



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Feroelektretinių keitiklių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Rytis Pamparas

Projekto autorius

Doc. dr. Andrius Chaziachmetovas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Feroelektretinių keitiklių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Rytis Pamparas

Projekto autorius

Doc. dr. Andrius Chaziachmetovas

Vadovas

Doc. dr. Darius Kybartas

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rytis Pamparas

Feroelektretinių keitiklių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Ryčio Pamparo, baigiamasis projektas tema „Feroelektretinių keitiklių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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.

Rytis Pamparas

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Pamparas, Rytis. Feroelektretinių keitiklių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Andrius Chaziachmetovas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Ultragarso, ultragarsiniai matavimai, impulsų formuotuvai, ultragarsiniai keitikliai, feroelektretinės plėvelės, feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai.

Kaunas, 2020. 46 p.

Santrauka

Ultragarso bangos yra plačiai naudojamos neardomosios kontrolės tyrimuose. Akustinių bangų virpesiams sužadinti ir priimti naudojami ultragarsiniai keitikliai. Baigiamojo darbo tikslas yra ištirti feroelektretinės medžiagos plėvelės panaudojimo galimybes ultragarsiniams keitikliams. Šiam tikslui įgyvendinti išsikelti uždaviniai. Pirmiausia atlikti literatūros analizę ir išsiaiškinti ultragarsinių keitiklių rūšis ir pritaikymo galimybes. Pagal feroelektretinių plėvelių kriterijus suprojektuoti ir pagaminti aukštos įtampos impulsų formuotuvą. Pasiruošti kelis skirtingos konstrukcijos feroelektretinius ultragarsinius keitiklius ir juos ištirti.

Aukštos įtampos impulsų formavimui buvo suprojektuotas ir pagamintas impulsų formuotuvai. Impulsų valdymui buvo pasirinkti tranzistoriai „IXTT1N250HV“, kurie gali valdyti aukštos įtampos ($V_{ds} = 2500 \text{ V}$) ir nuolatinės srovės ($I_d = 1,5 \text{ A}$) apkrovą.

Feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai buvo pagaminti keturių rūšių. Pirmojo keitiklio feroelektretinė plėvelė buvo priklijuota su cianoakrilato klijais, kito keitiklio plėvelė buvo priklijuota su laidžia tekstile ir laidžiais sidabro klijais, ir paskutinis keitiklis buvo priklijuotas su varine folija ir laidžiais sidabro klijais. Taip pat buvo pagamintas vienas ultragarsinis keitiklis iš keturių aktyvių elementų esančių šalia vienas kito. Visiems keitikliams buvo išmatuoti elektriniai parametrai bei atlikti akustinių bangų spinduliavimo bandymai.

Pamparas, Rytis. Research of Ferroelectret Transducers. Master's Final Degree Project / supervisor Doc. dr. Andrius Chaziachmetovas; Faculty of Electrical and Electronics engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: Ultrasound, ultrasonic measurements, pulser, ultrasonic transducer, ferroelectret films, ferroelectret ultrasonic transducer.

Kaunas, 2020. 46 p.

Summary

Ultrasonic waves are widely use in non-destructive research. For acoustic waves generation and conversion to electric signal are using ultrasonic transducers. The aim of final thesis is to investigate ferroelectret material film making possibilities for ultrasonic transducers. To accomplish this goal, the tasks are set. First, to perform literature analysis and evaluate ultrasonic transducers types and customization options. To design and produce high voltage impulses controller due to ferroelectret film material criteria. To prepare few difference constructions ultrasonic transducer and investigate it.

For high voltage impulses control was prepared high voltage impulses controller. For high voltage control was used "IXTT1N250HV" transistor which can manage high voltage ($V_{ds} = 2500 \text{ V}$) and continuous current ($I_d = 1,5 \text{ A}$) load.

Was made four types feroelectret ultrasonic transducers. For the first transducer, ferroelectret film was glued with cyanoacrylate glue. For other one transducer, ferroelectret film was glued with conductive textile and conductive silver glue. For the last one transducer, ferroelectret film was glued with copper foil and conductive silver glue. Also was made one ultrasound transducer with four active elements near each other. For all transducers was evaluated electric parameters and evaluated acoustic waves transmitting tests.

Turinys

| | |
|---|-----------|
| Paveikslų sąrašas | 7 |
| Santrumpų ir terminų sąrašas | 9 |
| Įvadas..... | 10 |
| 1. Ultragarsiniai tyrimai | 11 |
| 1.1. Ultragarso tyrimų sistemos..... | 11 |
| 1.2. Ultragarsinių keitiklių klasifikavimas | 12 |
| 1.3. Pjezoelektriniai ultragarsiniai keitikliai..... | 14 |
| 1.4. Elektrostatiniai (talpuminiai) ultragarsiniai keitikliai | 14 |
| 1.5. Elektromagnetiniai ultragarsiniai keitikliai | 15 |
| 1.6. Feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai | 16 |
| 2. Ultragarsinių tyrimų sistemos parengimas | 19 |
| 2.1. Aukštos įtampos impulsų formuotuvo projektavimas..... | 19 |
| 2.1.1. Aukštos įtampos impulsų formuotuvo testavimas..... | 23 |
| 2.2. Feroelektretinis mikrofonas..... | 25 |
| 3. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių tyrimai | 26 |
| 3.1. Skirtingų konstrukcijų feroelektretiniai keitikliai | 26 |
| 3.1.1. Impedanso tyrimai | 28 |
| 3.1.2. Feroelektretinės plėvelės dielektrinė skvarba..... | 30 |
| 3.1.3. Tyrimų sistemos dažninė analizė..... | 30 |
| 3.1.4. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių kryptingumo matavimai | 33 |
| 3.1.5. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių defektai | 40 |
| 3.1.6. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių jautrumas | 41 |
| Išvados | 44 |
| Literatūros sąrašas | 45 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|---|----|
| 1 pav. Ultragarstinės tyrimų sistemos struktūra [1] | 11 |
| 2 pav. Ultragarolinių skenavimų principas [3] | 12 |
| 3 pav. BVD keitiklio modelis | 14 |
| 4 pav. Talpuminio keitiklio struktūra [8] | 15 |
| 5 pav. Elektromagnetinio keitiklio struktūra [9] | 15 |
| 6 pav. Feroelektretinio keitiklio struktūra [11] | 16 |
| 7 pav. Tiesioginis pjezoelektrinis efektas – kairėje, atvirkštinis pjezoelektrinis efektas – dešinėje [4] | 17 |
| 8 pav. Feroelektretinio keitiklio struktūrą poliarizuojant plėvelę [11] | 17 |
| 9 pav. Feroelektretinio keitiklio pjezoelektrinio efekto, elektrostrikinio efekto ir suminio (pjezoelektrinio ir elektrostrikinio) efektų priklausomybės nuo žadinimo įtampos [12] | 18 |
| 10 pav. Tyrimų sistemos struktūra | 19 |
| 11 pav. Impulsų formuotuvų topologijos [13] | 19 |
| 12 pav. Impulsų formuotuvo įėjimo laipsnis | 20 |
| 13 pav. Impulsų formuotuvo galinis laipsnis | 21 |
| 14 pav. Transformatoriaus induktyvumo skaičiavimo schema | 22 |
| 15 pav. Transformatoriaus šerdies induktyvumo priklausomybė nuo dažnio – kairėje pusėje, impedanso priklausomybė nuo dažnio – dešinėje pusėje | 22 |
| 16 pav. Impulsų formuotuvo montazine plokštė | 23 |
| 17 pav. Impulsų formuotuvo montazinės plokštės 3d vaizdas | 23 |
| 18 pav. 100 V amplitudės impulsas – kairėje, 1970 V amplitudės impulsas – dešinėje | 24 |
| 19 pav. Ultragarstinis impulsų formuotuvus be apkrovos – kairėje, ultragarstinis impulsų formuotuvus su 75 pF apkrova – dešinėje | 24 |
| 20 pav. Ultragarstinio impulsų formuotuvus su 1 nF apkrova | 24 |
| 21 pav. Pirmojo mikrofono struktūros vaizdas – kairėje, pagaminto mikrofono vaizdas – dešinėje | 25 |
| 22 pav. Antrojo mikrofono struktūros vaizdas – kairėje, pagaminto mikrofono vaizdas – dešinėje | 25 |
| 23 pav. Feroelektretinio ultragarstinio keitiklio konstrukcija | 26 |
| 24 pav. Pagamintų feroelektretinių keitiklių su vienu aktyviu elementu vaizdas (kairėje pusėje – keitiklis su laidžia tekstile, dešinėje pusėje – keitiklis su varine folija) | 27 |
| 25 pav. 4 aktyvių elementų feroelektretinio ultragarstinio keitiklio konstrukcija | 27 |
| 26 pav. 4 aktyvių elementų feroelektretinio ultragarstinio keitiklio struktūra | 27 |
| 27 pav. BVD grandinės modelis – kairėje, išmatuoto impedanso principinė schema – dešinėje | 28 |
| 28 pav. Ultragarolinių keitiklių impedanso reali dedamoji – kairėje, impedanso menama dedamoji – dešinėje | 28 |
| 29 pav. Apskaičiuotas ultragarolinių keitiklių talpumas | 29 |
| 30 pav. Tyrimų sistemos struktūra | 31 |
| 31 pav. Priimto signalo apdorojimas | 32 |
| 32 pav. Tyrimų sistemos ir feroelektretinio ultragarstinio keitiklio su laidžia tekstile dažninė charakteristika | 32 |
| 33 pav. Akustinių bangų spinduliavimo zonos | 33 |
| 34 pav. Akustinių bangų tyrimų sistemos fragmentas | 34 |
| 35 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo ultragarstinio keitiklio su laidžia tekstile | 35 |

| | |
|--|----|
| 36 pav. Normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas ultragarsiniame keitiklyje su laidžia tekstile (kairėje – centrinis pjūvis x ašyje, centre – centrinis pjūvis y ašyje, dešinėje – akustinių bangų intensyvumas erdvėje) | 35 |
| 37 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo ultragarsinio keitiklio su varine folija..... | 35 |
| 38 pav. Normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas ultragarsiniame keitiklyje su vario folija (kairėje – centrinis pjūvis x ašyje, centre – centrinis pjūvis y ašyje, dešinėje – akustinių bangų intensyvumas erdvėje) | 36 |
| 39 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo ultragarsinio keitiklio su cianoakrilato klizais..... | 36 |
| 40 pav. Normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas ultragarsiniame keitiklyje su cianoakrilato klizais (kairėje – centrinis pjūvis x ašyje, centre – centrinis pjūvis y ašyje, dešinėje – akustinių bangų intensyvumas erdvėje)..... | 37 |
| 41 pav. Keturių aktyviu elementų ultragarsinio keitiklio tyrimų struktūros fragmentas | 37 |
| 42 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo 4 elementų keitiklio kai žadinami 2 keitiklio elementai..... | 38 |
| 43 pav. Akustinių bangų intensyvumas plokštumoje – kairėje, normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas pasirinktame erdvės pjūvyje, tolstant nuo keitiklio – dešinėje..... | 38 |
| 44 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo 4 elementų keitiklio kai žadinami visi keitiklio elementai | 39 |
| 45 pav. Akustinių bangų intensyvumas plokštumoje – kairėje, normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas pasirinktame erdvės pjūvyje, tolstant nuo keitiklio – dešinėje..... | 39 |
| 46 pav. Signalas imtuvo linijoje – geltona spalva, impulsų formuotuvo signalas – raudona spalva | 40 |
| 47 pav. Keitiklio paviršiaus defektai..... | 40 |
| 48 pav. Ultragarsinio keitiklio įtampų testas..... | 41 |
| 49 pav. Ultragarsinio keitiklio su laidžia tekstile žadinimas 300 V amplitudės įtampa | 42 |
| 50 pav. Ultragarsinio keitiklio su laidžia tekstile žadinimas 300 V amplitudės įtampa | 42 |
| 51 pav. Pažeisto feroelektretinio keitiklio vaizdas per mikroskopą..... | 43 |

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

2D – dvi dimensijos (x, y);

3D – trys dimensijos (x, y, z);

BVD – Butterworth – Van Dyke;

EMAT – elektromagnetinis akustinis keitiklis (angl. *electro magnetic acoustic transducer*);

PP – polipropilenas;

SAFT – sintetinės diafragmos fokusavimo technika (angl. *synthetic aperture focusing technique*);

SWC – sinusinė koreliacija (angl. *sine wave correlation*).

Terminai:

Difrakcija – bet koks nukrypimas nuo bangų sklidimo tiesia trajektorija.

Interferencija – dviejų ar daugiau erdvėje sklindančių koherentinių bangų sudėtis.

Koherentinės bangos – bangos, kurios turi vienodą bangos ilgį, dažnį ir pastovų fazių skirtumą.

Įvadas

Objektų, medžiagų ir konstrukcijų tyrimams neretai naudojami tūriniai arba erdviniai tyrimai. Paprastai stengiamasi atlikti neinvazinius tyrimus, kad tiriamasis objektas nebūtų mechaniškai pažeidžiamas. Medžiagų erdvinių struktūrų skenavime neretai sutinkami yra ultragarsinių akustinių bangų tyrimai. Naujos medžiagos ir metodikos skatina ultragarsinių tyrimų plėtrą. Ultragarso bangomis galima identifikuoti ne tik didelius objektų struktūros defektus, bet ir labai mažus, didelės raiškos reikalaujančius, medžiagos pakitimus.

Ultragarsiniuose tyrimuose pagrindinį vaidmenį atlieka keitikliai, kurie elektrinį signalą verčia mechaninėmis bangomis ir atvirkščiai. Be ultragarsinio keitiklio, ne ką mažiau svarbus yra aukštos įtampos impulsų formuotuvas, kuris formuoja elektrinius impulsus, bei signalo priėmimo grandinės stiprintuvas, kuris sustiprina mažos amplitudės signalą. Kuo didesniame gylyje atliekami tyrimai, tuo didesnis signalo stiprinimas yra būtinas, norint užtikrinti teisingą signalo identifikavimą. Be signalo apdorojimo grandinių labai svarbus yra ir akustinio impedanso suderinimas tarp keitiklio ir tiriamojo objekto, kadangi nuo to priklauso tyrimo efektyvumas ir energijos nuostoliai.

Darbo tikslas – ištirti feroelektretinės polipripileno plėvelės panaudojimo galimybes ultragarsiniams keitikliams.

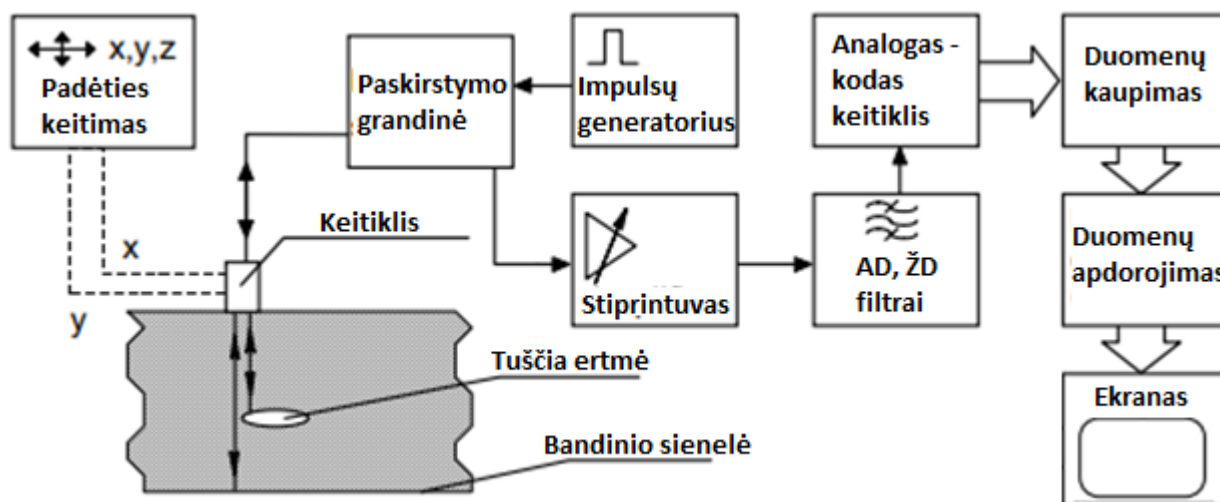
Darbo uždaviniai.:

- Atlikus mokslinių straipsnių analizę, palyginti ultragarsinių keitikliu technologijas.
- Pasiruošti ultragarsinę tyrimų sistemą eksperimentams atlikti.
- Pasigaminti skirtingų konstrukcijų feroelektretinius ultragarsinius keitiklius bei ištirti jų savybes.
- Išanalizuoti pagamintų feroelektretinių ultragarsinių keitiklių akustinių bangų spinduliavimo kryptingumą.

1. Ultragariniai tyrimai

1.1. Ultragarso tyrimų sistemos

Vis auganti ultragarsinių sistemų pasiūla atspindi jų paklausą, bei nuolat didėjančią šio metodo potencialą. Didelis ultragarsinių tyrimų metodikos pritaikymas ir naujų medžiagų, skirtų ultragarsiniams keitikliams, atsiradimas skatina ultragarsinių technologijų plėtojimą. Ultragarsinės sistemos struktūra yra sąlyginai nesudėtinga, bet struktūros elementams keliami reikalavimai yra labai aukšti, kadangi reikalinga: aukšta įtampa, precizinis stiprinimas ir signalo filtravimas, keitikliai su suderintu akustiniu impedansu darbinėje zonoje. Toliau pateikta tipinė neardomosios kontrolės ultragarso tyrimų sistemos schema (žr. 1 pav.).

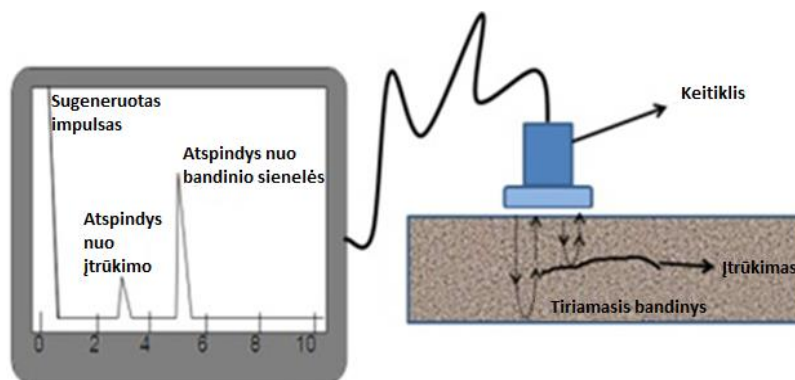


1 pav. Ultragarsinės tyrimų sistemos struktūra [1]

Sistemos struktūroje galima matyti, kad tyrimų sistemoje vienas svarbiausių elementų yra ultragarsinis keitiklis. Keitiklis yra bene svarbiausias, kadangi nuo jo priklauso kiek signalo energijos bus išspinduliuota ir kiek priimta. Pirmiausia yra labai svarbus keitiklio akustinis impedansas darbinėje zonoje, kadangi mechaninės bangos pereina iš vienos terpės į kitą. Akustinio impedanso nesuderinimas lems mechaninių bangų nuostolius sklindant erdvėje ar terpėje, ko sekoje, priimtas signalo gali būti net nepakankamas, kad jį būtų galima sistemoje užfiksuoti. Antras keitiklio faktorius yra elektrinis impedansas. Nuo elektrinio impedanso priklauso kiek energijos pavyks pasiūsti į keitiklį iš impulsų formuotuvo. Tobuliausias variantas yra kai keitiklio impedansas yra maksimaliai artimas impulsų formuotuvo išėjimo grandinės impedansui, kadangi tokiu atveju į keitiklį perduodama maksimali energija (signalas su mažiausiai nuostoliais). Siekiant gauti tiriamojo objekto plokštumos arba erdvinį vaizdą, keitiklis yra stumdomas x, y, ir z plokštumose. Dažniausiai mažiems, tolygaus paviršiaus, objektams nuskaityti yra naudojamos pozicionavimo sistemos ar staklės, o esant specifiniam tyrimo objekto reljefui ar gabaritams (pvz.: nėščių moterų pilvo echoskopijos tyrimas) – zondavimas atliekamas keitiklio poziciją keičiant žmogaus rankomis [2]. Kada reikalingas skenavimas objekto gylyje – naudojami SAFT daugiaelementiniai keitikliai. Daugiaelementinį keitiklį žadinant impulsiniais signalais su paslinkta faze, galime keisti keitiklio fokusavimo vietą, arba kitaip – skenavimo gylį.

Ultragarsinių tyrimų sistemoje taip pat svarbus yra ir impulsų generatorius arba impulsų formuotuvai. Nuo ultragarsinio keitiklio medžiagos tipo priklauso kokios amplitudės įtampa keitiklis turi būti žadinamas. Nors nemažai šiuolaikinių ultragarsinių keitiklių yra žadinami žemos amplitudės įtampa

iki kelių ar keliasdešimties voltų [17, 18], neretai sutinkami ir aukštos amplitudės impulsų reikalaujantys keitikliai [12, 19]. Elektriniai impulsai keitiklio pagalba yra paverčiami į mechaninius virpesius. Mechaniniai virpesiai (akustinės bangos) savo fizikinėmis savybėmis yra panašūs į šviesos bangas kadangi nuo skirtingo tankio medžiagų ribos bangos atsispindi, lūžta ar interferuoja. Atsižvelgiant į tai, kad medžiagos retai būna vienalytės, oro burbuliukai ir pašalinės priemaišos keičia medžiagos struktūrą. Zonduojant bandinius su pašalinėmis priemaišomis, ultragarso bangos nusklinda skirtingus kelius, kadangi vienos bangos atsispindi nuo bandinio sienelių, o kitos, nuo bandinyje esančių struktūros netolygumų (žr. 2 pav.).



2 pav. Ultragarso skenavimo principas [3]

Atsispindėjusios ir į ultragarso keitiklį grįžusios mechaninės bangos virsta elektriniu signalu. Dėl didelių energijos nuostolių, priimto elektrinio signalo amplitudė būna labai maža. Pirmiausia mažos amplitudės signalas yra sustiprinamas. Sustiprintas signalas yra filtruojamas nuo triukšmo dedamųjų, nuskaitomas keitikliu analogas – kodas, o gauti rezultatai apdorojami ir saugomi atmintyje. Gautus duomenis apdorojus yra pateikiamas skenavimo grafinis vaizdas, kuriame galima matyti bandinio struktūros pakitimus ir defektus.

1.2. Ultragarso keitiklių klasifikavimas

Ultragarso tyrimams labai svarbu yra tinkamai paruošta darbinė aplinka. Tinkamai paruošta darbinė aplinka reiškia, kad keitiklio sugeneruotos akustinės bangos nukeliaus reikiamą atstumą esant mažiausiems nuostoliams. Akustinių bangų sklaidimą terpėje riboja skirtingų medžiagų akustinis impedansas. Akustinis impedansas yra apskaičiuojamas 1 formule ir yra matuojamas Paskaliai x sekundės kubiniame metre ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$) arba reiliais kvadratiniam metre (rayl/m^2).

$$Z_a = \frac{P}{Q} \quad (1)$$

čia P – akustinių bangų slėgis; Q – srauto greitis kubiniame metre.

Medžiagos akustinio impedanso svarbiausia dedamoji – tankis. Dideli akustinių bangų nuostoliai atsiranda kai keitiklio ir tiriamosios medžiagos tankiai yra dideli, o tarp keitiklio ir tiriamojo objekto susidaro mažesnio tankio terpė (pvz. oras). Siekiant sumažinti sklindančių akustinių bangų nuostolius yra naudojamos tarpinės medžiagos tarp keitiklio ir tiriamojo objekto. Naudojant didelio tankio ultragarso keitiklius bei didelio tankio tiriamąsias medžiagas, dažniausiai oro tarpai yra užpildomi vandeniu, tepalu, ar kita tankesne už orą medžiaga. Naudojant papildomus užpildus – pasiekiamas maksimalus akustinio impedanso suderinimas tarp tiriamojo objekto ir ultragarso keitiklio.

Pagrindinės ultragarsinių keitiklių skirstymo kryptys yra trys: siūstuvai, imtuvai, siūstuvai ir imtuvai – du viename. Siūstuvo paskirtis yra elektrinius impulsus versti mechaniniais virpesiais, o imtuvų – mechaninius virpesius versti į elektrinį signalą. Ultragarsinių keitiklių esminis principas yra vienos rūšies energija paversti į kitos rūšies energija.

Elektrinių ir mechaninių virpesių generavimui yra naudojamas ne vienas metodas [4]. Pagrindinės keitiklių rūšys ir jų parametrai pateikiami lentelėje (žr. 1 lentelė).

1 lentelė. Skirtingų medžiagų akustinių keitiklių parametrai [4]

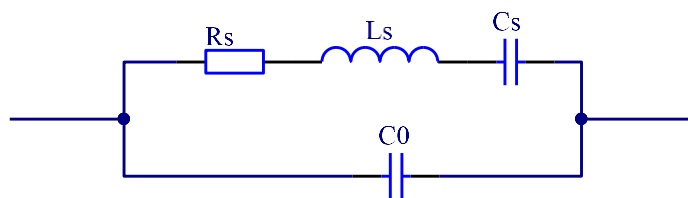
| Principas | Deformacijos jautrumas (angl. <i>Strain Sensitivity</i>) [V/με] | Slenkstis (angl. <i>Threshold</i>) [με] | Dinaminis santykis (angl. <i>Span to threshold ratio</i>) |
|-----------------|---|---|--|
| Pjezoelektrinis | 5,0 | 0,00001 | 100000000 |
| Pjezorezistyvus | 0,0001 | 0,0001 | 2500000 |
| Induktyvus | 0,001 | 0,0005 | 2000000 |
| Talpuminis | 0,005 | 0,0001 | 750 |
| Rezistyvus | 0,000005 | 0,01 | 50 |

Esminiai skirtumai 1-oje lentelėje yra tarp pjezoelektroninio ir visų likusių principų. Pagrindinis pjezoelektroninio matavimo principo trūkumas yra tas, kad keitiklis negali matuoti statiškai ilgesnį laiko tarpą [4]. Pasyvieji keitikliai, lyginant su pjezoelektriniais, gali matuoti statiškai. Elektrinio signalo amplitudė, pasyviajame keitiklyje, išlieka sąlyginai ilgą laiko tarpą nepakitusi.

Nors pjezoelektriniai keitikliai turi trūkumų, jie ganėtinai dažnai naudojami dėl savo aukšto darbinio dažnio – aukščiau 500 kHz, atsparumo elektriniams ir magnetiniams laukams, atsparumo radiacijai ir sąlyginai plataus darbinės temperatūros diapazono.

Atsižvelgiant į tiriamąjį objektą, keitikliai naudojami praėjimo arba atspindžio principais. Vienu atveju keitiklis veikia ir kaip siūstuvai, ir kaip imtuvai, o kitu atveju, tai būna du skirtingi keitikliai. Praėjimo principu veikiantys keitikliai dažniausiai būna išdėstyti tam tikra trajektorija ar pasukti reikiamu kampais. Keitikliams, dirbantiems su oro tarpu tarp keitiklio ir tiriamojo objekto, reikalinga aukštesnė žadinimo įtampa, dėl akustinio impedanso nesutapimo tarp oro ir keitiklio bei signalo slopinimo ore [5]. Jeigu keitiklio ir oro akustinis impedansas smarkiai skiriasi – bet koks oro tarpas stipriai slopina signalą, todėl norint tai kompensuoti keitiklis yra žadinamas aukštesne įtampa. Aukštesnė žadinimo įtampa sąlygoja aukštesnės amplitudės priimto signalo dedamąsias. Paprastai stengiamasi keitiklį priglauti prie tiriamojo objekto, o sąlyčio terpę užpildyti skysčiu ar lubrikantu, taip mažinant signalo nuostolius perėinant iš vienos terpės į kitą. Taip pat, svarbu paminėti, kad keitiklį naudojant ir signalo išsiuntimui ir priėmimui, netenkama galimybės keitiklį valdyti nuoseklaus rezonanso metodu.

Ultragarsinių keitiklių modeliavimas grindžiamas teoriniais keitiklių modeliais. Daugeliui keitiklių modelių reikia ne tik žinoti medžiagos savybes, bet ir fizinius parametrus. Pagrindinio rezonansinio dažnio srityje pjezoelektrinis keitiklis gali būti pakeistas supaprastinta ekvivalenčia schema ir aprašytas Butterworth – Van Dyke (BVD) modeliu [5] (žr. 3 pav.).



3 pav. BVD keitiklio modelis

Keitiklio medžiagos talpą apibūdina talpumas C_0 , o fizinius keitiklio medžiagos parametrus apibūdina nuoseklaus rezonanso grandinė (R_s , L_s , C_s). Mechaniniai sistemos parametrai modeliuojami keičiant R_s ir C_s , o L_s aprašoma mechaninės sistemos masė. Nuostolius apibūdinanti dedamoji R_s gali būti skaidoma į dvi dedamąsias: dielektriniai nuostoliai pjezokeramikoje ir akustinė emisija terpėje.

1.3. Pjezoelektriniai ultragarsiniai keitikliai

Pjezoelektrinis ultragarsinių virpesių generavimo metodas yra vienas populiariausių. Pjezoelektrinis efektas grindžiamas mechaniniais medžiagos virpesiais veikiant medžiagą elektriniu lauku, kai medžiagos dalelės poliarizuojasi. Pagal tai, kokia energija yra priimama ir kokia atiduodama, pjezoelektrinis efektas skirstomas į tiesioginį ir atvirkštinį. Tiesioginis pjezoelektrinis efektas vyksta mechaniniams virpesiams virstant elektriniais virpesiais, o atvirkštinis – kai elektriniai virpesiai paverčiami mechaniniais virpesiais. Pjezoelektrinis kristalas nuo mechaninio poveikio poliarizuojasi, o žadinamas elektrinio lauko deformuojasi.

Vienas iš pjezoelektrinių medžiagų ribojančių faktorių yra Kiuri temperatūra. Jeigu keitiklio temperatūra pakyla aukščiau Kiuri temperatūros – dingsta pjezoeftas. Daugeliui pjezoelektrinių keitiklių darbinė temperatūra aukštesnė kaip $70 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ yra pavojinga [7].

Nuo pjezoelektrinio elemento storio priklauso keitiklio rezonansinis dažnis:

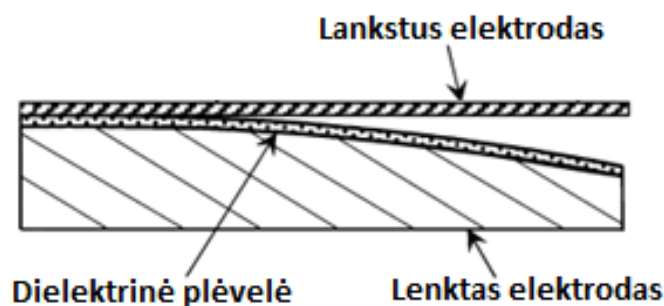
$$f = \frac{V}{2d} \quad (2)$$

čia d – pjezoelektriko storis; V – bangų greitis; f – rezonansinis dažnis.

Remiantis 2 formule matyti, kad kuo elementas storesnis, tuo rezonansinis dažnis žemesnis ir atvirkščiai, kuo elementas plonesnis tuo rezonansinis dažnis didesnis. Labai aukšto dažnio keitiklius yra sudėtinga pagaminti dėl reikalingo mažo aktyvaus elemento skersmens.

1.4. Elektrostatiniai (talpuminiai) ultragarsiniai keitikliai

Ultragarso virpesiams generuoti ir juos priimti naudojami talpuminiai ultragarsiniai keitikliai. Talpuminio keitiklio struktūros pavyzdys pateikiamas paveiksle (žr. 4 pav.).

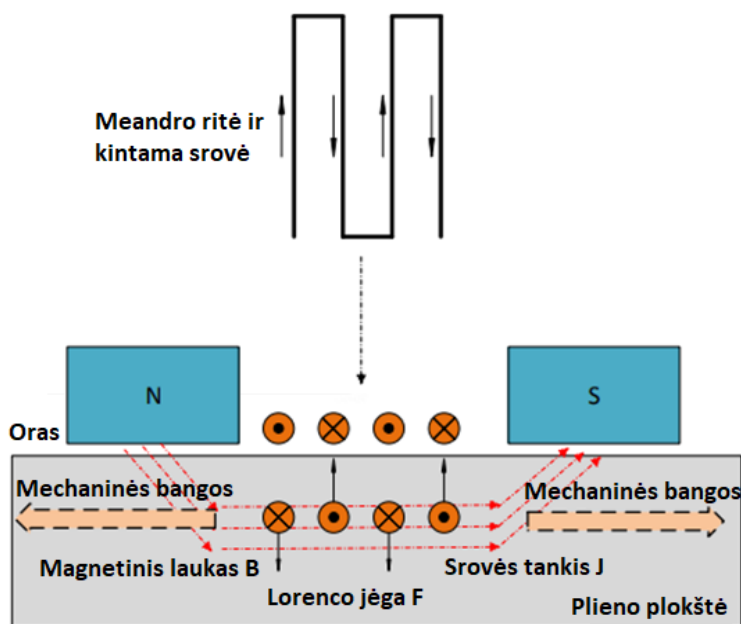


4 pav. Talpuminio keitiklio struktūra [8]

Du elektrodai, esantys netoli vienas kito, žadinami kintama įtampa pradeda mechaniškai virpinti paviršių sudarydami akustines bangas. Sužadintų bangų keitiklio paviršiaus poslinkis yra proporcingas žadinamos įtampos dydžiui. Nors šio metodo pagrindinis privalumas yra naudojimas per orą (bekontaktis matavimas), tačiau priimto signalo amplitudė yra nedidelė. Dažniausiai šio metodo keitikliai naudojami kaip ultragarsiniai imtuvai, kadangi galimas išmatuoti absoliutus poslinkis yra iki 10^{-11} m [7].

1.5. Elektromagnetiniai ultragarsiniai keitikliai

Vienas iš metalų ir kitų laidžių medžiagų tyrimų metodų – elektromagnetinis ultragarsinių virpesių keitiklio metodas (angl. *EMAT – Electro Magnetic Acoustic Transducer*). Didžiausias šio metodo privalumas, kad signalui perduoti nereikia papildomai skysčių ir kitų akustinių bangų suderinimo priemonių. Ultragarinio keitiklio struktūra pateikiama paveiksle (žr. 5 pav.).



5 pav. Elektromagnetinio keitiklio struktūra [9]

Virš elektrai laidaus kūno esanti ritė, kai ja pradeda tekėti kintama srovė, sukuria laidžioje medžiagoje sūkurines sroves. Nuolatinis magnetinis laukas kuriamas nuolatiniais magnetais. Sąveikaudamos sūkurinės srovės su išoriniu magnetiniu lauku sukuria Lorenco jėgą, kuri verčia kūną virpėti. Keičiant magnetinio lauko kitimo dažnį, galima keisti ultragarso bangų dažnį, o keičiant magnetinės indukcijos kryptį, galima generuoti bandinyje skersines arba išilgines ultragarso bangas.

Elektromagnetinį ultragarsinį keitiklį galima panaudoti ir kaip ultragarsinių bangų imtuvą, kadangi kintami virpesiai kirsdami statinio magnetinio lauko jėgų linijas sukurs kintantį elektrinį lauką, kurį bus galima priimti su rite.

Elektromagnetinių keitiklių privalumas yra matavimuose. Šiems keitikliams nėra reikalingas sąlytis su tiriamąja medžiaga, todėl galima tirti karštus, šaltus, užterštus, ar judančius objektus [9]. Tiriant šiuo metodu gaunamas didelis signalo ir triukšmo santykis.

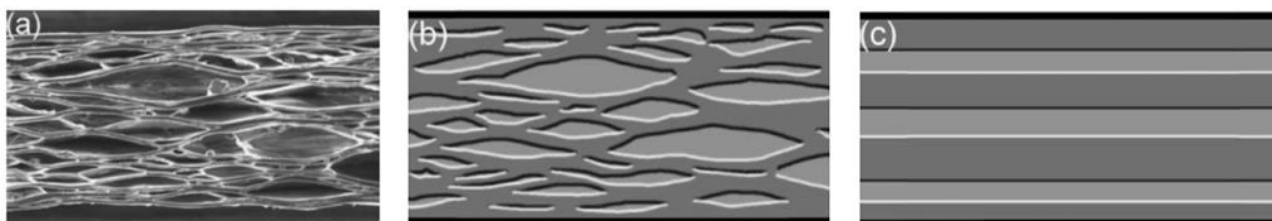
Nepaisant savo privalumų, elektromagnetiniai keitikliai turi ir trūkumų. Šiems keitikliams žadinti yra reikalingas didelis magnetinis laukas. Nors keitikliai yra žadinami didelės amplitudės magnetiniu lauku, gaunamas signalo perdavimo efektyvumas yra mažas. Didelės galios magnetinio lauko naudojimas gali sukelti didelių radijo trukdžių [9].

Didėjant atstumui tarp keitiklio ir tiriamojo objekto priimto ir išspinduliuoto (į bandinį) signalo amplitudė mažėja. Šiuo metodo jautrumas yra labai mažas (lyginant su pjezoelektriniais keitikliais < 50 – 100 dB), todėl netinka mažiems defektams arba didelei skenavimo rezoliucijai pasiekti.

1.6. Feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai

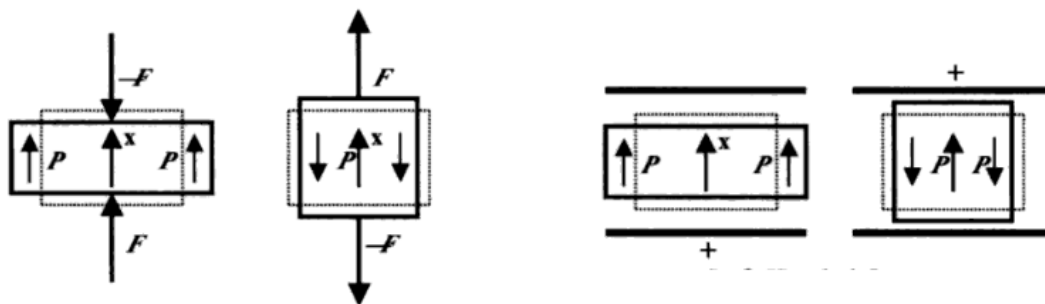
Vienas svarbiausių ultragarsinių keitiklių parametrų yra akustinis impedansas. Nuo akustinio impedanso suderinimo priklauso tyrimų duomenys bei energijos perdavimas iš keitiklio į tiriamąjį objektą ir atvirkščiai. Pavyzdžiui, dirbant oro terpėje ir naudojant pjezokeramikos ultragarsinį keitiklį, reikalingas akustinio impedanso suderinimas, kadangi keitiklio akustinis impedansas yra aukštas [6].

Feroelektretinės plėvelės žemą akustinį impedansą (artima oro) lemia medžiagos porėta struktūra (6 pav.). Feroelektretinio PP keitiklio ląstelinis vaizdas (žr. 6 pav. (a)); keitiklio scheminis vaizdas (žr. 6 pav. (b)); ekvivalenti lygiagrečių keitiklių modelio struktūra (žr. 6 pav. (c)).



6 pav. Feroelektretinio keitiklio struktūra [11]

Feroelektretinėmis medžiagomis yra vadinamos plonos, porėtos struktūros, polimerų plėvelės, pasižymintys pjezoelektriniu ir piroelektriniu efektu. Feroelektretinėse medžiagose veikia tiesioginis ir atvirkštinis pjezoelektrinis efektas. Tiesioginis pjezoelektrinis efektas pasireiškia tada, kai mechaniškai deformuojant pjezoelektrinę medžiagą, proporcingai pasikeičia jos poliarizacija. Tiesioginio pjezoelektrinio efekto metu mechaniškai paveikus medžiagą, jos paviršiuje atsiranda elektrinis krūvis. Atvirkštinis pjezoelektrinis efektas pasireiškia tada, kai medžiagoje sukuriama mechaninis įtempis, proporcingas veikiančiam išoriniam elektriniam laukui. Atvirkštinio pjezoelektrinio efekto metu medžiaga deformuojasi ją veikiant elektros įtampa. Pjezoelektrinio efekto principas pateikiamas (7 pav.).



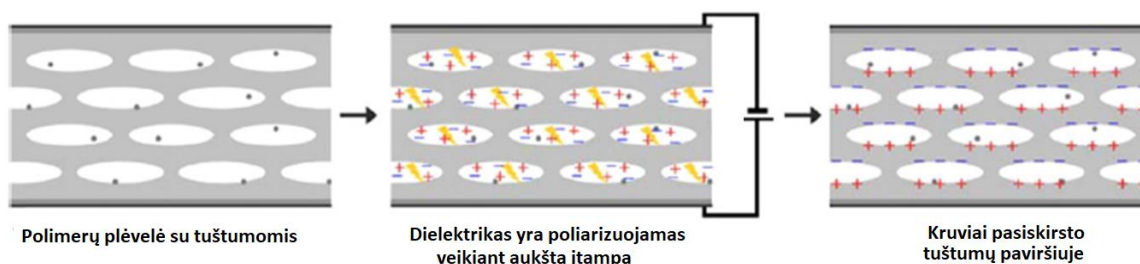
7 pav. Tiesioginis pjezoelektrinis efektas – kairėje, atvirkštinis pjezoelektrinis efektas – dešinėje [4]

Pjezoelektrinis efektas iliustruotas kvarco kristalo pjūvyje (7 pav.). Veikiant kristalą jėga F , kristalas deformuojasi ir dėl to atsiranda elektrinė poliarizacija P . Atvirkštinio efekto metu, išorinis elektrinis laukas tarp kristalo elektrodų sukelia mechanines kristalo deformacijas, kurios deformuoja kristalą. Priklausomai nuo elektrinio lauko krypties kinta kristalo deformacijos kryptis, o nuo mechaninės deformacijos krypties kinta kristalo poliarizacija.

Feroelektretiniuose ultragarsiniuose keitikliuose piroelektrinis efektas nėra naudojamas dėl lėtų pereinamųjų procesų. Piroelektrinio efekto metu, šiluminis poveikis sąlygoja kristalo poliarizaciją, o kristalą veikiant elektriniu lauku – kristalas generuoja šiluminį krūvį.

Viena žymiausių feroelektretinių keitiklių medžiagų yra ląstelinė polipropileno (PP) medžiaga. Šios medžiagos populiarumą lėmė didelis plastiškumas, mažas medžiagos svoris ir maža kaina. Polipropileno medžiaga turi dielektrinės medžiagos savybes, kadangi medžiaga nėra laidi elektros krūviui, bet veikiant išoriniu elektriniu lauku medžiagos atomai poliarizuojasi. Taip pat ši medžiaga turi atsparumą mechaniniam deformacijų poveikiui, kas yra labai svarbu pjezoelektrinėms medžiagoms [11].

Feroelektretinės medžiagos poros gali būti įkraunamos elektra, sukuriant elektronų orientaciją visoje plėvelės struktūroje. Du bruožai: nuolatinė ir stabili poliarizacija bei labai mažas standumas storio kryptimi lėmė galimybę išmatuoti pjezoelektrinio tipo plėvelių atsaką į mechaninį poveikį, nurodant storio pokyčio kryptį [10]. Feroelektretinės plėvelės poliarizacijos pavyzdys pateikiamas (8 pav.).

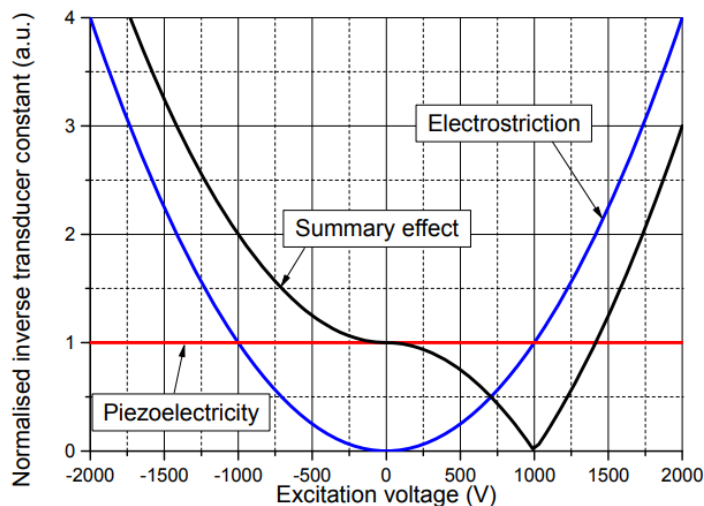


8 pav. Feroelektretinio keitiklio struktūrą poliarizuojant plėvelę [11]

Lyginant su pjezokeraminiais keitikliais, feroelektretiniai yra lengvi, plastiški, ir pigūs [11]. Feroelektretinių plėvelių plastiškos fizinės savybės leidžia nesudėtingai pagaminti specifinės formos keitiklius, ar keitiklių gardelę, kurios privalumas – kintamo židinio fokusavimas. Feroelektretinių medžiagų keitikliai dirba žemuose dažniuose – nuo 0,05 MHz iki 0,6 MHz [12]. Dėka savo žemo darbinio dažnio, feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai tinka žemesnio tankio medžiagoms kaip mediena, betonas ir kt.

Ultragarsiniai keitikliai, pagaminti iš feroelektretinių plėvelių, kaip ir keramikiniai ultragarsiniai keitikliai, bendrąja prasme, yra skirti darbui su aukštos amplitudės signalais. Norint turėti didelį jautrumą, feroelektretinio ultragarsinio keitiklio žadinimas turi būti atliekamas net iki 2 kV amplitudės impulsais [12, 20].

Feroelektretinių plėvelių keitikliuose pastebimi pjezoelektrinis ir elektrostrikcinis efektai (žr. 9 pav.).



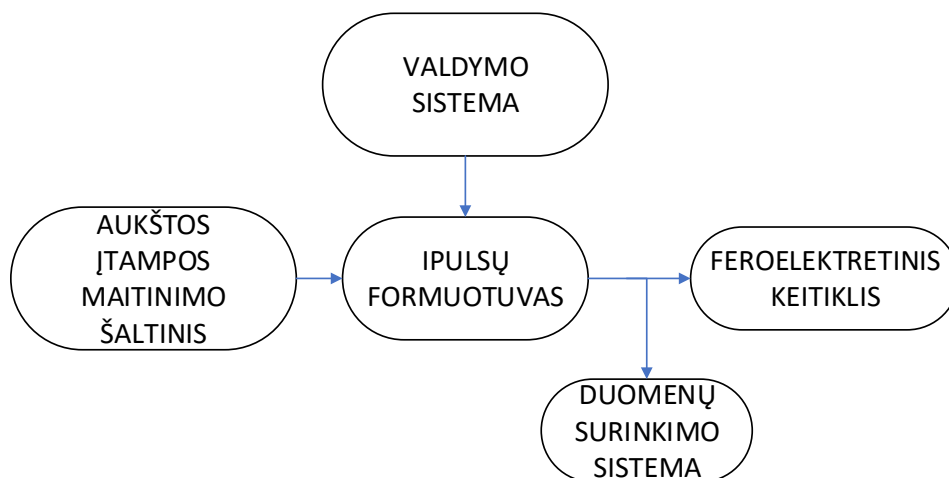
9 pav. Feroelektretinio keitiklio pjezoelektrinio efekto, elektrostrikcinio efekto ir suminio (pjezoelektrinio ir elektrostrikcinio) efektų priklausomybės nuo žadinimo įtampos [12]

Pjezoeffekto priklausomybė nuo žadinimo įtampos yra tiesinė, o elektrostrikcinio efekto priklausomybė nuo žadinimo įtampos kinta kvadratiu dėsniu [12, 20]. Elektrostrikcinio efekto metu feroelektretinės plėvelės elektrodai traukia vienas kitą. Pjezo efekto metu feroelektretinės plėvelės deformacija priklauso nuo poliarizacijos krypties. Žadinant keitiklį teigiamos amplitudės impulsais, pastebimas išspinduliuotų akustinių virpesių amplitudės sumažėjimas, kadangi pjezoelektrinis ir elektrostrikcinis efektai vienas kitą kompensuoja.

Feroelektretinių keitiklių vienas iš trūkumų – siauras darbinis temperatūrų diapazonas. Šie keitikliai negali dirbti aukštose temperatūrose dėl polimerinių junginių fizikinių savybių. Polipropileno feroelektretinės plėvelės medžiaga gali būti naudojama nuo - 20 iki 50 °C temperatūros aplinkoje [20].

2. Ultragarinių tyrimų sistemos parengimas

Norint atlikti neardomosios kontrolės tyrimus yra reikalinga tyrimų sistema. Tyrimams nuspręsta naudoti tyrimų sistemą, kurios struktūra pavaizduota paveiksle (žr. 10 pav.).



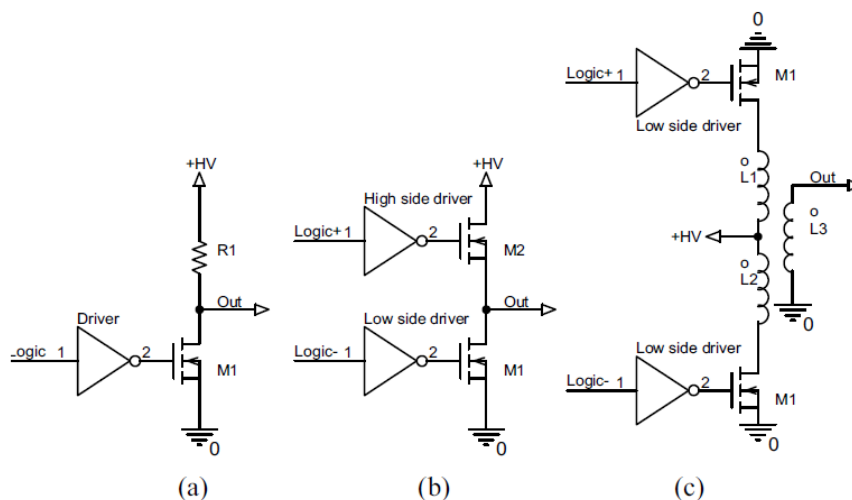
10 pav. Tyrimų sistemos struktūra

Atsižvelgiant į tai, kad feroelektreiniams keitikliams yra reikalinga aukšta žadinimo įtampa, pasirinktas aukštos įtampos maitinimo šaltinis iki 2 kV. Sistemos valdymui ir duomenų surinkimui pasirinkta prof. Lino Svilainio tyrimų sistema. Aukštos įtampos impulsų valdymui buvo projektuojamas aukštos įtampos formuotuvai, kuris galėtų valdyti žadinimo signalą, atsižvelgiant į keitiklio parametrus.

2.1. Aukštos įtampos impulsų formuotuvo projektavimas

Projektavimo etape pagrindiniai aukštos įtampos impulsų formuotuvo parametrai buvo: aukštos įtampos valdymas iki 2 kV ir dažnių juosta iki 500 kHz. Įtampos ir dažnių juostos parametrai pasirinkti remiantis literatūra apie feroelektreinių ultragarinių keitiklius [11, 12].

Aukštos įtampos impulsų valdymo metodas buvo pasirinktas iš trijų topologijų (žr. 11 pav.).



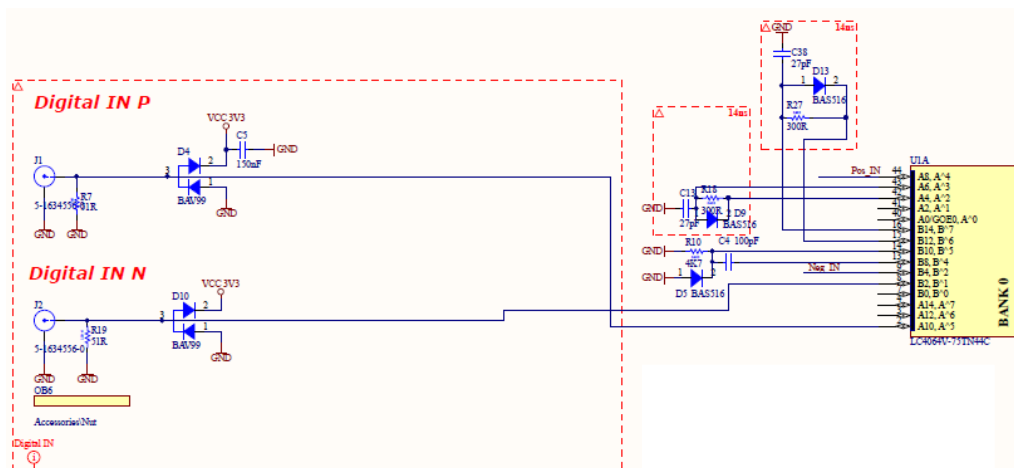
11 pav. Impulsų formuotuvų topologijos [13]

Kadangi feroelektretinio keitiklio charakteristikos teigiamiems ir neigiamiems aukštos įtampos impulsams yra skirtingos, keitiklis bus tiriamas generuojant teigiamus arba neigiamus impulsus. Esant dviejų poliarumų poreikiui (žr. 11 pav. (a)) esanti schema netinkama – ji skirta tik vieno poliarumo impulsų formavimui.

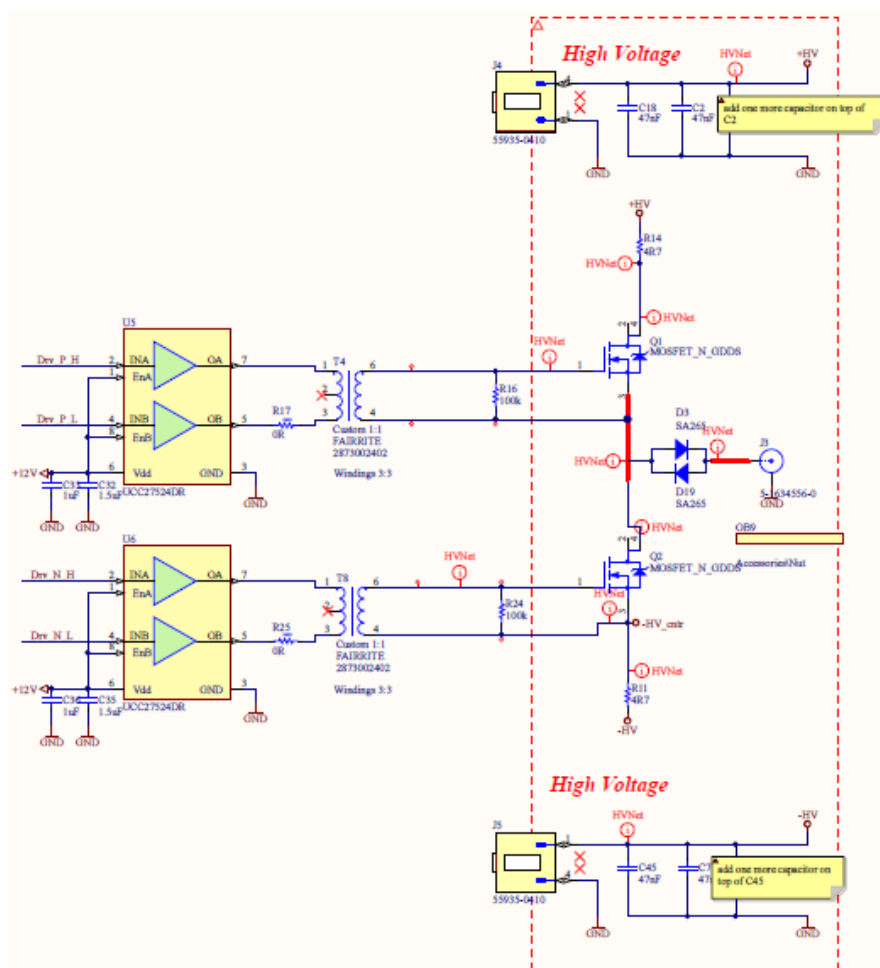
Topologija esanti paveiksle (žr. 11 pav. (c)) turi nemažai privalumų: galvaninis išėjimo signalo atišimas, galimybė turėti dviejų poliarumų impulsus išėjime, įėjime turint vienpolį maitinimą ir naudojant skirtingomis kryptimis suvyniotas transformatoriaus apvijas. Taip pat, teigiama savybė šios topologijos yra atsparumas dV/dt pereinamosioms charakteristikoms. Nepaisant savo teigiamų savybių, ši schema turi savo trūkumų. Vienas iš didžiausių trūkumų yra šerdies įsisotinimas, ypač naudojant vieno poliarumo impulsus išėjime. Naudojant vienpolius impulsus schemą reikia papildyti šerdies įsisotinimo kontrole, kad šerdis niekada nepasiektų soties. Be šerdies įsisotinimo yra dar vienas šios schemos trūkumas. Naudojant aukštos įtampos impulsus išėjimo transformatoriaus konstrukcija tampa sudėtinga, kadangi potencialų skirtumas gaunasi dvigubai didesnis ir dėl to transformatoriaus apvijos turi būti atitinkamai izoliuotos tarpusavyje – vengiant pramušimo.

Topologija esanti paveiksle (žr. 11 pav. (b)), šiuo atveju tinka labiausiai, kadangi nėra šerdies įsisotinimo, bei schemą galima pritaikyti dviejų poliarumų impulsų formavimui M1 tranzistoriaus žemę pakeitus neigiamo maitinimo poliarumu. Didžiausias šios schemos trūkumas – reikia skirti didelį dėmesį dV/dt pereinamosioms charakteristikoms išvengti, atkreipiant dėmesį į tranzistorių valdymą bei komutavimą.

Kuriant aukštos įtampos impulsų formuotuvą, projektavimas buvo atliekamas naudojant skirtingų schemų fragmentus, kurie buvo pasiimti iš studentų mokslinės grupės asmeninių archyvų, kurios vadovas – prof. Linas Svilainis. Suprojektuoto impulsų formuotuvo schemos fragmentai (žr. 12 – 13 pav.).



12 pav. Impulsų formuotuvo įėjimo laipsnis



13 pav. Impulsų formuotuvo galinis laipsnis

Schemos įėjime numatyti „BAV99“ diodai apsaugantys nuo staigių įtampos šuolių, kurių amplitudė yra didesnė nei 3,3 V. Šie diodai pasirinkti dėl korpuso pritaikyto paviršiniam montavimui ir žemos kainos. Impulsų formuotuvo įėjimo bei išėjimo grandinių valdymas atliekamas programuojamos matricos (FPGA) pagalba. Loginė matrica pasirinkta dėl sąlyginai paprasto programavimo, kadangi nesudėtinga programa greitai sukurama iš loginių blokelių, grafinio programavimo metu. Impulsų formuotuvo išėjimo valdymo raktai pasirinkti lauko tranzistoriai „IXTT1N250HV“. Pagrindinius kriterijus renkantis tranzistorius – feroelektretinio ultragarsinio keitiklio valdymo įtampos poreikis iki +- 2 kV [12, 20]. Šie tranzistoriai atidaromi nuo 2 V amplitudės signalo ir gali valdyti 2500 V amplitudės signalus. Maksimali nuolatinė valdymo srovė $I_d = 1,5 \text{ A}$, o atidaryto rakto varža $R_{ds} \leq 40 \Omega$. Aukštos amplitudės impulsų valdymas virš 1000 V yra ganėtinai sudėtingas kadangi puslaidininkiniai komponentai dažniausiai gali veikti iki 600 V (angl. *breakdown voltage*) ir tik vienetai gali pasiekti aukštesnes valdymo įtampas [12]. Pagal savo parametrus, pasirinkti tranzistoriai yra „egzotiniai“, kadangi valdymo srovė ir įtampa yra labai didelės.

Pajungus valdymo signalą į tranzistoriaus užtūrą (angl. *gate*) n kanalo tranzistoriuje tarp santakos ir ištakos susidaro n kanalo laidumas ir tranzistorius atsidaro, o norint jį uždaryti – krūvininkus reikia pašalinti. Vienas iš krūvininkų pašalinimo variantų yra įjungti kitą tranzistorių per kurį krūvininkai nuteka ir pirmasis tranzistorius užsidaro. Ženkliai efektyvesnis tranzistoriaus uždarymas yra panaudojant priešingo poliarumo valdymo signalą, kuris atsiradusius krūvininkus tarp santakos ir ištakos „išsiurbia“, todėl tokiu būdu tranzistorius yra uždaromas greičiau. Tranzistoriaus uždarymas priešingo poliarumo valdymu turi dar vieną privalumą – nėra trumpinamas aukštos įtampos

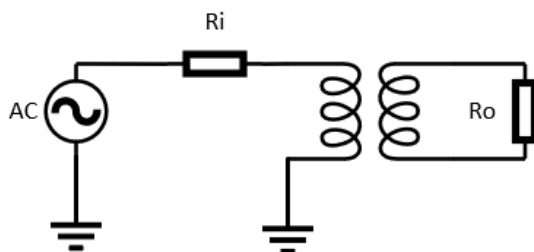
maitinimo šaltinis, raktų persijungimo momentais, kai vienam tranzistoriui nespėjus užsidaryti – kitas atsidaro. Tranzistorių valdymui pasirinkti valdikliai (angl. *driver*) „UCC27524DR“. Šie valdikliai generuoja teigiamus ir neigiamus impulsus į tranzistoriaus valdymo grandinę.

Saugant tranzistorių valdymo grandines nuo išėjimo grandinėje esančių aukštos įtampos impulsų yra naudojami transformatoriai galvaniniam atširimui. Induktyvumas reikalingas žemuose dažniuose iki ~ 500 kHz, kadangi feroelektretinis keitiklio rezonansinis dažnis yra būtent šiame dažnių ruože. Aukštesniuose dažniuose transformatoriaus apvijų induktyvumas mažėja, bet išauga rezistyvinė dedamoji dėl to, kad šerdies domenai nebespėja „vartytis“.

Transformatoriaus apvijų impedansas apskaičiuojamas pagal 3 formulę, naudojantis supaprastinta grandinės schema (žr. 14 pav.):

$$Z_L = 2\pi fL = R_i \quad (3)$$

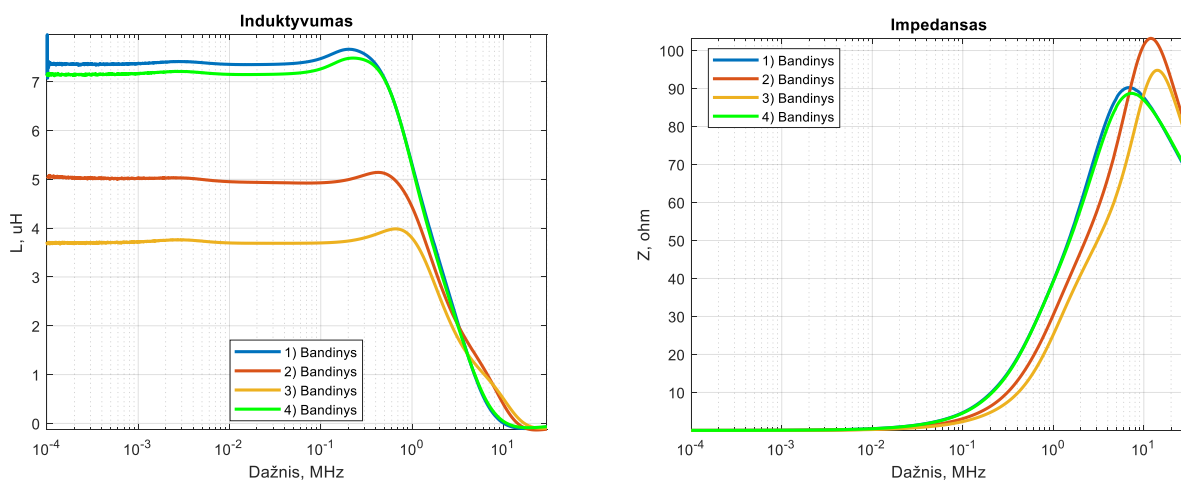
čia f – apatinis dažnis kai signalo amplitudė lygi pusei žadavimo įtampos amplitudės, L – transformatoriaus apvijų induktyvumas, R_i – Lauko tranzistorių valdiklio išėjimo varža.



14 pav. Transformatoriaus induktyvumo skaičiavimo schema

Kadangi lauko tranzistorių valdiklio išėjimo varža yra $7,5 \Omega$, o numatomas žemiausias darbinis dažnis 150 kHz, apskaičiuotas apvijų induktyvumas turi būti ne mažesnis kaip 7,96 uH.

Ištirtos keturių tipų šerdys ir išmatuotas jų induktyvumas esant vienai apvijai. Gauti rezultatai pateikiami grafikuose (žr. 15 pav.). Pirmas bandinys „EPCOS_#B62152A0007X030“, antras bandinys „Fair – Rite_#2873002402-2“, trečias bandinys „Fair – Rite_#2873002402-a5“, ketvirtas bandinys „EPCOS_#B62152P0007X030“.

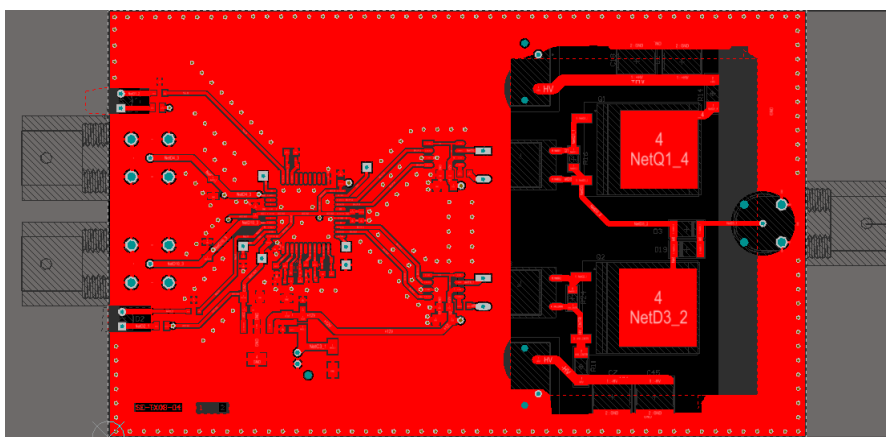


15 pav. Transformatoriaus šerdies induktyvumo priklausomybė nuo dažnio – kairėje pusėje, impedanso priklausomybė nuo dažnio – dešinėje pusėje

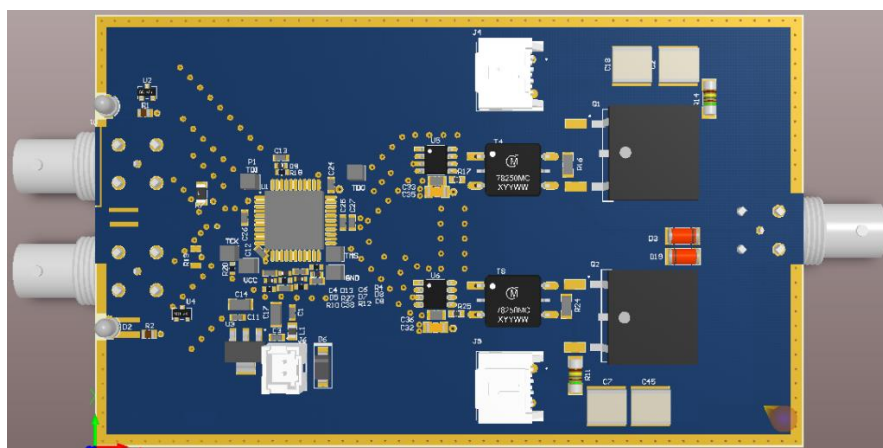
Atsižvelgiant į gautus grafikus pirmas ir ketvirtas šerdžių bandiniai yra beveik identiški, tai yra vieno produkto sena ir nauja versija, kadangi skiriasi gamintojo numerio viena raidė. Į impulsų formuotuvo grandinę nuspręsta dėti pirmą šerdies bandinį „EPCOS_#B62152A0007X030“, kadangi jo induktyvumas didžiausias, o ir impedansas aukštuose dažniuose turi mažesni piką. Naudojantis (3) formule apskaičiuotas apatinis signalo dažnis kai signalo amplitudė sumažėja perpus yra 159 kHz. Į transformatorių vyniojamos viena pirminė ir viena antrinė apvija dėl magnetinės šerdies siaurų kiaurymių.

Projektuojant impulsų formuotuvo spausdinto montažo plokštę, didelis dėmesys skirtas atstumams tarp aukštos įtampos takelių. Atstumas tarp takelių, esant 2 kV įtampos impulsams, turi būti 5,38 mm.

Projektavimo metu atstumą aukštos įtampos grandinėse tarp takelių pavyko išlaikyt 6 mm. Suprojektuota impulsų formuotuvo montažinė plokštė (žr. 16, 17 pav.).



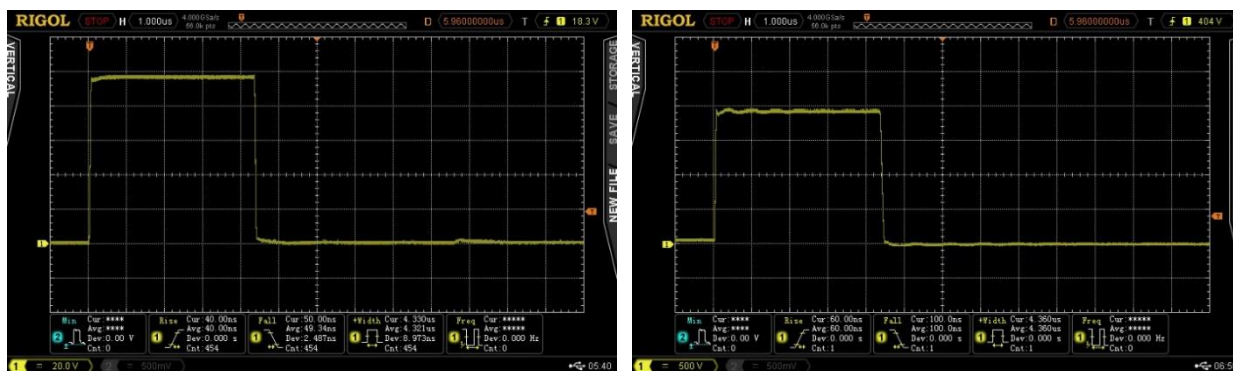
16 pav. Impulsų formuotuvo montažinė plokštė



17 pav. Impulsų formuotuvo montažinės plokštės 3d vaizdas

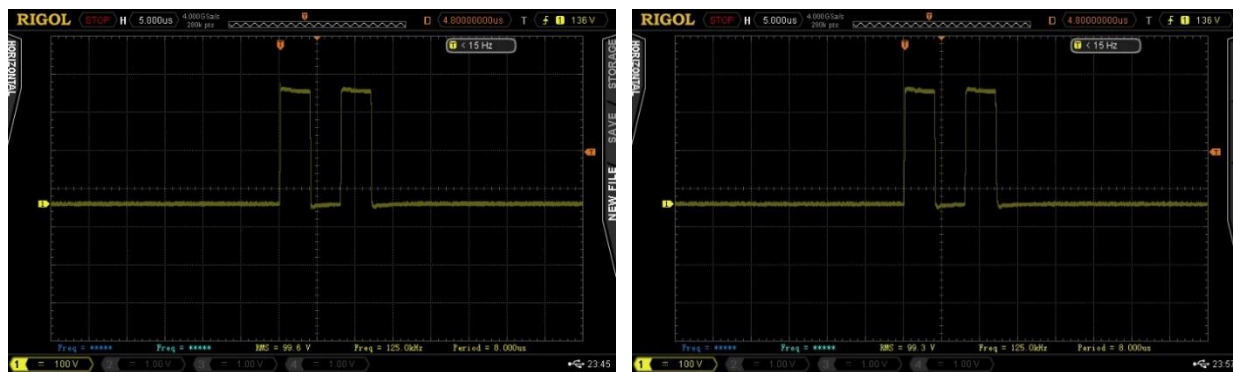
2.1.1. Aukštos įtampos impulsų formuotuvo testavimas

Atliktas impulsų formuotuvo valdymo įtampų tyrimas. Išbandytas impulsų formavimas nuo 100 V iki 1970 V naudojant (10 pav.) tyrimų sistemos struktūrą. Tyrimo metu generuoti 4,36 us pločio ir 125 kHz dažnio impulsai. Impulsų trukmė ir dažnis parinkti pagal tikėtinus feroelektretinio keitiklio parametrus [12.] Impulsų oscilogramos pateikiamos nuotraukose (žr. 18 pav.). Impulsų formuotuvai suformuoja beveik taisyklingos formos impulsus iki 1970 V įtampos.



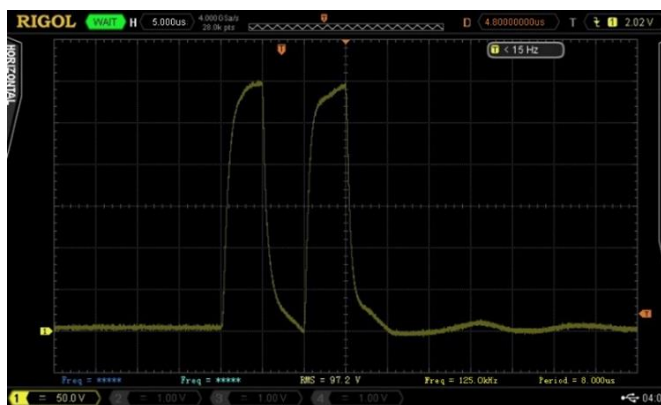
18 pav. 100 V amplitudės impulsas – kairėje, 1970 V amplitudės impulsas – dešinėje

Impulsų formuotuvo apkrova numatoma talpinė (feroelektrinis keitiklis). Tariant impulsų formos priklausomybę nuo apkrovos talpumo, matyti, kad kuo didesnė apkrovos talpa, tuo didesni impulso formos iškreipimai yra gaunami. Impulsų formuotuvo apkrovai naudojant 75 pF talpos feroelektrinį keitiklį, gauti impulsai beveik nesiskiria nuo signalo impulsų išėjime be apkrovos (žr. 19 pav.). Impulsų formuotuvo išėjime prijungus feroelektrinį keitiklį – matomas nežymus kylančio fronto pokytis. Kylantis frontas tampa mažiau status ir nelieka „išmetimo“ efekto.



19 pav. Ultragarinis impulsų formuotuvus be apkrovos – kairėje, ultragarinis impulsų formuotuvus su 75 pF apkrova – dešinėje

Keitiklio apkrovai naudojant 1 nF kondensatorių, išėjimo signalo frontai tampa lėkštesni (žr. 20 pav.), todėl akivaizdu, kad kuo didesnė apkrova tuo signalo impulsai labiau iškreipomi.



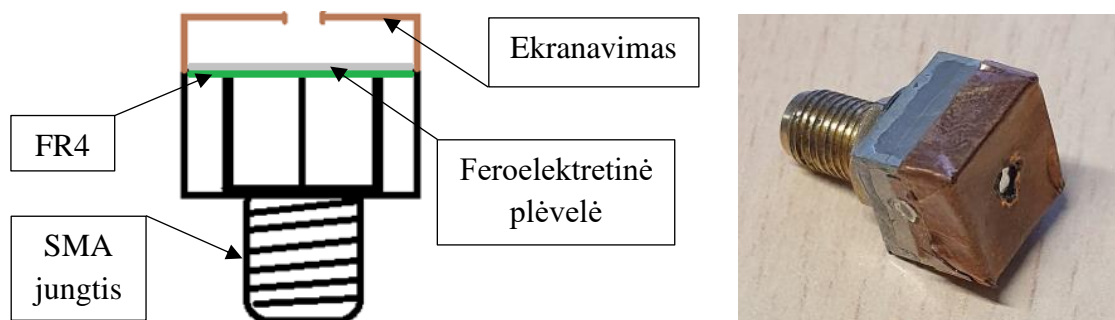
20 pav. Ultragarinio impulsų formuotuvus su 1 nF apkrova

2.2. Feroelektretinis mikrofonas

Feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai pasižymi rezonansiniu dažniu nuo 0,05 MHz iki 0,6 MHz [12]. Norint tinkamai įvertinti tokio keitiklio kuriamo akustinio lauko parametrus reikalingas mikrofonas, kuris dirba tokioje dažnių juostoje. Paprastai rinkoje esantys santykinai pigūs mikrofonai užtikrina dažnių juostą iki 44 kHz. Ši dažnių juosta yra ženkliai per maža, norint iširti feroelektretinius keitiklius.

Mikrofono gamybai panaudota feroelektretinė PP plėvelė „HS-03-20BRAL1“. Ši plėvelė pasirinkta todėl, kad iš tos pačios plėvelės buvo planuota pagaminti ir ultragarsinius keitiklius. Remiantis literatūros šaltiniais, feroelektretinio mikrofono darbinė dažnių juosta turėtų būti panaši kaip ir ultragarsinių keitiklių, kadangi naudojama ta pati feroelektretinė plėvelė [20].

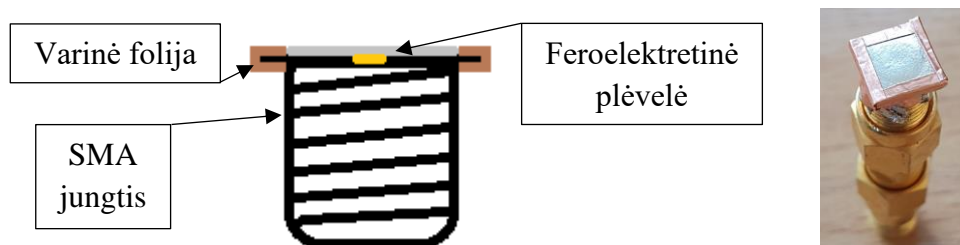
Pirmasis mikrofonas pagamintas ant 1x1 cm „FR4“ stiklo tekstolito montažinės plokštės elemento, priklijavus feroelektretinę plėvelę su cianoakrilato klijais. Mikrofono visas korpusas ekranuotas, siekiant sumažinti elektrinius trikdžius iš išorės. Mikrofono viršuje priklijuota varinė folija su 2 mm skersmens kiauryme centre, kuri skirta praleisti ribotą kiekį akustinių bangų į mikrofoną (21 pav.).



21 pav. Pirmojo mikrofono struktūros vaizdas – kairėje, pagaminto mikrofono vaizdas – dešinėje

Vertinant pagamintą mikrofoną nuspręsta, kad jis nėra tinkamas, kadangi varinės plėvelės kiaurymė aplink perimetrą yra netolygi. Netolygi kiaurymės briauna gali sąlygoti klaidingos informacijos priėmimą dėl susidariusios akustinių bangų difrakcijos ir interferencijos.

Išanalizavus pirmojo mikrofono gamybos klaidas, suprojektuota antra mikrofono versija, kurioje feroelektretinė plėvelė užklijuota cianoakrilato klijais tiesiogiai ant nušlifuotos SMA jungties, o plėvelės kraštai prie SMA jungties korpuso priklijuoti varine folija „WE 3003310A“ (22 pav.).



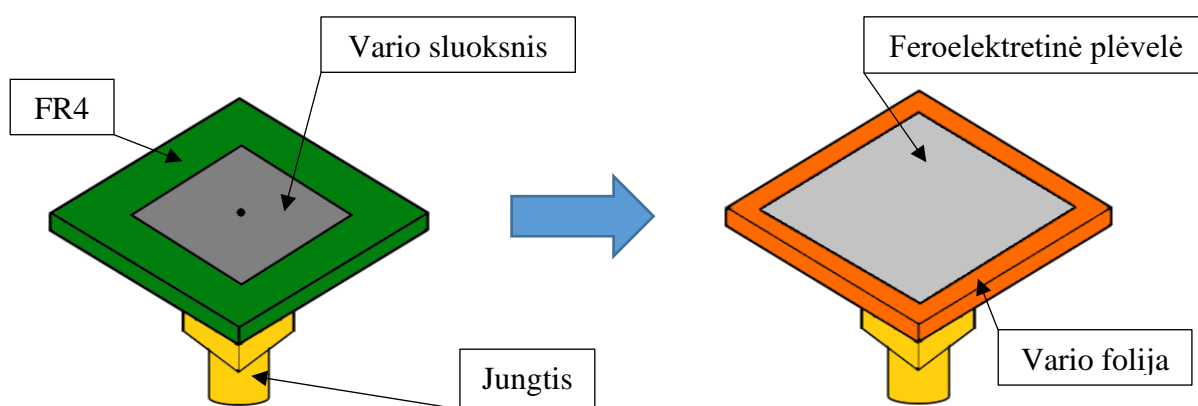
22 pav. Antrojo mikrofono struktūros vaizdas – kairėje, pagaminto mikrofono vaizdas – dešinėje

Centrinis SMA jungties atvadas veikia kaip 1,2 mm aktyvus elementas, o tarp centrinės gijos ir korpuso esanti chloroplasto medžiaga dirba kaip izoliatorius. Šio mikrofono paviršiuje ne tik nebelyka netolygios struktūros, bet ir sąlyginai mažas aktyvaus elemento skersmuo leidžia pasiekti didesnę skenavimo skyra nei, kad pirmojo mikrofono atveju.

3. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių tyrimai

3.1. Skirtingų konstrukcijų feroelektretiniai keitikliai

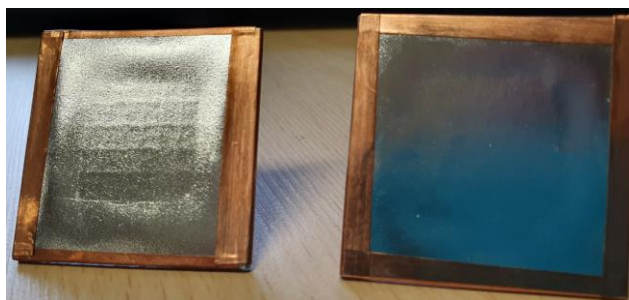
Feroelektretiniams ultragarsiniams keitikliams gaminti panaudota 70 um skersmens feroelektretinė PP plėvelė „HS-03-20BRAL1“. Viena feroelektretinės PP plėvelės pusė padengta aliuminio danga. Ultragarsinis keitiklis gamintas kondensatoriaus principu, todėl feroelektretinei plėvelei reikėjo pagaminti antrą laidų paviršių. Remiantis literatūros šaltinių analize, nuspręsta antram „karštam“ elektrodui panaudoti 1,6 mm skersmens „FR4“ stiklo tekstolito ruošinį su vario sluoksniu [14, 21]. Bendras stiklo tekstolito plokštelės dydis parinktas 40 x 40 mm, o centrinis elektrodas 20 x 20 mm. Tarp „karšto“ elektrodo ir „žemės“ sluoksnio paliktas 1 cm tarpas siekiant išvengti elektrinio pramušimo. Keitiklis pasirinktas didesnių matmenų, kad būtų patogu jį pagaminti. Prie stiklo tekstolito plokštės prilituota BNC jungtis. Ši jungtis pasirinkta dėl savo fizinių matmenų. Aliuminis feroelektretinės plėvelės sluoksnis veikia kaip ekranavimas ir „žemės“ laidininkas, kuris priklijuotas su 40 um varine folija „WE 3003310A“ prie kitoje pcb pusėje esančio „žemės“ sluoksnio. Suprojektuoto feroelektretinio ultragarsinio keitiklio konstrukcija (žr. 23 pav.).



23 pav. Feroelektretinio ultragarsinio keitiklio konstrukcija

Vienintelis metodas pritvirtinti turimą feroelektretinę plėvelę prie stiklo tekstolito plokštės paviršiaus – klėjai. Siekiant išbandyti kelias plėvelės klėjavimo technikas, pagaminti trys ultragarsiniai keitikliai, kuriems plėvelės buvo priklijuotos skirtingomis metodikomis. Pirmuoju atveju, feroelektretinė plėvelė ant stiklo tekstolito plokštelės užklijuota cianoakrilato klėjais. Antruoju atveju, ant feroelektretinės plėvelės užklijuota lipni 20 x 20 mm dydžio, 40 um skersmens vario folija „WE 3003310A“, kuri vėliau užklijuota laidžiais sidabro klėjais ant stiklo tekstolito plokštelės. Trečiuoju atveju, ant feroelektretinės plėvelės užklijuotas 20 x 20 mm dydžio, 100 um skersmens laidžios tekstilės audinys „WE 33050“, kuris vėliau pritvirtintas laidžiais sidabro klėjais prie stiklo tekstolito plokštės. Varinės folijos ir laidaus audinio dydis parinktas pagal keitiklio konstrukcijos aktyvaus elemento dydį, o užklijuotas taip, kad sutaptų su ant stiklo tekstolito plokštelės konstrukcijos esančiu kvadratu.

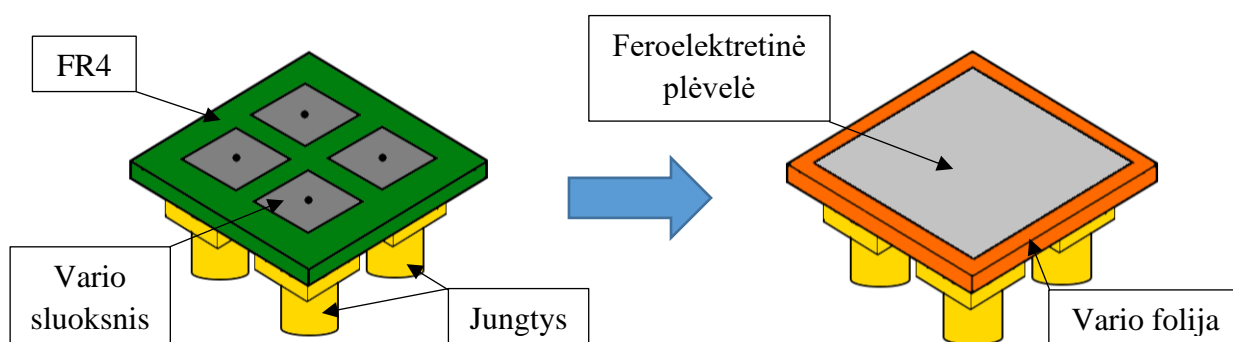
Pagamintų keitiklių vaizdas pateikiamas nuotraukose (žr. 24 pav.).



24 pav. Pagamintų feroelektretinių keitiklių su vienu aktyviu elementu vaizdas (kairėje pusėje – keitiklis su laidžia tekstile, dešinėje pusėje – keitiklis su varine folija)

Skirtingomis metodikomis pagaminti ultragarsiniai keitikliai vizualiai atrodo beveik identiškai. Keitiklis su laidžiu audiniu atrodo kiek išskirtinis dėl specifinio paviršiaus reljefo, kuris atsirado dėl laidžios tekstilės audinio struktūros.

Taip pat pagamintas vienas ultragarsinis keitiklis iš keturių aktyvių elementų. Keitiklis gamintas ant 29 x 29 mm dydžio „FR4“ stiklo tekstolito plokštelės. Aktyvių elementų dydis parinktas 10 x 10 mm, o tarpas tarp aktyvių elementų ir „žemės“ sluoksnio 3 mm. Ultragarsinio keitiklio su 4 aktyviais elementais struktūra (25 pav.).



25 pav. 4 aktyvių elementų feroelektretinio ultragarsinio keitiklio konstrukcija

Feroelektretinė plėvelė prie konstrukcijos priklijuota cianoakrilato klijais, o feroelektretinės plėvelės „žemės“ sluoksnis prijungtas varine folija. Taip pat, prie keitiklio „karštų“ elektrodų prilituotos keturios SMA jungtys. SMA jungtys parinktos dėl mažos ultragarsinio keitiklių masyvo konstrukcijos. Pagaminto keitiklio vaizdas (žr. 26 pav.).



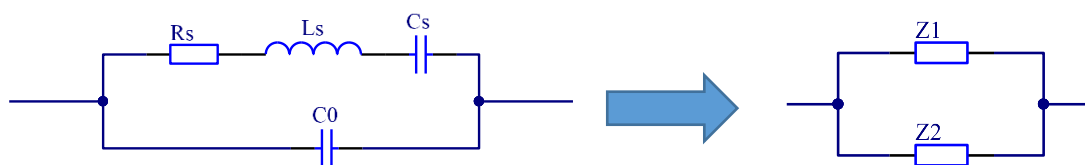
26 pav. 4 aktyvių elementų feroelektretinio ultragarsinio keitiklio struktūra

3.1.1. Impedanso tyrimai

Ultragarsiniuose tyrimuose svarbus ne tik akustinis ultragarsinio keitiklio impedansas, bet ir elektrinis impedansas. Elektrinė pilnutinė varža apsprendžia kiek energijos bus panaudota efektyviam darbui atlikti. Ne retai ultragarsinių keitiklių impedansas būna labai aukštas, o aukštos įtampos impulsų formuotuvo išėjimo grandinės impedansas – žemas. Impedansų nesuderinimo sąlyga reiškia, kad tik labai maža dalis energijos bus panaudota darbui atlikti, o kita energijos dalis bus išekvota nuostoliams kompensuoti.

Skirtingų konstrukcijų ultragarsinių feroelektretinių keitiklių impedanso analizė atlikta remiantis BVD modeliu, kuris pritaikytas pjezoelektriniams elementams [5]. Šis modelis pasiūlytas, kadangi feroelektretinės plėvelės pasižymi pjezoelektrinėmis savybėmis.

Impedanso matuokliu „WAYNE KERR 500B“ išmatuotas lygiagreto junginio impedanso reali ir menama dalys. BVD modelio ir ekvivalentinė išmatuoto impedanso schema pateikta (27 pav.).

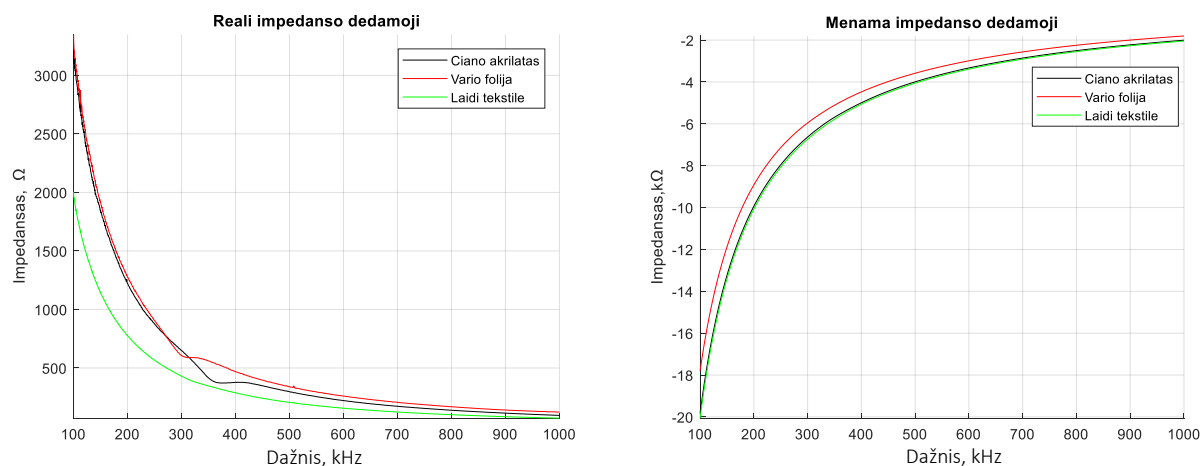


27 pav. BVD grandinės modelis – kairėje, išmatuoto impedanso principinė schema – dešinėje

Impedanso matuoklis, skaičiuodamas keitiklio realią ir menamą dalį, jas interpretuoja kaip sujungtas lygiagrečiai. Naudojant matematinės išraiškas iš lygiagreto jungimo realios ir menamos impedanso dalies, apskaičiuojamos BVD schemas komponentų dedamosios. Keitiklio medžiagos talpą nurodo C_0 dedamoji, o nuoseklaus rezonansinio kontūro dedamąsias: R_s , L_s , C_s . Bendras BVD modelio impedansas (Z_T) apskaičiuojamas pagal 6 formulę.

$$Z_T = \frac{\left(R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \right) \cdot \frac{1}{j\omega C_0}}{R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{1}{j\omega C_0}} \quad (6)$$

Išmatuoti skirtingų konstrukcijų ultragarsinių keitiklių impedanso rezultatai pateikti (28 pav.).



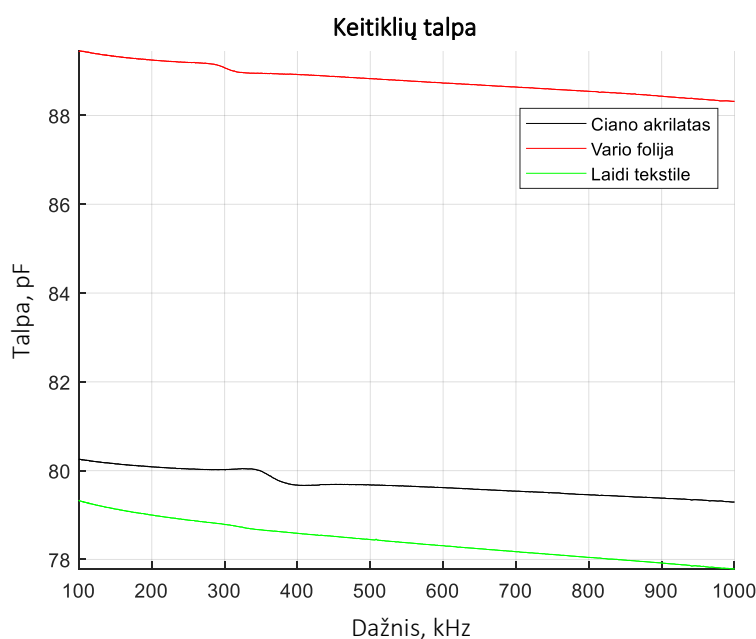
28 pav. Ultragarsinių keitiklių impedanso reali dedamoji – kairėje, impedanso menama dedamoji – dešinėje

Ultragarsiniuose keitikliuose impedanso realios dedamosios kreivės yra išsidėsčiusios skirtingai. Visų trijų keitiklių rezonansinis dažnis skiriasi. Impedanso realios dedamosios grafike sunkiai pastebimas yra laidžios tekstilės ultragarsinio keitiklio rezonansinis dažnis, kuris yra ~ 321 kHz. Ultragarsinio keitiklio su varine folija rezonansinis dažnis yra ~ 306 kHz, o cianoakrilato kljais pagaminto keitiklio rezonansinis dažnis yra ~ 360 kHz. Reali impedanso dedamoji, skirtingų konstrukcijų keitikliams skiriasi dėl skirtingų kljavimo metodikų ir tarpinių medžiagų tarp stiklo tekstolito plokštės ir feroelektretinės plėvelės. Menamos dedamosios grafikai cianoakrilato ir laidžios tekstilės keitikliams beveik identiški. Impedanso menama dedamoji yra šiek tiek mažesnė keitiklio su varine folija.

BVD modelio komponentų vertės apskaičiuotos remiantis impedanso realios ir menamos dedamųjų grafikais. Keitiklio talpuminės dedamosios apskaičiuotos pasinaudojus kondensatoriaus impedanso formule:

$$C = -\frac{1}{j\omega I_m} \quad (7)$$

Skaičiuojant talpą, formulėje naudota išmatuota keitiklio impedanso menama dalis – I_m . Apskaičiuota keitiklių talpa pateikiama (29 pav.).



29 pav. Apskaičiuotas ultragarsinių keitiklių talpumas

C_0 randamas aukštuose dažniuose (1 MHz) priimant, kad nuoseklaus rezonanso grandinėje, impedanso menamoje dedamojoje, L_m impedansas yra žemas ir grandinėje vyrauja tik C_0 dedamoji. Žemuose dažniuose (100 kHz) L_m impedansas yra aukštas ir grandinėje, impedanso menamoje dedamojoje, vyrauja tik C_0 ir C_m suma. R_m randama rezonanso metu išmatavus realią impedanso dedamąją. L_m yra randamas panaudojus rezonansinio LC kontūro formulę, išsireiškus induktyviąją dedamąją:

$$L = -\frac{1}{2\pi f_{rez} C_m} \quad (8)$$

Apskaičiuotos ultragarsinių keitiklių BVD modelio komponentų vertės pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. Apskaičiuotos keitiklių BVD modelio komponentų dedamosios

| Keitiklio klijavimo metodas | C0, pF | Cm, pF | Rm, Ω | Lm, mH |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Laidi tekstilė | 77,79 | 1,55 | 386,49 | 158,1 |
| Cianoakrilatas | 79,29 | 0,96 | 376,33 | 198,6 |
| Varinė folija | 88,32 | 1,13 | 590,9 | 237,5 |

Antroje lentelėje pateiktos apskaičiuotos matematinio modelio vertės. Jos nurodo BVD modelio komponentų dydžius. Žinant teorines komponentų vertes, galima modeliuoti skaitmeninį ultragarsinio keitiklio modelį.

3.1.2. Feroelektretinės plėvelės dielektrinė skvarba

Dielektrinėms medžiagoms vienas iš svarbių fizikinių dydžių yra dielektrinė skvarba. Dielektrinė skvarba yra dydis, apibrėžiantis kaip elektrinis laukas veikia dielektrinę medžiagą, arba kaip dielektrinė medžiaga veikia elektrinį lauką. Dielektrinė skvarba parodo medžiagos gebėjimą poliarizuotis, taip padidinant arba sumažinant elektrinį lauką medžiagos struktūroje. Žinant medžiagos dielektrinę skvarbą – apskaičiuojama santykinė dielektrinė skvarba (4 formulė), o turint ir kitus keitiklio parametrus – apskaičiuojama ultragarsinio keitiklio talpą (5 formulė).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4)$$

čia ϵ – medžiagos dielektrinė skvarba; ϵ_0 – vakuumo dielektrinė skvarba = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} \quad (5)$$

čia d – feroelektretinės plėvelės diametras; S – feroelektretinio keitiklio paviršiaus plotas; ϵ_0 – vakuumo dielektrinė skvarba = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m; ϵ_r – medžiagos santykinė dielektrinė skvarba.

Siekiant apskaičiuoti naudojamos feroelektretinės medžiagos dielektrinę konstantą, randamas 2 lentelėje pateiktų, visų keitiklių talpų (C0) vidurkis. Kadangi gaminant ultragarsinius keitikius buvo panaudota ta pati feroelektretinė plėvelė, skaičiuojamas talpų vidurkis, kuris yra 81,8 pF. Skaičiavimuose naudojamo keitiklio plotas – 0,0004 m², o feroelektretinės plėvelės storis – 70 um. Pasinaudojus 3 ir 4 formulėmis, apskaičiuota feroelektretinės plėvelės dielektrinė skvarba – $1,43 \cdot 10^{11}$ F/m ir santykinė dielektrinė skvarba – 1,62. Feroelektretinės plėvelės santykinė dielektrinė skvarba yra šiek tiek didesnė nei oro, kuri lygi 1,00054.

3.1.3. Tyrimų sistemos dažninė analizė

Ultragarsiniuose tyrimuose priimto signalo lygis būna labai mažas. Keitikliams turi įtakos ne tik akustinis impedansas, bet ir elektrinis impedansas. Dėl didelių energijos nuostolių priimto signalo amplitudė būna labai maža. Imtuvo grandinėje, prieš apdorojant signalą, signalas yra sustiprinamas. Stiprintuvas ne tik sustiprina informacinio signalo dedamąsias, bet sustiprina ir triukšmo dedamąsias, todėl reikalingos papildomos priemonės triukšmo dedamųjų šalinimui. Pats paprasčiausias triukšmo

dedamųjų pašalinimas yra filtravimas. Priimto signalo filtravimui naudojami įvairūs adaptyvūs, juostiniai ir kitokie filtrai.

Žinant formuojamo signalo centrinių dažnį, viena iš paprasčiausių triukšmo filtravimo metodikų yra sinusinė koreliacija (angl. *sine wave correlation*). Sinusinė koreliacija yra glaudžiai susijusi su Furje transformacija. Šis metodas leidžia išfiltruoti signalą, kuris yra paskendęs triukšme [15]. Sinusinė ir kosinusinė funkcijos yra naudojamos koreliuoti signalą y_m , diskretizuojamą laiko atskaitomis t_m , esant žinomam centriniam dažniui f_b . Sinusinės ir kosinusinės funkcijų pagalba yra sugeneruojamos reali ir menama dedamosios (9 – 10 formulės).

$$V_{re} = \frac{\sum_{m=1}^M [\cos(2\pi f_b t_m) \cdot y_m]}{\sum_{m=1}^M [\cos(2\pi f_b t_m)]^2} \quad (9)$$

$$V_{im} = \frac{\sum_{m=1}^M [\sin(2\pi f_b t_m) \cdot y_m]}{\sum_{m=1}^M [\sin(2\pi f_b t_m)]^2} \quad (10)$$

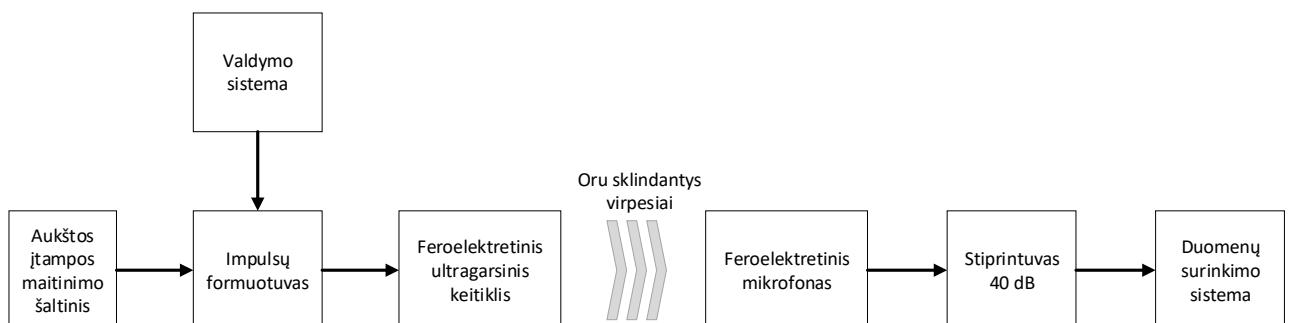
Apskaičiavus realią ir menamą dedamąsias, skaičiuojamas signalo amplitudės vektorius (11 formulė) ir signalo fazė (12 formulė).

$$V_{out} = \sqrt{V_{re}^2 + V_{im}^2} \quad (11)$$

$$\phi = \arctan \frac{V_{re}}{V_{im}} \quad (12)$$

Sinusinės koreliacijos pagalbą, duomenų signalą galima apdoroti net jei jis yra labai paskendęs triukšme.

Kadangi nėra žinomas feroelektretinio mikrofono jautrumas, esant skirtingiems akustinių bangų dažniams, buvo ištirta sistemos dažninė charakteristika. Tyrimų sistemos struktūra pateikta (žr. 30 pav.).

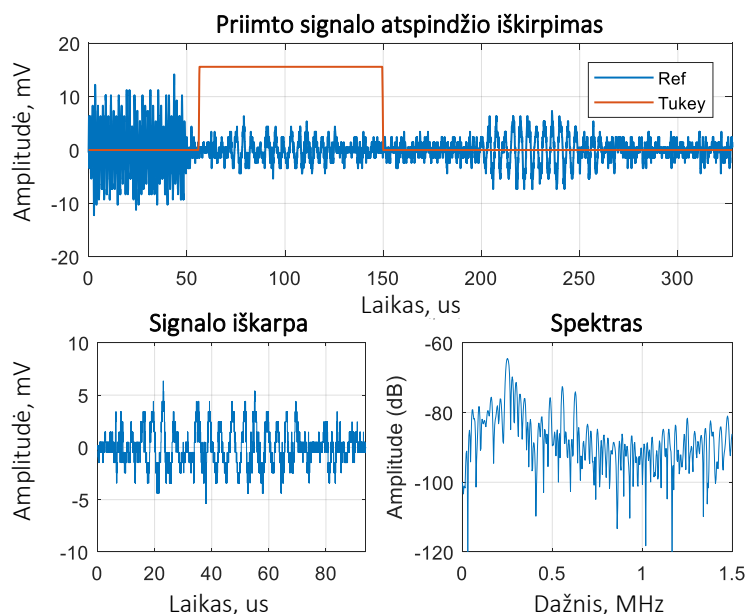


30 pav. Tyrimų sistemos struktūra

Atsižvelgus, kad pasirinktos PP feroelektretinės plėvelės „HS-03-20BRAL1“ ultragarsinio keitiklio rezonansinis dažnis yra ~ 300 kHz [14], dažninės analizės tyrimas atliktas nuo 100 kHz iki 400 kHz.

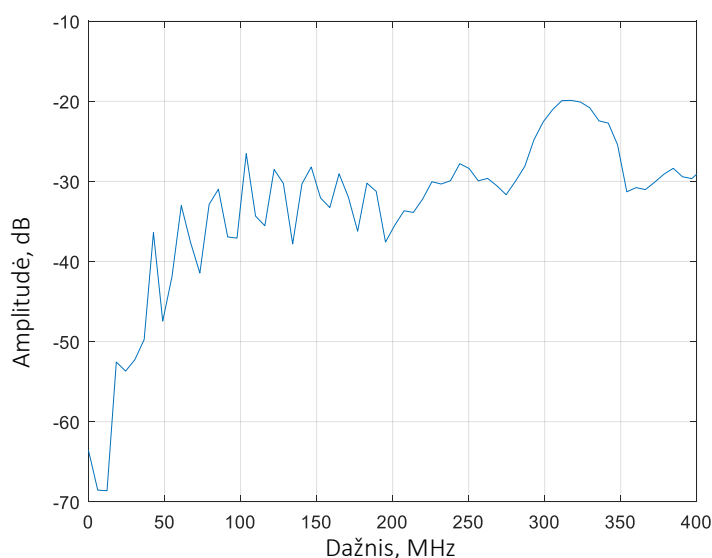
Tyrimo metu naudotas laidžia tekstile ir laidžiais sidabro klėjais suklijuotas ultragarsinis feroelektretinis keitiklis, bei cianoakrilato klėjais ant SMA jungties priklijuotos feroelektretinės plėvelės mikrofonas. Ultragarsinis keitiklis buvo žadintas 300 V amplitudės penkių impulsų seka. Atstumas tarp keitiklio ir mikrofono buvo 20 mm. Priimto signalo lygis buvo sustiprinamas 40 dB.

Oru sklindantys virpesiai užfiksuoti mikrofono pagalba (žr. 31 pav.).



31 pav. Priimto signalo apdorojimas

Iš priimto signalo duomenų, kiekvienam generuotam dažniui, pasinaudojus „lango“ funkcija, buvo išsikirtas pirmasis ultragarso virpesių signalas. Iškirpto signalo spektrą padalinus iš generuoto signalo spektro – gauta ultragarsinio keitiklio ir tyrimų sistemos suminė dažninė charakteristika. Atliktos dažninės analizės duomenys pateikiami (32 pav.).



32 pav. Tyrimų sistemos ir feroelektretinio ultragarsinio keitiklio su laidžia tekstile dažninė charakteristika

Iš gautos dažninės analizės matyti, kad maksimali signalo amplitudė yra ties ~ 320 kHz. Nors maksimalios signalo amplitudės dažnis yra beveik lygus rezonansiniam dažniui, kuris buvo gautas tiriant keitiklio elektrinį impedansą, negalima teigti, kad tai yra ultragarsinio keitiklio dažninė charakteristika. Gauti matavimai yra bendra tyrimų sistemos ir ultragarsinio keitiklio charakteristika.

3.1.4. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių kryptingumo matavimai

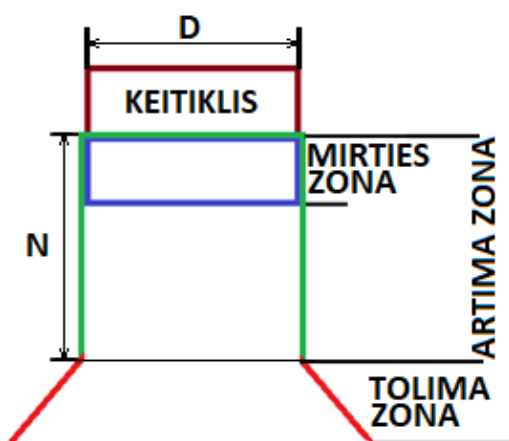
Bene pati svarbiausia ultragarsinių keitiklių charakteristika yra formuojamo akustinio lauko kryptingumas. Žinomas sukuriama akustinio lauko pasiskirstymas erdvėje padeda tiksliai sufokusuoti keitiklio akustinių bangų sklaidimą į pasirinktas tiriamojo objekto vietas.

Keitiklių akustinių bangų sklaidimas yra skirstomas į tris ribas: mirties (angl. *dead*) zoną, artimą zoną ir tolimą zoną. Mirties zona yra erdvė, kurioje nėra galimybės aptikti defektus. Ši zona yra nuo ultragarsinio keitiklio paviršiaus iki pirmojo atspindžio (aido), kurį galima užfiksuoti. Artima zona yra kai akustinių bangų spindulys keliauja beveik lygiagrečiai. Artimos zonos atstumą nuo paviršiaus galima apskaičiuoti pagal 13 formulę.

$$N = \frac{D^2 f}{4v} \quad (13)$$

čia N – atstumas iki keitiklio paviršiaus; D – keitiklio skersmuo; f – keitiklio darbinis dažnis; v – garso greitis darbinėje terpėje.

Tolima zona yra regionas esantis už artimos zonos ribos. Tolimoje zonoje spindulys „linksta“, o keitiklio jautrumo mažėjimas proporcingas atstumo kvadratui. Zonų pasiskirstymo brėžinys pateikiamas (33 pav.).



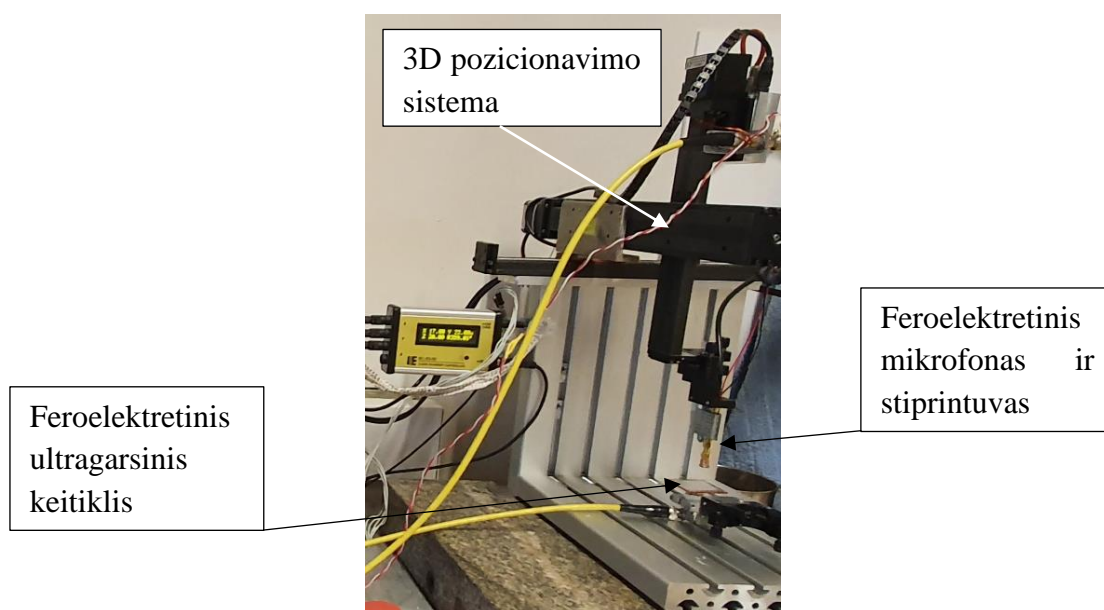
33 pav. Akustinių bangų spinduliavimo zonos

Remianti 13 formule apskaičiuota artimos zonos riba 2 cm ir 1 cm skersmens aktyviųjų elementų ultragarsiniams keitikliams oro aplinkoje, esant 320 kHz darbiniam dažniui.

$$N_{2cm} = \frac{0,02^2 \cdot 320000}{4 \cdot 343} = 9,33 \text{ cm} \quad N_{1cm} = \frac{0,01^2 \cdot 320000}{4 \cdot 343} = 2,33 \text{ cm}$$

Iš apskaičiuotų rezultatų galima spręsti, kad 2 cm skersmens (vieno aktyvaus elemento) ultragarsiniams keitikliams artima zona yra iki 9,33 cm atstumo, o 1 cm skersmens (keturių aktyviųjų elementų) ultragarsinio keitiklio artima zona yra iki 2,33 atstumo nuo keitiklio paviršiaus.

Ultragarsinių keitiklių akustinių bangų spinduliavimo tyrimas atliktas pasinaudojus anksčiau aprašyta ir 30 paveikslėlyje pavaizduota tyrimu sistemos struktūra. Tyrimo metu pasinaudota 3D skenavimo sistema, kurios pagalba buvo keičiama mikrofono pozicija. Tyrimų sistemos fragmentas pateikiamas paveikslėlyje (žr. 34 pav.).

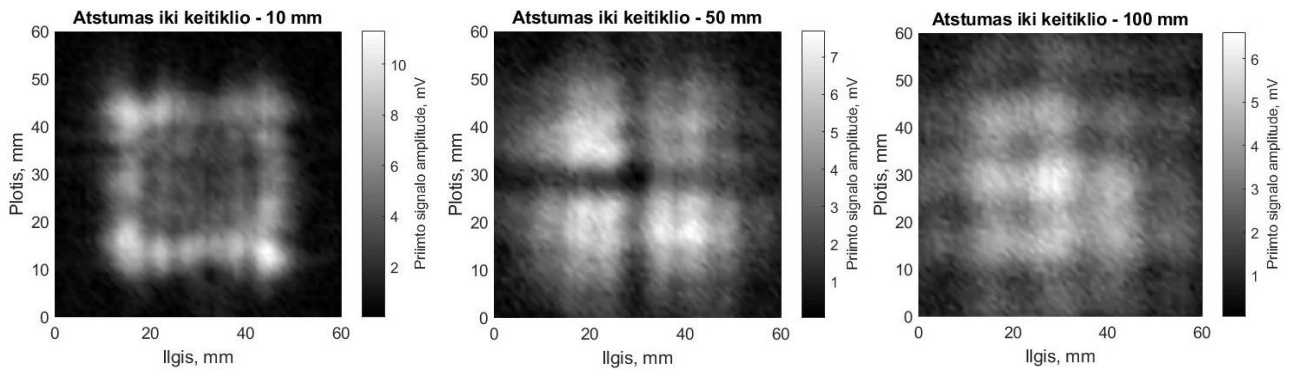


34 pav. Akustinių bangų tyrimų sistemos fragmentas

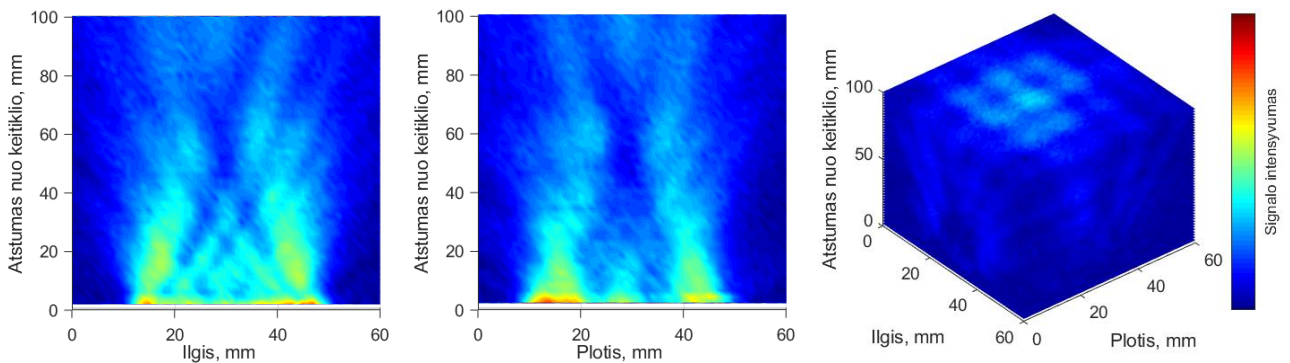
Tyrimas atliktas keitiklį žadinant 500 V amplitudės 5 impulsų seka. Pasirinkta sąlyginai aukšta 500 V amplitudė, kadangi feroelektretiniams ultragarsiniams keitikliams reikalingi aukštos įtampos impulsai, norint sugeneruoti didesnės energijos akustines bangas. Pasirinktas keitiklio žadinimo dažnis – 320 kHz. Šis dažnis pasirinktas remiantis keitiklių elektrinių impedansų charakteristikomis, bei bendra tyrimų sistemos dažninę charakteristika. Iš elektrinių impedansų charakteristikų buvo pasirinktas trijų keitiklių centrinis rezonansinis dažnis, kadangi nėra aišku, ar kuriamos akustinio lauko rezonansinis dažnis sutaps su elektrinio impedanso charakteristikose esančiu rezonansiniu dažniu. Keitiklių plotas skenuotas x ir y plokštumose 0,25 mm žingsniu, o z plokštumoje 2 mm žingsniu. Visiems keitikliams buvo parinktas skenavimo atstumas z plokštumoje, atsižvelgiant į artimos zonos ribą. Keturių aktyviųjų elementų keitiklio skenavimas buvo atliktas nuo 2 mm iki 54 mm atstumu, o vieno aktyvaus elemento keitikliams nuo 2 mm iki 100 mm atstumu.

Tyrimo metu gauti rezultatai apdoroti išsikerpant pirmąjį akustinių bangų sugeneruotą signalą ir jį apdorojant sinusinės bangos koreliacija. Apskaičiavus priimto signalo amplitudę yra pateikiami duomenys 2D ir 3D plokštumose.

Pirmieji matavimai buvo atlikti su ultragarsiniu keitikliu, kuriame panaudota laidų tekstilė. Gauti duomenys keitiklio paviršiaus plokštumoje pateikiami (35 pav.). Normuotos amplitudės akustinių bangų formavimasis erdvėje bei centriniuose x ir y plokštumos pjūviuose z ašies atžvilgiu pavaizduoti (36 pav.).



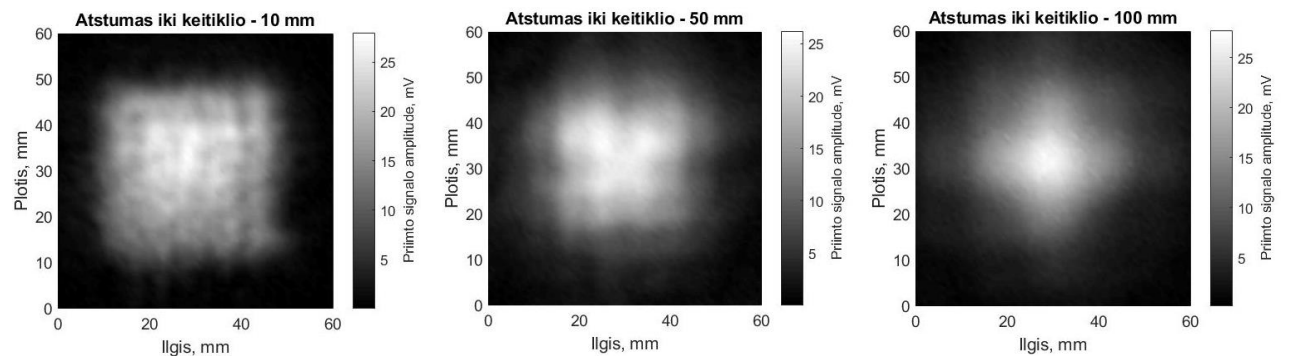
35 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo ultragarsinio keitiklio su laidžia tekstile



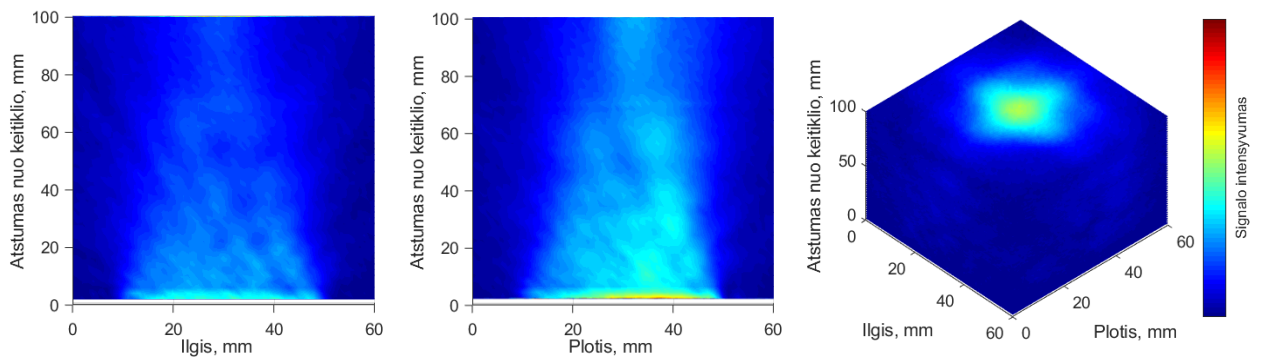
36 pav. Normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas ultragarsiniame keitiklyje su laidžia tekstile (kairėje – centrinis pjūvis x ašyje, centre – centrinis pjūvis y ašyje, dešinėje – akustinių bangų intensyvumas erdvėje)

Iš gautų duomenų yra matomas akustinių bangų pasiskirstymas erdvėje. Esant 10 mm ir 50 mm atstumu nuo keitiklio, matomas aiškus akustinių bangų formavimasis, o 100 mm atstumu nuo keitiklio yra susiformavęs akustinių bangų srautas, kurio didžiausias intensyvumas yra x ir y plokštumos centre. Pastebimas kuriamo akustinio lauko pasiskirstymas „grotelėmis“. Šis akustinio lauko netolygus pasiskirstymas grindžiamas netolygia ultragarsinio keitiklio paviršiaus struktūra, kuri susidarė dėl laidžios tekstilės įtakos (24 pav.).

Ištirtas ultragarsinis keitiklis su varine folija. Gauti duomenys keitiklio paviršiaus plokštumoje pateikiami (37 pav.). Normuotos amplitudės akustinių bangų formavimasis erdvėje bei centriniuose x ir y plokštumos pjūviuose z ašies atžvilgiu pavaizduoti (38 pav.).



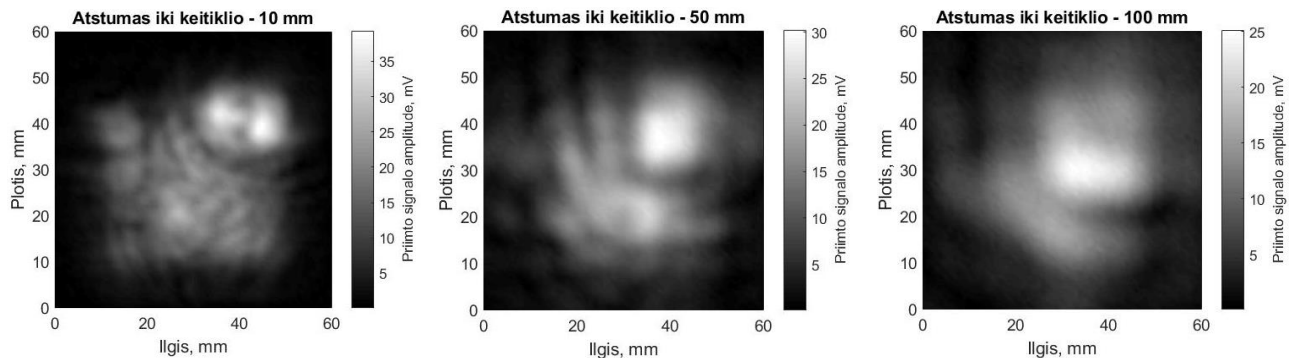
37 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo ultragarsinio keitiklio su varine folija



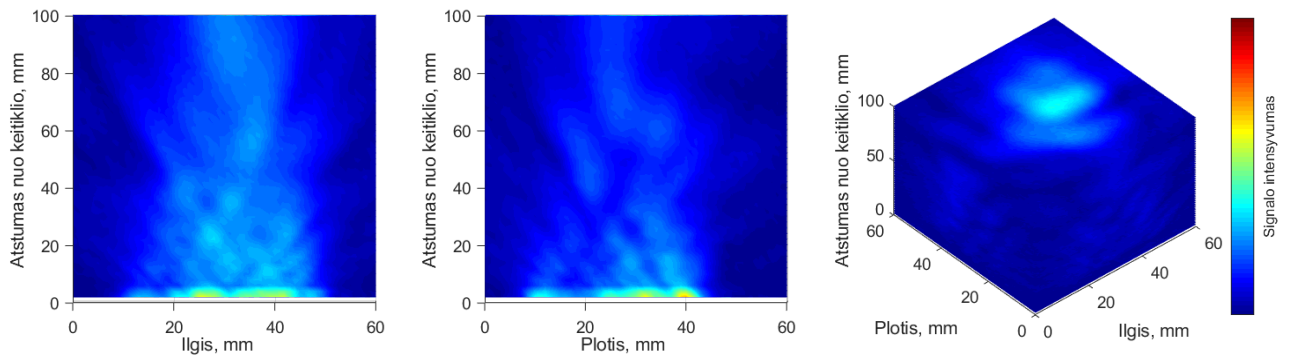
38 pav. Normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas ultragarsiniame keitiklyje su vario folija (kairėje – centrinis pjūvis x ašyje, centre – centrinis pjūvis y ašyje, dešinėje – akustinių bangų intensyvumas erdvėje)

Ištyrus ultragarsinį keitiklį su varine folija yra matomas tolygus akustinių bangų formavimasis ir aiškiai išreikštas akustinių bangų intensyvumas viename taške, esantis už artimos zonos ribų (100 mm atstumu nuo keitiklio). Akustinės bangos formuojasi tolygiai, kadangi keitiklyje su varine folija pavyko suformuoti lygų paviršių, o varinės folijos tarpas yra salyginai vienodo skersmens visame keitiklio plote.

Taip pat atlikta analizė ultragarsinio keitiklio, kuris pagamintas su cianoakrilato klėjais. Gauti duomenys keitiklio paviršiaus plokštumoje pateikiami (39 pav.). Normuotos amplitudės akustinių bangų formavimasis erdvėje bei centriniuose x ir y plokštumos pjūviuose z ašies atžvilgiu pavaizduoti (40 pav.).



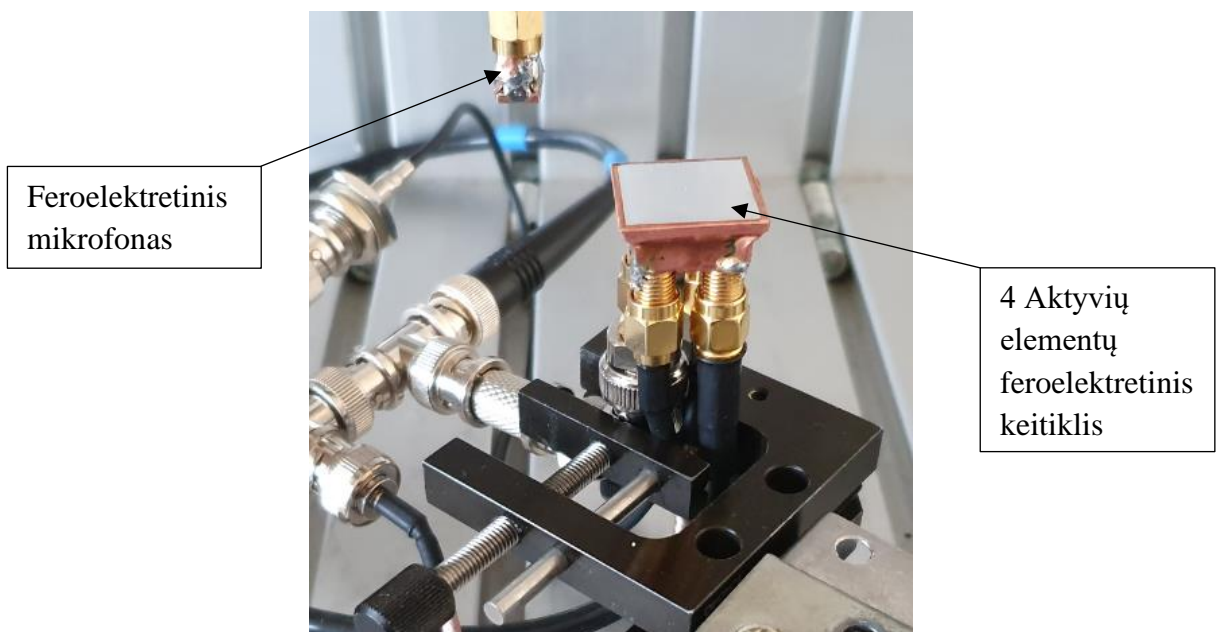
39 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo ultragarsinio keitiklio su cianoakrilato klėjais



40 pav. Normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas ultragarsiniame keitiklyje su cianoakrilato klėjais (kairėje – centrinis pjūvis x ašyje, centre – centrinis pjūvis y ašyje, dešinėje – akustinių bangų intensyvumas erdvėje)

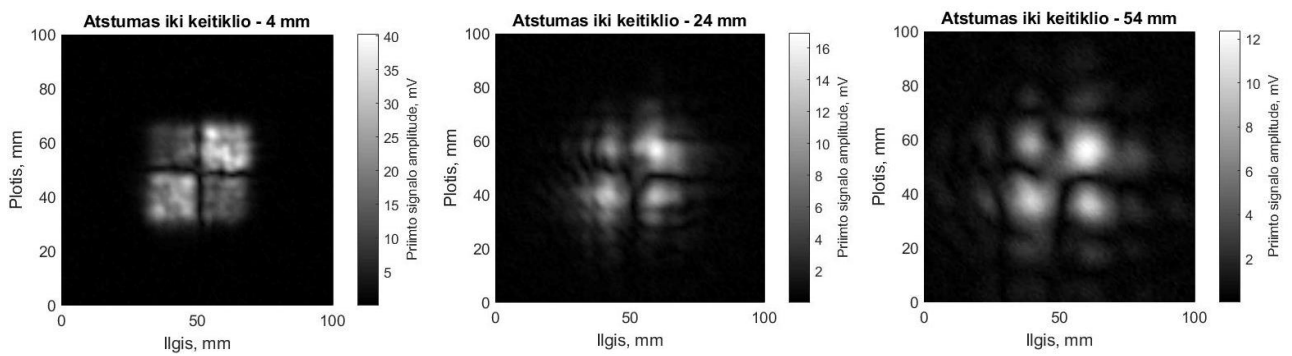
Nors vizualiai cianoakrilato klėjais klijuoto keitiklio paviršius yra lygus, kaip ir keitiklio su varine folija, bet kuriamas akustinių bangų srautas nėra tiksliai sukoncentruotas x ir y plokštumų centruose, už keitiklio artimos zonos ribos. Netolygus kuriamų akustinių bangų pasiskirstymas gali būti sąlygotas cianoakrilato klijų įsiskverbimo į porėtą feroelektretinės plėvelės struktūrą. Įsiskverbę klėjai pakeičia feroelektretinės plėvelės savybes ir dalis struktūros iš porėtos tampa vienalyte ir kieta.

Ištirtas keturių aktyvių elementų ultragarsinis keitiklis pagamintas su cianoakrilato klėjais. Tyrimo metu žadinti arba du, arba keturi keitikliai vienu metu. Tyrimų sistemos struktūros vaizdas pateikiamas (41 pav.).



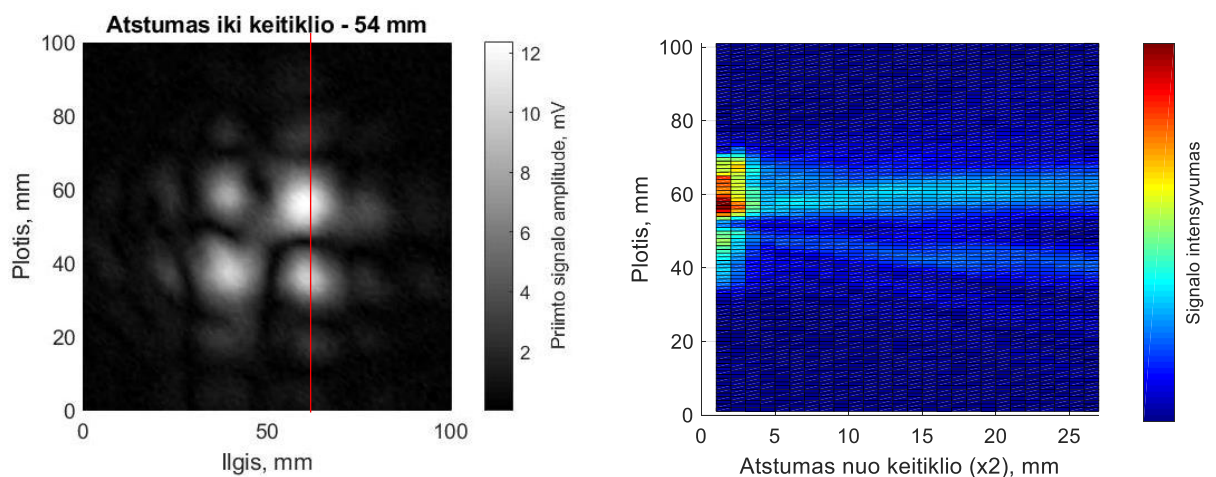
41 pav. Keturių aktyvių elementų ultragarsinio keitiklio tyrimų struktūros fragmentas

Pirmiausia buvo ištirtas dviejų aktyvių elementų žadinimas. Aktyvūs elementai buvo pasirinkti esantys skersai vienas kito, kadangi tikslas buvo žadinti toliausiai esančius elementus. Gauti duomenys paviršiaus plokštumoje pateikti (42 pav.).



42 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo 4 elementų keitiklio kai žadinami 2 keitiklio elementai

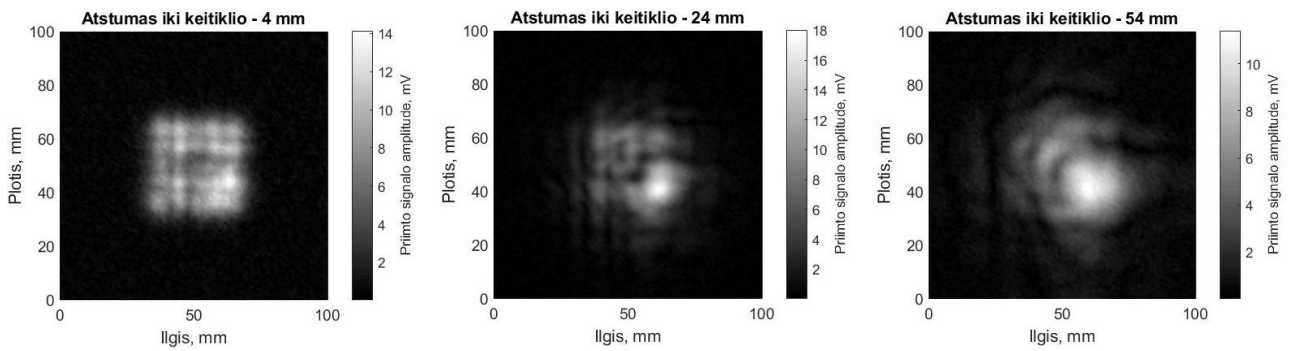
Žadinant tik du aktyvius elementus iš keturių, pastebima, kad „neaktyvūs“ elementai taip pat generuoja akustines bangas. Neaktyvūs elementai generuoja akustines bangas dėl rezonansinio efekto, bei dėl paviršiaus struktūroje kuriamų akustinių bangų, kurios persiduoda dėl vienalytės feroelektretinės plėvelės. Kadangi centriniuose x ir y plokštumos pjūviuose z ašies atžvilgiu akustinių bangų intensyvumo maksimumo nesusidaro, pateikiamas (raudonos linijos) ašinis pjūvis ties susidarančiu akustiniu bangų maksimumu (43 pav.).



43 pav. Akustinių bangų intensyvumas plokštumoje – kairėje, normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas pasirinktame erdvės pjūvyje, tolstant nuo keitiklio – dešinėje.

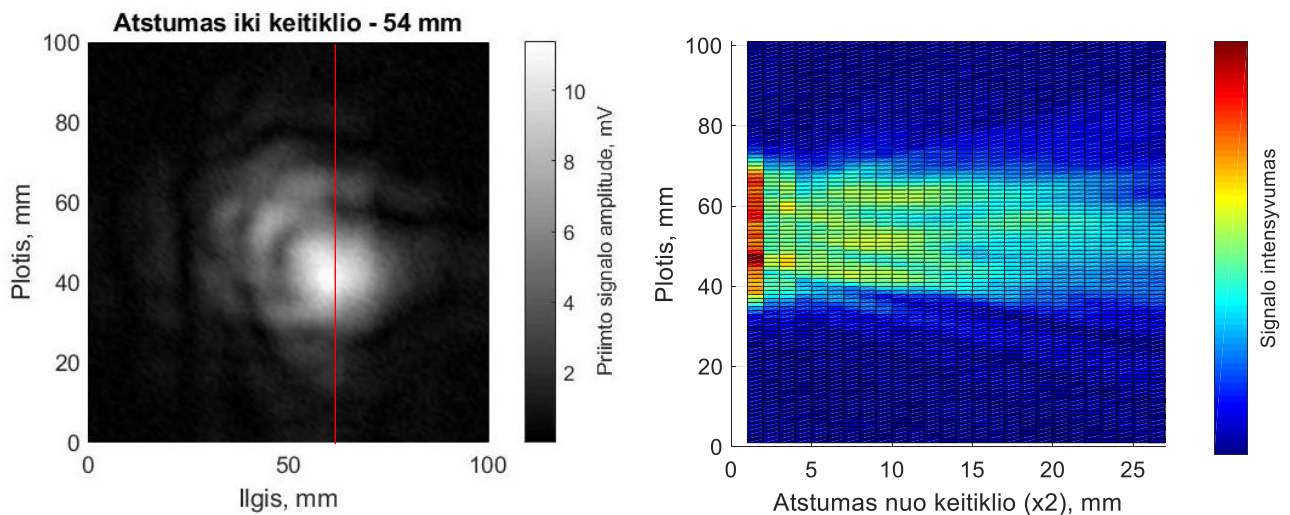
Ašinio pjūvio pagalba galima matyti akustinių bangų formavimąsi erdvėje. Pastebimas aktyvaus elemento, bei „neaktyvaus“ keitiklio elemento kuriamas akustinių bangų laukas. Aktyvaus elemento kuriamas akustinių bangų srautas yra statmenas keitiklio plokštumai.

Atlikta keturių aktyvių elementų ultragarsinio keitiklio analizė, kai visi keitiklio elementai buvo žadinami vienu metu. Gauti duomenys paviršiaus plokštumoje pateikti (44 pav.).



44 pav. Akustinių bangų intensyvumas esant skirtingiems atstumams nuo 4 elementų keitiklio kai žadinami visi keitiklio elementai

Žadinant visus keitiklio elementus, pastebima, kad kuriamas akustinis laukas dėl akustinių bangų interferencijos fokusuojasi į vieną tašką. Kadangi akustinių bangų maksimumas susidaro ne centriniuose x ir y plokštumos pjūviuose z ašies atžvilgiu, pateikiamas (raudonos linijos) ašinis pjūvis ties susidarančiu akustiniu bangų maksimumu (45 pav.).



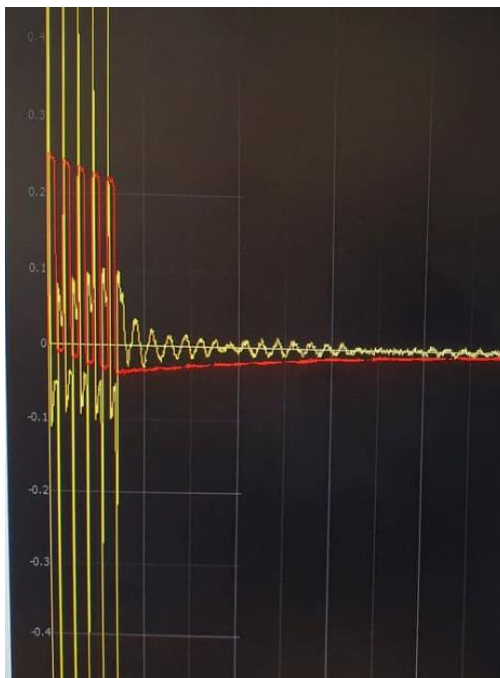
45 pav. Akustinių bangų intensyvumas plokštumoje – kairėje, normuotos amplitudės akustinių bangų intensyvumas pasirinktame erdvės pjūvyje, tolstant nuo keitiklio – dešinėje.

Valdant kelių aktyvių elementų ultragarsinius akustinius keitikius, galima formuoti akustinių bangų spinduliavimo kryptingumą pasirinkta kryptimi. Svarbiausias faktorius norint valdyti kelių akustinių keitiklių kryptingumą – signalo fazės poslinkis. Paslinkta signalo fazė sąlygoja kurioje erdvės vietoje susidarys akustinių bangų maksimumai ir minimumai.

Lyginant tarpusavyje vieno aktyvaus elemento ultragarsinius keitikius galima matyti, kad tolygiausiai ir tiksliausiai per centra kryptingumą formuoja ultragarsinis keitiklis su varine folija. Keitiklis su cianoakrilato kljais neturi aiškiai suformuoto vieno spindulio dėl cianoakrilato kljų, kurie įsigėrę į feroelektretinę plėvelę pakeitė plėvelės fizikines savybes. Keitiklis su laidžia tekstile parodo, kad galima feroelektretinę plėvelę pritaikius prie specifinio paviršiaus turėti norimą akustinių bangų kryptingumą.

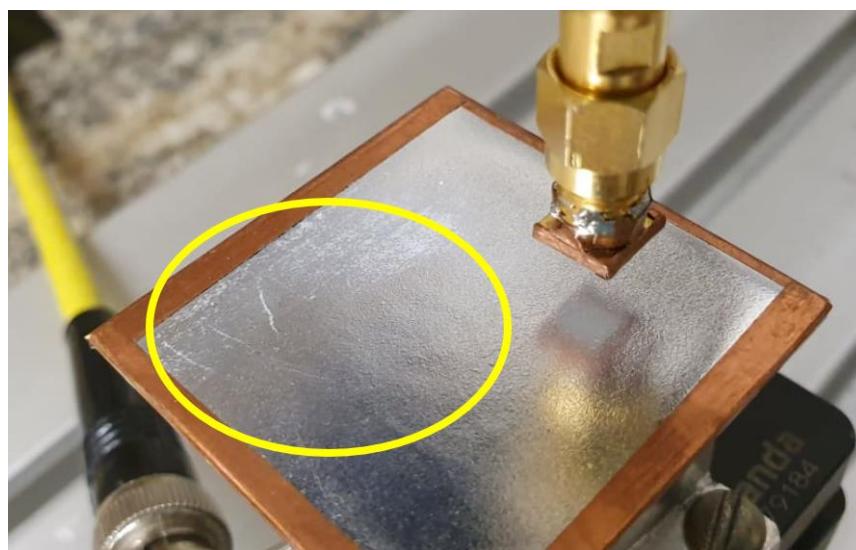
3.1.5. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių defektai

Keitikliams, kaip ir visiems kitiems elektros bei elektronikos prietaisams, galioja elektromagnetinio suderinamumo standartai. Ultragarsiniams keitikliams gana svarbus faktorius yra įžeminimas. Ultragarsinių keitiklių struktūra dažniausiai projektuojama taip, kad visas keitiklio korpusas būtų įžemintas. Teoriškai, gerai ekranuotas keitiklis elektrinio triukšmo neturėtų nei spinduliuoti, nei priimti. Tyrimų metu pastebėtos anomalijos. Skenuojant bandinį, imtuvo linijoje – matomos aukštos amplitudės triukšmo impulsų vertės (46 pav.).



46 pav. Signalas imtuvo linijoje – geltona spalva, impulsų formuotuvo signalas – raudona spalva

Pastebėta, kad didelės amplitudės elektrinio signalo triukšmai pastebimi mikrofonui esant arti ultragarsinio keitiklio. Analizuojant tyrimų sistemos elementus, pastebėti keitiklio paviršiuje esantys spalvos pakitimai (47 pav.).

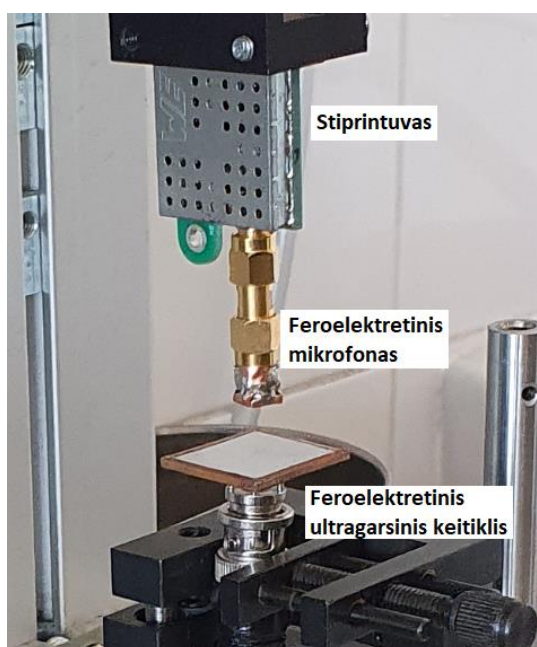


47 pav. Keitiklio paviršiaus defektai

Apžiūrėjus keitiklio paviršių detaliau, matomos nusitrynusios aliuminio folijos žymės. Pažeistas paviršius reiškia, kad tose vietose nebėra ekranavimo. Nusitrynusios vietos tampa ne tik elektromagnetinių bangų spinduliavimo šaltiniu, bet ir elektromagnetinio triukšmo priėmimo vietomis. Tiriant ultragarsinius keitikius, keitikliai yra žadinami aukšta įtampa. Esant aukštai pulsuojančiai įtampai, vietose kur nėra ekranavimo, pradedami spinduliuoti elektrinio lauko impulsai, kurie tiesiogiai indukuojasi į šalia esančio mikrofono signalines linijas. Norint užtikrinti maksimaliai „tylų“ (nospinduliuojantį) keitiklį – reikia saugoti keitiklio paviršių, kad jis nepasižeistų.

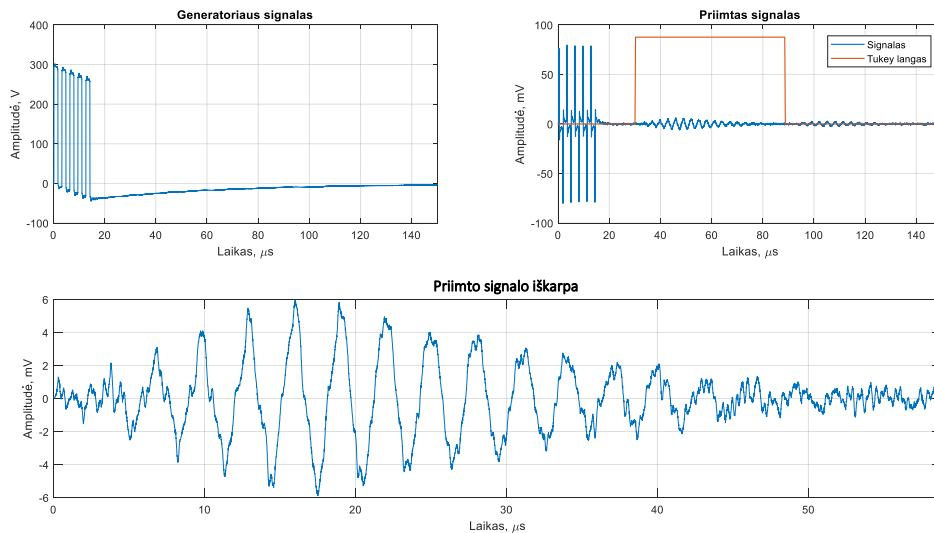
3.1.6. Feroelektretinių ultragarsinių keitiklių jautrumas

Feroelektretiniams ultragarsiniams keitikliams yra būdinga netiesinė akustinių bangų spinduliavimo efektyvumo priklausomybė nuo žadinimo įtampos. Netiesiškumas atsiranda dėl feroelektretinio keitiklio polipropileno medžiagos elektrostrikcinio efekto [16]. Siekiant ištirti feroelektretinio ultragarsinio keitiklio akustinių bangų spinduliavimo savybes, panaudota (30 pav.) tyrimų sistemos struktūra, kurios fragmentas pavaizduotas (48 pav.)

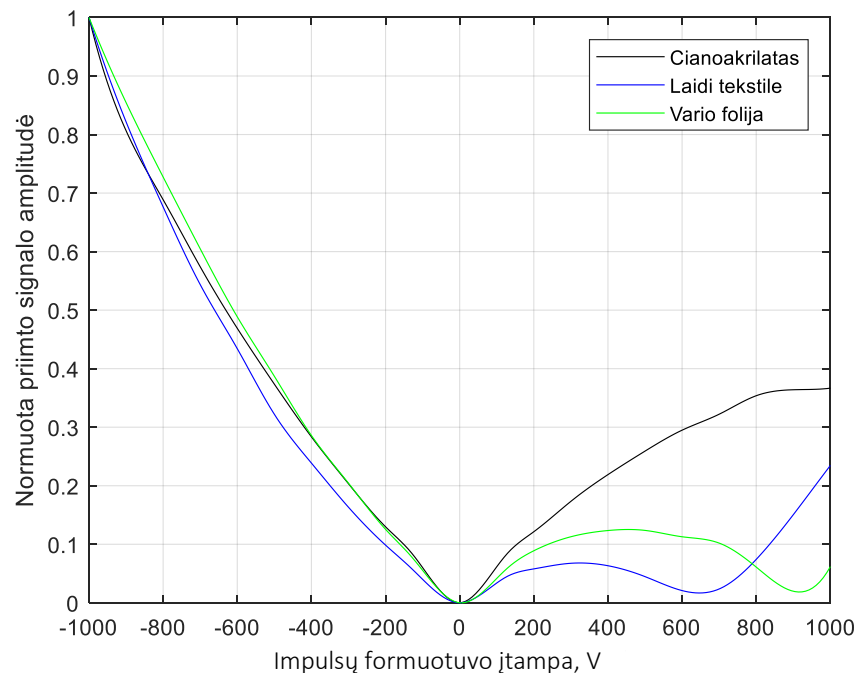


48 pav. Ultragarsinio keitiklio įtampų testas

Feroelektretinio ultragarsinio keitiklio įtampų tyrimas atliktas su trijų technologijų gamybos ultragarsiniais keitikliais. Atstumas tarp keitiklio ir mikrofono padarytas 10 mm, o keitiklis žadinamas 5 impulsų seka, kurios dažnis yra 320 kHz. Tyrimo metu buvo ištirta įtampų riba nuo -1000 V iki +1000 V. Pirmo atspindžio išsikirpimui panaudota lango funkcija, o signalo amplitudės radimui – sinusinės bangos koreliacija. Matavimo duomenų apdorojimas pateikiamas (49 pav.), o apdoroti gauti duomenys (50 pav.).



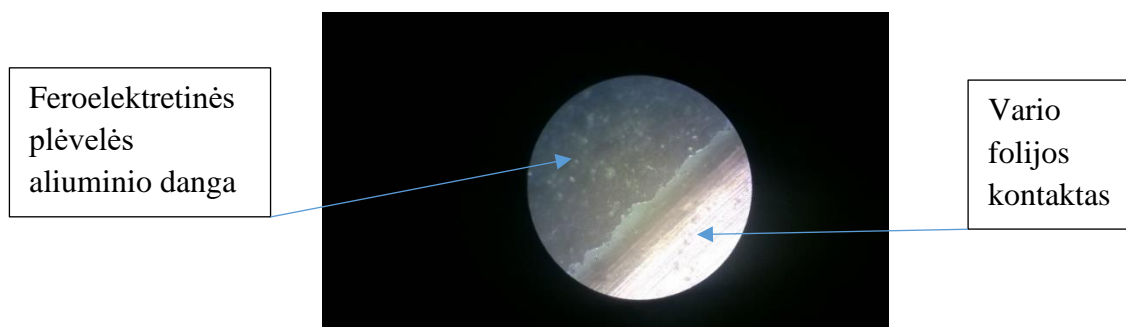
49 pav. Ultragarsinio keitiklio su laidžia tekstile žadinimas 300 V amplitudės įtampa



50 pav. Ultragarsinio keitiklio su laidžia tekstile žadinimas 300 V amplitudės įtampa

Ištyrus ultragarsinius keitiklius matoma, kad keitiklius žadinant neigiamo poliarumo impulsais išspinduliuoto signalo intensyvumas auga kvadratinio dėsnio, o žadinant teigiamo poliarumo impulsais – pastebimas pjezoelektrinio ir elektrostrikinio efektų fenomenas. Gautos priklausomybės parodo, kad keitiklyje su laidžia tekstile pjezoeftas pasireiškia mažiausiai. Keitiklį su laidžia tekstile žadinant teigiamos amplitudės impulsais, pjezoelektrinio ir elektrostrikinio efektų sąveika pasireiškia anksčiau, nei kituose keitikliuose. Skirtingas pjezoelektrinio efekto intensyvumas grindžiamas skirtinga keitiklių konstrukcija. Spėjama, kad tarpinė medžiaga (vario folija, arba laidži tekstilė) amortizuoja, taip sušvelnindama pjezoelektrinio efekto poveikį. Kadangi ultragarsinis keitiklis su cianoakrilato klijais neturi jokios tarpinės tarp feroelektretinės plėvelės ir stiklo tekstolito plokštės, pjezoelektrinis efektas pasireiškia labiausiai.

Tyrimo metu į cianoakrilato klėjais suklijuotą ultragarsinį keitiklį padavus 1100 V amplitudės impulsus, nudegė keitiklio paviršiuje esanti aliuminio plėvelė (51 pav.).



51 pav. Pažeisto feroelektretinio keitiklio vaizdas per mikroskopą

Nuotraukoje galima matyti kontakto nebūvimą tarp varinės folijos ir feroelektretinės plėvelės kontakto. Ši vieta nudegė generuojant aukštos įtampos impulsus. Žemas keitiklio atsparumas aukštai įtampai galėjo būti sąlygotas mechaninio surinkimo metu pažeidus keitiklio paviršių (nutrynus dalį kontakto). Feroelektretinės plėvelės paviršiuje esanti aliuminio folija yra labai plono sluoksnio ir lengvai pažeidžiama ją liečiant rankomis. Siekiant išvengti feroelektretinės plėvelės paviršiaus pažeidimo, keitikliai turi būti gaminami labai atsargiai. Bet kokie plėvelės folijos pažeidimai turės neigiamos įtakos keitiklio darbinių įtampų ruožui bei ekranavimo savybėms.

Išvados

1. Feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai pasižymi žemu akustiniu impedansu, todėl yra pritaikyti darbui oro aplinkoje. Feroelektretiniai ultragarsiniai keitikliai dirba žemuose dažniuose (50 – 600 kHz), todėl tinka mažesnio tankio medžiagoms skenuoti.
2. Parengta tyrimu sistema su kuria galima valdyti ultragarsinius keitikius iki 2 kV įtampos amplitudės. Žadinant keitiklį aukštos įtampos impulsais – gaunamas didelis keitiklio jautrumas, kuris, nepaisant pjezoelektrinio ir elektrostrikinio efektų fenomenų, kinta kvadratinio dėsnio.
3. Parengtas feroelektretinis mikrofonas, kurio pagalba galima fiksuoti feroelektretinių ultragarsinių keitiklių kuriamas akustines bangas.
4. Pasiūlytas BVD matematinis keitiklio modelis. Apskaičiuotos BVD ultragarsinio keitiklio matematinio modelio vertės leidžia charakterizuoti keitiklio impedansą.
5. Nustatyta, kad pažeidus feroelektretinio keitiklio metalizuotą paviršių (ekranavimą), keitiklis tampa elektrinio triukšmo spinduliavimo šaltiniu.
6. Parengtų ultragarsinių keitiklių jautrumo charakteristika priklauso nuo klijuojančios medžiagos intarpo. Keitikius žadinant teigiamo poliarumo impulsais, amortizuojanti tarpinė medžiaga sumažina pjezoelektrinio efekto poveikį. Keitikliuose su intarpu elektrostrikinis efektas pradeda dominuoti anksčiau, nei keitikliuose be intarpo.
7. Nustatyta, kad feroelektretinių ultragarsinių keitiklių kuriamas akustinių bangų pasiskirstymas erdvėje priklauso nuo keitiklio paviršiaus struktūros. Taip pat, nustatyta, kad žadinant kelis ultragarsinius keitikius vienu metu akustinės bangos interferuoja.

Literatūros sąrašas

1. Svilainis, Linas, & Puodžiūnas, V. (1998). Ultrasonic NDE system: The hardware concept. *Ultragarsas = Ultrasound*, (1), 34-40.
2. All about ultrasounds. Iš babycenter [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-10]. Prieiga per internetą: <https://www.babycenter.com/0_all-about-ultrasounds_329.bc>.
3. Ultrasonic Flaw Detection. Iš hiengr [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-10]. Prieiga per internetą: <http://www.hiengr.com/ultrasonic_flaw.html>.
4. Gautschi, G. Piezoelectric sensorics. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2002. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://books.google.lt/books?id=-nYFSLcmc-cC&pg=PA3&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>.
5. Svilainis, L., & Motiejūnas, G. (2006). Power amplifier for ultrasonic transducer excitation. *Ultragarsas*, (1), 30-36.
6. Rupitsch, S., Lerch, R., Strobel, J., & Streicher, A. (2011). Ultrasound transducers based on ferroelectret materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(1), 69-80.
7. E. Jasiūnienė. *Ultragarsinė medžiagotyra*. Vitae Litera, Kaunas, 2007.
8. McIntosh, R., Mauger, P., & Patterson, S. (2006). Capacitive transducers with curved electrodes. *IEEE Sensors Journal*, 6(1), 125-138.
9. Huang, X., Saniie, J., Bakhtiari, S., & Heifetz, A. (2018). Applying EMAT for Ultrasonic Communication Through Steel Plates and Pipes. 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 2018, 0379-0383.
10. T. E. Gómez Álvarez-Arenas and L. Díez, "Ferroelectret transducers for water immersion and medical imaging," 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Tours, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728532.
11. Abolfazl Mohebbi Frej Mighri Abdellah Ajji Denis Rodrigue. Cellular Polymer Ferroelectret: A Review on Their Development and Their Piezoelectric Properties. Iš Onlinelibrary [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2018-12-10]. Prieiga per internetą: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adv.21686>>.
12. Chaziachmetovas, A., Gomez Alvarez-Arenas, T., & Svilainis, L. (2017). Comparison of direct and transformer drive high voltage ultrasonic pulser topologies. 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2, 1111-1116.
13. Svilainis, L., Dumbrava, Chaziachmetovas, & Aleksandrovas. (2012). Pulser for arbitrary width and position square pulse trains generation. 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, 1-4.
14. Carpi, F. (2016). *Electromechanically Active Polymers: A Concise Reference*. (Polymers and Polymeric Composites: a Reference Ser).
15. L. Svilainis, V. Dumbrava, □Amplitude and phase measurement in acquisition systems, □ *Matavimai*, 2006, vol.38, pp.21-25.
16. V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, M. Gaal, A. Erhard, M. Kreuzbruck, Y. Yakymenko, "Enhanced electromechanical response of ferroelectret ultrasonic transducers under high voltage excitation," *Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics*, vol. 112, no. 2, pp. 97-102, 2013.

17. Jurkonis, R, Marozas, V, & Kurapkienė, Skaidra. (2007). Development and evaluation of virtual instrument to supplement ultrasonic echoscope system for ophthalmology. *Ultragarsas*, (1), 12-17.
18. Zeng Fan, John Rudlin, Giorgos Asfis, & Hongying Meng. (2019). Convolution of Barker and Golay Codes for Low Voltage Ultrasonic Testing. *Technologies*, 7(4), 72.
19. Svilainis, Linas, Chaziachmetovas, Andrius, & Dumbrava, Vytautas. (2015). Half bridge topology 500V pulser for ultrasonic transducer excitation. *Ultrasonics*, 59, 79-85.
20. Bovtun, V., Döring, Bartusch, Gaal, Erhard, Kreutzbruck, & Yakymenko. (2013). Enhanced electromechanical response of ferroelectret ultrasonic transducers under high voltage excitation. *Advances in Applied Ceramics: Piezoelectric Materials for End Users*, 112(2), 97-102.
21. Jimenez Martin, A., Hernandez Alonso, A., Ruiz, D., Gude, I., De Marziani, C., Perez, M., . . . Urena, J. (2015). EMFi-Based Ultrasonic Sensory Array for 3D Localization of Reflectors Using Positioning Algorithms. *IEEE Sensors Journal*, 15(5), 2951-2962.