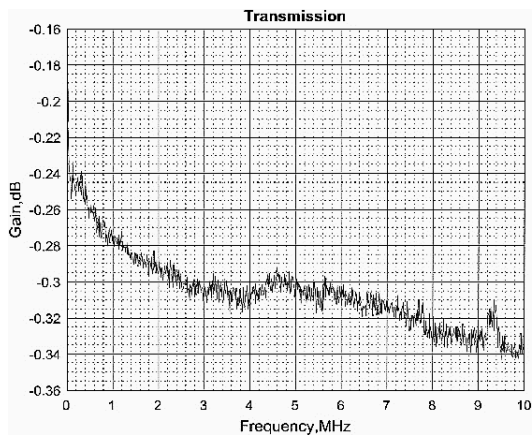
Tolesniam tyrimo sistemos kalibravimui pakeičiama signalų prijungimo konfigūracija, papildomai panaudojama 50 Ω apkrova, signalas atšakojamas kuo arčiau generatoriaus išėjimo išvado. žr. 3.6 Pav.



3.6 Pav. Matavimo sistemos antroji sujungimo konfigūracija

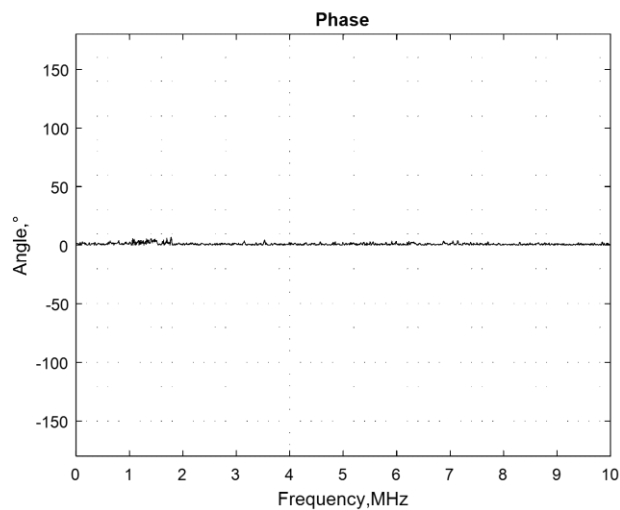
Šios konfigūracijos pagalba stengiamasi eliminuoti matuojamuose kabeliuose susidarančius atspindžius dėl kurių yra iškraipomi matavimo duomenys. Pakartotinai programinės įrangos Matlab pagalba atliekamas skenavimas 10 kHz - 10 MHz dažnių ruože 10 kHz žingsniu.

Nustatoma fazinė dažninė charakteristika, netiesinių iškraipymo koeficientas, perdavimo dažninė charakteristika žr. 3.7 Pav.



3.7 Pav. Matavimo sistemos perdavimo charakteristika, antroji sistemos konfigūracija

Pakeitus matavimo kabelių prijungimo konfigūraciją bei panaudojus  $50\Omega$  apkrovą, dažninėje perdavimo charakteristikoje stiprinimas augant dažnio vertei buvo pašalintas. Naudojantis šia konfigūracija augant dažniui stiprinimo koeficientas mažėja iki  $-0,34$  dB lygio. Dėl šios priežasties daroma išvada kad pašaliniai atspindžiai naudojamose konfigūracijoje buvo pašalinti. Fazinė charakteristika kaip ankstesniu atveju gaunama ganėtinai triukšminga bet tiesinė žr. 3.8 Pav.

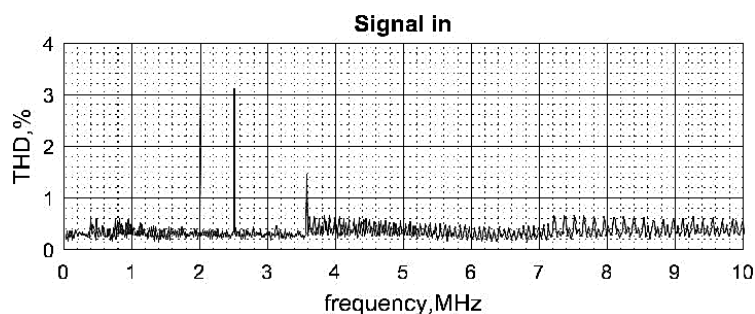


3.8 Pav. Matavimo sistemos fazinė charakteristika, antroji sistemos konfigūracija

Pagal pateiktą grafiką matome, kad fazinė charakteristika visame dažnių diapazone gaunama stabili. Fazės triukšmo priežastį pašalinti sudėtinga - nepaisant to, kad naudota išorinė prietaisų sinchronizacija, abu oscilografo kanalai nėra diskretizuojami sinchroniškai.

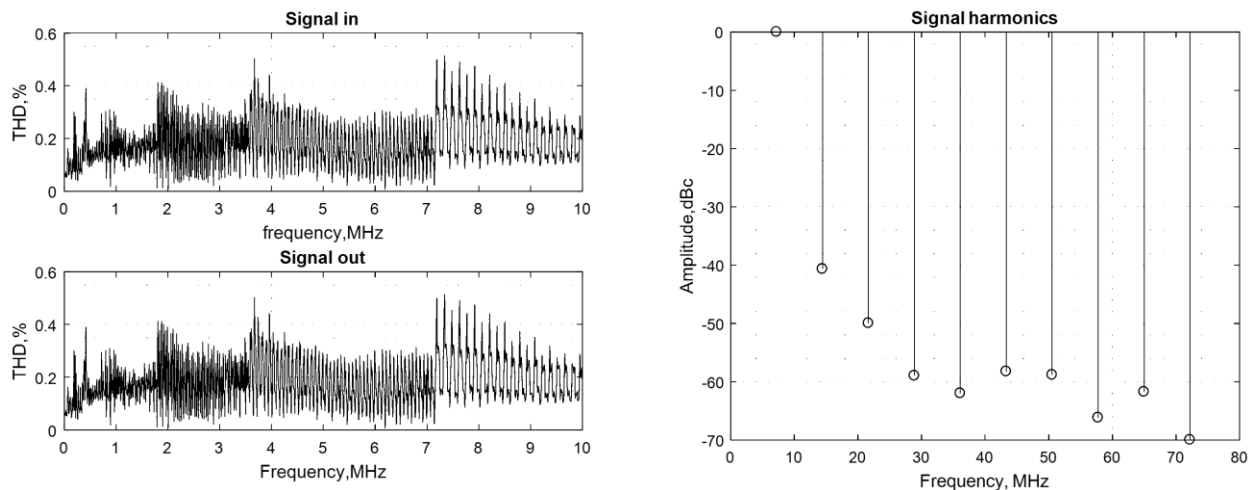
Dažnių ruože  $1,5$  MHz -  $3,5$  MHz pastebimi faziniai netolygumai iki  $10^\circ$ . Netiesinių iškraipymų koeficientas lyginant su ankstesnės konfigūracijos duomenimis sumažėjo žr. 3.9 Pav.





3.9 Pav. Matavimo sistemos netiesiniai iškraipymai 10 kHz-10 MHz dažniu ruože, antroji sistemos konfigūracija

Nors iškraipymų procentinė dalis mažesnė lyginant su ankstesnės konfigūracijos duomenimis, pagrindiniai iškraipymų pikai ties 2.5 MHz bei 3.57 MHz dažniais išliko nepakitę. Manoma, kad ties šiais dažniai iškraipymo koeficiento padidėjimą įtakoja pašaliniai triukšmai iš generatoriaus. Atlikti pakartotiniai matavimai esant kelios skirtingoms matavimų kabelių konfigūracijoms netiesinių iškraipymų pikų nepanaikina. Pasinaudojus atsarginiu tokio pačio modelio signalų generatoriumi netiesinių iškraipymų maksimumai ties 2.5 MHz bei 3.57 MHz dažniais dingo žr. 3.10 Pav.



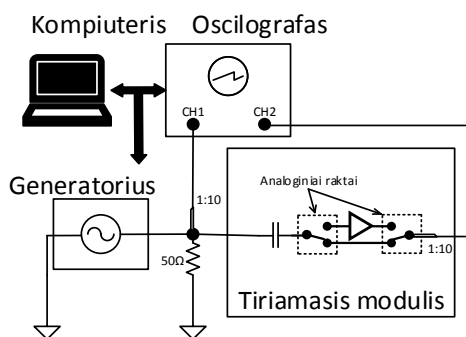
3.10 Pav. Netiesinių iškraipymų tyrimų rezultatai pakeitus generatorių, kairėje. Signalų harmonikos kai pagrindinio signalo dažnio dedamoji 7.22 MHz, dešinėje.

Netiesinių iškraipymų koeficiento vertė siekia 0.5 %. Gamintojas specifikuoja mažiausią -35 dB antrosios harmonikos lygį. Matome, kad antrosios harmonikos lygis siekia 40 dB. Daroma išvada, kad 0.5 % netiesinių iškraipymų lygis įtakojamas generatoriaus. Atlikti matavimų sistemos matavimai leidžia atlikti gautų duomenų kalibravimą norint pašalinti pačios sistemos įnešamus nepageidaujamus veiksnius.

## 3.2. Posistemių tyrimas

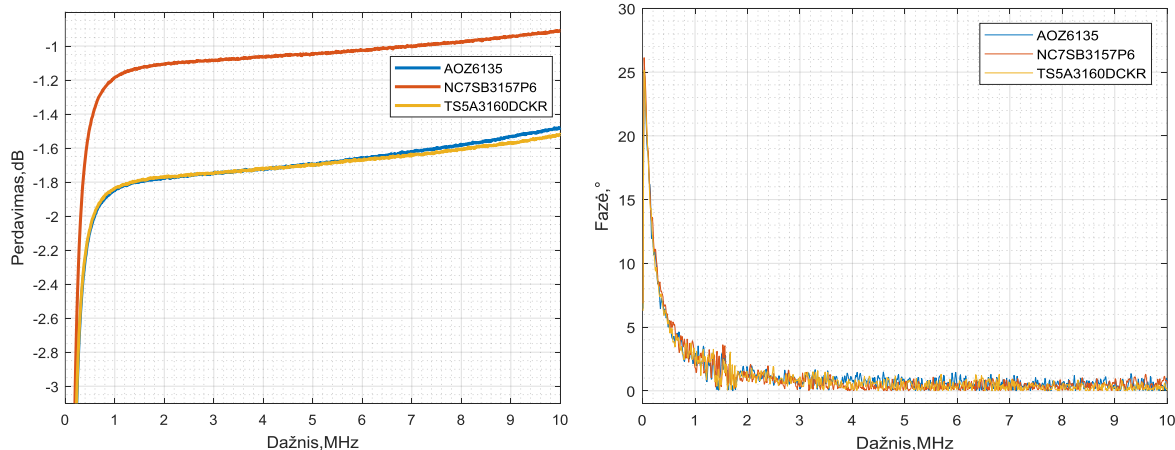
### 3.2.1 Ultragarsinių signalų priėmimo posistemės tyrimas

Sukalibravus matavimams naudojamą sistemą yra atliekami analoginių raktų tyrimai kurie yra naudojami ultragarsinės sistemos priėmimo dalyje. Analoginių raktų tyrimai buvo atlikti remiantis atraminio sinusinio signalo iš generatoriaus palyginimu su praėjusio pro analoginius raktus sinusiniu signalu. Analoginių raktų tyrimams naudota sujungimo konfigūracija pateikiama 3.11 Pav.



3.11 Pav. Analoginių raktų tyrimams naudota sujungimo konfigūracijos schema

Atliekant tyrimus buvo palyginti trijų skirtingų gamintojų siūlomi produktai. Atlikta amplitudės dažninės charakteristikos analizė 10 kHz – 10 MHz dažnių srityje, 10 kHz žingsniu (3.12 Pav.).



3.12 Pav. Analoginių raktų palyginimo grafikas, amplitudės (kairė) bei fazės (dešinė) dažninė perdavimo charakteristika, 10 kHz - 10 MHz riboje.

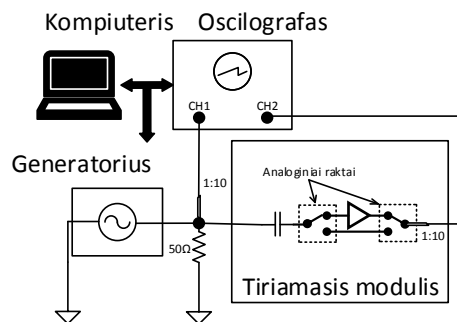
Pagal matavimo rezultatus nustatyta, kad naudojami analoginiai raktai įneša papildomą signalo slopinimą. Mažiausias signalo slopinimas pasireiškė naudojant NC7SB3157P6 analoginius raktus. Raktų slopinimo įtaka yra mažesnė didėjant įeinančio signalo dažniui. Tyrimams naudoti analoginiai raktai AOZ6135 bei TS5A3160DCKR pasižymėjo panašiu, bet 0.6 dB didesniu slopinimu nei NC7SB3157P6. Kadangi priimamas ultragarsinis signalas numatomas mažos amplitudės (~10 mV)

pasirenkami raktai, užtikrinantys mažiausią slopinimą. Raktų įvertinimui tai pat svarbus fazės pokytis, atsirandantis dėl signalo vėlinimo.

Atlikus analoginių raktų fazinės charakteristikos tyrimus nustatyta, kad visų tyrimams naudotų analoginių raktų fazinė charakteristika praktiškai identiška. Dėl prieš analoginius raktus naudojamo kondensatoriaus matomas fazinės charakteristikos iškraipymas iki  $26^\circ$  žemuose dažniuose. Projektuojamos sistemos darbo diapazone 200 kHz – 3 MHz fazinė charakteristika iškraipoma iki  $5^\circ$  ribos. Pagal gautus duomenis matoma 1 MHz – 2 MHz dažnių ruože gaunami faziniai šuoliai.

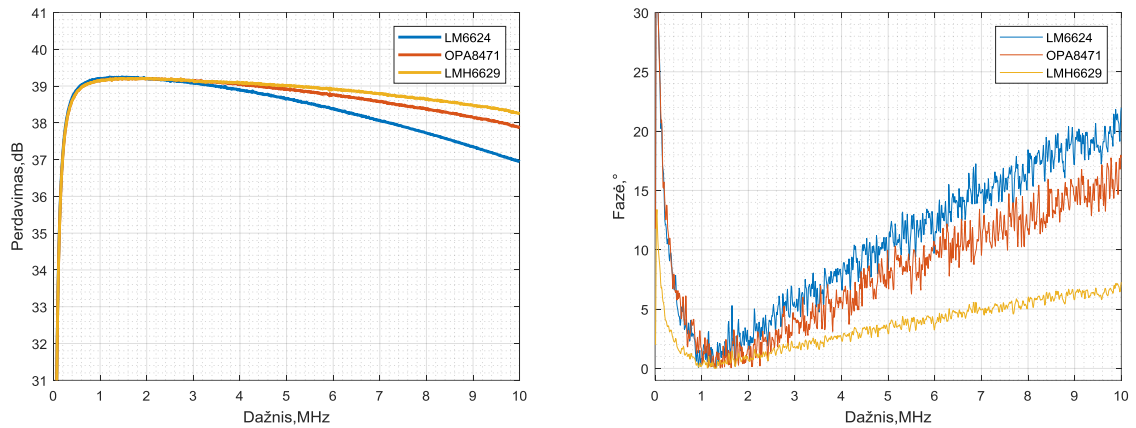
Pagal gautus amplitudės ir fazės dažninės charakteristikos duomenis ultragarsiniame imtuve nuspręsta naudoti NC7SB3157P6 analoginius raktus. Įvertinus raktų įnešamą slopinimą bei fazinės charakteristikos iškraipymus sudaromi kalibravimo koeficientai kurių paskirtis kuo labiau sumažinti naudojamų komponentų įnešamą nepageidaujamą poveikį.

Pasirinkus analoginius raktus įvertinama imtuvo modulyje naudojamo stiprintuvo įnešama amplitudinė bei fazinė įtaka projektuojamai sistemai. Šiam tikslui kaip ir analoginiams raktas atliekama amplitudinių bei fazinių charakteristikų dažninė analizė trims 2.2 lentelėje apžvelgtiems stiprintuvams. Stiprintuvų tyrimams naudojama sujungimo konfigūracija pateikiama 3.13 Pav.



3.13 Pav. Stiprintuvų tyrimams naudojama tyrimų sistemos konfigūracija.

Signalas iš generatoriaus pateikiamas į projektuojamos ultragarsinės sistemos imtuvo dalį bei atšakojamas ir pateikiamas į oscilografo pirmąjį kanalą kaip atraminis signalas. Stiprintuvo išėjimo signalas nuvedamas į antrąjį oscilografo kanalą. Amplitudės dažninės charakteristikos tyrimų rezultatai pateikiami 3.14 Pav.

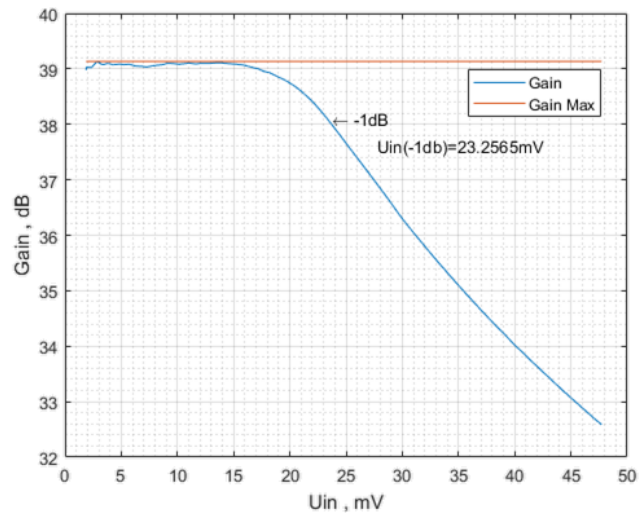


3.14 Pav. Stiprintuvų dažninės charakteristikos

Atlikus stiprintuvų dažninių charakteristikų tyrimus nustatyta, kad didėjant jėjimo dažniui stiprinimo koeficientas mažėja. Stiprinimo koeficientas 180 kHz – 3.18 MHz dažnių srityje yra 39.2 dB visiems tirtiems stiprintuvams. Tolygiausiai stiprinimo koeficientą išlaiko LMH6629 stiprintuvas. Tolesniais tyrimai atliekami stiprintuvų fazės iškraipymo tyrimai. Tyrimais stengiamasi nustatyti kuris iš tiriamųjų stiprintuvų įneša didžiausius fazės iškraipymus.

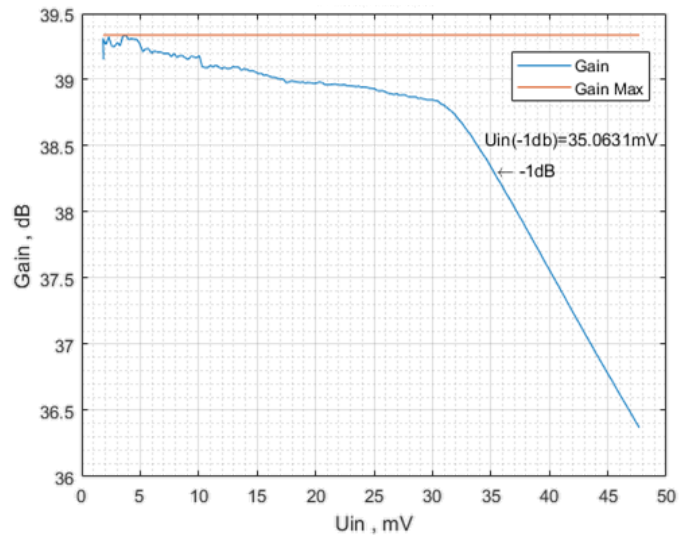
Fazinių charakteristikų tyrimai parodė, kad mažiausius fazinės charakteristikos iškraipymus įneša LMH6629 stiprintuvas. Visiems tirtiems stiprintuvams būdingas fazinės charakteristikos iškraipymų augimas didėjant įeinančio signalo dažnio vertei.

Tolesniais stiprintuvu tyrimais atliekami kiekvieno stiprintuvo dinaminio diapazono tyrimai. Tam tikslui jėjimo amplitudė palaipsniui didinama iki dėl atsiradusio ribojimo stiprinimas sumažėja 1 dB. Šiais tyrimai išmatuojama kiekvieno stiprintuvo maksimali jėjimo įtampos vertė prie kurios jėjimo signalo iškraipymo vertė minimali (1 dB compression point [24] ). Kiekvienas stiprintuvas tirtas tomis pačiomis sąlygomis. Visi stiprintuvai maitinami iš +5 V linijos. Tyrimo rezultatai LMH6624 operaciniam stiprintuvui pateikiami 3.15 Pav.



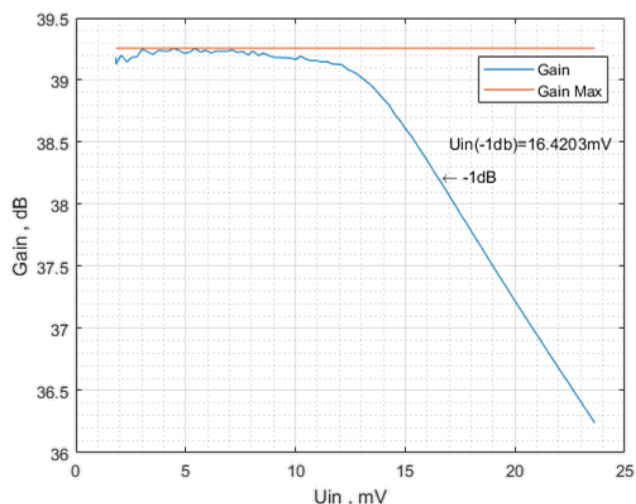
3.15 Pav. Stiprintuvo LMH6624 maksimalios įėjimo amplitudės nustatymas.

Atlikti tyrimai rodo, kad LMH6624 operacinis stiprintuvas pasižymi vienuodu stiprinimo koeficientu kol įėjimo signalo amplitudė nėra aukštesnė nei 15 mV. Stiprintuvo stiprinimas  $-1$  dB sumažėja kai įėjimo įtampos vertė pasiekia 23.2556 mV. Sekančiu tyrimu atliekamas LMH6629 stiprintuvo dinaminio diapazono tyrimas (žr. 3.16 Pav.).



3.16 Pav. Stiprintuvo LMH6629 maksimalios įėjimo amplitudės nustatymas.

Tyrimų rezultatai parodo, kad stiprintuvo stiprinimo koeficiento vertė mažėja tiesiniu dėsniumi kol įėjimo įtampos vertė pasiekia 30 mV. LMH6629 operacinio stiprintuvo stiprinimas sumažėja per 1 dB nuo maksimalios stiprinimo vertės kai įėjimo įtampos vertė lygi 35.063 mV. Dinaminio diapazono tyrimas OPA8471 stiprintuvui pateikiamas 3.17 Pav.

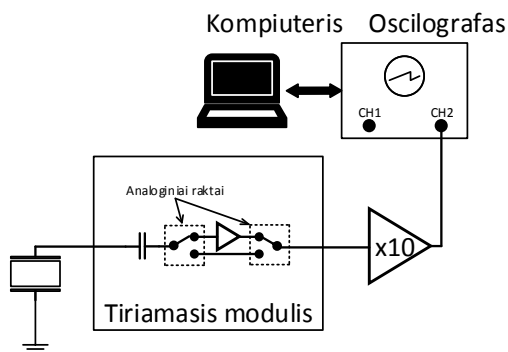


3.17 Pav. Stiprintuvo OPA8471 maksimalios jėjimo amplitudės nustatymas.

Nustatyta, kad operacinis stiprintuvas OPA8471 pasižymi panašiomis stiprinimo koeficiento savybėmis kaip ir operacinis stiprintuvas LMH6624. Stiprinimo koeficiento vertė stabili kol jėjimo įtampos vertė mažesnė nei 10 mV. Įėjimo įtampos vertei pasiekus 16.42 mV stiprinimo koeficientas nukrenta per 1 dB.

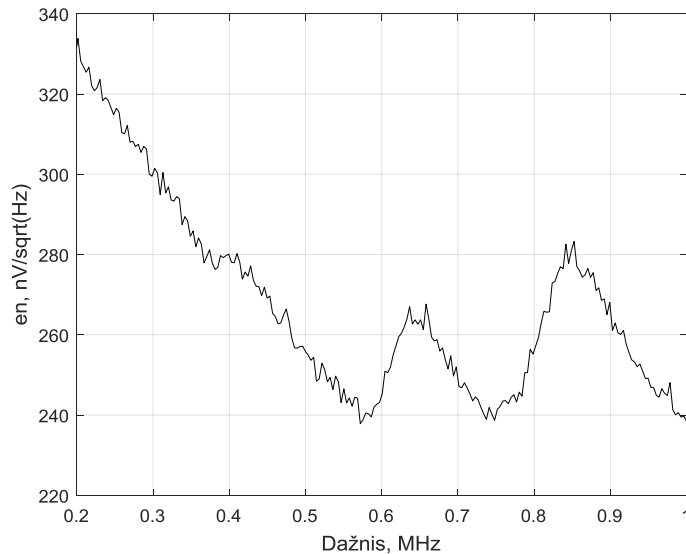
Atlikus stiprintuvų tyrimus pasirinkta naudoti LMH6629 operacinį stiprintuvą. Stiprintuvas užtikriną mažiausius fazinius iškraipymus dažnių diapazone ir didžiausią dinaminį diapazoną.

Pasirinktam operaciniam stiprintuvui išmatuotas triukšmų įtampos spektrinis tankis 200 kHz - 1 MHz dažnių diapazone. Tyrimui naudota konfigūracija pateikiama 3.18 Pav.



3.18 Pav. Stiprintuvo triukšmų įtampos tankiui naudota matavimo sistemos konfigūracija

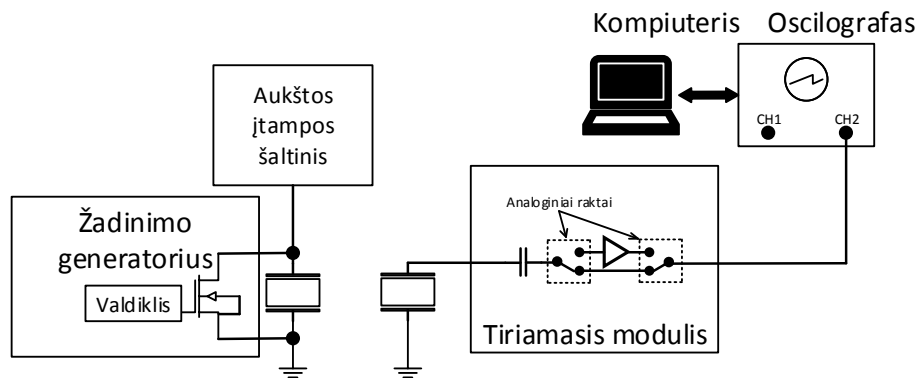
Tyrimų metu prie tiriamojo modulio prijungtas ultragarsinis keitiklis. Siunčiantysis ultragarsinis keitiklis nėra žadinamas, keitiklių pora ekranuojama audiniu norint sumažinti pašalinių trikdžių (oro srauto bei akustinių triukšmų) įtaką. Registruojami signalai operacinio stiprintuvo išėjime papildomai sustiprinami. Priimti signalai konvertuojami į dažnių sritį, paskaičiuojamas galios spektrinis tankis ir tuomet skaičiuojamas visų signalų galios spektrinio tankio vidurkis 3000 signalų. Gautas spektras konvertuojamas į įtampos spektrinį tankį (3.19 Pav.).



3.19 Pav. LMH6629 operacinio stiprintuvo išėjimo triukšmų įtampos spektrinis tankis

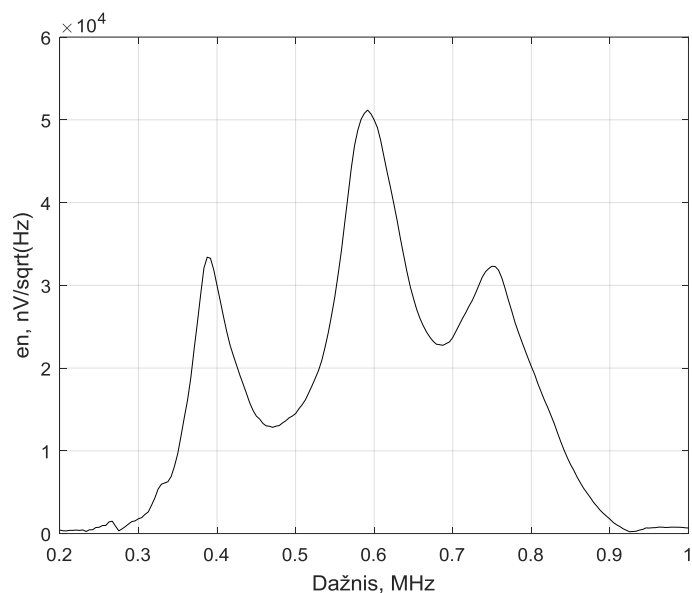
Nustatyta, kad triukšmas mažėja iki 0.58 MHz ribos. Diapazone 0.58 MHz – 0.65 MHz bei 0.75 MHz – 0.85 MHz triukšmo lygis išauga dėl ultragarsinio keitiklio impedanso rezonansų.

Sekančio tyrimo metu išmatuotas priimto signalo įtampos spektrinis tankis 200 kHz - 1 MHz dažnių diapazone. Tyrimui naudota konfigūracija pateikiama 3.20 Pav.



3.20 Pav. Signalų įtampos tankiui naudota matavimo sistemos konfigūracija

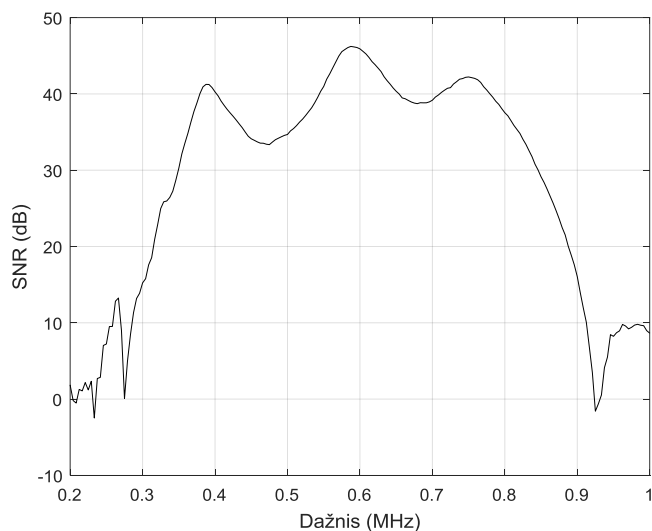
Tyrimo metu siunčiantysis keitiklis buvo žadinamas 400 V įtampa. Priimtam signalui pritaikytas Tukey langas siekiant išskirti tik pirmąjį, tiesioginio praėjimo signalą. Priimti signalai sulygiuoti, suvidurkinti. Kadangi vidurkis laike skaičiuotas iš 3000 signalų, laikoma, kad triukšmo lygis ženkliai sumažėjo ir vyrauja tik signalo spektras. Vidurkio signalas konvertuotas į dažnių sritį, paskaičiuotas įtampos spektrinis tankis. Gauti rezultatai pateikiami 3.21 Pav.



3.21 Pav. Signalo spektrinis įtampos tankis be bandinio.

Nustatyta, kad signalo įtampos spektrinis tankis didėja 0.2 MHz – 0.58 MHz riboje. Diapazone 0.58 MHz – 0.71 MHz bei 0.88 MHz – 1 MHz signalo lygis sumažėja dėl ultragarsiniame keitiklyje pasireiškiančių daugkartinių atspindžių.

Žinant signalo spektrinį įtampos tankį, bei triukšmo spektrinį įtampos tankį apskaičiuotas signalo ir triukšmo santykis (SNR) kai tiriamosio medžiagos tarp ultragarsinių keitiklių nėra. Gauti rezultatai pateikiami 3.22 Pav.



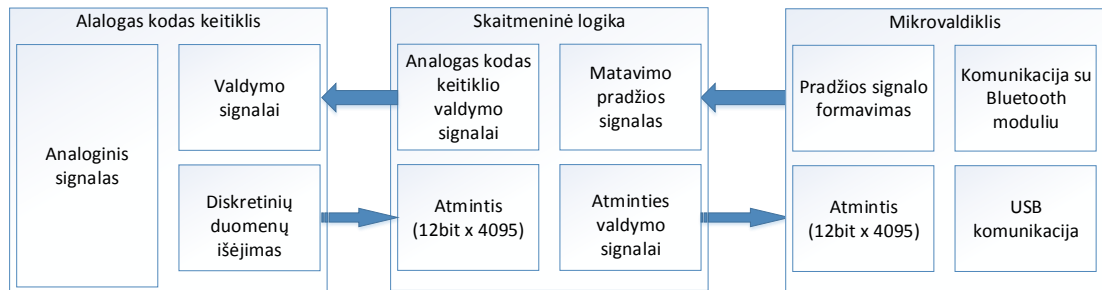
3.22. Signalo ir triukšmo santykis be bandinio 0.2 MHz – 1 MHz riboje.

Nustatyta, kad signalo – triukšmas santykio maksimali vertė sieki 45.2 dB. SNR santykis didžiausias ties ultragarsinio keitiklio rezonansiniu dažniu ~590kHz.



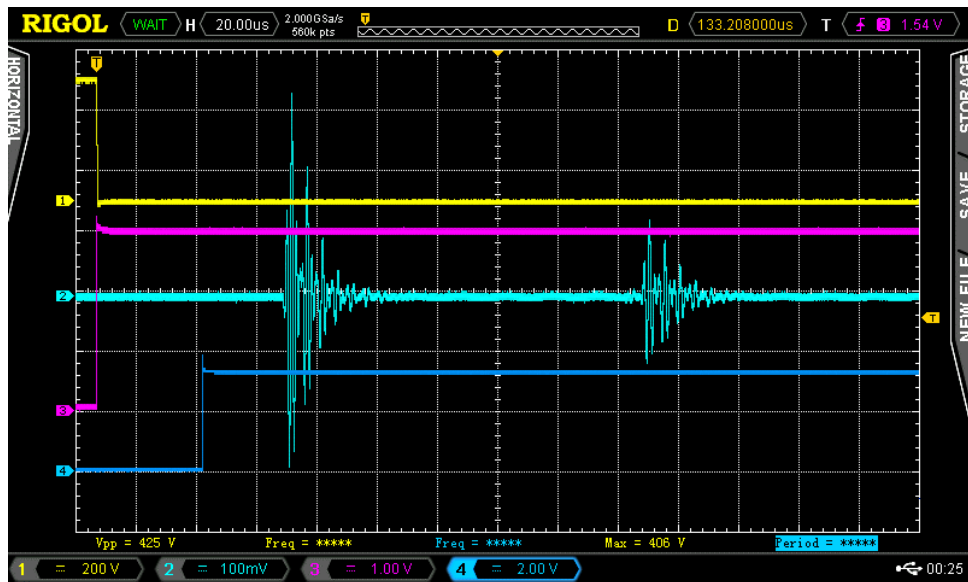
### 3.2.2 Valdymo ir sinchronizacijos posistemės tyrimai

Norint surinkti duomenis iš mikrovaldiklio labai svarbu užtikrinti sistemos sinchronizaciją bei greitaveiką. Sistema turi būti pajėgi surinkti duomenų paketus kurie atsinaujina kas 1  $\mu$ s. Šiam tikslui atliekami tyrimai norint įsitikinti sistemos sinchronizacija bei darbo našumu. Tiriamosios sistemos dalis pateikiama 3.20 Pav.



3.23 Pav. Detalizuota analogas kodas keitiklio, skaitmeninės logikos ir mikrovaldiklio sąsaja.

Mikrovaldiklis perduoda pradžios impulsą skaitmeniniam mazgui, šiuo metu skaitmeninis mazgas (toliau CPLD) įjungia analogas kodas keitiklio taktavimo dažnį bei formuoja aukšto lygio diskretinį signalą dėl kurio suformuojamas bei išsiunčiamas ultragarsinių bangų impulsas. Detalesnis signalų vaizdas pateikiamas 3.21 Pav.



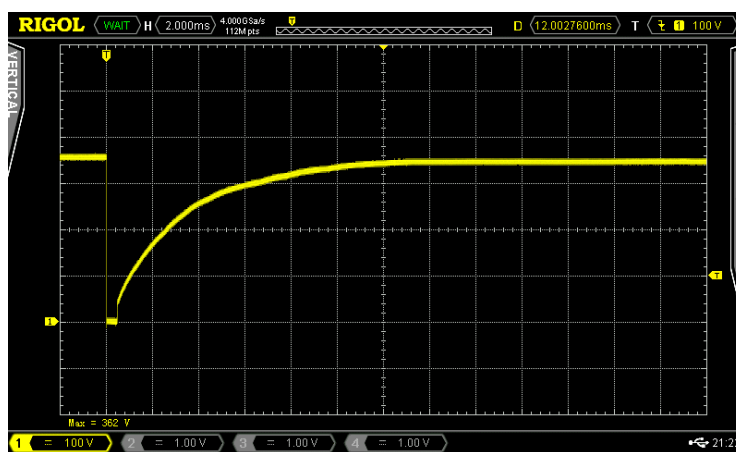
3.24 Pav. Diskretiniai projektuojamos ultragarsinės sistemos signalai duomenų surinkimo metu.

Pirmasis oscilografo kanalas (1, Geltona spalva ) atvaizduoją aukštos įtampos kitimą ultragarsinių bangų siuntimui naudojamame ultragarsinio keitiklio įėjime. Pagal pradžios signalą kuris pažymėtas trečiuoju kanalu (3, Tamsiai rožinė spalva ) aukštos įtampos keitiklis išjungiamas bei sukaupta energija išėjimo kondensatoriuje šuntuojamą į nulinio potencialo tašką. Dėl šios priežasties išsiunčiamas ultragarsinių bangų impulsas kuris atvaizduojamas antrame oscilografo kanale (2, Žydra

spalva ). Signalas prieš patekdamas į ultragarsinių bangų keitiklį įveikia 2 cm atstumą todėl yra vėlinamas apytiksliai 50 μ. Įvertinant ultragarsinių bangų keliavimo trukmę duomenys į FIFO tipo atmintį pradedami įrašinėti po 30 us nuo pradinio impulso pradžios, įrašinėjimas pradedamas kai ketvirtojo kanalo signalas (4, Tamsiai mėlyna spalva ) pereina į aukštą lygi. Po duomenų surinkimo į skaitmeninį mazgą duomenys 158 kHz dažniu perduodami mikrovaldikliui.

### 3.2.3 Žadinimo posistemės tyrimai

Aukštos įtampos maitinimo šaltinio tyrimų metu nustatyta per kiek laiko šaltinis atstato savo pradinę įtampos vertę po ultragarsinio keitiklio šuntavimo į nulinio taško potencialą. Aukštos įtampos maitinimo šaltinio įtampos atsistatymo laikas tiesiogiai įtakoja laiko intervalą kuris apsprendžia ultragarsinių bangų žadinimo dažnį. Tyrimu metu oscilografo pirmasis kanalas prijungiamas prie aukštos įtampos šaltinio išėjimo pasinaudojant 1:100 daliklį. Maitinimo šaltinio išėjimas šuntuojamas į žemės potencialą, matuojama per kiek laiko atsistato maitinimo šaltinio įtampos vertė. Gauti rezultatai pateikiami 3.22 Pav. Pagal pateiktus duomenis matyti kad maitinimo šaltinis pilnai pasikrauna iki 362 V per pirmąsias 15 ms. Nustačius maitinimo šaltinio įtampos atsistatymo laiką nustatyta, kad norint maksimaliai sumažinti energijos nuostolius aukštos įtampos šaltinyje reikalinga įjungti analogas – kodas keitiklį po 15 ms nuo aukštos įtampos šaltinio įjungimo.

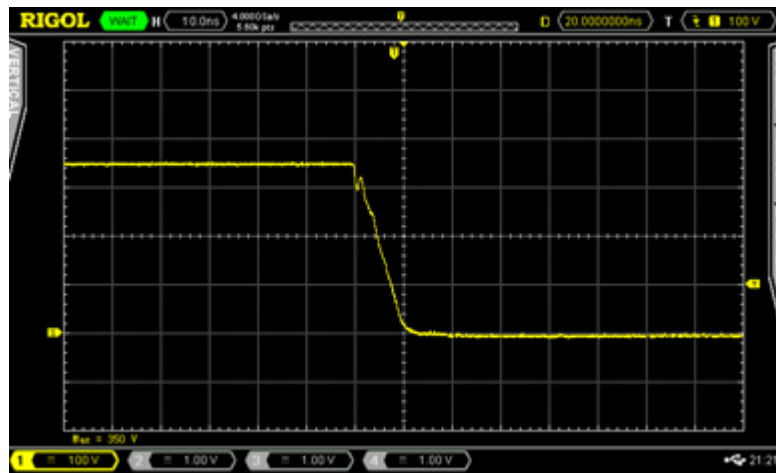


3.25 Pav. Auštos įtampos maitinimo šaltinio įtampos kitimas po šuntavimo į nulinio potencialo tašką

Žinant šaltinio įtampos atsistatymo laiką papildomai atliekami žadinimo signalo fronto tyrimai. Priklausomai nuo žadinančiojo signalo fronto statumo keičiasi sugeneruojamo ultragarsinių bangų dažnio vertė. Generuojamo signalo spektro maksimalus dažnis:

$$f_{max} = \frac{1}{\pi * t_f} \quad , \quad (3.1)$$

čia,  $t_f$  žadinančiojo signalo fronto trukmė. Oscilografu išmatuota žadinančiojo fronto trukmė kai tranzistoriaus valdiklio įtampos vertė +12 V pateikiama 3.23 Pav.



3.26 Pav. Generuojamas įtampos frontas žadinančiojo ultragarsinio keitiklio įėjime.

Nustatyta, kad ultragarsinio keitiklio žadinimo frontas yra ~11 ns. Tuomet maksimalus žadinimo dažnis yra ~350 MHz. Kadangi sistemoje naudojama 12 V linija nėra paranki atlikti tyrimai, kaip žadinimo fronto trukmė priklauso nuo tranzistoriaus užtūros valdiklio įtampos (5 V arba 12 V, keičiant) bei žadinimo įtampos vertės. Gauti rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje.

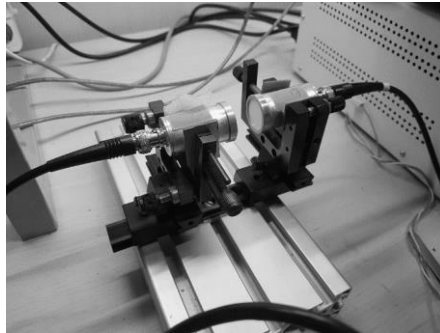
3.1 lentelė. Žadinamojo fronto trukmė priklausomai nuo žadinimo įtampos

Valdiklio įtampa	Žadinimo įtampa	Fronto trukmė	Valdiklio įtampa	Žadinimo įtampa	Fronto trukmė
5 V	3 V	59.9 ns	12 V	3 V	3.6 ns
	5 V	74.4 ns		5 V	3.8 ns
	10 V	111.7 ns		10 V	3.9 ns
	20 V	191.0 ns		20 V	4.0 ns
	50 V	465.8 ns		50 V	4.2 ns
	100 V	1045.5 ns		100 V	4.3 ns
	120 V	1320.4 ns		120 V	4.5 ns
	150 V	1762.6 ns		150 V	4.7 ns
	200 V	2659.0 ns		200 V	5.2 ns
	250 V	3719.5 ns		250 V	6.8 ns
	300 V	4936.5 ns		300 V	7.6 ns
	350 V	6272.0 ns		350 V	8.5 ns
400 V	7756.9 ns	400 V	11.2 ns		

Nustatyta, kad fronto trukmei didžiausią įtaką turi tranzistoriaus valdymo įtampos vertė: 400 V žadinimo įtampa (400 V) pasiekama per 7.5 μs naudojant 5 V valdiklio įtampą, naudojant 12 V valdiklio įtampą - per 11.2 ns. Fronto trukmė tai pat priklauso žadinimo įtampos vertės. Kuo žadinimo įtampa mažesnė tuo fronto trukmė mažesnė. Tai paaiškinama tuo, kad fronto augimo greitis apsprendžiamas tranzistoriaus (NDD03N80Z) maksimalios srovės (12 A) bei apkrovos talpa (350 pF). Daroma išvada, kad siekiant platesnės nei 3 MHz justos, žadinti reikėtų naudojant 12 V tranzistoriaus užtūros valdiklio įtampą. Pirmame skyriuje suformuotuose reikalavimuose numatyta, kad sistema turi užtikrinti 3 MHz darbo juostą, t.y. reikalavimas išpildytas.

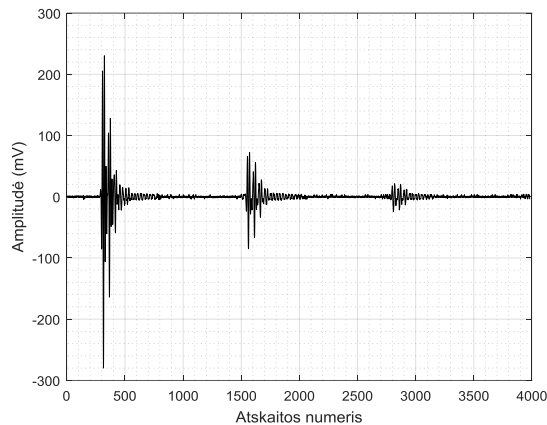
### 3.3. Rezonansinės spektroskopijos bandymai naudojant sistemą

Suprojektavus ultragarsinę sistemą atliekami ultragarsiniai tyrimai. Bandymų tikslas - ištirti kaip sistema veikia rezonansinės spektroskopijos tyrime. Signalai surenkami be bandinio bei su bandiniu, siekiant gauti bandinio rezonansinės spektroskopijos rezultatą. Pirmasis matavimas (žr. 3.24 Pav.) atliekamas be bandinio.



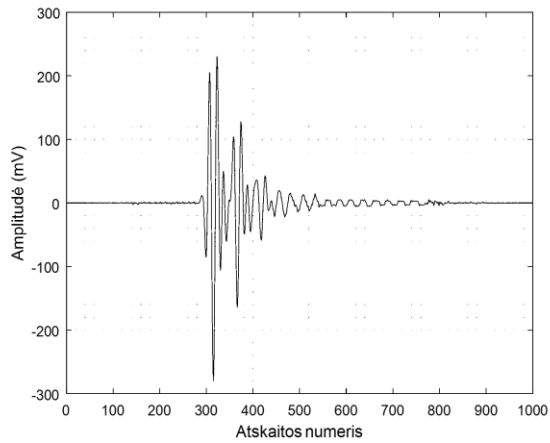
3.27 Pav. Eksperimento vaizdas matuojant be bandinio

Pasiunčiamas ultragarsinis impulsas, gautas žadinant ultragarsinį keitiklį 350 V įtampos šuoliu. Ultragarsiniai keitikliai pastatomi 2 cm atstumu vienas nuo kito, bei pozicionuojami taip kad antrojo signalo (atspindžio) 3.25. Pav. amplitudė būtų maksimali. Priimtas signalas skaitmenizuojamas bei perduodamas į kompiuterį.



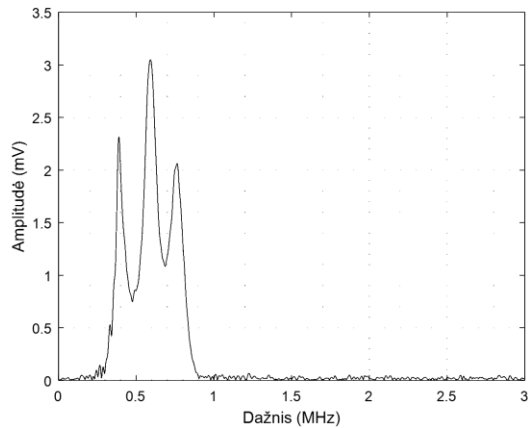
3.28 Pav. Priimtas ir skaitmenizuotas ultragarsinis signalas be bandomosios medžiagos.

Pagal gautus duomenis matome, kad priimtas signalas susideda iš tiesioginio praėjimo ultragarsinio signalo bei jo daugkartinių atspindžių. Atraminiam signalui išrenkama tiesioginio ultragarsinio signalo dalis naudojant Tukey lango funkciją (3.26 Pav.).



3.29 Pav. Atraminis ultragarsinis signalas laiko ašyje žadinant 350 V įtampos šuoliu.

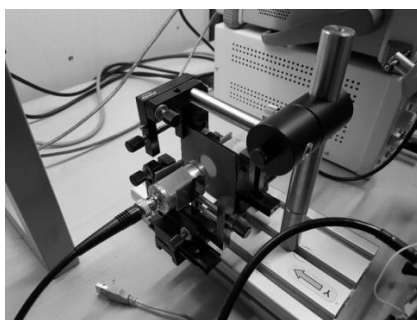
Atraminis signalas konvertuotas į dažnių ašį naudojant greitosios Furje transformaciją (DFT). Gautas signalo spektras pateikiamas 3.27 Pav.



3.30 Pav. Gautas atraminio signalo spektras žadinant 350 V šuoliu

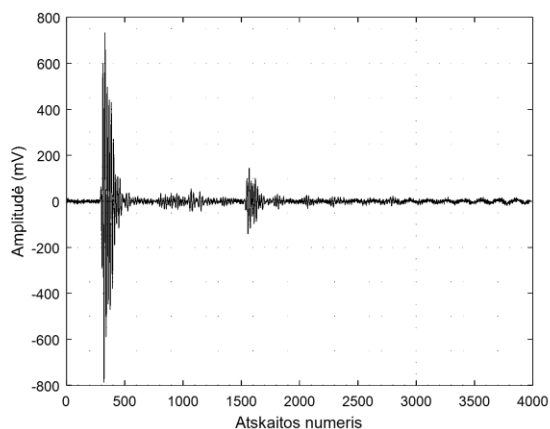
Kadangi naudojami ultragarsiniai keitikliai savyje neturi demferio, sužadintas ultragarsinis signalas atsispindi nuo ultragarsinio keitiklio galinės dalies bei interferuoja su siunčiamu ultragarsiniu signalu. Dėl šios priežasties signalo spektre gaunami spektriniai maksimumai bei minimumai 0.3 MHz – 0.9 MHz dažniu riboje.

Tarp ultragarsinių keitiklių įterpiama bandomoji medžiaga. Bandomoji medžiaga centruojama ultragarsinių keitiklių atžvilgiu norint užtikrinti didžiausią perduodamos energijos kiekį žr. 3.28 Pav. Kadangi tiriamasis bandinys pasižymės ultragarsinio signalo slopinimu, priimtas ultragarsinis signalas stiprinamas 40 dB.



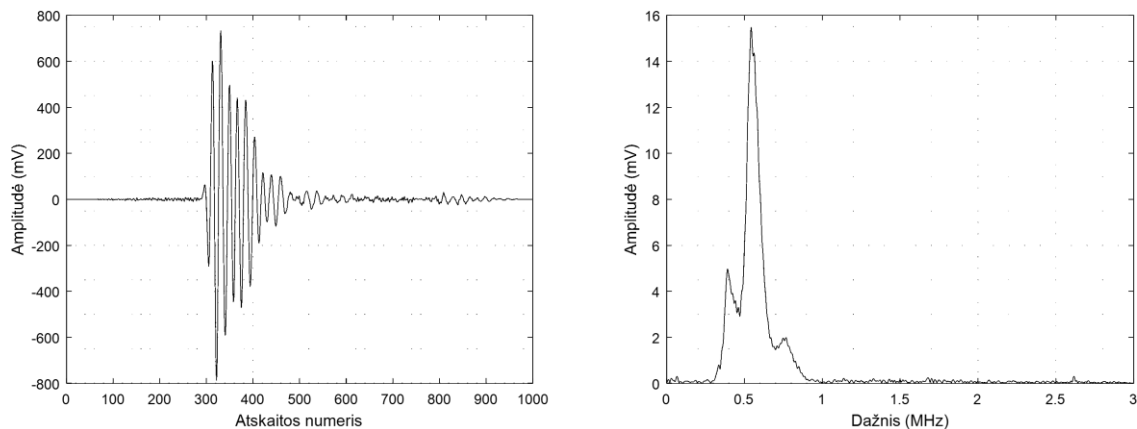
3.31 Pav. Eksperimento vaizdas matuojant su bandiniu

Matomas pagrindinis priimtas ultragarsinis signalas bei po jo einantis daugkartinis atspindys (žr. 3.29 Pav.). Lyginant šį signalą su ankščiau gautu atraminiu (be bandinio) aiškiai pastebima, kad priimtas ultragarsinis signalas pasižymi didesniu triukšmo lygiu bei papildomais virpesiais kuriuos sukelia rezonansai tiriamojoje medžiagoje.



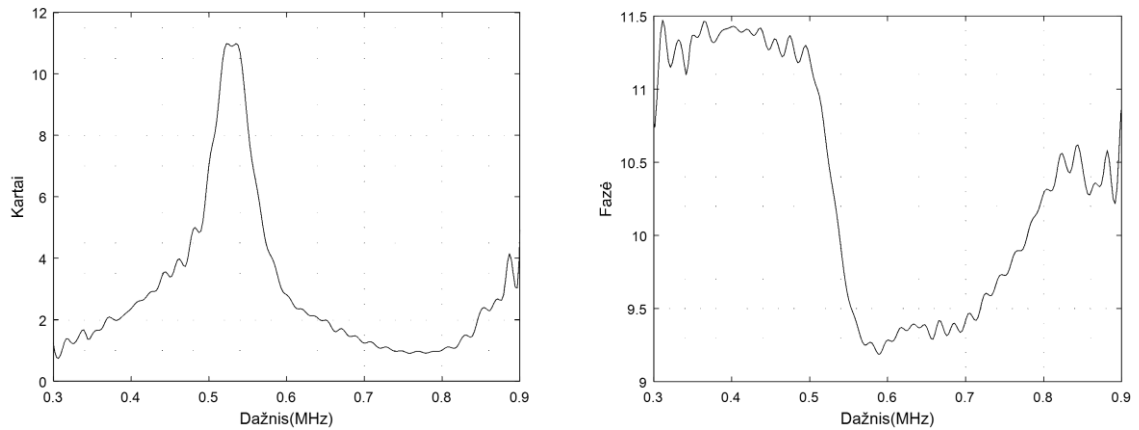
3.32 Pav. Priimtas signalas su bandiniu žadinant 350 V šuoliu, signalas sustiprintas 40 dB.

Signalas apdorojamas kaip ir atraminis - išsikerpame pagrindinį ultragarsinį signalą naudodami Tukey lango funkciją bei konvertuojame į dažnių sritį DFT pagalba (žr. 3.30 Pav.).



3.33 Pav. Priimtas ultragarsinis signalas praėjęs bandinį bei jo spektras žadinant 350 V šuoliu.

Matome, kad spektras skiriasi nuo atraminio signalo. Padalinus šį spektrą iš be bandinio gauto atraminio signalo spektro gaunamas įterpto bandinio spektrinis atsakas žr. 3.31 Pav.



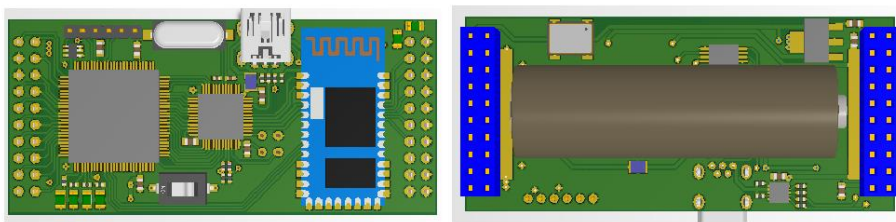
3.34 Pav. Bandinio spektroskopijos rezultatas: amplitudė (kairė) ir fazė (dešinė) žadinant 350 V šuoliu.

Nustatyta, kad bandinys turi vieną storio rezonansą tiriamame diapazone. Pagal gautus amplitudės ir fazės santykio rezultatus galimas bandomosios medžiagos parametrų nustatymas sprendžiant atvirkštinį uždavinį [1]. Fazės santykis parodo vėlinimą bandinyje.

## 4. SISTEMOS PROTOTIPO PROJEKTAVIMAS

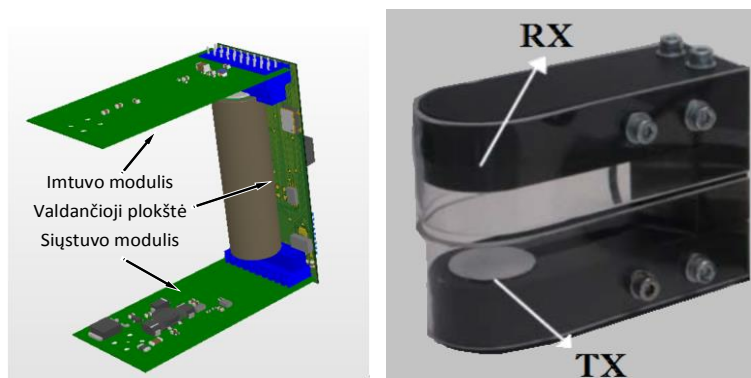
Atlikus bandymus su suprojektuotais sistemos moduliais, pereita prie prototipo projektavimo bei gamybos etapo. Ultragarinės sistemos prototipas suprojektuotas remiantis ankščiau tirtais moduliais. Sistemos prototipą sudaro: valdančioji plokštė, imtuvas ir siųstuvas.

Valdančioji sistemos plokštė savyje talpina skaitmeninę logiką, mikrovaldiklį, Bluetooth ryšio modulį, USB komunikacijos jungtį bei apsaugą, baterijos įkrovimo valdiklį, 2700 mAh talpos AA dydžio pakraunamą ličio jonų bateriją, programavimo bei imtuvui ir siųstuvui prijungti skirtas jungtis. Valdančiosios plokštės trimatis modelis pateikiamas 4.1 Pav.



4.4.1 Pav. Valdančiosios posistemės spausdinto montažo plokštė, vaizdas iš viršaus (kairė) ir iš apačios (dešinė)

Papildomai prie valdančiosios plokštės moduliui jungiamas imtuvo modulis. Imtuvo modulį sudaro: analoginiai raktai, ultragarinių signalų stiprintuvas, filtras ir analogas kodas keitiklis. Paskutinis modulis yra siųstuvas. Siųstuvo modulį sudaro aukštos įtampos maitinimo šaltinis bei ultragarinių signalų generatorius. Imtuvo ir siųstuvo modulį numatoma prijungti prie valdančiosios plokštės sudarant 90° kampą žr. 4.2 Pav.



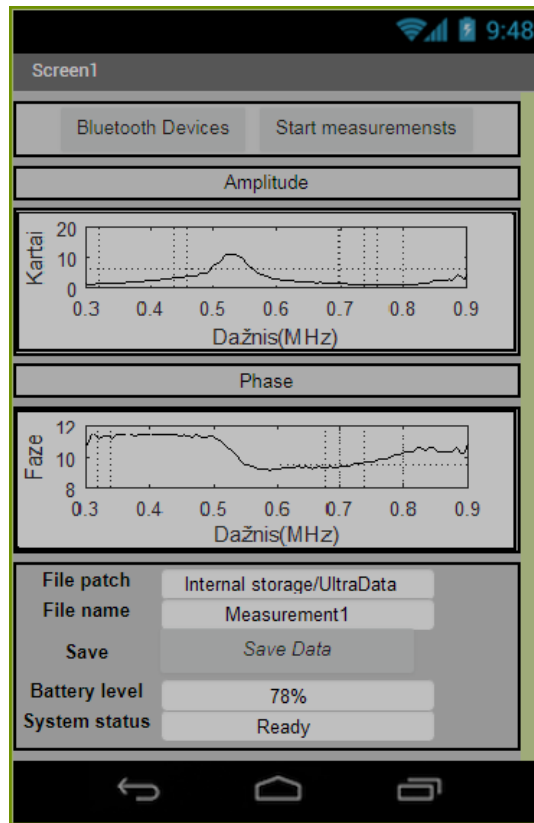
4.4.2 Pav. Ultragarinės duomenų surinkimo sistemos prototipas (kairė), prototipui numatomas korpusas (dešinė).

Patalpinus suprojektuotą duomenų surinkimo sistemą į sandarų korpusą numatoma sistema naudoti lauko sąlygomis. Sistemoje naudojamas Bluetooth ryšys leidžia vartotojui gauti surinktus duomenis tiesiai į išmanųjį įrenginį ar kompiuterį. Sistema turi USB sąsajos jungtį per kuria galima komunikacija su sistema, sistemoje naudojamos baterijos krovimas.



## 4.1. Išmaniojo įrenginio programinės įrangos projektavimas

Tobulėjant elektronikai tobulėja ir žmonės supantys elektronikos prietaisai. Šiuo metu daugelis su savimi turi išmanųjį mobilųjį telefoną. Šiuolaikiniai mobilieji telefonai pasižymi dideliu skaičiavimų našumu, todėl sukaupti signalai gali būti apdoroti išmaniajame įrenginyje. Šiam tikslui sukurta programinė įranga Android operacinės sistemos pagrindu žr. 4.3 Pav.



4.4.3 Pav. Sukurtos programinės įrangos vartotojo sąsajos prototipas

Programinės įrangos kūrimui pritaikyti appinventor.mit.edu šablonai, adaptuoti pagal norimus atvaizduoti parametrus. Pasirinkus skiltį „Bluetooth devices“ atsidaro langas kuriame išsirenkamas ultragarsinės sistemos Bluetooth adresas. Jei prisijungimas pavyko, „System status“ lange rodomas pranešimas „Connected“. Indikuojamas baterijos talpos likutis procentais, paskaičiuotas pagal išmatuotą įtampą. Kuomet duomenų surinkimo sistema pasirengia matavimo procesui, lange „System status“ rodomas pranešimas „Ready“. Matavimai pradami paspaudus mygtuką „Start measurements“. Papildomai numatyta galimybė nurodyti duomenų saugojimo kelią bei failo pavadinimą. Programinė įranga turi būti pritaikoma pagal konkrečiam vartotojui aktualius parametrus.

## IŠVADOS IR PASIŪLIMAI

- Oro terpės ultragarsinės spektroskopijos publikacijų apžvalga parodė, kad tokių sistemų dažnių juosta turi siekti 3 MHz, reikalingos dvi stiprinimo reikšmės: 0 dB (nesant bandinio) bei 40 dB (patalpinus bandinį), žadinimui reikalingi iki 400 V impulsai.
- Pasiūlyta sistemą sudaryti iš trijų pagrindinių posistemų: i) žadinimo; ii) priėmimo ir skaitmenizavimo bei iii) valdymo, sinchronizacijos ir duomenų perdavimo.
- Posistemės suprojektuotos ir pagamintos kaip atskiri moduliai.
- Parengta programinė įranga duomenų perdavimui į išmanųjų įrenginių.
- Sudaryta tyrimų metodika, suprojektuota tyrimų sistema. Atlikta tyrimų sistemos bei metodikos analizė.
- Atlikti suprojektuotų ultragarsinės duomenų surinkimo sistemos modulių mazgų tyrimai, palyginti įvairūs sprendimo variantai.
- Nustatyta, kad žadinimo įtampa siekia 406 V, maksimali žadinimo fronto trukmė yra 11 ns.
- Nustatyta, kad maksimalus triukšmo lygis keitiklio analogas – kodas įėjime yra  $331 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , signalo ir triukšmo santykis be bandinio siekia iki 45.2 dB, 0,2 MHz – 1 MHz dažnių juostoje.
- Nustatyta, kad sistemos tarnavimo laikas vienu akumuliatoriaus pakrovimu yra 112 parų.
- Naudojantis suprojektuota ultragarsinių signalų surinkimo sistema, atlikti preliminarūs ultragarsinės spektroskopijos bandymai.
- Suprojektuota portatyvi ultragarsinių signalų surinkimo sistema skirta oru sklindančio ultragarso taikymui spektroskopijoje. Suprojektuotą sistemą sudaro trys moduliai: priėmimo ir žadinimo moduliai yra 60 mm x 30 mm, valdančiosios posistemės - 66 mm x 30 mm.

## LITERATŪROS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. T. Gomez, Air-coupled ultrasonic spectroscopy for the study of membrane filters, Journal of membrane science 213, 2003, p.p. 195-207.
2. Elena Jasiūnienė, Ultragarstinė medžiagotyra mokomoji knyga, Išleido „Vita Litera“. ISBN 978-9955-686-35-4, 2007.
3. T. Gomez, Simultaneous determination of the ultrasound velocity and the thickness of solid plates from the analysis of thickness resonances using air-coupled ultrasound, Ultrasonics, Vol.50, Iss. 2, 2010, p.p. 104–109.
4. Sancho-Knapik, D. Calás, H. Peguero-Pina, J.J.Ramos-Fernández, A.Gil-Pelegrín, 12. T. Gomez, T.E.G. Air-coupled ultrasonic resonant spectroscopy for the study of the relationship between plant leaves elasticity and their water content. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control 2012, 59, 319–325.
5. D. Sancho-Knapik, T. Gomez, J.J Peguero-Pina, E. Gil-Pelegrin, Noncontact and noninvasive study of plant leaves using air-coupled ultrasounds, Applied Physics Letters 95, 2009.
6. Tomas Gómez Álvarez-Arenas, Eustaquio Gil-Pelegrin, Joao Ealo Cuello , Maria Dolores Fariñas, Domingo Sancho-Knapik, David Alejandro Collazos Burbano, Ultrasonic Sensing of Plant Water Needs for Agriculture, MDPI sensors, 2016.
7. Timothy G. Leighon, What is ultrasound?, Institute of sound and vibration research, science direct, molecular biology 93, 2007.
8. Pascal Laugier and Guillaume Haiat, Introduction to the Physics of Ultrasound, University Pierreet Marie Curie, 2011.
9. University of Washington, courses, Ultrasound slides, internetinė prieiga: <http://courses.washington.edu/bioen508/Lecture6-US.pdf>, 2012.
10. Peter Hoskins, Kevin Martin and Abigail Trush, Diagnostic Ultrasound, Physics and Equipment, ISBN 978-0-521-75710-2, Cambridge University Press, 2010.
11. Tom´as E. G´omez ´Alvarez-Arenas, Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducers to the Air, Journal Sensors 2013.

12. Jorge Topete and Tomás Gómez Álvarez-Arenas , A comparative study of air-coupled ultrasonic transducers based on piezoelectric composites and ferroelectric foams. ICSV22, Florence (Italy) 12-16 July 2015
13. Dharmendra Pandey and Shri Pandey (2010). Ultrasonics: A Technique of Material Characterization, Acoustic Waves, Don Dissanayake (Ed.), ISBN: 978-953-307-111-4, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/acoustic-waves/ultrasonics-a-technique-of-material-characterization>
14. W.M.D.Wright, D.A. Hutchins, Air-coupled ultrasonic testing of metals using broadband pulses in through-transmission Department of Engineering, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, UK, 1998.
15. C. Fritsch, J. Camacho, A. Ibanez, J. Brizuela, Full Featured Ultrasound NDE System in a Standard FPGA, Madrid , 2006.
16. US.Box. Ultrasonic testing system with USB interface. LECOEUR ELECTRONIQUE, 2004.
17. US.Smart LECOEUR ELECTRONIQUE, 2015. Internetinė prieda : [http://www.lecoeur-electronique.net/crbst\\_13.html](http://www.lecoeur-electronique.net/crbst_13.html)
18. Ultratek Compact Pulser. Ultrasonic Pulser/Receiver for Standard and Remote Operation. Internetinė prieda : [http://www.usultratek.com/products/usb\\_ut350.htm](http://www.usultratek.com/products/usb_ut350.htm)
19. Linas Svilainis, Vytautas Dumbrava, Darius Kybartas, Evaluation of the ultrasonic preamplifier noise voltage density. Journal of Circuits, Systems, and Computers. Vol. 23, No. 1. 2013
20. L.Svilainis, V.Dumbrava, A.Aleksandrovas, A.Chaziachmetovas, S.Kitov, D.Pagodinas. Signal stripping technique for ultrasonic imaging // IC-MINDT-2013 : Materials integrated non destructive testing : 5th international conference on NDT of HSNT-IC MINDT 2013, Athens Greece, Eugenides Foundation, May 20-22, 2013. Athens: HSNT, 2013. [1-8].
21. Pedro M. Ramos, Fonseca da Silva and António Cruz Serra, IMPROVING SINE-FITTINGALGORITHMS FOR AMPLITUDE AND PHASE MEASUREMENTS, XVII IMEKO World Congress 2003.
22. US-Key. New generation of High performances Ultrasonic device. LECOEUR ELECTRONIQUE, 2010.

23. Sancho-Knapik, T. Gomez, E. Gil Pelegrin, L. Farinas, Ultrasonic spectroscopy allows a rapid determination of the relative water content at the turgor loss point, *Tree Physiology*, 2013.
24. Khaled M. Graraibeh, Nonlinear distortion in wireless systems modeling and simulation with Matlab, 2012.
25. Linas Svilainis<sup>1</sup>, Andrius Chaziachmetovas<sup>1</sup>, Tomas E. Gomez Alvarez-Arenas, Ultrasonic Air Coupled Transducer Output Impedance Measurement Technique, 2018.