

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

JUSTINA ŠEŠTOKĖ

**PMN–32%PT PJEZOELEKTRINIŲ KRISTALŲ TYRIMAS IR JŲ  
TAIKYMAS ULTRAGARSINIAMS ORINIAMS KEITIKLIAMS  
BEI DAUGIAELEMENTĖMS GARDELĖMS**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, Matavimų inžinerija (10T)

2016, Kaunas

Disertacija rengta 2012-2016 metais Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute.

**Mokslinis vadovas:**

Prof. habil. dr. Rymantas Jonas KAŽYS (Kauno technologijos universitetas, Technologijos mokslai, Matavimų inžinerija, 10T).

**Matavimų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

Prof. habil. dr. Arūnas LUKOŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija, 01T) – **pirmininkas**;

Prof. habil. dr. Tamara KUJAWSKA (Lenkijos mokslų akademijos Fundamentinių technologijos tyrimų institutas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, 10T);

Prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T);

Prof. Dr. Liudas MAŽEIKA (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, 10T);

Dr. Egidijus ŽUKAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, 10T).

Disertacija bus ginama viešame matavimų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2016 m. gruodžio 15 d. 11 val. Kauno technologijos universiteto centrinių rūmų disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt).

Disertacijos santrauka išsiųsta 2016 m. lapkričio 15 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

## IVADAS

Nekontaktinis matavimo metodas yra taikomas neardomųjų bandymų medžiagų charakteristikoms matuoti per orą. Pagrindinė problema yra ultragarsinių signalų slopinimas dėl skirtingų akustinių varžų tarp ultragarsinio keitiklio ir oro. Ją išspręsti galima naudojant suderinimo sluoksnį, kurio akustinis impedansas yra mažesnis už pjezoelektrinių keramikų. Tam galima panaudoti 1–3 tipo kompozitines medžiagas su maža akustine varža.

Naujų pjezoelektrinių medžiagų su labai stipriu pjezoelektriniu efektu, tokių kaip švino magnio niobato-švino titanatas (angl. *lead magnesium niobate-lead titanate*) [ $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN–32%PT)] kristalai, gali pagerinti ultragarsinių keitiklių efektyvumą. PMN–32%PT kristalų elektromechaniniai ryšio koeficientai yra labai dideli. Storio išsiplėtimo modos elektromechaninio ryšio koeficientas  $k_{33} > 0,90$ , skersinės šlyties modos –  $k_{15} > 0,95$  ir skersinės išsiplėtimo modos –  $k_{32} > (0,84\text{--}0,90)$ . Šie parametrai yra geresni negu pjezoelektrinės keramikos, kuri naudojama ultragarso keitikliuose. PMN–32%PT kristalų savybės gali būti pagerintos naudojant domenų inžineriją.

PMN–32%PT kristalai yra naudojami aukšto dažnio ultragarsinėse fazuotose gardelėse, kurios yra pritaikytos medicinoje; ultragarso keitikliuose, kurie skirti neardomųjų bandymų metodų medžiagų parametrams nustatyti ir ultragarsiniuose hidrofonuose. Atlikti ultragarsinių keitiklių matavimai per oro tarpą, panaudojant PMN–32%PT kristalus yra aprašyti mūsų darbuose (angl. „Application of PMN-32%PT piezoelectric crystals for novel air-coupled ultrasonic transducers“ ir „Development of Air-Coupled Low Frequency Ultrasonic Transducers and Arrays with PMN-32%PT Piezoelectric Crystals“).

Mūsų žiniomis, PMN–32%PT pjezoelektrinių elementų panaudojimas ultragarsiniuose oriniuose keitikliuose ir gardelėse dar nėra išsamiai išnagrinėtas.

### Tikslas ir uždaviniai

Pagrindinis disertacijos tikslas – išanalizuoti bei sukurti PMN–PT kristalų pjezoelektrinių savybių matavimo metodus poliarizacijos proceso metu ir pritaikyti šiuos kristalus ultragarsiniams oriniams keitikliams bei gardelėms matavimams per oro tarpą atlikti. Tikslui pasiekti buvo suformuluoti šie uždaviniai.

1. Išanalizuoti PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų savybes ir jų matavimo metodus.
2. Sukurti domenų struktūros ir pjezoelektrinių koeficientų matavimo metodą poliarizacijos proceso metu.
3. Atlikti teorinį ir eksperimentinį PMN–32%PT kristalų elementų virpesių tyrimą.
4. Sukurti plačiajuosčius ultragarsinius orinius keitiklius ir gardeles.

## **Mokslinis naujumas**

1. Buvo pasiūlytas ir sėkmingai įgyvendintas naujas matavimo metodas PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų koeficientų ir domenų struktūros stebėjimui poliarizacijos proceso metu.
2. Atliktas PMN–32%PT kristalų virpesių nusistovėjusiame ir pereinamajame režimuose tyrimas skaitmeninio modeliavimo ir eksperimentiniais metodais. Sukurtas ir ištirtas ultragarsinis orinis keitiklis ir fazuota gardelė, veikiantys žemųjų dažnių diapazone siuntimo ir priėmimo režimais.
3. Parinktos virpesių modos ir atliktas PMN–32%PT kristalų geometrijos optimizavimas ultragarsiniams oriniams keitikliams bei gardelėms.

## **Rezultatų apibavimas**

Doktorantūros studijų metu mokslinių tyrimų rezultatai buvo paskelbti 7 moksliniuose straipsniuose: 5 straipsniai išspausdinti leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinį sąrašą, 1 straipsnis paskelbtas tarptautiniame duomenų bazės leidinyje bei 1 straipsnis išspausdintas recenzuojamame mokslo leidinyje. Tarptautinėse mokslinėse konferencijose perskaityti 7 pranešimai. Pristatomo darbo dalys buvo panaudotos ir aprašytos Šveicarijos bei Lietuvos projekte, kuriame dalyvavo Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas.

## **Ginamieji teiginiai**

1. PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų plokštelių su  $\langle 011 \rangle$  bei  $\langle 001 \rangle$  pjūviais ir domenų struktūros pjezoelektrinių koeficientų stebėjimas poliarizacijos proceso metu buvo sėkmingai įgyvendintas ir nustatyta matavimo metodo neapibrėžtis.
2. Optiniai kristalų vaizdai bei elektromechaninio ryšio koeficientai skirtingais laiko momentais parodė, kaip keičiasi domenų struktūra ir PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų savybės poliarizacijos proceso metu.
3. PMN–32%PT pjezoelektriniai kristalai, turintys aukštą elektromechaninio ryšio koeficientą skersinėje išsiplėtimo modyje, buvo pasiūlyti ultragarsiniams oriniams keitikliams.
4. Fizikinių procesų modeliavimas taikant baigtinių elementų metodą ir atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad sukurtas ultragarsinis orinis keitiklis yra keletą kartų efektyvesnis nei panašios geometrijos PZ-29 ultragarsinis keitiklis.
5. Gauti akustinių laukų, spinduliuojamų į orą, daugiaelementės gardelės tyrimų rezultatai.

## **Disertacijos struktūra ir apimtis**

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados, tolesnių tyrimų kryptys, literatūros sąrašas ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas. Darbo apimtis – 124 puslapiai, kuriuose pateikiami 96 paveiksai, 14 lentelių, 109 matematinės išraiškos ir 123 pavadinimų literatūros sąrašas.

Įvade supažindinama su problemos aktualumu, iškeliami mokslinių tyrimų tikslai ir uždaviniai, įvardijamas mokslinis naujumas, rezultatų aprobavimas, darbo praktinė vertė bei ginamieji teiginiai. Pirmame skyriuje nagrinėjami ultragarsiniai keitikliai, jų panaudojimas ir PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų savybės, virpesių modos bei pjezoelektrinių savybių matavimo metodai. Antrame skyriuje pateikiamas domenų struktūros ir PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų savybių matavimo metodas poliarizacijos proceso metu. Trečiame skyriuje – PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų pritaikymas ultragarsiniams oriniams keitikliams. Atliktas modeliavimas naudojant ANSYS sistemos paketą ir matavimai taikant dažninį bei lazerinį interferometro metodus. Ketvirtame skyriuje pateikiamas ultragarsinės oro gardelės tyrimas ir mechaninio poslinkio bei akustinio slėgio priklausomybės nuo dažnio. Pristatomi akustinių laukų, spinduliuojamų į orą, modeliavimo ir matavimo rezultatai. Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateiktos išvados.

Darbo pabaigoje pateikiamos atliktų teorinių bei eksperimentinių tyrimų išvados, tolesnių tyrimų kryptys, naudotos literatūros sąrašas ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas.

## **1. ULTRAGARSINIAI ORINIAI KEITIKLIAI IR PMN–PT PJEZOELEKTRINIŲ KRISTALŲ SAVYBĖS**

Per pastaruosius du dešimtmečius pasiekta nemaža pažanga ultragarsinių orinių pjezoelektrinių, pjezokeraminių, elektrostatinių keitiklių technologijoje. Pagrindinis ir svarbiausias ultragarsinių orinių keitiklių privalumas yra galimybė atlikti matavimus nekontaktiniu metodu. Naudojant orinius keitiklius galima greitai ir efektyviai atlikti neardomųjų medžiagų analizę įvairiose konstrukcijose. Dėl šios priežasties jie yra labai paklausūs aviacijos pramonėje. Modernūs laineriai, kuriems būtinas ypatingas lengvumas, yra pagaminti iš kompozitinių medžiagų. Šios medžiagos yra stiprios, standžios, ilgamžės, atsparios korozijai ir lengvos. Ultragarsiniais oriniais keitikliais galima greitai ir efektyviai aptikti defektus kompozitinėse medžiagose.

Matavimus per orą labai apsunkina didelis akustinių impedansų skirtumas tarp keitiklio (30–35 MRayl) ir oro (0,445 MRayl). Dėl to atsiranda didelis ultragarsinių signalų slopinimas. Ši problema gali būti sprendžiama naudojant suderinimo sluoksnį ir PMN–32%PT pjezoelektrinius kristalus, kurių labai didelis elektromechaninio ryšio koeficientas, didelė dielektrinė konstanta bei maži dielektriniai nuostoliai, kurie pagerina ultragarsinių orinių keitiklių

efektyvumą. Tinkamai parinktos suderinimo sluoksnio medžiagos leidžia suderinti medžiagas, turinčias skirtingus akustinius impedansus.

PMN–PT kristalai su skirtingomis virpesių modomis gali būti pritaikyti ultragarsiniams oriniams keitikliams dėl gerų pjezoelektrinių savybių. Didžiausią elektromechaninio ryšio koeficientą turi PMN–32%PT pjezoelektriniai kristalai. Šie kristalai turi tris pagrindinius pjūvius  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  ir  $\langle 111 \rangle$ . Visi trys pjūviai gali būti poliarizuojami [001], [011] ir [111] kryptimis. Pjezoelektrinės, elastingės ir dielektrinės savybės gali būti išmatuojamos skirtingais matavimo metodais. Dažniausiai taikomi matavimo metodai yra dažninis, lazerinis interferometro ir kvazistatinis. Dažniniu matavimo metodu galima greitai ir tiksliai išmatuoti koeficientų reikšmes, prietaiso matavimo paklaida yra  $\pm 0,5\%$ . Dažninio matavimo metodo trūkumas tas, kad matavimai turi būti atlikti atsižvelgiant į keliamus reikalavimus bandinio geometrijai, kurie nurodyti Europos EN 50324 – 1:2002 ir pasaulio CEI/IEC 60483:1976 standartuose.

PMN–32%PT kristalų pjezoelektrinės savybės gali būti pagerintos taikant domenų inžineriją. Nėra žinomo matavimo metodo, kuris leistų stebėti bei fiksuoti vienu metu, kaip keičiasi domenų struktūra, ir išmatuoti kristalo pjezoelektrines savybes poliarizacijos proceso metu.

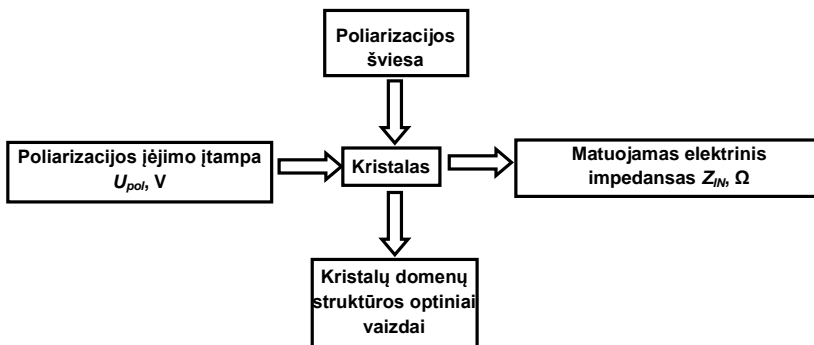
## **2. PMN–32%PT KRISTALŲ POLIARIZACIJOS PROCESO STEBĖJIMAS**

Geros PMN–32%PT pjezoelektrinės savybės gali padidinti ultragarsinių keitiklių efektyvumą. PMN–32%PT kristalai yra naudojami medicinos srities ultragarsiniuose keitikliuose. PMN–32%PT kristalų elektromechaninio ryšio koeficientas (0,90–0,96) yra pagerintas taikant domenų inžineriją. Šio skyriaus tikslas – sukurti naują matavimo metodą, kai drauge stebimi domenų struktūros vaizdai ir matuojamos pjezoelektrinės savybės poliarizacijos proceso metu. Tuo tikslu buvo pasiūlytas ir sukurtas naujas matavimo metodas PMN–32%PT kristalų poliarizacijos proceso stebėjimui.

### **Poliarizacijos proceso stebėjimas**

Šiam tyrimui buvo naudojamos stačiakampės  $\langle 011 \rangle$  pjūvio PMN–32%PT plokštelės su [011] poliarizacija pagrindine skersinės išsiplėtimo modos kryptimi. Kvadratinė PMN–32%PT kristalo plokštelė yra anizotropinė medžiaga, kitaip tariant,  $x$  (1) ir  $y$  (2) kryptimis pjezoelektrinės savybės yra skirtingos. PMN–32%PT kristalo plokštelė ( $10 \times 10 \times 0,2$ ) mm<sup>3</sup> buvo padengta skaidriais ITO elektrodais. Šie skaidrūs elektrodai naudojami norint gauti domenų struktūros vaizdą. PMN–32%PT kristalo plokštelė supjaustoma į 4 segmentus ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  ir  $D$ ), norint gauti 4 tiriamus bandinius. Visi segmentai buvo poliarizuoti ir ištirti. Poliarizacijos procesui buvo naudojamas įtampos šaltinis SRS PS350, elektrinio impedanso matavimui *Wayne Kerr* 65120B impedanso matuoklis,

optinių domenų struktūros vaizdų stebėjimui – *Olympus SZX16* mikroskopas (1 pav.).



**1 pav.** PMN–32%PT vieno kristalo polarizacijos procesas

Metodas yra pagrįstas nepertraukiamu matavimu polarizacijos proceso metu, kai kartu registruojamas kristalo domenų struktūros kitimas ir elektrinio impedanso priklausomybė nuo dažnio. Norėdami išvengti impedanso matuoklyje polarizavimo įtampos šuolių polarizacijos proceso metu, naudojame papildomus  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$  kondensatorius.

### Papildomų kondensatorių $C_{S1}$ , $C_{S2}$ įtaka ir matavimo paklaidos

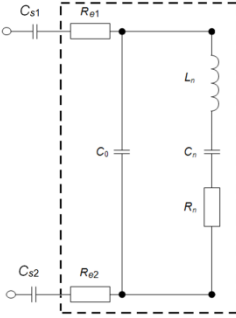
Įtampos šaltinis yra skirtas atlikti polarizacijos procesui. Kondensatoriai  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$  yra prijungti nuosekliai prie polarizuojamo kristalo, norint apsaugoti impedanso matuoklį nuo polarizacijos aukštosios įtampos. Matuojamas įėjimo elektrinis impedansas  $Z_{INm}$  susideda iš trijų impedansų:

$$Z_{INm} = Z_{CS1} + Z_{CS2} + Z_{IN}; \quad (1)$$

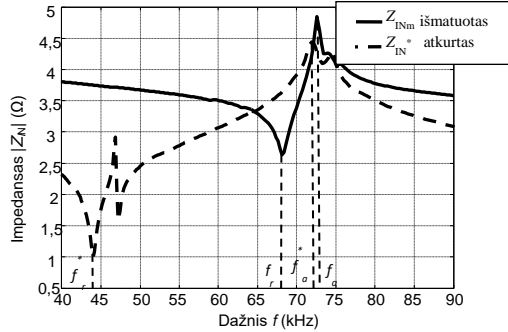
čia  $Z_{CS1}$  ir  $Z_{CS2}$  yra papildomų kondensatorių  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$  įėjimo elektriniai impedansai. Papildomi elementai matavimo grandinėje gali sukelti matavimo paklaidų. Pirmiausia ištyrėme papildomų kondensatorių įtaką vienai virpesių modai (2 pav.). Elektrinėje grandinėje naudojami kondensatoriai, kurių išmatuota talpa  $C_{S1} = 1502$  pF,  $C_{S2} = 984$  pF ir elektrodų varža  $R_{e1} = R_{e2} = 200$  Ω. Kadangi kondensatoriai yra prijungti nuosekliai, jų ekvivalentinis talpumas lygus  $C_S = 584$  pF. Įėjimo elektrinio impedanso  $Z_{IN}$  priklausomybė nuo dažnio, kai nuosekliai sujungtas tiriamasis kristalas ir kondensatoriai  $C_{S1}$  bei  $C_{S2}$ , polarizacijos proceso metu yra pavaizduota 3 pav. Atkurtas išmatuotas įėjimo impedansas  $Z_{IN}^*(j\omega)$  yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Z_{IN}^*(j\omega) = Z_{INm}(j\omega) - X_{CS}(j\omega); \quad (2)$$

$$X_{CS} = \frac{1}{j\omega C_S}; \quad (3)$$



**2 pav.** PMN–32%PT plokštelės plokštelės ekvivalentinė grandinė su papildomais kondensatoriais  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$



**3 pav.** Išmatuotas elektrinis jėjimo impedansas  $Z_{INm}$  – ištisinė linija, atkurtas impedansas  $Z_{IN}^*$  – brūkšninė linija polarizacijos proceso metu

čia  $Z_{INm}$  – išmatuotas jėjimo elektrinis impedansas su papildomais kondensatoriais  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$ ,  $\omega = 2\pi f$  yra kampinis dažnis. Iš elektrinio impedanso  $Z_{IN}^*$  yra nustatomi  $f_r^*$  ir  $f_a^*$  dažniai.

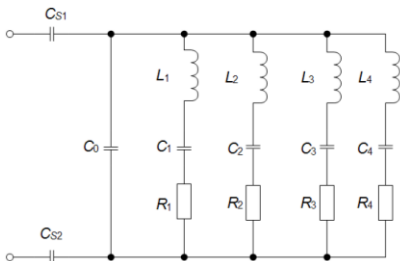
Elektromechaninio ryšio koeficientus galime apskaičiuoti iš išmatuoto rezonansinio ir antirezonansinio dažnio pagal formulę:

$$\frac{k_{3j}^2}{1 - k_{3j}^2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a - f_r}{f_r}\right); \quad (4)$$

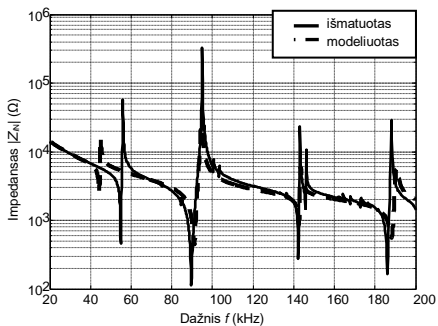
čia  $k_{3j}$  – elektromechaninis ryšio koeficientas  $x$  (1) ar  $y$  (2) kryptimi,  $j = 1, 2$  nurodytos krypties numeris,  $f_a$  – antirezonansinis dažnis,  $f_r$  – rezonansinis dažnis. Iš atkurto elektrinio jėjimo impedanso randami dažniai  $f_r^* = 43,91$  kHz,  $f_a^* = 71,79$  kHz ir elektromechaninis ryšio koeficientas lygus  $k_{32}^* = 0,89$ .

PMN–32%PT kristalo ( $15 \times 15 \times 1$ ) mm<sup>3</sup> su  $\langle 011 \rangle$  pjūviu ir  $[011]$  polarizacijos kryptimis, ekvivalentinė schema yra pavaizduota 4 pav. Kristalai yra standartiniai ir pagaminti „HC Materials Corporation“ (JAV). Išmatuoto jėjimo elektrinio impedanso priklausomybė nuo dažnio yra pavaizduota 5 pav. išsisine linija, o modeliuoto – brūkšnine linija.



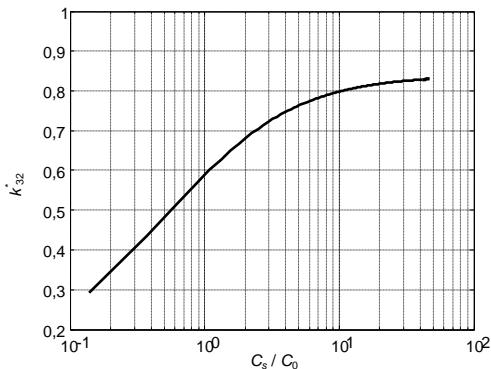


**4 pav.** PMN–32%PT plokštelės 4 modų ekvivalentinė grandinė su papildomais kondensatoriais  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$



**5 pav.** Pjzoelektrinio elemento 4 modų įėjimo impedansas su  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$  kondensatoriais. Ištininė linija – išmatuotas, brūkšninė – modeliuotas

Iš rezultatų galima daryti išvadą, kad PMN–32%PT kristalo plokštelės pasižymi labai stipriu pjzoelektriniu efektu. Elektrinėje grandinėje, kai yra daugiau nei viena moda, negaunamas atitikimas žemiausiai modai (4–5 pav.). Šiam nesutapimui turi įtakos papildomi kondensatoriai  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$ . Buvo atlikti skaičiavimai žemiausiai vienai virpesių modai, kai  $f_j=37,0$  kHz, ir gauti rezultatai rodo, kad norint gauti mažą  $k_{32}^*$  matavimo paklaidą papildomų kondensatorių talpa turėtų būti  $C_S = 200$  nF. Paskaičiuoto elektromechaninio ryšio koeficiento  $k_{32}^*$  priklausomybė nuo  $C_S/C_0$  yra pavaizduota 6 pav.

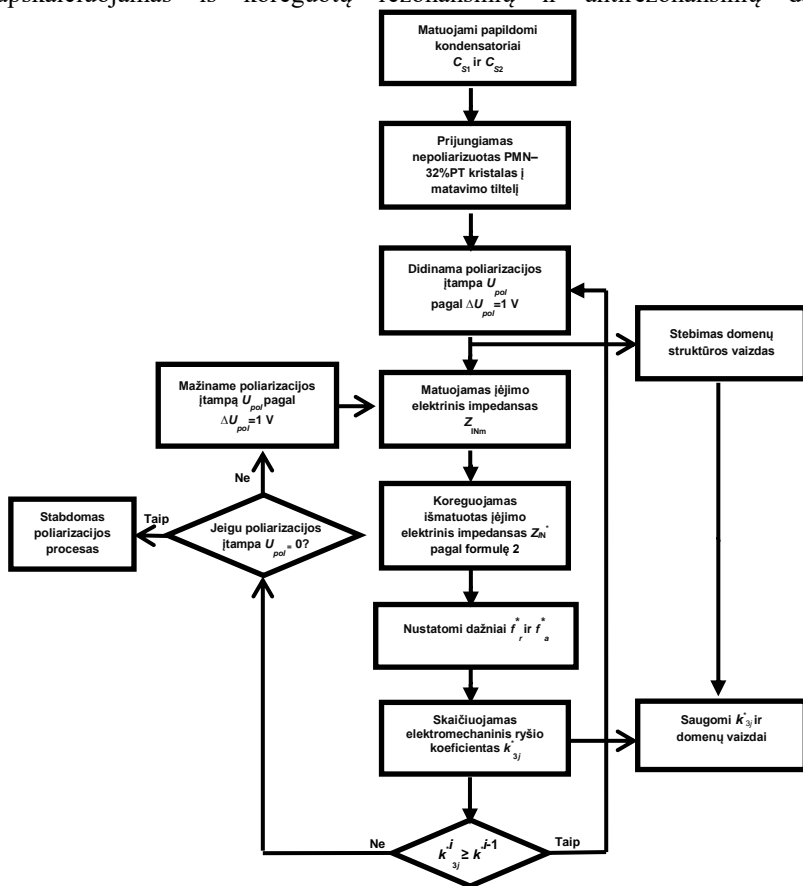


**6 pav.** Elektromechaninio ryšio koeficiento  $k_{32}^*$  priklausomybė nuo  $C_S/C_0$

Tokių kondensatorių, kai  $C_S=200$  nF, prijungti į matavimo grandinę negalima, dėl to turi būti atkurtas išmatuotasis įėjimo impedansas, taikant anksčiau minėtą procedūrą.

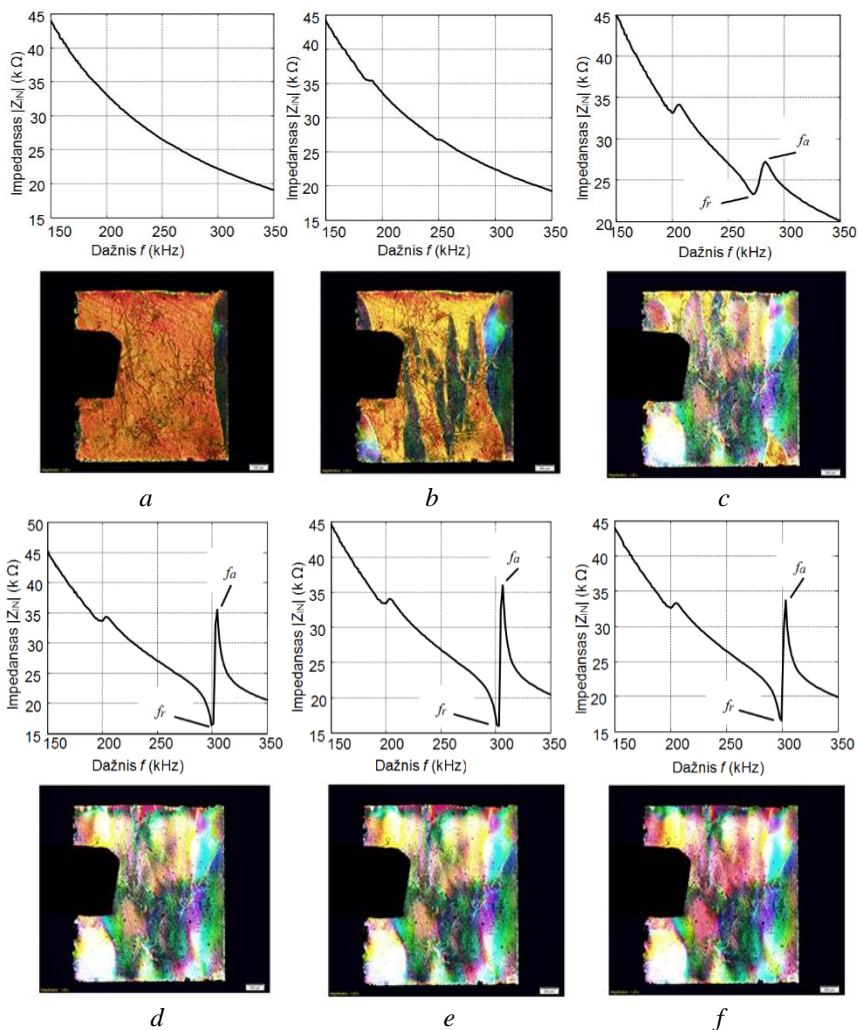
## Polarizacijos proceso rezultatai

Buvo tirtos nepolarizuotos ( $5 \times 5 \times 0,2$ ) mm<sup>3</sup> PMN–32%PT kristalų plokštelės su  $\langle 011 \rangle$  pjūviu ir  $[011]$  poliarizacija. Šios plokštelės padengtos skaidriais ITO elektrodais ir poliarizuotos. Įėjimo impedansas buvo matuojamas *Wayne Kerr* 65120B impedanso matuokliu, o optiniai vaizdai stebimi optiniu mikroskopu ir duomenys fiksuojami asmeniniu kompiuteriu. Šiuo metodu galima kontroliuoti domenų inžinerijos procesą. Poliarizacijos įtampa  $U_{pol}$  keičiama kas 1 V įtampos šaltiniu SRS PS350. Matavimo metodo algoritmas pavaizduotas 7 pav., kuriame  $i$  yra matavimų numeris. Elektromechaninio ryšio koeficientas apskaičiuojamas iš koreguotų rezonansinių ir antirezonansinių dažnių.



7 pav. Matavimo metodo algoritmas

Elektrinio įėjimo impedanso  $Z_{IN}$  priklausomybė nuo dažnio ir domenų struktūros kitimas polarizacijos proceso metu pavaizduoti 8 pav.



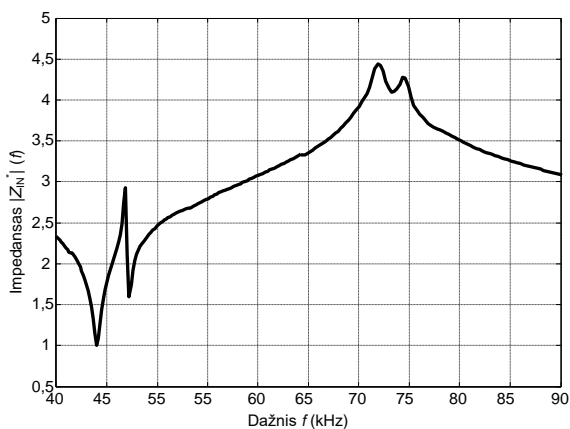
**8 pav.** Elektrinio įėjimo impedanso  $Z_{IN}$  priklausomybė nuo dažnio ir domenų struktūros kitimas polarizacijos proceso metu skirtingu laiko momentu: *a* –  $U_{pol} = 44$  V,  $\Delta t = 0$  min; *b* –  $U_{pol} = 44$  V,  $\Delta t = 2$  min; *c* –  $U_{pol} = 44$  V,  $\Delta t = 6$  min ( $f_r = 271,8$  kHz,  $f_a = 283,0$  kHz); *d* –  $U_{pol} = 44$  V,  $\Delta t = 8$  min ( $f_r = 299,8$  kHz,  $f_a = 305,0$  kHz); *e* –  $U_{pol} = 50$  V,  $\Delta t = 0$  min ( $f_r = 303,3$  kHz,  $f_a = 306,8$  kHz); *f* –  $U_{pol} = 0$  V,  $\Delta t = 0$  min ( $f_r = 299,8$  kHz,  $f_a = 303,3$  kHz)

Šiuo nauju metodu galima kontroliuoti domenų struktūrą, reguliuojant poliarizacijos procesą. Iš eksperimentinių rezultatų galima daryti išvadą, kad domenų struktūros nėra pastovios feroelektrikų medžiagoje. Domenų struktūros ir pjezoelektrinių savybių matavimas poliarizacijos proceso metu buvo pasiūlytas ir sėkmingai įgyvendintas.

### Matavimo metodo metrologinis įvertinimas

Elektromechaninio ryšio koeficiento matavimo neapibrėžčiai gali turėti įtakos keletas komponenčių: aplinkos temperatūra, elementų matavimo stendas, pavyzdžiui, talpumas, esantis tarp laidų, laidų induktyvumas. PMN–32%PT kristalų plokštelės buvo tirtos žemojo dažnio (>1 MHz) aplinkoje, ir dėl to šie veiksniai gali būti nevertinami. Tačiau elektromechaninio ryšio koeficiento matavimo neapibrėžčiai turi įtakos dvi pagrindinės komponentės: išmatuoti dažniai ir papildomi kondensatoriai  $C_{S1}$  bei  $C_{S2}$ . Papildomi kondensatoriai  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$  elektrinėje matavimo grandinėje sukelia matavimo paklaidas. Norint jų išvengti reikia atlikti korekciją įvertinant kondensatorių taką impedansui  $Z_{IN}$ . Korekcija yra atliekama pagal anksčiau minėtą procedūrą (formulė 3). Papildomi kondensatoriai  $C_{S1}$  ir  $C_{S2}$  yra prijungti nuosekliai, todėl jų išmatuotas ekvivalentinis talpumas yra lygus  $C_S = 584$  pF. Impedanso matuoklio *Wayne Kerr*, kuriuo buvo atlikti įėjimo impedanso matavimai, matavimo paklaida yra  $\pm 0,05$  %. Papildomų išmatuotų kondensatorių talpos standartinė neapibrėžtis yra  $u(C_S) = 584 \pm 2,92$  (0,5 %) pF.

PMN–32%PT kristalo plokštelės ( $13 \times 8 \times 1$ ) mm<sup>3</sup> su <011> pjūviu ir [011] poliarizacija, orientuoto y (2) kryptimi, įėjimo elektrinis impedansas  $Z_{IN}$  po atliktos korekcijos yra pavaizduotas 9 pav. Iš šios kreivės yra nustatomi  $f_r^*$  ir  $f_a^*$  dažniai.



9 pav. Įėjimo elektrinis impedansas atlikus korekciją

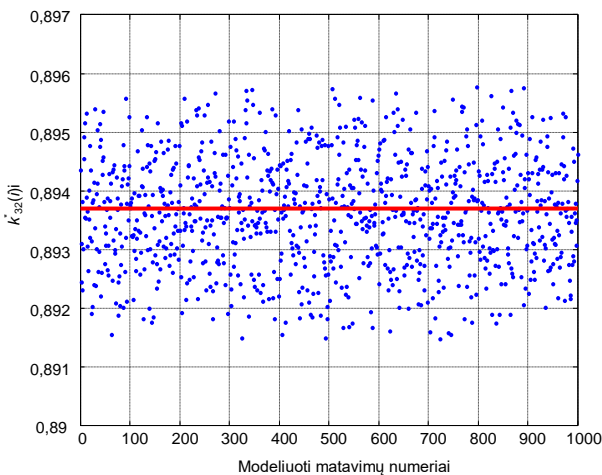
Paskaičiuojama dažnio funkcijos išvestinė, norint surasti dažnius per nulį. Atliekama dažnio funkcijos interpoliacija, kai dažnio žingsnis 1 Hz ir pasirenkamas slenkstis  $0,2 \cdot 10^{-3} [\Omega/\text{Hz}]$ , kurio ribose randamas rezonansinis  $f_r^* = 43,9127 \text{ kHz}$  ir antirezonansinis  $f_a^* = 71,7917 \text{ kHz}$  dažniai. Paskaičiuotas išmatuotas elektromechaninio ryšio koeficientas yra  $k_{32}^* = 0,89$ . Norint įvertinti dažnio matavimo neapibrėžties įtaką elektromechaninio ryšio koeficiento rezultatui, buvo atliktas modeliavimas *Matlab* aplinkoje, kurį pasitelkus randamas elektromechaninio ryšio koeficiento pasiskirstymas. Generuojami tolydžiai išsidėstę atsitiktiniai dydžiai intervale (0, 1). Generuojamas ciklų skaičius  $n = 1000$ . Paskaičiuojami nauji rezonansiniai  $\Delta f_r^*$  ir antirezonansiniai  $\Delta f_a^*$  dažniai. Su šiais dažniais yra paskaičiuojami nauji elektromechaninio ryšio koeficientai  $k_{32}^*(i)$ , kurių išsibarstymas pavaizduotas 10 pav.

Standartinė elektromechaninio ryšio koeficiento neapibrėžtis paskaičiuojama pagal formulę:

$$S(k_{32}^*) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (k_{32}^*(i))^2}, \quad (5)$$

$$u(k_{32}^*) = S(k_{32}^*). \quad (6)$$

Standartinė elektromechaninio ryšio koeficiento neapibrėžtis yra lygi  $u(k_{32}^*) = 0,89 \pm 0,0021$  (0,24 %).



**10 pav.** Elektromechaninio ryšio koeficiento  $k_{32}^*(i)$  priklausomybė nuo modeliuotų matavimų numerių

Suminė standartinė išėjimo dydžių neapibrėžtis esant nekoreliuotiems įėjimo įverčiams tokia. Kai įtakos koeficientai  $W_Q=W_S=W_T=W_D=1$ , galima paskaičiuoti suminę matavimo neapibrėžtį pagal 7 formulę, o išplėstinę matavimo neapibrėžtį – pagal 8 formulę:

$$u_{\sum k} = \sqrt{u(k_{32}^*)^2 + u(C_S)^2}, \quad (7)$$

$$U_k = k_s u_{\sum k}; \quad (8)$$

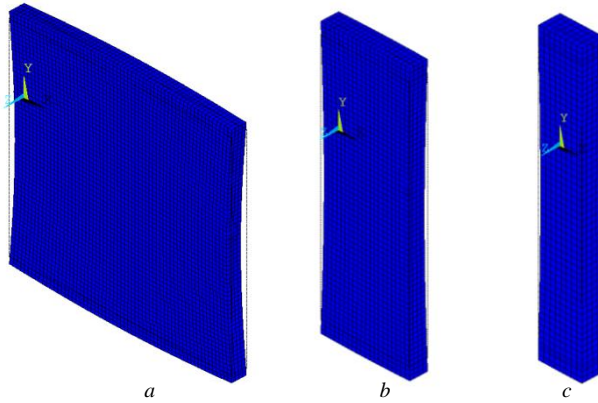
čia  $k_s$  yra vyraujančio pasiskirstymo dėsnio perdengimo koeficientas. Esant normaliniam sklaidos dėsniui, suminio sklaidos dėsnio koeficientas lygus  $k_s = 2$ . Tada suminė matavimo neapibrėžtis yra lygi  $u_{\sum k} = 0,55\%$ , o išplėstinė  $U_k = 1,1\%$ .

### 3. ORINIO KEITIKLIO SU PMN–32%PT PJEZOELEKTRINIAIS ELEMENTAIS TYRIMAS

Ultragarsiniai keitikliai yra plačiai naudojami medžiagų savybių nustatymui, charakterizavimui ir matavimui. Šio skyrelio tikslas – sukurti ultragarsinį oro keitiklį, veikiantį dažniais <100 kHz. Tam tikslui įgyvendinti naudojome PMN–32%PT ( $15 \times 15 \times 1$ ) mm<sup>3</sup> kristalus su <011> pjūviu ir [011] poliarizacija skersinės išsiplėtimo modos režime. Buvo sukurtas skaitmeninis keitiklio modelis taikant baigtinių elementų metodą (BEM). Ultragarsinių keitiklių eksperimentiniams tyrimams buvo atrinkti trys matavimų metodai: dažninis metodas, lazerinis interferometro metodas ir ultragarsinis akustinių laukų į orą matavimo metodas.

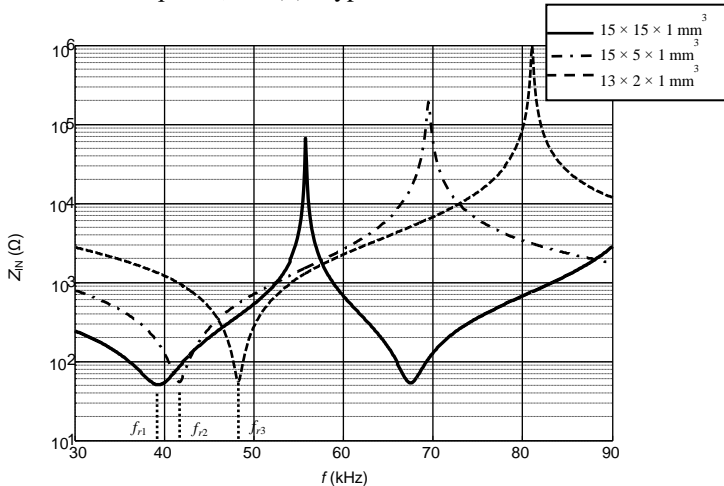
#### Skaitmeninis keitiklio modelis

Pjezoelementui modeliuoti naudojome ANSYS programinį paketą. Atliktas 3D baigtinių elementų modeliavimas su SOLID5 elementais. Pjezoelektrinių  $e_{ij}$  (C/m<sup>2</sup>), elastinių  $c_{ij}$  (N/m<sup>2</sup>) ir dielektrinių  $\epsilon_{ij}$  ( $\epsilon(\epsilon_0)$ ) savybių koeficientų reikšmės paimtos iš „HC Materials Corporation“ duomenų bazės, iš šios įmonės buvo ir pirkti PMN–32%PT kristalai. Kvadratinė plokštelė yra anizotropinė medžiaga, kai  $x$  (1) ir  $y$  (2) kryptimis pjezoelektrinės savybės yra skirtingos. Skaitmeninis elementas turi 8 mazgus su 4 laisvės laipsniais:  $x$  (1),  $y$  (2),  $z$  (3) kryptimis ir elektrine įtampa  $U$ , kai 1, 2, 3 yra krypties numeris. Parinkta sužadavimo įtampa  $U_{pp} = 1$  V. Buvo ištirti trijų skirtingų geometrijos PMN–32%PT kristalai:  $a$  – ( $15 \times 15 \times 1$ ) mm<sup>3</sup>,  $b$  – ( $15 \times 5 \times 1$ ) mm<sup>3</sup> ir  $c$  – ( $13 \times 2 \times 1$ ) mm<sup>3</sup>, remiantis Europos EN 50324 – 1“2002 ir Pasaulio CEI/IEC 60483:1976 standartais. Baigtinių elementų modelis yra pavaizduotas 11 pav.

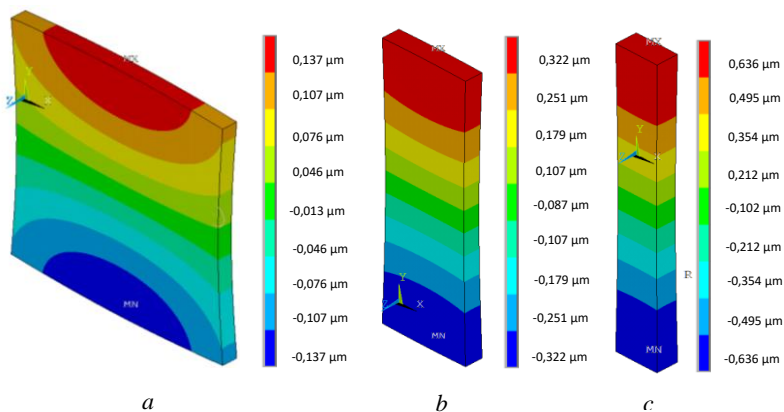


**11 pav.** Baigtinių elementų modelis ir nedeformuota elemento forma (ištisinė linija)

Kristalų elektrinio įėjimo impedansai pavaizduoti 12 pav., o erdviųjų mechaninių poslinkių pasiskirstymas PMN–32%PT paviršiuje – 13 pav. Spalvų skalės žymi mechaninių poslinkių amplitudes. Visi modeliuojami elementai yra orientuoti pagrindine skersinės išsiplėtimo modos režime, t. y.  $y$  (2) kryptimi. Šia kryptimi elementai išsiplėčia, o  $x$  (1) kryptimi traukiasi.



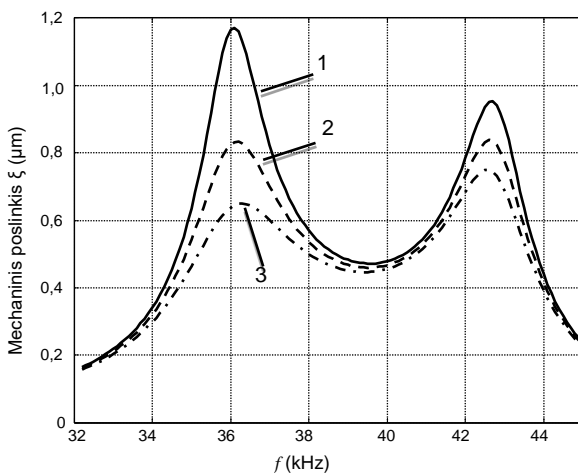
**12 pav.** PMN–32%PT kristalo elektrinis įėjimo impedansas. Ištisinė linija –  $(15 \times 15 \times 1) \text{ mm}^3$ ,  $f_{r1}=39,3 \text{ kHz}$ ; punktyrinė linija –  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$ ,  $f_{r2}=41,6 \text{ kHz}$ ; brūkšninė linija –  $(13 \times 2 \times 1) \text{ mm}^3$ ,  $f_{r3}=48,3 \text{ kHz}$



**13 pav.** Erdvinių mechaninių poslinkių pasiskirstymas PMN–32%PT paviršiuje:  
*a* –  $(15 \times 15 \times 1) \text{ mm}^3$ ; *b* –  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$ ; *c* –  $(13 \times 2 \times 1) \text{ mm}^3$

Mechaninių poslinkių vaizdavimas 13 pav. yra padidintas  $6 \times 10^4$ , siekiant parodyti PMN–32%PT kristalo mechaninius poslinkius.

Buvo parinktas koeficiento slopinimas  $\beta$  suderinimo sluoksnio medžiagai (14 pav.). Slopinimas paskaičiuotas kristalo dažnio diapazone  $f = (32 \div 48) \text{ kHz}$ .



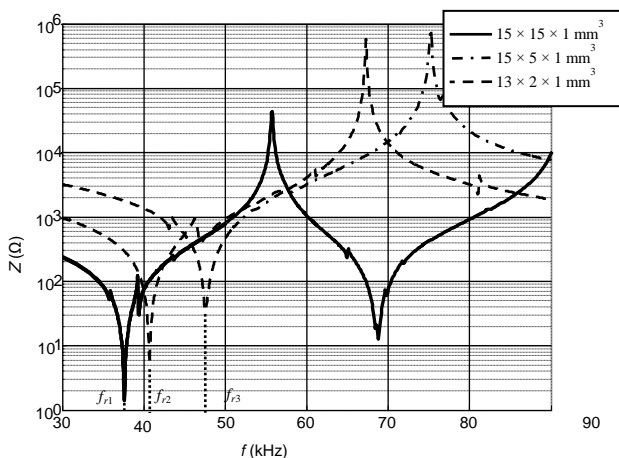
**14 pav.** Koeficiento slopinimas  $\beta$  suderinimo sluoksnio medžiagoje:  
 1 –  $2 \times 10^{-7}$ ; 2 –  $3 \times 10^{-7}$ ; 3 –  $4 \times 10^{-7}$



Remdamiesi modeliavimo ir matavimo rezultatais, tolimesniam skaitmeniniam modeliavimui naudojome suderinimo sluoksnio slopinimą  $\beta = 3 \times 10^{-7}$ . PMN–32%PT vieno kristalo su skirtingais matmenimis 3D erdvinių mechaninių poslinkių modeliavimas buvo sėkmingai įgyvendintas ir nustatyta, kad optimalus mechaninio poslinkio pasiskirstymas yra tada, kai kristalo geometrija  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$ .

### Pjezoelektrinių kristalų savybių matavimas

Matavimai buvo atlikti trimis skirtingais metodais naudojant tris skirtingus matavimo prietaisus: impedanso matuoklį *Wayne Kerr B6500*, lazerinį interferometrą *POLYTEC OFV 5000* bei ultragarsinę *ULTRALAB* matavimo sistemą, kuri pagaminta Ultragarso mokslo institute, KTU. Impedanso matuokliu išmatuoti PMN–32%PT elementų impedansai yra pavaizduoti 15 pav.



**15 pav.** Elektrinis įėjimo impedansas  $Z_{IN}$ :  $(15 \times 15 \times 1) \text{ mm}^3$ ,  $f_{r1}=37,5 \text{ kHz}$  – ištisinė linija;  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$ ,  $f_{r2}=40,7 \text{ kHz}$  – brūkšninė linija;  $(13 \times 2 \times 1) \text{ mm}^3$ ,  $f_{r3}=47,5 \text{ kHz}$  – punktyrinė linija

Taikant lazerinį interferometrą, kai interferometrą sudaro vibrometro valdiklis *POLYTEC OFV 5000*, vibrometro galvutė *OFV 505*, signalo generatorius *AFG 3051*, XY skeneris bei asmeninis kompiuteris, buvo atliktas mechaninio poslinkio priklausomybės nuo rezonansinio dažnio  $f_r$  matavimas bei erdvinių mechaninių poslinkių paskirstymas ant pjezoelemento paviršiaus. Buvo išmatuoti [001], [011], [111] poliarizacijų PMN–32%PT kristalai. Išmatuoti ir paskaičiuoti pjezoelektrinio, elastinio ir dielektrinio kristalų koeficientų parametrai. Iš visų atliktų matavimų buvo nustatyta efektyviausia [011] poliarizacijos kryptis bei skersinės išsiplėtimo (angl. *transverse extension TE*) modos režimas y (2) kryptimi. Pasiūlyta PMN–32%PT  $(15 \times 15 \times 1) \text{ mm}^3$

kristalą pjaustyti į tris dalis po  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$  norint pasiekti maksimalių mechaninių poslinkių. Visos šios rekomendacijos paremtos ne tik atliktais modeliavimo bei matavimo rezultatais, bet ir Europos EN 50324 – 1:2002 bei Pasaulio CEI/IEC 60483:1976 pjekokeramikų standartais. Matavimų rezultatai pateikti 1–3 lentelėse.

**1 lentelė.**  $(15 \times 15 \times 1) \text{ mm}^3$  PMN–32%PT plokštelės matavimų rezultatai

Plokštelės ( $15 \times 15 \times 1$ ) $\text{mm}^3$	Kryptis	Rezonansinis dažnis $f_r$ (kHz)	Transformacijos koeficientas $k_{3j}$ ( $\mu\text{m}/\text{V}$ )
1	y (2)	37,3	2,3
	x (1)	37,3	1,2
2	y (2)	37,5	2,2
	x (1)	37,5	1,1
3	y (2)	38,4	2,3
	x (1)	38,4	1,1

**2 lentelė.**  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$  PMN–32%PT juostelių matavimų rezultatai

Juostelės ( $15 \times 5 \times 1$ ) $\text{mm}^3$	Rezonansinis dažnis $f_r$ (kHz)	Transformacijos koeficientas $k_{32}$ ( $\mu\text{m}/\text{V}$ )
1	40,6	5,1
2	41,0	5,0
3	41,1	4,9

**3 lentelė.**  $(13 \times 2 \times 1) \text{ mm}^3$  PMN–32%PT strypelių matavimų rezultatai

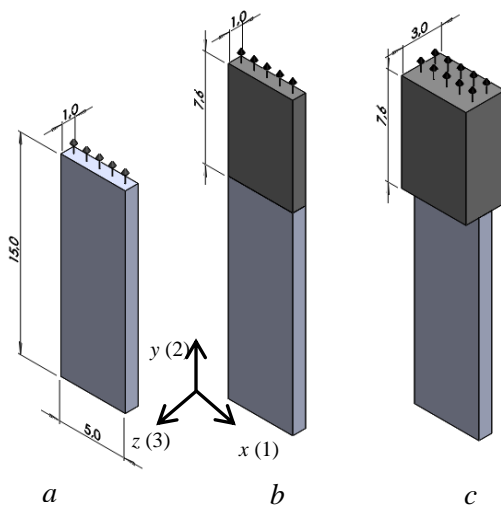
Strypeliai ( $13 \times 2 \times 1$ ) $\text{mm}^3$	Rezonansinis dažnis $f_r$ (kHz)	Transformacijos koeficientas $k_{32}$ ( $\mu\text{m}/\text{V}$ )
1	46,2	0,94
2	45,9	0,75
3	45,8	0,78

Iš gautų rezultatų matome, kad didžiausias transformacijos koeficientas  $k_{32}$  gaunamas, kai kristalo išmatavimai yra  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$ . Erdvinis mechaninis pasiskirstymas labiau netolygus  $(15 \times 15 \times 1) \text{ mm}^3$  PMN–32%PT plokštelėje nei siauresnių išmatavimų kaip  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$  ir  $(13 \times 2 \times 1) \text{ mm}^3$  elementuose.

Todėl tolimesniems tyrimams ir ultragarsinių oro keitiklių gamybai yra pasirenkami  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$  išmatavimų PMN–32%PT kristalai.

### Ultragarsinio orinio keitiklio akustinis suderinimo elementas

PMN–32%PT kristalų mechaninio poslinkio priklausomybė nuo dažnio buvo tirta teoriškai ir eksperimentiškai. Norėdami pasiekti tolygų mechaninių poslinkių pasiskirstymą aktyviame paviršiuje, naudojome  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$  geometrijos PMN–32%PT kristalus (16 pav.). Teorinė analizė buvo atlikta taikant baigtinių elementų modeliavimą ANSYS programa naudojant SOLID5 elementus su pjezoelektrinėmis savybėmis („HC Materials Corporation“ duomenų bazė). Norėdami pagerinti keitiklio charakteristikas, naudojome akustinį suderinimo elementą, kurio ilgis  $\lambda/4$ . Dviejų skirtingų storų  $w$  akustiniai suderinimo elementai, kai storis  $w = 1 \text{ mm}$  ir  $w = 3 \text{ mm}$ , pavaizduoti 16 b ir c pav.



**16 pav.** Ultragariniai oro keitikliai (strėliukės rodo spinduliavimo paviršius): *a* – vienas PMN–32%PT elementas; *b* – elementas su suderinimo elementu ( $w = 1 \text{ mm}$ ); *c* – elementas su suderinimo elementu ( $w = 3 \text{ mm}$ )

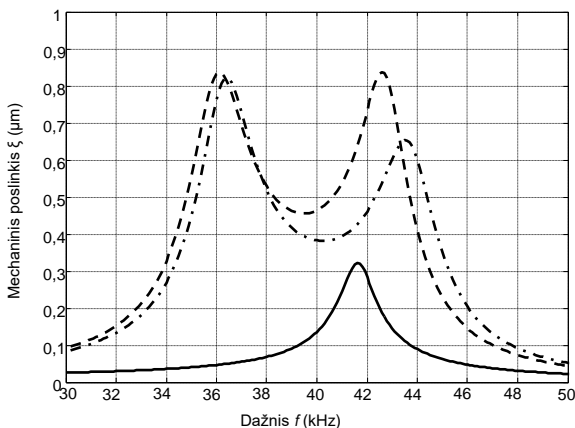
Nustatyta, kad efektyvesnis yra akustinis suderinimo elementas, kurio storis  $w = 1 \text{ mm}$ . Taip pat buvo tirtas trijų skirtingų medžiagų *FinnFoam*, *AIREX R90.200* ir *AIREX R90.300* panaudojimas suderinimo elementuose. Jų akustinės savybės pateiktos 4 lentelėje. Ultragarso greitis  $c$  monolitinėje ir juostelės medžiagose buvo matuojamas naudojant du vienodus 50 kHz dažnio keitiklius. Juostelės ilgis buvo pasirinktas  $\lambda/4$  ( $\lambda$  – ultragarsinės bangos ilgis) ir storis 1 mm.

Ultragarso greitis  $c$  juostelės medžiagoje yra mažesnis nei monolitinėje medžiagoje. Ultragarso bangos sklidimo greičio sumažėjimui turi įtakos kraštų sąlygos bangolaidyje.

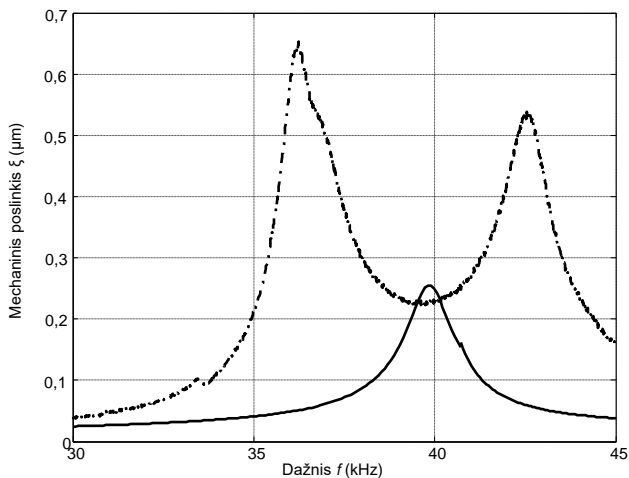
**4 lentelė.** Akustinės savybės suderinimo sluoksniui

Monolitinė medžiaga			
Savybės	AIREX R90.200	AIREX R90.300	FinnFoam
Medžiagos tankis $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	200	300	38
Ultragarso greitis $c$ (m/s)	1340	1513	700
Akustinis impedansas $Z_s$ (MRayl)	0,268	0,454	0,0266
Juostelės medžiaga			
Savybės	AIREX R90.200	AIREX R90.300	FinnFoam
Ultragarso greitis $c$ (m/s)	1272	1385	326
Akustinis impedansas $Z_s$ (MRayl)	0,254	0,415	0,0124
Suderinimo sluoksnis $\lambda/4$ (mm)	7,6	8,3	2,0

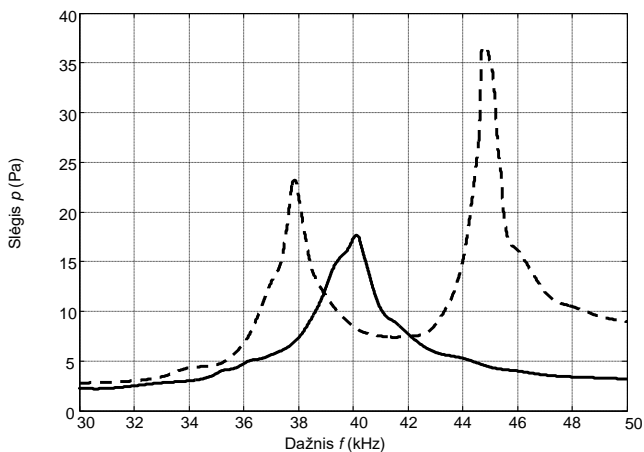
Rezonansinio dažnio ir mechaninio poslinkio priklausomybė nuo suderinimo sluoksnio medžiagos pavaizduota 17 pav. Matavimų rezultatai pateikti 18–19 pav.



**17 pav.** Modeliuoti vieno PMN–32%PT elemento mechaniniai poslinkiai nuo rezonansinio dažnio. Ištinė linija – elementas be suderinimo elemento; su suderinimo elementu ( $w = 1$  mm,  $R_g = 50 \Omega$ ): brūkšninė linija – AIREX R90.200, punktyrinė linija – AIREX R90.300



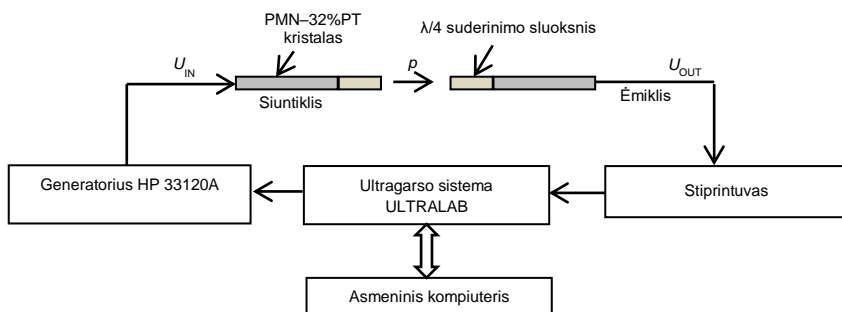
**18 pav.** Mechaninio poslinkio ir dažnio priklausomybė, išmatuota lazeriniu interferometru. Ištinė linija – elementas be suderinimo elemento, brūkšninė – elementas su suderinimo elementu ( $w = 1 \text{ mm}$ ,  $R_g = 50 \Omega$ , AIREX R90.200)



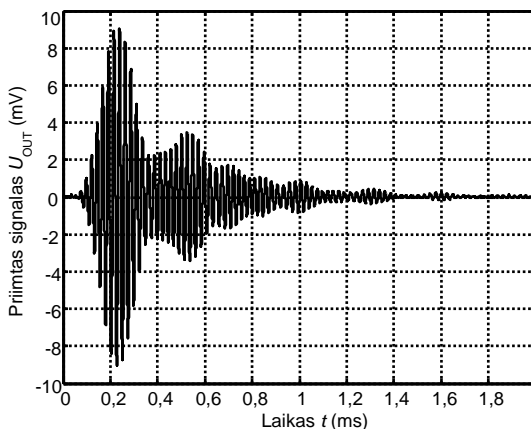
**19 pav.** Išmatuota akustinio slėgio priklausomybė nuo rezonansinio dažnio. Ištinė linija – elementas be suderinimo elemento, brūkšninė linija – elementas su suderinimo elementu ( $w = 1 \text{ mm}$ ,  $R_g = 50 \Omega$ , AIREX R90.200)

Tolimesniems tyrimams buvo pasirenkamos  $(15 \times 5 \times 1) \text{ mm}^3$  PMN–32%PT kristalų juostelės, orientuotos  $y$  (2) kryptimi. Parenkamas AIREX R90.200 medžiagos akustinis suderinimo sluoksnis, kurio storis  $w = 1 \text{ mm}$ .

Sukurta ir ištirta PMN–32%PT ultragarsinis oro keitiklis su suderinimo elementu  $\lambda/4$ . Buvo atliktas dviejų ultragarsinių keitiklių matavimas, norint gauti keitiklio akustinius perdavimo nuostolius. Žemojo dažnio ultragarsiniai keitikliai, skirti darbui ore, dirba siuntimo ir priėmimo režimais. Keitiklis sužadinas rezonansinio dažnio  $f_r = 41,5 \text{ kHz}$  5 periodų impulsiniu signalu, kai sužadimo įtampa  $U_{pp} = 0,5 \text{ V}$ , tarp keitiklių atstumas yra  $1 \text{ mm}$ . Dviejų ultragarsinių keitiklių perdavimo nuostolių matavimo principas pavaizduotas 20 pav., o keitiklio priimtas signalas – 21 pav.



20 pav. Perdavimo nuostolių matavimo principas



21 pav. Priimtas signalas

Keitiklio perdavimo nuostoliai  $k$  paskaičiuojami pagal formulę:

$$k = 10 \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}; \quad (9)$$

čia  $U_{IN}$  yra sužadavimo įtampa, o  $U_{OUT}$  – ėmiklio įtampa. Vieno keitiklio perdavimo nuostoliai  $k = -13,5$  dB. Esant 100 mm atstumui tarp keitiklių, perdavimo nuostoliai yra  $k = -30,4$  dB, kai sužadavimo įtampa  $U_{pp} = 5,6$  V.

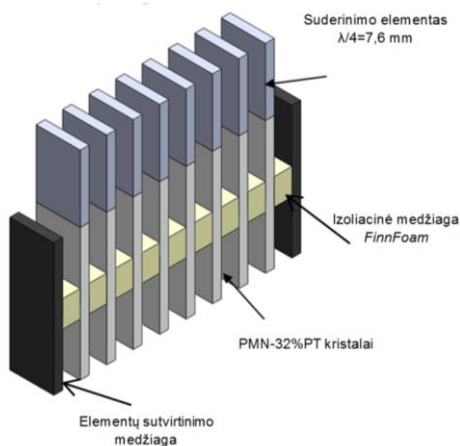
Taikydami impulsinės reakcijos metodą modeliuojant gavome, kad perdavimo nuostoliai yra -34 dB, kai matavimo atstumas 100 mm. Modeliavimo ir matavimo rezultatai nesutampa ~10 %.

#### 4. ULTRAGARSINĖS ORINĖS GARDELĖS SUKŪRIMAS IR TYRIMAS

Šiame skyrelyje aprašomas PMN–32 % PT kristalų pritaikymas ultragarsinei orinei gardei. Norint pagerinti veikimą naudojamas specialus akustinis suderinimo elementas  $\lambda/4$  su žemu impedansu.

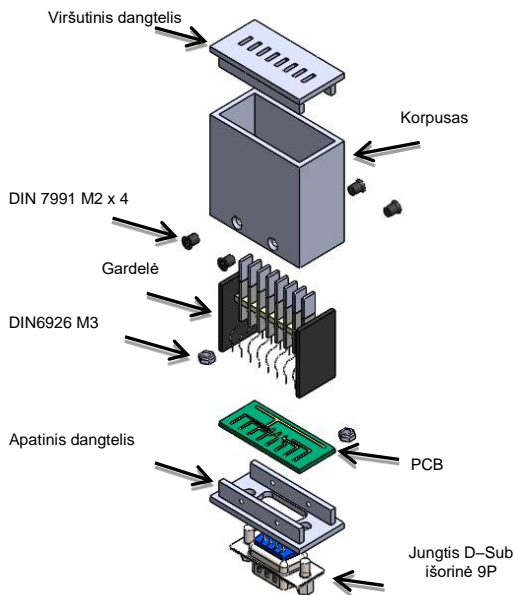
##### Ultragarsinės gardelės modelis

Ultragarsinė orinė gardelė susideda iš 8 PMN–32%PT juostelių ( $15 \times 5 \times 1$  mm<sup>3</sup>), kurios tarpusavyje atskirtos izoliacine medžiaga (22 pav.). Kiekvienas elementas yra atskirtas izoliacine medžiaga, kurios žingsnis yra  $\lambda_a/2$ ; čia  $\lambda_a$  – bangos ilgis ore esant pagrindiniam rezonansiniam dažniui. Tarpai ( $2 \times 3 \times 5$  mm<sup>3</sup>) yra pagaminti iš *FinnFoam* medžiagos. Modeliuojant nustatyta, kad ši pasirinkta medžiaga mažiausiai veikia kitus, šalia esančius pjezoelementus.

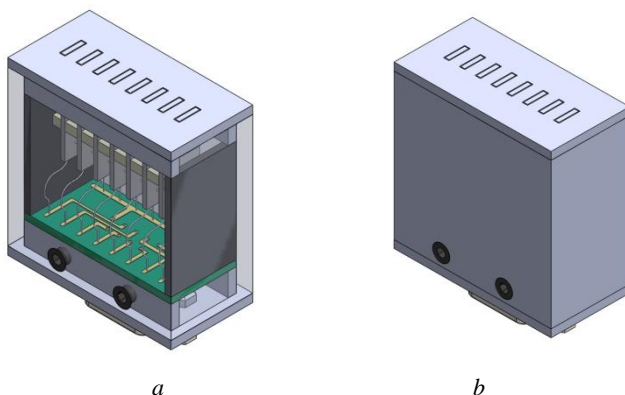


22 pav. Ultragarsinė orinė gardelė su suderinimo elementais

Ultragarsinės orinės gardelės modelis pavaizduotas 23 ir 24 pav.



23 pav. Išrinkta ultragarsinė orinė gardelė



24 pav. Ultragarsinė daugiaelementė orinė gardelė: *a* – skaidrus vaizdas, *b* – išorinis vaizdas

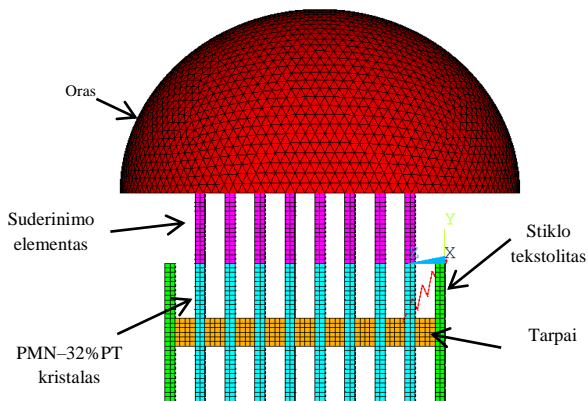
Elementams sutvirtinti naudojamas stiklo tekstolitas, kurio tankis  $\rho=1900 \text{ kg/m}^3$ , Puasono koeficientas  $\nu=0,2$ , tamprumo modulis  $E=21 \text{ GPa}$ . Ultragarsinę



gardelę sudaro: viršutinis ir apatinis dangteliai, korpusas, elementų gardelė, mikroschema ir jungtis. Viršutinis gardelės dangtelis yra pagamintas iš kieto plastiko, korpusas ir apatinis dangtelis iš aliuminio, buvo naudota D-Sub išorinė 9P jungtis.

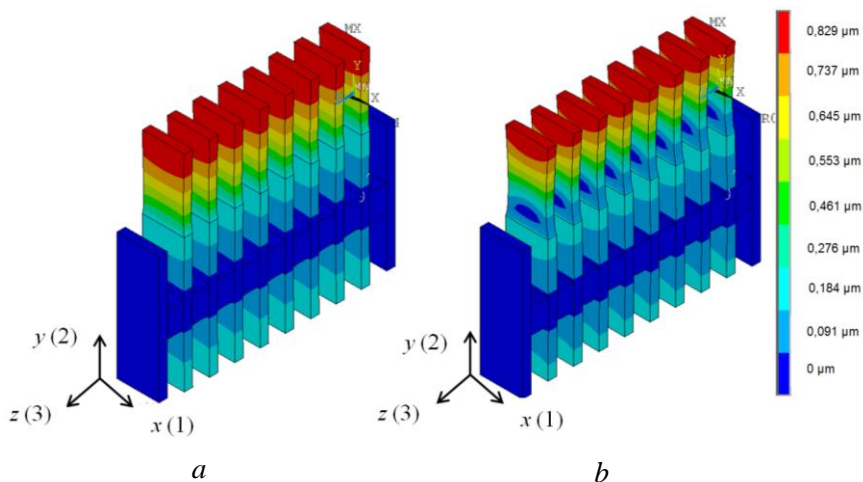
### Ultragarsinės gardelės virpesių tyrimas naudojant baigtinių elementų modelį

Ultragarsinė orinė gardelė buvo modeliuota naudojant ANSYS programinį paketą ir SOLID5, FLUID30, FLUID130, SOLID45 elementus. Ultragarsinės gardelės 3D modelis pavaizduotas 25 pav. Baigtinių elementų modeliavimas padėjo suprasti ultragarsinės orinės gardelės erdvinius mechaninius virpesius bei akustinio slėgio priklausomybę nuo dažnio. Buvo nustatyta, kad PMN–32%PT kristalo mechaninis poslinkis yra lygus nuliui elemento centre. Dėl šios priežasties visi esantys kristalo elementai gardelėje buvo sutvirtinti *FinnFoam* medžiaga per kristalo centrą užimant mažiausiai įtakos mechaniniams poslinkiams turintį plotą. Tvirtinimo medžiaga padeda sutvirtinti gardelės elementus ir išvengti akustinio ryšio tarp greta esančių kaimyninių elementų.



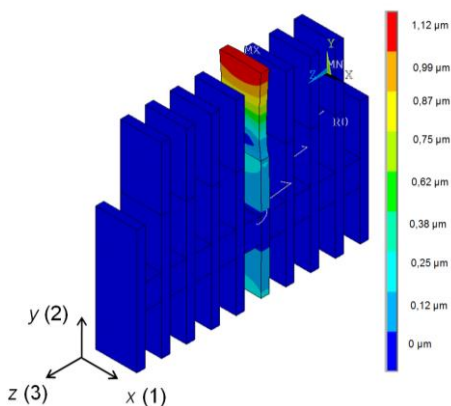
25 pav. Ultragarsinės orinės gardelės 3D modelis

Erdvinis mechaninių poslinkių pasiskirstymo modulis pagrindine  $y$  (2) kryptimi esant pagrindiniams rezonansiniams dažniam  $f_{r1} = 35,7$  kHz ir  $f_{r2} = 42,8$  kHz pavaizduotas 26 pav. Amplitudės skalė yra dešinėje pusėje, išreikšta mikrometrais. Spalvų skalės žymi mechaninių poslinkių amplitudes. Mechaninių poslinkių vaizdavimas 26 pav. yra padidintas  $6 \times 10^4$ , siekiant akivaizdžiau pavaizduoti PMN–32%PT kristalo mechaninius poslinkius.



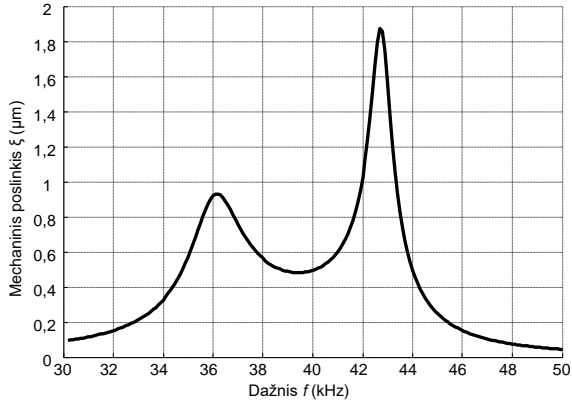
**26 pav.** Ultragarsinės orinės girdelės erdvinis pasiskirstymas:  
 $a - f_{r1} = 35,7 \text{ kHz}$ ;  $b - f_{r2} = 42,8 \text{ kHz}$

Erdvinis mechaninių poslinkių pasiskirstymo modulis pagrindine  $y(2)$  kryptimi esant rezonansiniam dažniui  $f_r = 42,8 \text{ kHz}$ , kai sužadinamas vienas pjezoelektrinis elementas nr. 5, yra pavaizduotas 27 pav.

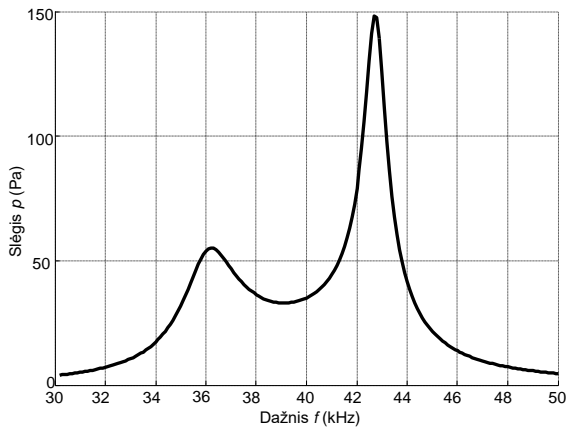


**27 pav.** Ultragarsinės orinės girdelės erdvinis pasiskirstymas, kai sužadinamas vienas nr. 5 pjezoelektrinis elementas

PMN–32%PT ultragarsinės orinės girdelės mechaninio poslinkio ir akustinio slėgio priklausomybė nuo dažnio yra pavaizduota 28–29 pav.

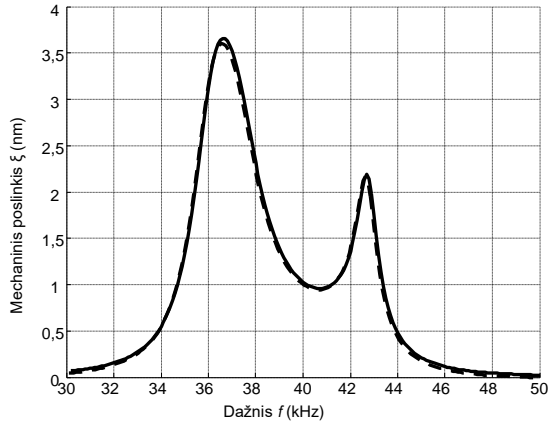


**28 pav.** Modeliuota mechaninio poslinkio priklausomybė nuo dažnio, kai sužadinas vienas nr. 5 pjzoelektrinis elementas

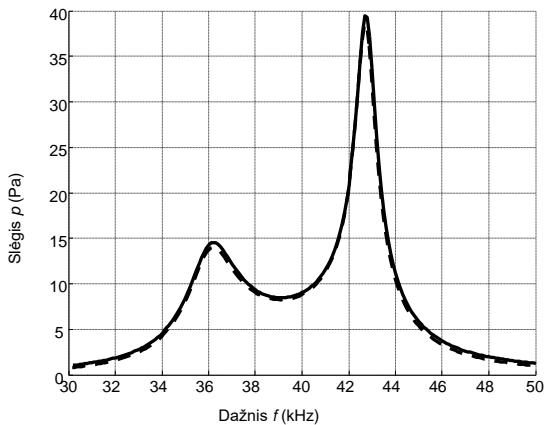


**29 pav.** Modeliuota akustinio slėgio priklausomybė nuo dažnio, kai sužadinas vienas nr. 5 pjzoelektrinis elementas

Modeliuotas mechaninio poslinkio ryšys, kai sužadinas vienas nr. 5 elementas, tarp greta esančių elementų yra pavaizduotas 30 pav., o akustinis ryšys – 31 pav.



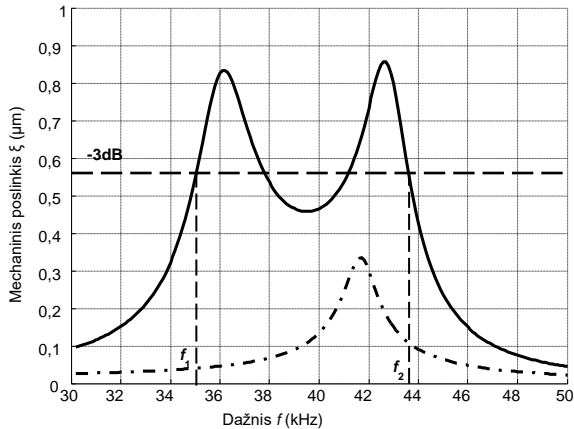
**30 pav.** Mechaninis poslinkis, kai sužadinas nr. 5 elementas. Ištinė linija – poslinkis ant nr. 4 elemento, brūkšninė linija – poslinkis ant nr. 6 elemento



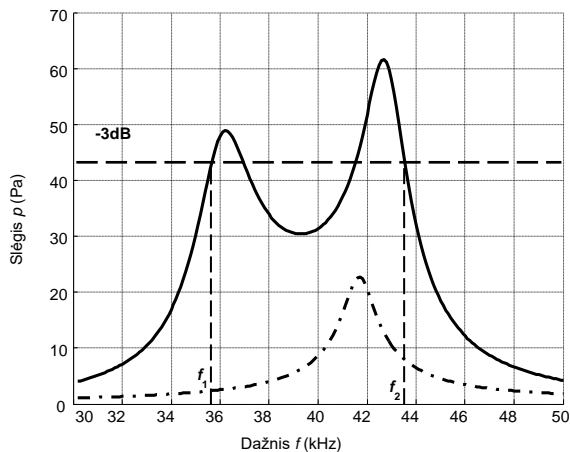
**31 pav.** Akustinis slėgis, kai sužadinas nr. 5 elementas. Ištinė linija – slėgis ant nr. 4 elemento, brūkšninė linija – slėgis ant nr. 6 elemento

Iš modeliavimo rezultatų, matome, kad sužadinant vieną elementą kitam elementui mechaninio poslinkio įtaka labai minimali (30 pav.). Mechaninis poslinkis susidaro apie 864 kartus (arba 59 dB) mažesnis ant šalia esančių elementų nr. 4 ir nr. 6 nei ant sužadiamo elemento nr. 5, o akustinis slėgis apie 4 kartus (arba 11 dB) mažesnis.

Modeliuotas mechaninis poslinkis ir akustinis slėgis, kai gardelė su  $\lambda/4$  suderinimo elementu ir be jo, yra pavaizduotas 32–33 pav. Iš rezultatų matome, kad mechaninis poslinkis  $\xi$  yra  $\sim 3$  kartus didesnis su suderinimo elementu  $\lambda/4$  nei be jo, taip pat atsiranda papildomas rezonansinis dažnis  $f$ , kuris praplečia juostą nuo 35 kHz iki 45 kHz.



**32 pav.** Modeliuotas mechaninis poslinkis. Ištinė linija – orinė gardelė su akustiniu elementu  $\lambda/4$  ( $w = 1$  mm), punktyrinė linija – orinė gardelė be akustinio elemento



**33 pav.** Modeliuotas akustinis slėgis. Ištinė linija – orinė gardelė su akustiniu elementu  $\lambda/4$  ( $w = 1$  mm), punktyrinė linija – orinė gardelė be akustinio elemento

## Akustinių laukų modeliavimas taikant impulsinį reakcijos metodą

Akustinių laukų skaičiavimui taikysime impulsinės reakcijos metodą. Taikysime jau žinomą modeliavimo metodą pagal *The Lamb Matlab Toolbox (Beta version 0.1)* versiją.

Norint paskaičiuoti akustinius laukus, mums reikia žinoti ultragarsinės gardelės elementų virpėjimo greičius. Šiuos greičius išmatuosime lazeriniu interferometru. Matavimo sistemą sudaro: lazerinis interferometras OFV 5000, generatorius AFG 3051, osciloskopas *Agilent DSO5023A*, 8 kanalų stiprintuvas, kuris formuoja iš stačiakampio į harmoninį signalą ir *Dasel SITAU 32:128:2 LF TR*. Šiuo prietaisu galima valdyti kiekvieną gardelės elementą atskirai.

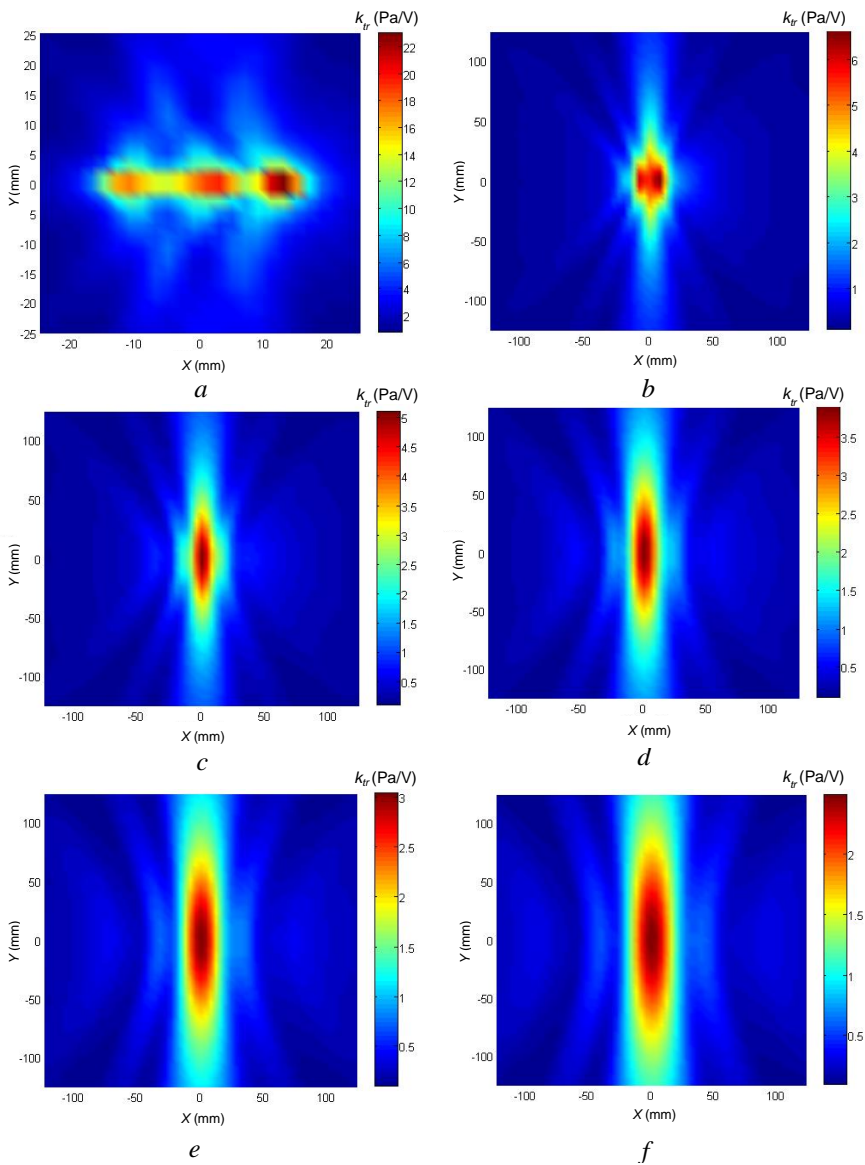
Paskaičiuotas ultragarsinės orinės gardelės vidutinis rezonansinis dažnis  $f_{vid}=37,91$  kHz. Matavimų rezultatai pateikti 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Lazerinio interferometro matavimo rezultatai

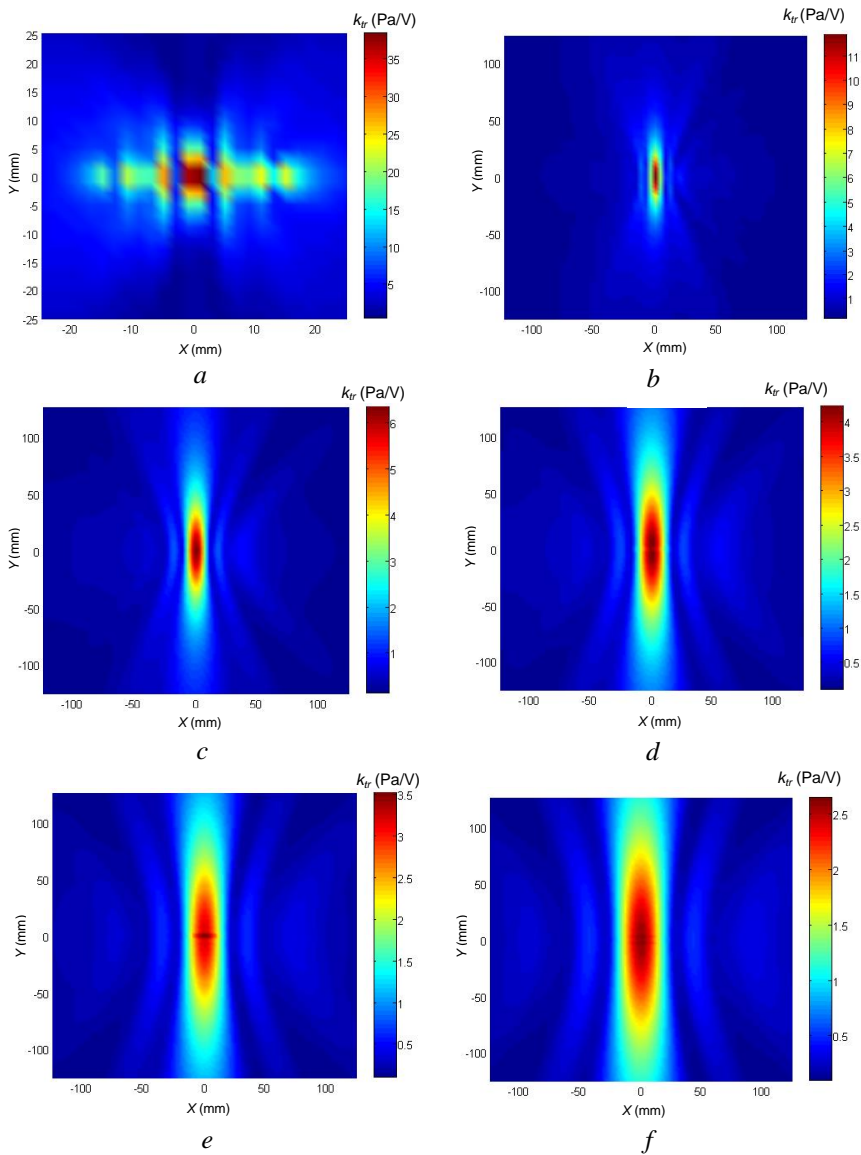
$R_g=50 \Omega$	Poslinkio amplitudė $A$ , nm	Greitis $v$ , m/s	Sužadavimo įtampa $U_A$ , mV	Normuotas poslinkis $A$ , $\mu\text{m}/\text{V}$	Normuotas virpamasis greitis $v$ , m/s/V
nr. 1	40	0,0095	70	0,57	0,1358
nr. 2	40		70	0,57	0,1358
nr. 3	40		70	0,57	0,1358
nr. 4	40		70	0,57	0,1358
nr. 5	40		90	0,44	0,1048
nr. 6	40		70	0,57	0,1358
nr. 7	40		75	0,53	0,1262
nr. 8	40		100	0,40	0,0953

Kiekvieno elemento ultragarsinėje orinėje gardelėje įtampa  $U_A$  buvo reguliuojama pagal elemento poslinkio amplitudę, kuri nustatyta 40 nm. Sujungimo tarpai tarp elementų spinduliuoja labai mažą mechaninį poslinkį, t. y. 0,04–0,05  $\mu\text{m}/\text{V}$ , apie 20 kartų mažiau nei elemento paviršius. Elementai nr. 5 ir nr. 8 turi mažesnę poslinkį, galbūt tam turi įtakos rezonansinis dažnis, nutolęs nuo paskaičiuoto vidutinio rezonansinio dažnio  $f_{vid} = 37,91$  kHz. Elektrinio generatoriaus išėjimo varža buvo nustatyta  $R_g = 50 \Omega$ .

Akustinių laukų modeliavimui buvo naudojamas greičio signalas su 5 periodų sinusiniu signalu. Pagrindinis dažnis yra  $f_{vid} = 37,91$  kHz su ribota pralaidumo juosta 20–80 kHz ir 700  $\mu\text{s}$  laiko juosta. Matuojamas atstumas yra skirstomas į tris laukus: artimasis laukas, artimojo lauko riba ir tolیمasis laukas. Paskaičiuota artimojo lauko riba, kuri yra  $N_{sr}=21,1$  mm. Atlikome modeliavimą 1 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm ir 100 mm atstumais. Ultragarsinės orinės gardelės kampą sukome nuo  $-20^\circ$  iki  $20^\circ$  kas  $10^\circ$ . Matavimai atlikti nevertinant vėlinimo trukmės ir įvedant vėlinimo trukmę. Visi modeliavimo rezultatai pavaizduoti 34–35 pav.



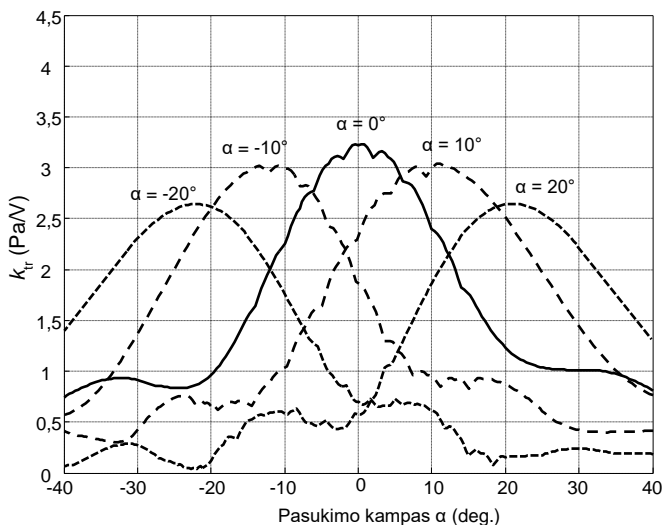
**34 pav.** Modeliuoti akustiniai slėgiai  $k_r$  su nefokusuotu spinduliu: *a* – 1 mm, *b* – 20 mm, *c* – 40 mm, *d* – 60 mm, *e* – 80 mm, *f* – 100 mm atstumais



**35 pav.** Modeliuoti akustiniai slėgiai  $k_{tr}$  su fokusuotu spinduliu: *a* – 1 mm, *b* – 20 mm, *c* – 40 mm, *d* – 60 mm, *e* – 80 mm, *f* – 100 mm atstumais



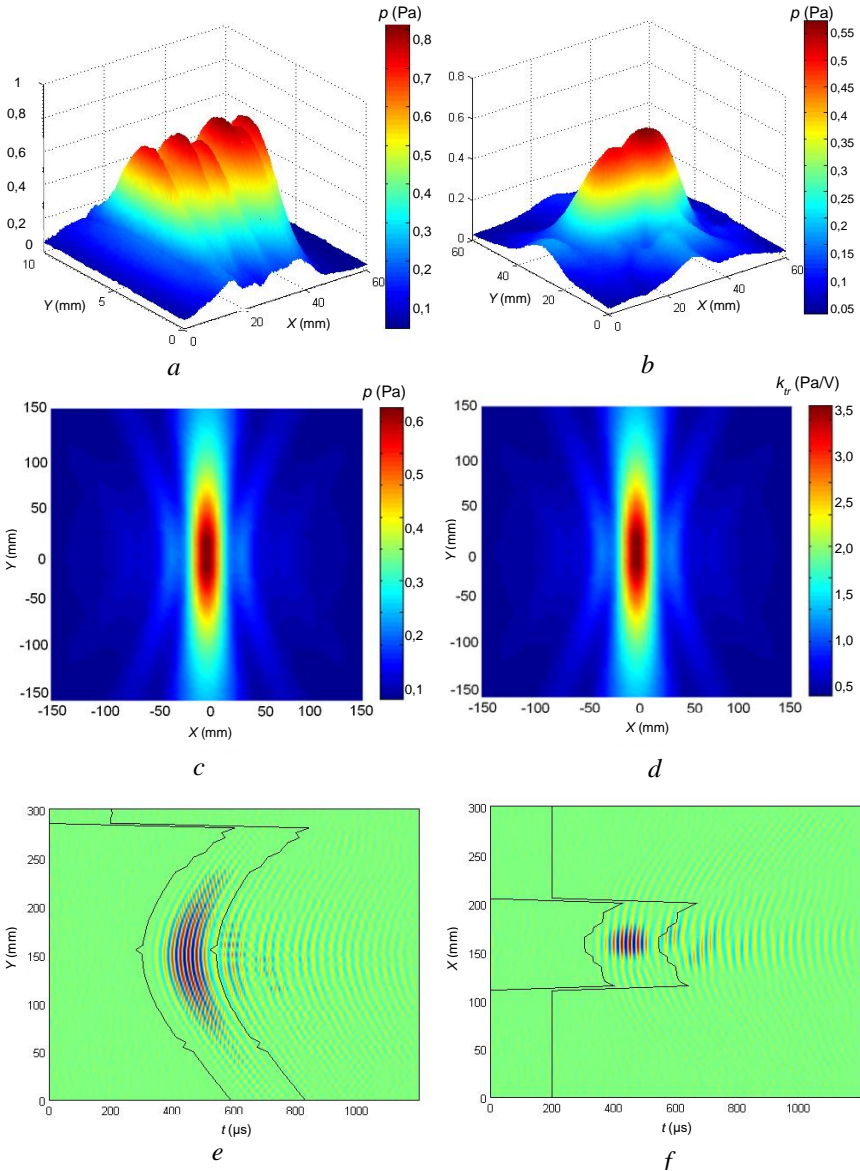
Modeliavimo rezultatai parodo, kad efektyvus fokusavimas yra gaunamas artimojo lauko riboje, kai atstumas 20 mm. Orinės gardelės sukuriamas akustinis slėgis fokuse yra lygus  $k_{tr} = 11 \text{ Pa/V}$ . Norint valdyti ultragarsinę orinę gardelę reikia įvesti vėlinimo trukmę. Modeliuojant pasukimo kampą buvo parinktas 80 mm atstumas, o gauti rezultatai pavaizduoti 36 pav. Pasirinktas tolimasis laukas norint išvengti išorinio aplinkos poveikio, t. y. nesusidaro signalo atspindžiai nuo aplinkinių objektų.



36 pav. Modeliuotas akustinis slėgis 80 mm atstumu

### Akustinių laukų eksperimentinis tyrimas

Akustinių laukų matavimas atliktas naudojant ULTRALAB matavimo sistemą, kurią sudaro: XYZ skeneris, 4138 modelio akustinis mikrofonas su matavimo stiprintuvu NEXUS WH 3219 (*Bruel & Kjaer*), 8 kanalų stiprintuvu ir *Dasel SITAU 32:128:2* LF TR generatoriumi. Sužadinama 5 periodų harmoniniu signalu. Akustinės gardelės spinduliuojami laukai išmatuoti skirtingais atstumais: 1 mm, 10 mm ir 80 mm, kai neįvedamas vėlinimo trukmė. Rezultatai pateikti 37 pav. B vaizdas  $Y$  ir  $X$  kryptimi, kai atstumas 80 mm, pateiktas 37 pav.  $e$  ir  $f$ ; čia ištiesinė linija yra lango plotis.

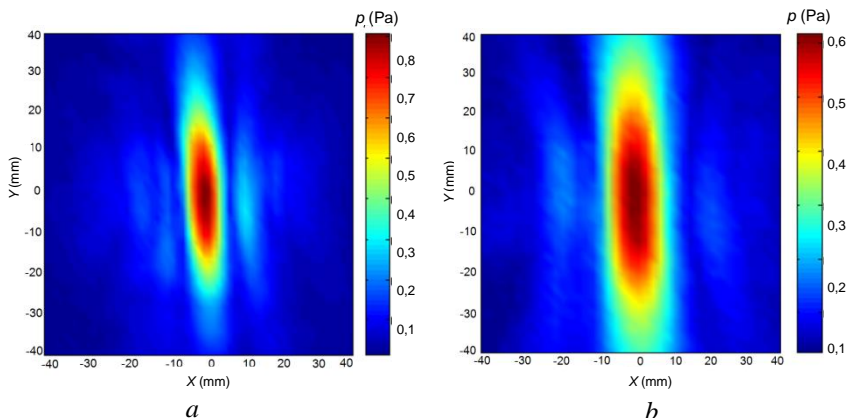


**37 pav.** Matuoti akustiniai slėgiai su nefokusuotu spinduliu: *a* – 1 mm, *b* – 10 mm, *c* – 80 mm atstumu (absoliutusis slėgis  $p$ , Pa), *d* – 80 mm (normalusis slėgis  $k_{tr}$ , Pa/V), *e* –  $B$  vaizdas:  $Y$  kryptimi, kai atstumas 80 mm, *f* –  $B$  vaizdas:  $X$  kryptimi, kai atstumas 80 mm

Esant skirtingiems 10 mm ir 40 mm atstumams buvo išmatuotas laikas nuo kiekvieno elemento iki fokusuoto atstumo. Paskaičiuota vėlinimo trukmė, reikalinga norint gauti fokusuotą spindulį. Vėlinimo trukmė pavaizduota 6 lentelėje ir išmatuoti akustiniai laukai naudojant vėlinimo trukmę pavaizduota 38 pav.

**6 lentelė.** Išmatuota pjezoelektrinių elementų vėlinimo trukmė

10 mm atstumas							
nr. 1	nr. 2	nr. 3	nr. 4	nr. 5	nr. 6	nr. 7	nr. 8
0 $\mu$ s	7,8 $\mu$ s	15 $\mu$ s	19,3 $\mu$ s	19,3 $\mu$ s	16,1 $\mu$ s	10,5 $\mu$ s	1,4 $\mu$ s
40 mm atstumas							
0 $\mu$ s	2,3 $\mu$ s	4,9 $\mu$ s	6,4 $\mu$ s	6,3 $\mu$ s	4,9 $\mu$ s	3,8 $\mu$ s	0,1 $\mu$ s



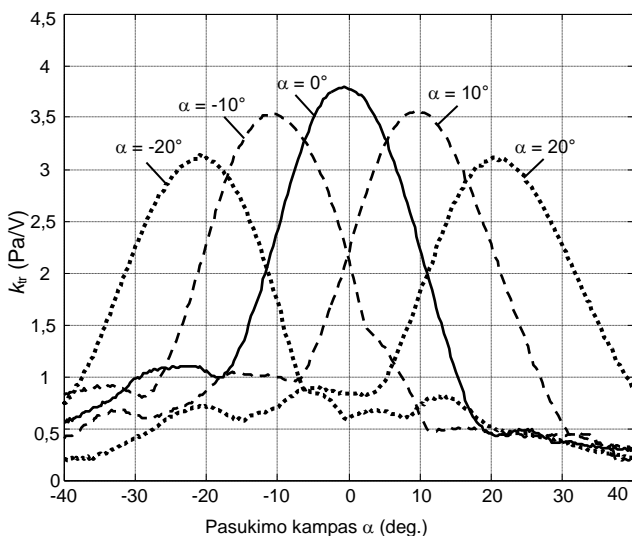
**38 pav.** Matuoti akustiniai laukai su fokusuotu spinduliu:  
*a* – 10 mm, *b* – 40 mm atstumu

Gardelės elementų vėlinimo trukmę galima paskaičiuoti pagal 10 formulę:

$$\tau_i = \tau_0 \pm i\Delta t_i; \quad (10)$$

čia  $t_0$  – pradinė vėlinimo trukmė,  $\Delta t_i$  – vėlinimo trukmė tarp gretimų elementų,  $i$  – elemento numeris.

Akustinių laukų matavimai su pasukimo kampais  $\pm 20^\circ$ , pavyzdžiui, 80 mm atstumu tolimajame lauke yra pavaizduoti 39 pav., čia  $k_r$  yra normuotas akustinis slėgis. Pasirinktas tolimasis laukas norint išvengti papildomo išorinio aplinkos poveikio, t. y. nesusidaro papildomi signalo atspindžiai nuo aplinkinių objektų.



39 pav. Išmatuotas akustinis slėgis

## IŠVADOS

1. Buvo ištirtos stačiakampės PMN–32%PT kristalų plokštelės ir juostelės. PMN–32%PT kristalų geros pjezoelektrinės savybės pagerina naujo tipo ultragarsinio orinio keitiklio charakteristikas.
2. Buvo pasiūlytas ir sėkmingai įgyvendintas naujas matavimo metodas PMN–32%PT pjezoelektrinių kristalų savybių ir domenų struktūros stebėjimams poliarizacijos proceso metu. Šis metodas demonstruoja, kaip kinta PMN–32%PT kristalų pjezoelektrinės savybės ir domenų struktūra poliarizacijos proceso metu. Eketromechaninio ryšio koeficiento matavimo standartinė neapibrėžtis yra  $u(k_{32}^*) = \pm 0,24\%$ , o papildomų kondensatorių –  $u(C_s) = \pm 0,5\%$ . Išplėstinė matavimo neapibrėžtis yra  $U_k = 1,1\%$ .
3. Norint pasiekti ultragarsinių orinių keitiklių dažnį (<100 kHz) buvo pasiūlyta PMN–32%PT kristalų juostelės su <011> pjūviu ir [011] poliarizacija pagrindinėje skersinėje išsiplėtimo modyje. PMN–32%PT vieno elemento perdavimo koeficientas  $k_{32}$  yra 25 kartus didesnis negu PZT-29 ( $f_r = 50$  kHz) elemento ir mechaninis poslinkis yra 11 kartų didesnis negu panašios medžiagos PZT-29 su suderinimo sluoksniu. Vieno keitiklio perdavimo nuostoliai yra -13,5 dB esant rezonansiniam dažniui  $f_r = 41,5$  kHz, 1 mm atstumu tarp keitiklių.

4. Norint pagerinti perdavimo efektyvumą buvo pasiūlyta suderinimo sluoksnį gaminti iš žemo akustinio impedanso plastiko AIREX R90.200. Ultragarstinė gardelė susideda iš 8 PMN–32%PT kristalų juostelių ( $15 \times 5 \times 1$  mm<sup>3</sup> su  $\lambda/4$  suderinimo sluoksniais, kurie dirba skersinėje išsiplėtimo modoje y (2) kryptimi. Gauti geri sutapimai tarp modeliavimo ir matavimų rezultatų.
5. Buvo ištirti ultragarstinės gardelės akustiniai laukai taikant impulsinės reakcijos metodą. Ultragarstinės orinės gardelės akustinių laukų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai nesutampa ~14 %. Nustatyta galimybė valdyti ultragarstinės orinės gardelės spindulį elektroninėje erdvėje.

# MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

## STRAIPSNIAI

### Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidiniuose

1. Kažys, Rymantas Jonas; Šlitteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Simultaneous Monitoring of the Electromechanical Coupling Coefficients and Domain Structural Changes of the PMN-32%PT Crystals during Poling Process // Publisher: Ferroelectrics. Abingdon: Taylor&Francis. ISSN 0015-0193. 2015, vol. 480, issue 1, p. 24–31. DOI:10.1080/00150193.2015.1012405 (Thomson Reuters, 2016).
2. Kažys, Rymantas Jonas; Šlitteris, Reimondas; Šeštokė, Justina; Vladišauskas, Alfonsas. Air – coupled Ultrasonic Transducers based on an Application of the PMN-32%PT Single Crystals // Publisher: Ferroelectrics. Abingdon: Taylor&Francis. ISSN 0015-0193. 2015, vol. 480, issue 1, p. 85–91. DOI: 10.1080/00150193.2015.1012458 (Thomson Reuters, 2016).
3. Kažys, Rymantas Jonas; Šlitteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Monitoring of the piezoelectric properties and structural changes of the PMN-32%PT crystals during poling process // 2014 Joint IEEE International symposium on the applications of ferroelectrics, International workshop on acoustic transduction materials and device & Workshop on piezoresponse force microscopy (ISAF – IWATMD – PFM), May 12–16, 2014, The Pennsylvania State University, State College, PA, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, ISBN 9781479938605, p. 83–86.
4. Kažys, Rymantas Jonas; Šlitteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Development of air-coupled low frequency ultrasonic transducers and arrays with PMN-32%PT piezoelectric crystals // IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 21–24 October 2015, Taipei, Taiwan. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, ISBN 9781479981823. p. [1–4]. DOI:10.1109/ULTSYM.2015.0214.
5. Kažys, Rymantas Jonas; Šlitteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Application of PMN-32PT piezoelectric crystals for novel air-coupled ultrasonic transducers // Physics procedia: ICU international congress on ultrasonics, Metz, France, 11–14 May, 2015. Amsterdam: Elsevier. ISSN 1875-3892. 2015, vol. 70, p. 896–900. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.08.185.

### Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

1. Kažys, Rymantas Jonas; Šlitteris, Reimondas; Šeštokė, Justina; Zienius, Marius. Investigation of high frequency mechanical displacements in PMN-32%PT crystals by laser interferometry // Solid State Phenomena. ISSN 1012 0394. 2016, vol. 251, p. 83–88.

## **Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai**

1. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina; Zienius, Marius. Investigation of high frequency mechanical displacements in PMN-32%PT crystals by laser interferometry // *Mechatronic systems and materials: abstracts of the 11 h international conference, MSM 2015, 7–9 July 2015, Kaunas, Lithuania* / Editors: I. Skiedraitė, R. Rimašauskienė, L. Zubrickaitė, E. Dragašius. Kaunas University of Technology. ISSN 1822-8283. 2015, p. 67–68.

## **PRANEŠIMAI MOKSLINĖSE KONFERENCIJOSE**

1. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Monitoring of the piezoelectric properties and structural changes of the PMN-32%PT crystals during poling process // *2014 IEEE ISAF/IWATMD/PFM: 2014 05 12–16, Penn State, USA.*
2. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Simultaneous Monitoring of the Electromechanical Coupling Coefficients and Domain Structural Changes of the PMN-32%PT Crystals during Poling Process // *European Conference of Application of Polar Dielectrics 2014: 2014 07 07–11, Vilnius, Lietuva.*
3. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina; Vladišauskas, Alfonsas. Air-coupling Ultrasonic Transducers based on an Application of the PMN-32%PT Single Crystals // *European Conference of Application of Polar Dielectrics 2014: 2014 07 07–11, Vilnius, Lietuva.*
4. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Application of PMN-32PT piezoelectric crystals for novel air-coupled ultrasonic transducers // *2015 International Congress on Ultrasonics: 2015 05 11–15, Metz, Prancūzija.*
5. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina; Zienius, Marius. Investigation of high frequency mechanical displacements in PMN-32%PT crystals by laser interferometry // *11th International Conference Mechatronic Systems and Materials: 2015 07 07–09, Kaunas, Lietuva.*
6. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Development of Air-Coupled Low Frequency Ultrasonic Transducers and Arrays with PMN-32%PT Piezoelectric Crystals // *IEEE International Ultrasonics Symposium: 2015 10 21–24, Taipei, Taivanas.*
7. Kažys, Rymantas Jonas; Šliteris, Reimondas; Šeštokė, Justina. Development of air-coupled ultrasonic transducers based on PMN-PT type single crystals // *19th World Conference on Non-Destructive Testing: 2016 06 13–17, Munich, Vokietija.*

## **Trumpa informacija apie autorių**

Justina Šeštokė gimė 1986 m. rugsėjo 30 d. Raseiniuose. Studijavo Kauno technologijos universitete. 2010 metais įgijo bakalauro ir 2012 metais mechanikos inžinerijos magistro kvalifikacijos laipsnį.

2012 - 2016 metais studijavo Kauno technologijos universiteto Prof. Kazimiero Baršausko ultragarso mokslo institute matavimų inžinerijos mokslo krypties doktorantūroje.

El. paštas [justina.sestoke@ktu.lt](mailto:justina.sestoke@ktu.lt).



## RESUME

### Relevance of the problem

Air-coupled ultrasonic techniques are already used for material characterization, non-destructive evaluation and even for wireless secure transmission of data. The main problem which is met is big losses of ultrasonic signals caused by attenuation and significant mismatch of acoustic impedances of ultrasonic transducers and air. One of the ways to solve this problem is application of composite piezoelectric elements the specific acoustic impedance of which is lower than of monolithic piezoelectric ceramics. Performance of the 1-3 connectivity piezocomposite disks may be improved by matching layers made of materials with low acoustic impedance, for example, polypropylene foam ferroelectric film. Further enhancement of the performance of ultrasonic air transducers is limited by the piezoelectric effect of the piezoelectric material used.

Advent of novel piezoelectric materials with a very strong piezoelectric effect such as lead magnesium niobate-lead titanate [ $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_2/3\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  (PMN-PT)] crystals enables to improve performance of ultrasonic transducers. The electromechanical coupling factors of PMN-32%PT crystals are very high. The electromechanical coupling factor for the thickness extension mode is  $k_{33} > 0,90$ , for the transverse shear mode  $k_{15} > 0,95$  and for the transverse extension  $k_{32} > (0,84-0,90)$ . The properties of the PMN-32%PT crystals may be further improved using domain engineering. Those parameters are higher than similar parameters of piezoelectric ceramic elements used as active elements in ultrasonic transducers.

PMN-32%PT crystals are already used in very high frequency ultrasonic phased arrays for medical applications, in ultrasonic transducers for non-destructive testing and ultrasonic hydrophones. Application of the PMN- 32%PT crystals for air-coupled ultrasonic transducers was suggested in our previous works.

However to our knowledge PMN-32%PT piezoelectric element have not been yet systematically investigated from the point of view of their application for air-coupled ultrasonic transducers and arrays.

### Objective and tasks

The main objective of the dissertation was to analyse and to develop measurement methods of the piezoelectric properties of PMN-PT single crystals during a poling process and to apply those crystals in novel air-coupled ultrasonic transducers and multi-element arrays. In order to achieve this objective the following tasks were formulated:

1. Analysis of PMN-32%PT piezoelectric crystals properties and their measurement methods.
2. Development of a measurement technique for simultaneous monitoring of variations of the domain structure and piezoelectric coefficients during poling process.
3. Theoretical and experimental investigation of vibrations of PMN-32%PT elements.
4. Development of wide band air-coupled ultrasonic transducers and arrays with an improved performance.

### **Scientific novelty of the work**

1. A novel measurement technique for simultaneous monitoring of the piezoelectric properties and structural changes of the PMN-32%PT single crystal during poling process has been proposed and successfully implemented.
2. Numerical and experimental analysis of vibrations of piezoelectric PMN-32%PT crystals in steady-state and transient modes. Ultrasonic air-coupled transducers and phased arrays operating in a low frequencies range were developed and investigated both in the transmitting and receiving modes.
3. Selection of the appropriate vibrations modes and optimization of the geometry of PMN-32%PT crystals for air-coupled ultrasonic transducers and arrays.

### **The practical application of the work**

The research leading to these results has received funding from Lithuanian-Swiss cooperation programme to reduce economic and social disparities within the enlarged European Union under project agreement No. CH-3-ŠMM-01/02. Investigations results were used in project Swiss-Lithuanian Ferroelectrics: From controlled internal fields to energy harvesting/medical diagnostics/microelectronic applications.

### **Research methodology**

Operation of ultrasonic transducers was simulated by the finite element method using ANSYS Mechanical APDL Product Launcher software. Spatial distributions of displacements inside piezoelectric elements and matching strips were obtained. Experimental investigations were carried out by the Wayne Kerr impedance meter, laser Doppler vibrometer Polytec OFV-5000 and the ULTRALAB (it is developed and produced at Ultrasound Research Institute, KTU) measurement system with XYZ scanner, the Bruel&Kjaer 4138 acoustic microphone with the measurement amplifier NEXUS WH 3219.

## **Approbation of results**

During the research 7 scientific papers were published. Five papers are published in a journal which is in the database “ISI Web of Science”, one article is published in other journals that are included in other international databases and one paper published in a referred scientific journal. The main results of the work are presented in 7 international conferences. Some parts of the presented work were used and reported in the Swiss-Lithuanian project in which the prof. K. Barsausko Ultrasound Research Institute participated.

## **Results presented for the defence**

1. The monitoring method of the variations of piezoelectric properties and domain structure of the PMN-32%PT single crystal plates of  $\langle 011 \rangle$ -cuts during poling process was proposed successfully implemented and evaluated the uncertainty of the measurement method.
2. The optical images of the crystal's at different time instants demonstrated how the domain structure transforms and piezoelectric properties of the PMN-32%PT crystals develop during a poling process.
3. Due to the high electromechanical coupling factor of the transverse extension mode of the PMN-32%PT single crystals a good performance of the proposed air-coupled transducers was achieved.
4. The finite element modelling and experiments showed that the performance of the developed air-coupled ultrasonic transducer is better than of the air-coupled PZ-29 composite ultrasonic transducer of similar dimensions.
5. Investigation results of the acoustic fields radiated in air by the developed multi-element arrays.

## **Structure and content of the dissertation**

The doctoral dissertation consists of the introduction, 4 chapters, conclusions and the list of references. 124 pages in total that contain 96 illustrations, 14 tables, 109 mathematical expressions and list of references of 123 items.

## **CONCLUSIONS**

1. Piezoelectric PMN-32%PT single crystal elements rectangular plates and strips have been investigated. Extraordinarily high piezoelectric properties of the PMN-32%PT crystals allow the development of a new type of air-coupled ultrasonic transducers denoted by excellent performance.

2. A novel measurement technique for the simultaneous monitoring of the piezoelectric properties and structural changes of the PMN-32%PT single crystal during the poling process has been proposed and successfully performed. It has been clearly demonstrated how the domain structure transforms and how the piezoelectric properties of the PMN-32%PT crystals develop during the poling process. The standard uncertainty of additional capacitors is  $u(C_s) = \pm 0.5\%$ . The standard uncertainty of the electromechanical coupling coefficient is  $u(k_{32}^*) = \pm 0.24\%$ . The expanded measurement uncertainty is  $U_k = 1.1\%$ .
3. For low frequency (<100 kHz) air-coupled ultrasonic transducers as active elements, PMN-32%PT crystal strips with <011> cut and [011] poling direction vibrating in the main transverse extension mode (TE) in the direction were proposed. PMN-32%PT single element transduction coefficient  $k_{32}$  is 25 times better than that of the PZT-29 element ( $f_r = 50$  kHz) whereas mechanical displacement  $\xi$  is 11 times better than that of the similar PZT-29 element with the matching strip. The developed transducer possesses the transaction losses of  $-13.5$  dB with the frequency of  $f_r = 41.5$  kHz at the distance of 1 mm.
4. For the improvement of the transduction efficiency and pulse responses, strip-like matching elements made of low acoustic impedance plastic AIREX R90.200 were proposed. The ultrasonic array consisting of 8 PMN-32%PT crystal strips ( $15 \times 5 \times 1$ ) mm<sup>3</sup> with the  $\lambda/4$  matching strips operating in the transverse extension mode in the direction of y (2) axis was developed. Good agreement between the finite element simulation and the measurement results was observed.
5. For the theoretical investigation of the radiated acoustic fields created by a vibrating air-coupled array of rectangular pistons, the impulse response method (IRM) was chosen. Theoretical and experimental investigations of the acoustic fields radiated by the 8-element ultrasonic array demonstrated not only good performance of the array in the pulse mode but also excellent capacity of steering the ultrasonic beam in space electronically as well. ~14% mismatch between the simulation and the measurement results was observed.

UDK 53.082.73 + 681.586.48](043.3)

SL344. 2016-10-24, 2,75 leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz. Užsakymas 393.  
 Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
 Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas