

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

EDGARAS VAŠTAKAS

**MECHANINIŲ POVEIKIŲ GENERAVIMAS IR  
TAIKYMAS PJEZOKERAMINIŲ ŽEMŲJŲ  
DAŽNIŲ AKUSTINĖS EMISIJOS KEITIKLIŲ  
KALIBRAVIMUI**

Daktaro disertacija  
Technologijos mokslai, matavimo inžinerija (10T)

2016, Kaunas

UDK 681.586.773 + 681.586.4] (043.3)

Disertacija rengta 2010–2016 metais Kauno technologijos universiteto Metrologijos institute.

Disertacija ginama eksternu.

**Mokslinis konsultantas:**

Prof. habil. dr. Stasys Vygantas AUGUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

**Redagavo:**

Rita Malikėnienė (Leidykla „Technologija“)

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

## TURINYS

SANTRUMPOS.....	5
IVADAS.....	6
1. AKUSTINĖS EMISIJOS KEITIKLIŲ CHARAKTERISTIKŲ MATAVIMO METODŲ ANALIZĖ .....	9
1.1. AEK charakteristikų matavimo problema.....	9
1.2. AEK kalibravimo metodai .....	11
1.2.1. Kalibravimo standarto E1106-86 analizė .....	11
1.2.2. Akustinės emisijos keitiklių apertūros įtakos įvertinimas.....	13
1.2.3. Kalibravimo standarto E1781-98 analizė .....	16
1.2.4. Standarto E976 analizė .....	17
1.2.5. Tarpusavio sąveikos AEK charakteristikų matavimo metodo analizė.....	19
1.2.6. Tiesioginio AEK sąlyčio matavimo metodo analizė .....	21
1.2.7. Baltojo triukšmo, naudojamo AEK charakteristikoms matuoti, metodo analizė .....	23
1.2.8. Kibirkšties išlydžio AEK charakteristikų matavimo metodo analizė .....	24
1.2.9. Elektromechaninio AEK charakteristikų matavimo metodo analizė .....	25
1.3. Skyriaus išvados .....	27
2. NORIMOS FORMOS MECHANINIŲ POVEIKIŲ SINTEZĖ BANGOLAIDŽIUOSE .....	28
2.1. Bangolaidžio matmenų parinkimas.....	28
2.2. Bangų dispersija bangolaidžiuose.....	30
2.3. Norimos formos mechaninių poveikių generavimas dispersiniuose bangolaidžiuose .....	33
2.4. Norimos formos signalo kokybinis įvertinimas .....	41
2.5. Sintezės metodų taikymas strypo tipo bangolaidžiuose .....	43
2.6. Bangų vizualizacija.....	50
2.7. Skyriaus išvados .....	53
3. AEK CHARAKTERISTIKŲ MATAVIMO SISTEMOS.....	54
3.1. AEK kalibravimo sistemos su strypo ir plokštės tipo bangolaidžiais .....	54
3.2. AEK kalibravimo sistema su gardele iš $N$ strypo tipo bangolaidžių .....	55
3.2.1. Kalibravimo stendas su pluoštiniu slopintuvu .....	61
3.3. Poslinkių matavimo keitikliai .....	64
3.3.1. Lazerinis Doplerio vibrometras .....	65
3.3.2. Optinio fokusavimo poslinkių matavimo keitiklis.....	66

3.3.3. Talpinis poslinkių matavimo keitiklis.....	69
3.3.4. Talpinio keitiklio kalibravimas.....	71
3.3.5. Išmanusis talpinis keitiklis.....	73
3.4. Skyriaus išvados.....	77
4. AEK KALIBRAVIMO SISTEMŲ NEAPIBRĖŽČIŲ ĮVERTINIMAS.....	78
4.1. AEK kalibravimo neapibrėžčių įvertinimo metodika .....	79
4.2. Matavimo priemonių neapibrėžčių įvertinimas.....	81
4.3. Mechaninio poveikio matavimo neapibrėžties įvertinimas.....	83
4.4. AEK impulsinės charakteristikos neapibrėžties įvertinimas .....	84
4.5. AEK dažninės charakteristikos matavimo neapibrėžties įvertinimas .....	86
4.6. Kalibravimo stendo paruošimas darbui.....	87
4.7. Skyriaus išvados.....	88
IŠVADOS .....	89
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	90
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .....	94
PRIEDAI .....	95
1 priedas. AEK charakteristikų pavyzdžiai .....	95
2 priedas. Kalibravimo stendas .....	96
3 priedas. Keitiklio R3CU kalibravimo rezultatai, gauti su pagaminta įranga.....	97
4 priedas. Pagamintas AEK ir išmatuotos jo charakteristikos.....	98
5 priedas. Pagaminti kalibravimo standai .....	99
6 priedas. Išmatuota AEK impulsinė reakcija.....	100
7 priedas. Optinio fokusavimo keitiklio struktūra.....	101

## SANTRUMPOS

$AEK$  – akustinės emisijos keitiklis.

$s(t)$  – AEK impulsinė reakcija.

$S_i(j\omega)$  – tiriamo AEK impulsinės reakcijos spektras.

$K_{AEK}(j\omega)$  – AEK dažninė charakteristika.

$K_{ET}(j\omega)$  – etaloninio keitiklio dažninė charakteristika (išreiškiama absoliučiaisiais vienetais m/s arba nm).

$S_{ET}(j\omega)$  – etaloninio keitiklio impulsinės reakcijos spektras.

$K_{ET}(j\omega)$  – etaloninio keitiklio dažninė charakteristika, gauta kalibruojant pagal standartą E1106-86.

$x(t)$  – įėjimo signalas arba bangolaidžio žadinimo signalas.

$x_i$  – žadinimo signalo imtis.

$X_i(j\omega)$  – žadinimo signalo spektro imtis  $i$ .

$y(t)$  – mechaninis poveikis arba norimos formos mechaninis poveikis.

$h(t)$  – sistemos impulsinė reakcija.

$H(j\omega)$  – sistemos impulsinės reakcijos spektras arba bangolaidžio impulsinės reakcijos spektras.

$X(j\omega)$  – bangolaidžio žadinimo signalo spektras (sistemos įėjimo signalas).

$Y(j\omega)$  – kompleksinis norimos formos signalo spektras (sistemos išėjimas) arba norimos formos mechaninio poveikio spektras.

$N$  – sveikas skaičius.

$L(j\omega)$  – lango funkcija.

$k$  – konstanta, naudojama taikant kompozicijos metodą.

$W$  – koeficientas, naudojamas taikant modifikuotą dekompozicijos metodą.

$l$  – ribinis koeficientas.

$g$  – signalo indeksas.

$Z_g$  – skaičius, rodantis spektrų dalinį sutapimą.

$Q$  – norimos formos signalo  $y(t)$  kokybės kriterijus.

$Q_s$  – santykinis norimos formos poveikio kokybės kriterijus.

$Q_{is}$  – išmatuoto norimos formos poveikio kokybės kriterijus.

$Q_t$  – apskaičiuotas teorinis norimos formos poveikio kokybės kriterijus.

## IVADAS

### Problemos aktualumas

Akustinės emisijos signalams matuoti, atliekant neardomą diagnostiką ir sprendžiant kitus akustinių bangų taikymo uždavinius [1–8], yra ypač svarbios matavimo priemonės laikinės ir dažninės charakteristikos. Įprastai matuojamos pjezokeraminių keitiklių charakteristikos, kurios priklauso nuo pjezokeramikos savybių [9], keitiklio konstrukcijos ir eksploatacijos sąlygų [10]. Šiuo metu jos gali būti matuojamos naudojant akustinės emisijos keitiklių (toliau – AEK) kalibravimo įrangą, pagamintą pagal standartus **E1106-86** ir **E1781-98** [11]. Charakteristikų kitimas įvertinamas pagal standartą **E976**.

Vienas iš esminių kalibravimo sistemų elementų yra metalinis blokas, kuriame sužadunami mechaniniai poveikiai, veikiantys AEK. Blokas naudojamas kaip akustinių bangų vėlinimo linija. Tai leidžia atskirti AEK reakciją į poveikį nuo kalibravimo sistemoje atsirandančių akustinių bangų atspindžių. Bloko matmenys parenkami atsižvelgiant į mažiausią sukulto mechaninio poveikio bangos ilgį. Tokiu atveju, kai žemieji dažniai yra nuo 20 kHz iki 100 kHz, gaunami dideli kalibravimo sistemos matmenys – bloko masė gali siekti keletą tonų.

Mechaniniams poveikiams generuoti įprastai naudojami kapiliariniai vamzdeliai, leidžiantys generuoti šimtųjų mikrosekundžių trukmės mechaninius poveikius. Mechaninių poveikių generavimo metodas sukelia kai kurių problemų. Būtina užtikrinti gaminamų vamzdelių parametrų kartojimąsi. Metodas taip pat apriboja kalibravimo sistemos greitaveiką.

Kalibruojama įprastai naudojant Relėjaus (Rayleigh) tipo bangą ir neatsižvelgiant į AEK eksploataavimo sąlygas. Taigi su rekomenduojama kalibravimo įranga gautos charakteristikos yra teisingos, kai keitiklio eksploataavimo sąlygos yra artimos buvusioms kalibruojant. Jeigu eksploatuojamas AEK matuoja kitokio tipo bangą, sklindančią medžiaga, kurios akustinė banga labai skiriasi, gautos kalibruojant keitiklio charakteristikos nėra išsamios.

Atsižvelgiant į minėtus rekomenduojamų kalibravimo stendų trūkumus, buvo suformuluotas uždavinys sukurti naujo tipo nešiojamąją AEK kalibravimo įrangą. Tokios įrangos greitaveika turėtų būti didesnė, leistų matuoti AEK charakteristikas naudojant skirtingo tipo bangas ir įvertintų jų charakteristikas esant skirtingoms akustinėms varžoms.

Kalibravimo įrangos matmenys daugiausia priklauso nuo akustinių bangų vėlinimo linijos ir metodo, leidžiančio generuoti AEK poveikį. Įrangos matmenys negali būti laikomi AEK kalibravimo problema, tačiau, naudojant šiame darbe siūlomas akustines strypo, plokštės ir gardelės tipo bangolaidžių konstrukcijas, galima gerokai sumažinti įrangos matmenis. Mažesni įrangos matmenys gali būti laikomi nauju inžineriniu sprendimu. Tačiau toks sprendimas sukelia daug problemų, susijusių su akustinių bangų dispersija, neišvengiama siūlomose bangolaidžio tipo struktūrose.

Dispersiniuose bangolaidžiuose sukeliama mechaniniai poslinkiai priklauso nuo bangolaidžių geometrijos (ilgio, skersmens, skerspjūvio formos, plokštės atveju priklauso nuo jos storio) ir žadinti naudojamo keitiklio savybių. Dėl šios priežasties gauti

kelių mikrosekundžių trukmės mikroposlinkius, taikant įprastinius žadinimo metodus, tokiuose bangolaidžiuose nėra įmanoma. Mechaniniams poveikiams generuoti dispersiniuose bangolaidžiuose numatyti bangų sinteze pagrįsti metodai, leidžiantys kompensuoti dispersijos įtaką. Šios konstrukcijos, taikant bangų sintezės metodus, sudaro galimybes spręsti ir AEK kalibravimo vieno tipo banga problemą.

Norint kalibruoti keitikius, būtina žinoti keitiklį veikiančio poslinkio dydį absoliučiaisiais vienetais, tad darbe numatomos galimos mikroposlinkių matavimo priemonės. Taip pat siūloma naujo tipo talpinio mikroposlinkių matavimo keitiklio konstrukcija.

Remiantis šiame darbe pateikiamais rezultatais, pasiūlyti naujo tipo žemųjų dažnių AEK kalibravimo standai ir mikroposlinkių matavimo priemonės, įvertintos pasiūlytosios kalibravimo įrangos matavimo neapibrėžtys, numatoma sertifikuoti siūlomus matavimo metodus. Darbo rezultatai panaudoti „Smart acoustic emission transducers“ projekte.

### **Darbo tikslas ir uždaviniai**

Darbo tikslas – sukurti išplėstų galimybių naujo tipo žemojo dažnio AEK kalibravimo priemones ir ištirti jų metrologines charakteristikas.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:

1. Pasiūlyti norimos formos mechaninių poslinkių gavimo metodus ir priemones, taikomus dispersiniams bangolaidžiams.
2. Pasiūlyti bangolaidžių konstrukcijas ir įvertinti jų naudojimo galimybes AEK kalibruoti.
3. Pasiūlyti ir ištirti galimas matavimo priemones, skirtas mechaniniams poslinkiams matuoti. Įvertinti siūlomų matavimo priemonių nulemtas neapibrėžtis AEK kalibruoti.

### **Mokslinis naujumas**

1. Parodytos norimos formos mechaninių poveikių generavimo galimybės strypo ir plokštės tipo struktūrose.
2. Pasiūlyti nauji norimos formos mechaninių poveikių gavimo metodai. Atlikta pasiūlytų ir žinomų metodų lyginamoji analizė.

### **Darbo praktinis taikymas**

Darbo rezultatai panaudoti „Smart acoustic emission transducers“ projekte. Remiantis darbe gautais rezultatais, buvo sukalibruoti pagamintieji AEK.

### **Tyrimų metodika**

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti tyrimo uždaviniai buvo sprendžiami analitiškai, rezultatai patikrinami eksperimentiškai. Dispersinės bangolaidžių savybės apskaičiuotos pagal literatūroje pateikiamas matematinės išraiškas. Determinuotų poslinkių skaičiavimo ir vertinimo algoritmai buvo realizuoti naudojantis „Matlab“ programiniu paketu.

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami Kauno technologijos universiteto Metrologijos instituto, Mechanikos ir mechatronikos fakulteto bei Prof. K. Baršausko

ultragarso mokslo instituto laboratorijose. Matavimo neapibrėžtys įvertintos pagal literatūroje pateiktą metodiką.

## **Rezultatų apibavimas**

Disertacijos tema paskelbtos šios publikacijos: du straipsniai mokslinės informacijos instituto duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose ir vienos konferencijos straipsnių rinkinyje, skaityti trys pranešimai tarptautinėse konferencijose. Praktiniai darbo rezultatai naudojami „Smart acoustic emission transducer“ projekte.

## **Gynimui pateikiami teiginiai**

1. Siūlomi bangolaidžių žadinimo metodai leidžia gauti norimos formos mechaninius poveikius dispersiniuose bangolaidžiuose. Todėl AEK kalibruoti gali būti naudojamos naujo tipo konstrukcijos su strypo ar plokštės tipo bangolaidžiais ir bangolaidžių gardelėmis.
2. Siūlomi naujo tipo AEK kalibravimo standai praplečia AEK charakteristikų matavimo galimybes. Išsprendžiamos kalibravimo vieno tipo banga, matavimo greitaveikos, kalibravimo sistemos matmenų ir matavimo vieno tipo aplinkoje problemos.
3. Mechaninių poveikių įvertinimo absoliučiaisiais vienetais problema siūlomuose kalibravimo stenduose išsprendžiama naudojant naujo tipo talpinį poslinkių matavimo keitiklį su kalibravimosi galimybe.

## **Disertacijos struktūra ir apimtis**

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Bendra apimtis – 102 psl., kuriuose pateikiami 68 paveikslai, 13 lentelių, 63 matematinės išraiškos, yra 7 priedai ir 61 pozicijų literatūros sąrašas.

Pirmame skyriuje pateikiami AEK kalibravimo pavyzdžiai, kurie leidžia spręsti apie būtinybę pateikti išsamesnius kalibravimo duomenis. Išnagrinėti AEK kalibravimo metodai, aptarti jų privalumai ir trūkumai.

Antrame skyriuje atskleidžiamos problemos, atsirandančios siekiant gauti norimos formos poslinkius strypuose ir plokštėse, taip pat dispersijos įtaka sužadintiems poslinkiams. Pasiūlyti sprendimai, leidžiantys kompensuoti dispersijos įtaką ir gauti norimos formos poslinkius strypuose ir plokštėse. Pasiūlyti determinuotų poslinkių vertinimo kriterijai ir atlikta poslinkių vizualizacija.

Trečiame skyriuje siūlomos AEK charakteristikų matavimo išilgine ir paviršine bangomis sistemos. Nagrinėjamos esamos ir siūlomos matavimo priemonės, kurios leidžia matuoti generuojamus norimos formos mechaninius poveikius.

Ketvirtame skyriuje atliekama siūlomų kalibravimo sistemų ir matavimo priemonių neapibrėžčių analizė.

Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados, darbo pabaigoje – galutinės atliktų tyrimų išvados.



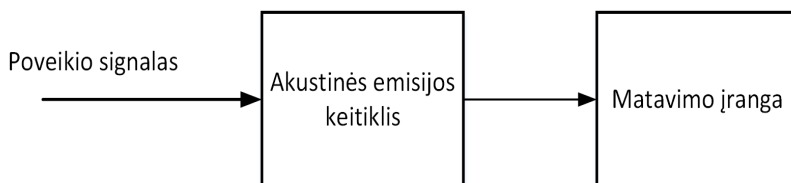
# 1. AKUSTINĖS EMISIJOS KEITIKLIŲ CHARAKTERISTIKŲ MATAVIMO METODŲ ANALIZĖ

## 1.1. AEK charakteristikų matavimo problema

Supaprastinta akustinės emisijos keitiklių (toliau – AEK) charakteristikų matavimo struktūrinė schema pavaizduota 1 pav. Akustinės emisijos keitiklį veikia žinomas mechaninis poveikis. Mechaninis poveikis dėl pjezoefekto keičiamas į proporcingą jam įtampą, kuri išmatuojama ir registruojama tam skirta matavimo įranga.

AEK charakteristikos – impulsinė jo reakcija ir AEK dažninė charakteristika. Impulsinė reakcija teoriškai turėtų būti gaunama naudojant be galo trumpą ir be galo didelės amplitudės poveikį. Praktiškai tokie poveikiai negalimi, tačiau kai poveikis yra trumpas, gaunama sistemos reakcija gali būti laikoma tos sistemos impulsine charakteristika (arba impulsine reakcija). Poveikis laikomas trumpu, jeigu, mažinant jo trukmę, keičiasi gaunamos sistemos reakcijos amplitudė, bet ne forma.

Idealiu atveju išmatuotos AEK impulsinės reakcijos spektras turėtų būti pakankamas, norint įvertinti jo dažninę charakteristiką. Tačiau naudojamas poveikis AEK reakcijai matuoti yra neidealus, jo spektre yra netolygumų. Dėl šios priežasties AEK dažninė charakteristika gaunama dalijant išmatuotos AEK reakcijos spektrą iš poveikio spektro.



1 pav. Supaprastinta akustinės emisijos keitiklio kalibravimo sistemos struktūrinė schema

Literatūros šaltiniuose pateikiami šie AEK charakteristikų matavimo metodai [12–21]:

Metodas aprašytas standarte **E1106-86**, taikomas pirminiam AEK kalibravimui atlikti, naudojant Relėjaus tipo bangas.

Metodas aprašytas standarte **E 1781–98**. Kalibruojama naudojant pagal standartą **E1106-86** kalibruotą AEK ir plieninį bloką.

Metodas aprašytas standarte **E976**. Pateikiamos rekomendacijos įrangai, skirtai AEK charakteristikoms palyginti. Įranga, pagaminta pagal šio standarto rekomendacijas, neužtikrina rezultatų atsikartojimo tarp laboratorijų ar organizacijų.

Tarpusavio sąveikos (*reciprocity*) kalibravimo metodas. Kalibruojant AEK šiuo metodu nėra reikalingas norimos formos mechaninis poveikis, tačiau matuojant susidaro tam tikros neapibrėžtys, kurioms įvertinti būtina papildomai kalibruoti AEK, naudojant standartuose **E1106-86** arba **E 1781-98** rekomenduojamą kalibravimo įrangą.

Tiesioginio AEK sąlyčio kalibravimo (*surface to surface*) metodas. Kalibruoti naudojami du AEK. Vienas iš keitiklių yra etaloninis ir naudojamas kitam keitikliui žadinti. Šis AEK kalibravimo metodas gali būti priskiriamas standartui **E976**.

Smūginis AEK kalibravimo metodas. Taikant šį metodą, kaip vienas iš kalibravimo sistemos elementų naudojamas akustinis bangolaidis, kuris žadinamas naudojant mechaninį arba elektromechaninį daužtuką. Kalibravimo metodas gali būti priskiriamas standartui **E976**.

Kibirkšties išlydžio naudojimo AEK kalibravimo metodas. AEK kalibruojamas ore, naudojant kibirkšties išlydžio sukiamą poveikį. Kalibravimo metodas priskiriamas standartui **E976** ir leidžia įvertinti neapkrauto AEK charakteristikas.

Baltojo triukšmo naudojimo metodas. Šis metodas gali būti priskiriamas standartui **E976**. Keitiklio charakteristikos gaunamos kaip reakcija į baltojo triukšmo poveikį.

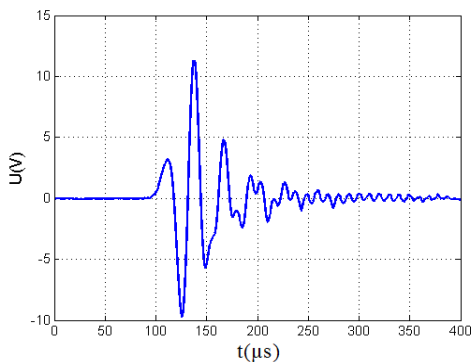
Išvardyti matavimo metodai leidžia įvertinti AEK dažnines charakteristikas. Matavimo rezultatai pateikiami kaip tam tikrame dažnių ruože esantis keitiklio jautrumas (matavimo vienetai V/m/s, V/nm arba V/Mpa). Tokios AEK dažnines charakteristikos pavyzdys pateikiamas **1 priede**.

Matuojant impulsinę AEK charakteristiką, dažninė charakteristika gaunama atliekant Furjė transformaciją. Taigi, žinant vieną charakteristiką, galima apskaičiuoti kitą, ir atvirkščiai. Tačiau įprastai dažninė charakteristika AEK dokumentuose pateikiama kaip iliustracija. Dėl šios priežasties, žinant tik dažninę AEK charakteristiką, negalima spręsti apie impulsinės reakcijos trukmę.

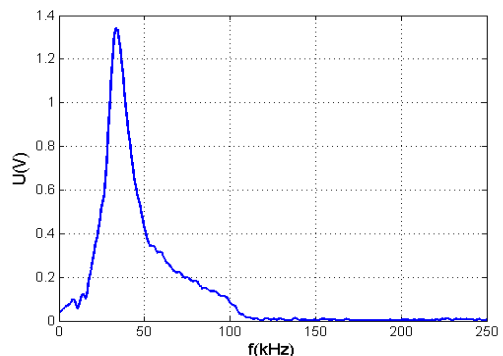
AEK charakteristikos matuojamos juos žadinant vieno tipo banga ir esant tam tikrai akustinei varžai. Įprastai pateikiamos charakteristikos, išmatuotos ant plieninio bloko. Tai neleidžia įvertinti tokio AEK naudojimo galimybių kitokiomis eksploataavimo sąlygomis.

Nepakankamai išsamių AEK charakteristikų problemos aktualumas gali būti matomas iš 2 pav. pateiktų matavimo rezultatų, kuriuose vaizduojamos to paties AEK charakteristikos, gautos skirtingomis sąlygomis. Vienu atveju matavimo rezultatai gauti žadinant AEK ore, kibirkštimi, kitu atveju žadinimas plieniniame bangolaidyje sukeliama mechaniniu poveikiu. Žadinant kibirkštimi, atsiranda antras rezonansinis dažnis, kai yra 70 kHz. Taip pat pastebimas rezonansinių dažnių pokytis nuo 40 kHz iki 25 kHz. Tokio tipo duomenys būtų nežinomi, turint tik AEK dažninę charakteristiką, išmatuotą su vienu iš galimų standartinių metodų.

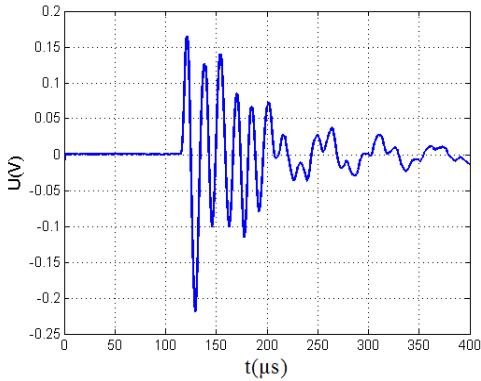
Esamais kalibravimo metodais galima įvertinti AEK laikines ir dažnines charakteristikas, tačiau įprastai jos yra nepakankamai išsamios dėl jų pateikimo ir dėl taikytų matavimo metodų.



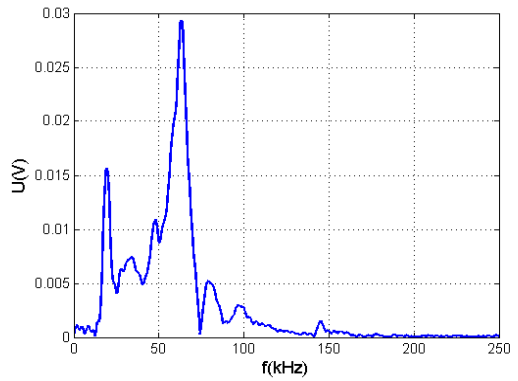
a)



b)



c)



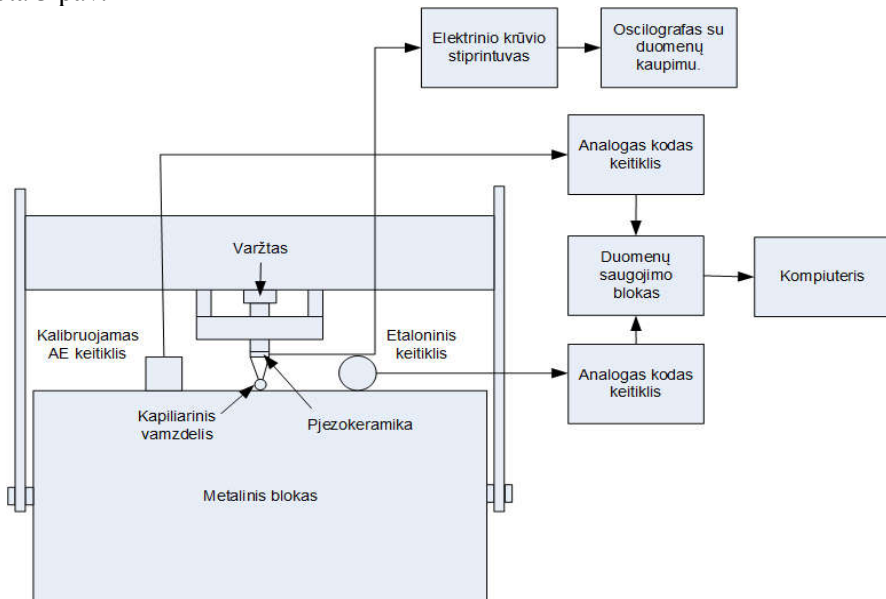
d)

**2 pav.** AEK impulsinės reakcijos ir apskaičiuoti jų spektrai: a) AEK R3UC impulsinė reakcija, gauta naudojant kalibravimo standą su strypo tipo bangolaidžiu, tokio tipo konstrukcija yra siūloma darbe, jos struktūrinė schema pateikiama 3 skyriuje; b) apskaičiuotas AEK R3UC impulsinės reakcijos signalo spektras; c) AEK R3UC impulsinė reakcija, išmatuota ore naudojant kibirkštis iššydį; d) apskaičiuotas AEK R3UC impulsinės reakcijos signalo spektras ore

## 1.2. AEK kalibravimo metodai

### 1.2.1. Kalibravimo standarto E1106-86 analizė

Standartas **E1106-86** apibūdina pirminį žemojo dažnio AEK kalibravimo metodą, naudojant paviršines Relėjaus tipo bangas [12]. Kalibravimo įrangos struktūrinė schema pavaizduota 3 pav.

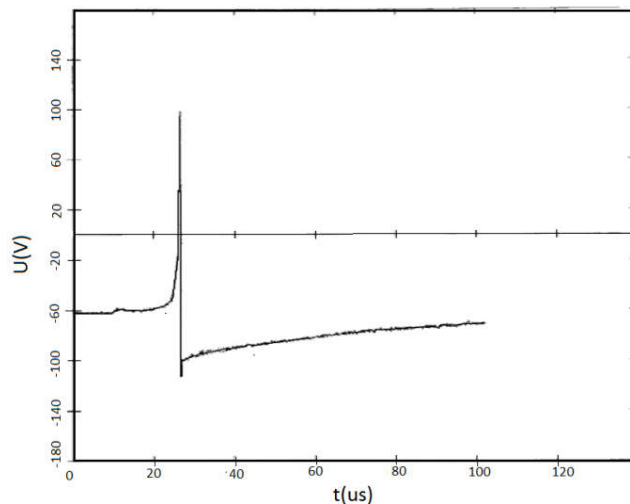


**3 pav.** AEK kalibravimo stendo struktūrinė schema (standartas E1106-86)

Akustinės bangos sužadintos metaliniame bloke, laužant kapiliarinį vamzdelį. Tokio bloko nuotrauka pateikiama **2 priede**. Bloko matmenys priklauso nuo akustinių bangų sklidimo greičio medžiagoje. Reikalaujama, kad AEK charakteristikos matavimo laikiniame lange nepatektų akustiniai signalai, atspindintys nuo bloko sienelių. Įprastai šis blokas yra metalinis, tačiau gali būti pagamintas ir iš kitokios medžiagos.

AEK dažninė charakteristika priklauso nuo bloko ir AEK impedansų suderinamumo. Dėl šios priežasties standarte nurodoma, kad pateikiant AEK charakteristikas būtų nurodoma kalibruoti naudoto bloko medžiaga. Reikalavimai ir tikrinimo metodika AEK kalibruoti naudojamiems blokams pateikiama standarte E-114 bei E-494. Reikalaujama, kad kalibravimo bloko medžiagoje nebūtų netolygumų, nuo kurių sklįstų atspindžiai, didesni kaip 10 %, palyginti su pirmu atspindžiu, nuo priešingos bloko sienelės.

Akustinės bangos sužadintos laužant 0,1–0,3 mm (tipinis 0,2 mm) skersmens, 2 mm ilgio kapiliarinį vamzdelį. Vamzdelis guldomas ant kalibruoti naudojamo bloko paviršiaus ir, didinant jėgą, spaudžiamas konstrukcijoje numatytu varžtu. Didinant vamzdelio spaudimo jėgą, jis įprastai lūžta esant 5–30 N spaudimo jėgai. Lūžtant vamzdeliui, bloko paviršiuje sukeliama nanometrų dydžio ir 0,1  $\mu$ s eilės mechaninis poveikis – impulsas. Išmatuotas elektrinis signalas, proporcingas poslinkio formai, pateikiamas 4 pav.



**4 pav.** Etalominio AEK išmatuotas elektrinis signalas, proporcingas kapiliarinio vamzdelio lūžio sukeltam mechaniniam poslinkiui

Tariama, kad sukeliama mechaninio poslinkio amplitudė yra tiesiogiai proporcinga lūžio metu kapiliarinį vamzdelį veikusiai jėgai. Tokiu atveju kapiliarinio vamzdelio lūžimas aprašomas [12] formule (1):

$$F(t) = \frac{F_L}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi t}{t_a} \right) \right) \quad 0 \leq |t| \leq t_a, \quad (1)$$

$$F(t) = 0, \text{ kai } t < 0,$$

$$F(t) = F_L, \text{ kai } t > t_a;$$

čia  $t_a$  – impulso amplitudės augimo laikas, s;  $F(t)$  – impulso amplitudė jėga, N;  $F_L$  – lūžio metu buvusi jėga, N.

Ant metalinio bloko paviršiaus vienodu nuotoliu (įprastai  $100 \pm 1$  mm) nuo akustinių bangų šaltinio dedami du keitikliai: keitiklis, kurio charakteristika yra matuojama, ir etaloninis keitiklis. AEK elektriniai signalai matuojami naudojant analogas kodas keitikius.

Duomenys iš analogas kodas keitiklio perduodami į duomenų saugojimo bloką. Reikalaujama, kad šis blokas galėtų išsaugoti bent 100  $\mu$ s arba ilgesnės trukmės signalo įrašą. Tariama, kad įprastai tokios trukmės įrašo užtenka išmatuoti bet kokio žemojo dažnių AEK impulsinei reakcijai. Tolesniam apdorojimui duomenys įrašomi į kompiuterio atmintį

Stendas leidžia matuoti AEK impulsinę reakciją, dažninė charakteristika randama pagal (2) formulę:

$$K_{AEK}(j\omega) = \frac{S_t(j\omega)}{S_e(j\omega)}. \quad (2)$$

čia  $K_{AEK}(j\omega)$  – AEK dažninė charakteristika, dB;  $S_t(j\omega)$  – tiriamo AEK impulsinės reakcijos spektras, V;  $S_e(j\omega)$  – etaloninio keitiklio impulsinės reakcijos spektras, nm arba m/s.

Kalibruojant AEK pagal **E1106-86** standartą užtikrinama  $\pm 15$  % kalibravimo neapibrėžtis. Pagrindiniai neapibrėžties šaltiniai:

- AEK apertūros plotas ir apertūros geometrija.
- Akustinių bangų šaltinio atsikartojimas.
- Etaloninio keitiklio jautrumo neapibrėžtis. Standarte numatyta, kad ši neapibrėžtis turi neviršyti  $\pm 5$  %.

### 1.2.2. Akustinės emisijos keitiklių apertūros įtakos įvertinimas

Standarte **E1106-86** AEK kalibruoti naudojamos Relėjaus tipo bangos. Šios bangos sklinda AEK pozicionavimo atžvilgiu tangentine kryptimi. Tai reiškia, kad ne visas AEK plotas sužadinas vienu metu [14, 15]. Atsklidusios bangos normalinės dedamosios greitis AEK apertūros plote nėra vienodas. Buvo įrodyta, kad tokiu atveju AEK išėjimo įtampa yra proporcinga vidutiniam normaliniam atsklidusios bangos greičiui [23, 24]. Vidutinis normalinis greitis priklauso nuo sklindančios bangos ilgio ir AEK apertūros ploto ir geometrijos. Ši priklausomybė vadinama apertūros funkcija.

Apertūros funkcija gali būti vertinama kaip matuojamo AEK charakteristika, atsirandanti žadinant AEK bangomis, jo matavimo apertūros atžvilgiu sklindančiomis tangentine kryptimi.

Apertūros funkcijos įtaka matavimo rezultatui – aukštųjų dažnių slopinimas. Kuo mažesnis AEK apertūros matmenų ir atsklidusios bangos ilgio santykis, tuo aukštesni dažniai slopinami. Dėl šios priežasties aukštųjų dažnių AEK matavimo apertūros plotas, palyginti su žemojo dažnių AEK, gali būti dešimtis kartų mažesnis.

Galima išskirti du AEK naudojimo atvejus. Vienu atveju matuojamos bangos, AEK apertūros atžvilgiu sklindančios tangentine, kitu atveju – normaline kryptimi. Matavimo rezultatai abiem atvejais skiriasi. Šis skirtumas paaiškinamas (3) formulę ir priklauso nuo keitiklio jautrumo apertūros plote ir normalinio sklindančios bangos greičio [15]. Dėl šios priežasties, kai keitiklis matuoja normaline kryptimi sklindančias bangas, matavimo rezultatas nepriklauso nuo keitiklio apertūros, ir atvirkščiai.

$$U_{AEK} = \frac{1}{S} \iint_S \omega(r)m(r) dS; \quad (3)$$

čia  $U_{AEK}$  – neapkrauto AEK išėjimo įtampa, U;  $S$  – AEK apertūros plotas;  $\omega(r)$  – normalinis bangos greitis keitiklio taške  $r$ , m/s;  $m(r)$  – keitiklio jautrumas taške  $r$  nuo AEK centrinio taško, m/s.

Pagal **E1106-86** standartą galima matuoti, tik tai kai banga AEK apertūros atžvilgiu sklinda tangentine krypti. Tokiu atveju nėra žinoma išilginės bangos matavimo charakteristika. Ji gali būti įvertinama pagal (4) formulę, apskaičiuojant dažninės charakteristikos, gautos pagal standartą **E1106-86**, ir apertūros funkcijos santykį .

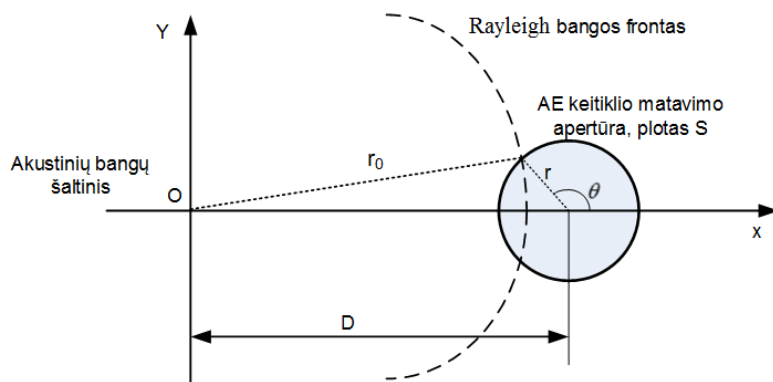
$$K_{AEKL}(j\omega) = \frac{K_{AEKR}(j\omega)}{M_r(j\omega)}; \quad (4)$$

čia  $K_{AEKR}(j\omega)$  – AEK dažninė charakteristika, gauta kalibruojant Relėjaus tipo banga dB;  $K_{AEKL}(j\omega)$  – išilginės bangos AEK dažninė charakteristika;  $M_r(j\omega)$  – apertūros funkcija.

Apertūros funkcija įvertinama pagal (5) formulę [14, 15]:

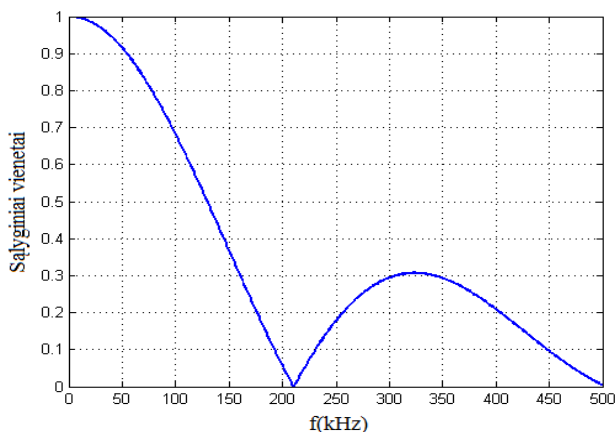
$$M_r = \frac{m_0}{S} \sqrt{D} e^{jk_r D} \iint_S \frac{e^{-jk_r r_0}}{\sqrt{r_0}} dr d\theta; \quad (5)$$

čia  $D$  – atstumas nuo akustinių bangų šaltinio iki AEK centro, m;  $k_r = 2\pi f / c_r$  – banginis skaičius;  $S$  – keitiklio apertūros plotas, m<sup>2</sup>;  $M_r$  – apertūros funkcija (keitiklio jautrumas Relėjaus bangai);  $m_0$  – AEK jautrumas ties apertūros centru, m.



**5 pav.** Struktūrinė schema, skirta AEK apertūros funkcijai skaičiuoti [14, 15]

Apskaičiuotas 24 mm skersmens AEK apertūros funkcijos pavyzdys pateikiamas 6 pav.



**6 pav.** Apskaičiuotos 24 mm skersmens AEK apertūros funkcijos pavyzdys

6 pav. pavaizduotoje AEK apertūros funkcijos iliustracijoje matoma, kad dėl šios funkcijos tam tikruose dažnių ruožuose atsiranda didelis signalo slopinimas. Problemas, atsirandančios siekiant įvertinti AEK apertūros funkciją, yra šios:

- Nelygus AEK jautrumas keitiklio apertūros plote.
- Sklindančios bangos fronto įvertinimas.
- Mechaninio poveikio slopinimas AEK apertūros plote dėl keitiklio prie kalibravimo stendo.

Taigi matematiškai įvertinti keitiklio apertūros funkcijos įtaką galima, tačiau praktiškai taikyti sudėtinga dėl nepakankamų duomenų apie AEK konstrukciją.

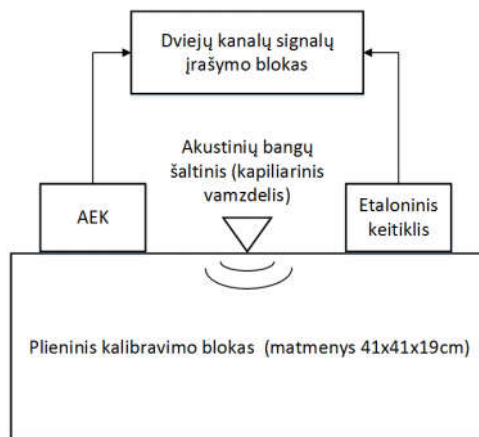
### 1.2.3. Kalibravimo standarto E1781-98 analizė

Pagal standartą **E1781-98** pagaminta įranga leidžia matuoti AEK impulsinę reakciją [12], iš kurios apskaičiuojama AEK dažninė charakteristika, tačiau matavimams atlikti būtinas etaloninis keitiklis, kurio charakteristikos išmatuotos su įranga, pagaminta pagal standartą **E1106-86**.

Standarte **E1781-98** kaip etaloninį rekomenduojama naudoti kūginį NIST keitiklį. Keitikliui keliami reikalavimai – pastovios galios spektras su nedidesniais kaip 20 dB amplitudės svyravimais dažnių ruože nuo 100 kHz iki 1 MHz, taip pat kuo mažesnė keitiklio apertūra.

AEK kalibruoti kaip ir standarte **E1106-86** naudojamas metalinis blokas, ant kurio įrengiami matuojamas ir etaloninis AEK 100 mm atstumu nuo žadinimo šaltinio.

Kaip žadinimo šaltinį rekomenduojama naudoti kapiliarinį vamzdelį, tačiau minima, kad tai gali būti ir kitoks akustinių bangų šaltinis, kaip kibirkštis išlydžio, impulsu žadinamas AEK bei kiti įrenginiai, leidžiantys gauti mechaninį poveikį dažnių ruože nuo 100 kHz iki 1 MHz, mechaninio poveikio atsikartojimas ne didesnis kaip 98 %.



7 pav. AEK kalibravimo stendo struktūrinė schema (standartas **E1781-98**)

Matuojamo AEK dažninė charakteristika įvertinama pagal (6) formulę:

$$K_{AEK}(j\omega) = \frac{S_t(j\omega)K_{ET}(j\omega)}{S_e(j\omega)}; \quad (6)$$

čia  $K_{ET}(j\omega)$  – etaloninio keitiklio dažninė charakteristika, gauta kalibruojant pagal standartą **E1106-86**, m/V arba m/s/;  $S_e(j\omega)$  – etaloninio keitiklio impulsinės reakcijos spektras, nm arba m/s.



Metodo privalumai:

- Lyginant su standartu **E1106-86**, yra paprastesnė matavimams skirta įranga.

Metodo trūkumai:

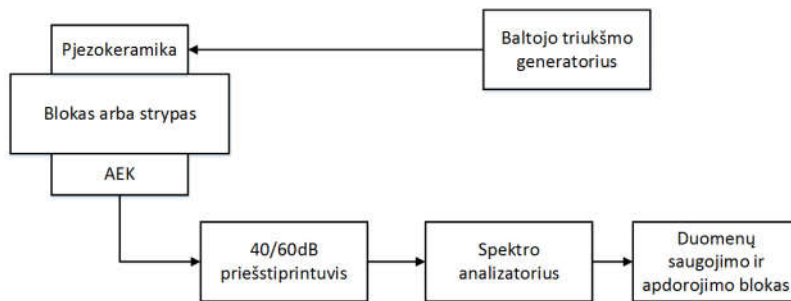
- Kalibravimas vieno tipo banga.
- Būtina periodiškai kalibruoti etaloninį keitiklį.
- Ribotos galimybės didinti matavimo greitaveiką, kuri priklauso nuo naudojamo akustinių bangų šaltinio. Šio atveju, kaip ir standarte **E1106-86**, tai yra laužomas kapiliarinis vamzdelis.

#### 1.2.4. Standarto E976 analizė

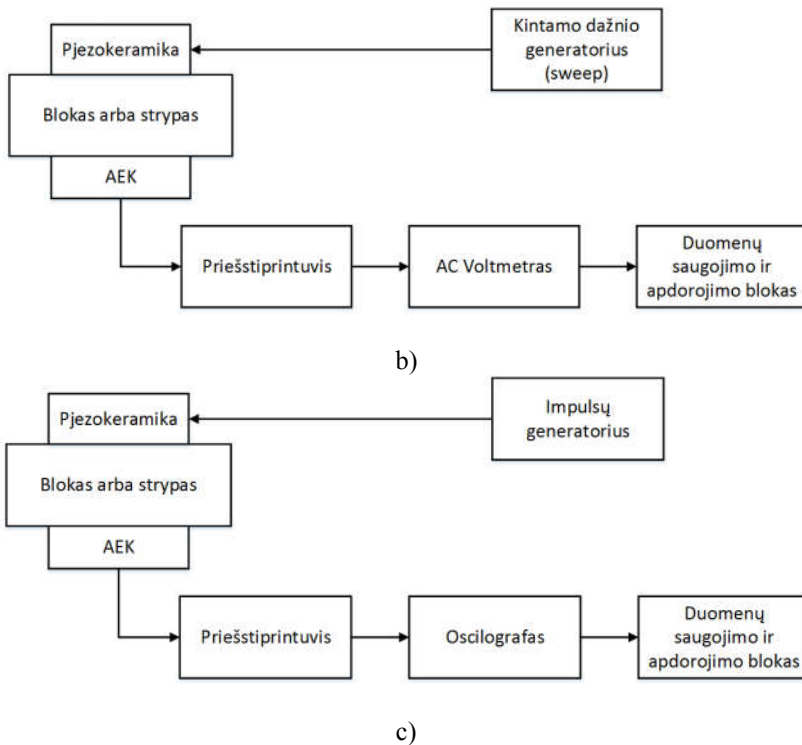
Standartas **E976** rekomenduoja įrangą ir metodus, leidžiančius tikrinti naudojamų AEK charakteristikas [13]. Įranga gali būti taikoma ir gamyboje, siekiant įvertinti kuriamų arba pagamintų AEK charakteristikas. Tam tikrais atvejais gamintojai gali pateikti su šia įranga išmatuotas AEK charakteristikas (pavyzdys pateikiamas **2 priede**), tačiau atlikti matavimai negali būti laikomi patikimais ar atkartojamais skirtingose laboratorijose ar organizacijose.

Matavimai gali būti atliekami naudojant metalinį bloką arba strypo tipo bangolaidžius. Kaip akustinių bangų šaltinis naudojama pjezokeramika, pritvirtinta prie bloko arba strypo. Taip pat galimi ir kitokie mechaninio poveikio šaltiniai. Pagal šį standartą siūlomos įrangos prijungimo schemas pateikiamos 8 pav.

Visais atvejais pradžioje, taikant vieną iš galimų matavimo metodų, išmatuojama AEK reakcija į tam tikrą atsikartojantį mechaninį poveikį (reikalavimai mechaninio poveikio atsikartojimui nėra pateikiami, tačiau kartotiniai kalibravimo rezultatai neturi skirtis daugiau kaip 3 dB). Ši reakcija išsaugoma. Vėlesni AEK matavimai leidžia įvertinti santykinę AEK parametrų pokytį.



a)



**8 pav.** AEK kalibravimo stendo struktūrinės schemos (standartas **E976**): a) stendas su spektro analizatoriumi; b) stendas su AC voltmetru; c) stendas su oscilografu

8 pav. pavaizduotos struktūrinės schemos gali keistis priklausomai nuo laboratorijos, kurioje atliekami matavimai. Pagal standartą tokie pokyčiai galimi, nes matavimai yra lyginamojo pobūdžio.

Metodo privalumai:

- Palyginti su standartais **E1106-86** ir **E1781-98**, galima didesnė matavimo sparta.
- Paprastesnė matavimų įranga, lyginant su rekomenduojama standartuose **E1106-86** arba **E1781-98**.

Metodo trūkumai:

- Standartas neužtikrina matavimo rezultatų atsikartojimo tarp atskirų matavimus atliekančių laboratorijų ar organizacijų.
- Metodas nėra skirtas AEK kalibruoti, tačiau lyginamiesiems AEK charakteristikų matavimams, skirtiems AEK charakteristikų kitimui dėl senėjimo ar kitų priežasčių įvertinti.

### 1.2.5. Tarpusavio sąveikos AEK charakteristikų matavimo metodo analizė

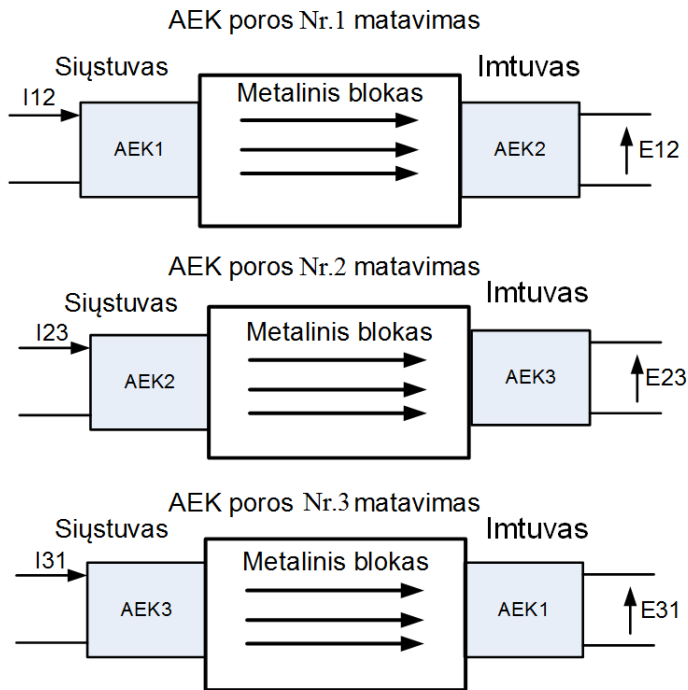
Kalibruojant AEK pagal tarpusavio sąveikos [16–18] (*reciprocity*) kalibravimo metodą, būtinos trys AEK poros 9 pav. (joms sudaryti užtenka trijų AEK). Šioms AEK poroms keliami reikalavimai:

Laikoma, kad visi AEK yra tiesiniai.

Akustinis kontaktas tarp AEK ir bangų sklidimo aplinkos privalo būti atkartojamas (žinomos medžiagos ir vienodas storis).

Laikoma, kad visi AEK yra vienodi ir jų dažninės charakteristikos nepriklauso nuo to, ar jie veikia siūstuvo ar imtuvo režimu.

Bangų sklidimo aplinkoje nėra atspindžių.

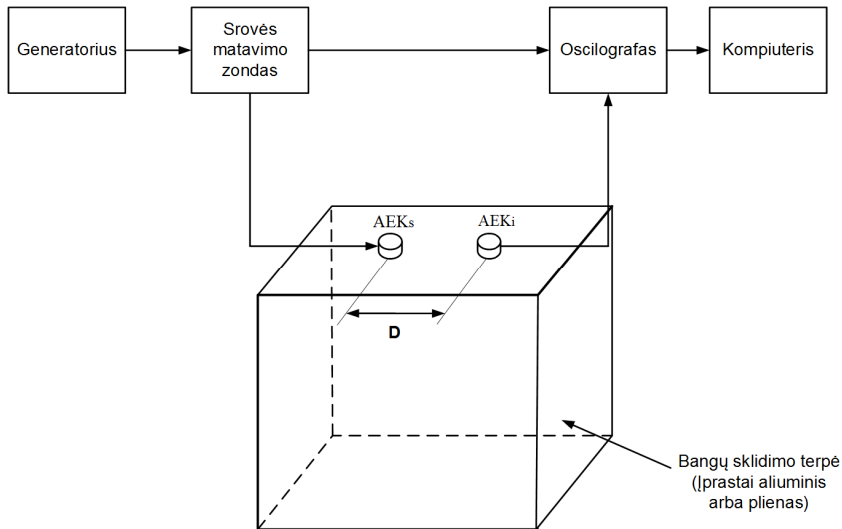


9 pav. Akustinės emisijos keitiklių išdėstymo esant abipusiam kalibravimui

Kalibruojama trimis etapais. Kiekvienu atveju naudojami du AEK, siūstuvus ir imtuvas. Matuojamos kiekvieno iš AEK poros siūstuvo režimu veikiančio keitiklio srovės ir imtuvo režimu veikiančio keitiklio įtampos. 9 pav. pavaizduotoje struktūrinėje schemoje siūstuvo režimu veikiančių keitiklių srovės pažymėtos  $I_{12}$ ,  $I_{23}$ ,  $I_{31}$ , o imtuvo režimu veikiančių keitiklių įtampos –  $E_{12}$ ,  $E_{23}$ ,  $E_{31}$ .

Tariama, kad kalibruojant AEK šiuo metodu nėra reikalingas norimos formos mechaninis poslinkis. Kadangi vienas iš reikalavimų yra atspindžių nebuvimas sklidimo aplinkoje, kalibruoti privalo būti naudojamas metalinis blokas. Bloko matmenys

parenkami atsižvelgiant į kalibruojamo AEK dažnių ruožą. Tipinė įrangos prijungimo schema pavaizduota 10 pav.



10 pav. Vienos AEK poros charakteristikų matavimo struktūrinė schema

AEK dažninė charakteristika randama pagal (7) formulę. Joje, be išmatuotų AEK srovių ir įtampų, taip pat būtinas abipusio ryšio koeficientas. Šis koeficientas [17] yra keitklį veikiančios bangos tipo. Relėjaus bangos atveju koeficientas randamas pagal (8) formulę, o išilginės bangos atveju – pagal (9) formulę:

$$M_{2R,L} = \sqrt{\frac{E_{12}E_{23}I_{31}}{H_{R,L}I_{12}I_{23}E_{31}}}; \quad (7)$$

čia  $E_{12}, E_{23}, E_{31}$  – imtuvo režimu veikiančių keitklių įtampos, V;  $I_{31}, I_{12}, I_{23}$  – siųstuvo režimu veikiančių keitklių srovės A;  $H_{2R,L}$  – išilginės arba Relėjaus tipo bangos abipusio ryšio koeficientas (*reciprocity parameter*).

$$H_R = 2\pi f^{\frac{2}{3}} \frac{x}{\mu \sqrt{v_r D}} e\left[j\left(\frac{\pi}{4} - k_R D\right)\right]; \quad (8)$$

čia  $H_R$  – Relėjaus bangos ryšio koeficientas;  $x$  – skaičius, priklausantis nuo Poisson koeficiento;  $\mu$  – šlyties modulis;  $v_r$  – Relėjaus tipo bangos sklidimo greitis, m/s;  $k_R$  – banginis skaičius (Relėjaus tipo bangos).

$$H_L = \frac{2f}{\rho v_L^2 D} e\left[j\left(\frac{\pi}{2} - k_L D\right)\right]; \quad (9)$$

čia  $H_L$  – išilginės bangos ryšio koeficientas;  $\rho$  – bangų sklidimo aplinkos tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $f$  – dažnis, Hz;  $v_L$  – išilginės bangos greitis, m/s;  $D$  – nuotolis iki siųstuvo režimu veikiančio keitklio, m;  $k_L$  – banginis skaičius (išilginei bangai).

Metodo privalumai:

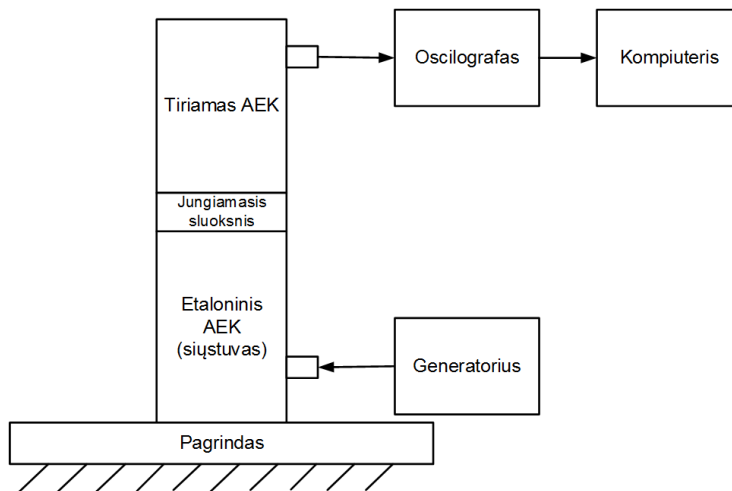
- Nėra reikalingas norimos formos mechaninis poveikis, matavimams naudojamas kintamojo dažnio signalas.

Metodo trūkumai:

- Siūlomas kalibravimo metodas grindžiamas prielaida, kad visos AEK poros yra vienodos, turinčios tiesinius parametrus, ir gali veikti siūstuvo bei imtuvo režimu, išlaikydamos tokias pat dažnines charakteristikas. Tačiau tai nėra žinoma ir gali būti nustatoma tik kalibruojant.
- Matuojant nėra gaunama impulsinė AEK charakteristika, nes naudojamas kintamojo dažnio signalas.
- Siekiant išvengti atspindžių ir bangų dispersijos, matuoti naudojamas masyvus metalinis blokas, tai didina matavimo įrangos matmenis.

### 1.2.6. Tiesioginio AEK sąlyčio matavimo metodo analizė

Tiesioginio AEK sąlyčio kalibravimo metodas (*surface to surface*) [19] pritaikomas pagal 11 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Kalibruoti naudojami du AEK. Vienas iš keitiklių yra etaloninis, jo dažninė charakteristika žinoma. Šis keitiklis jungiamas siūstuvo režimu ir žadinamas, naudojant keičiamojo dažnio sinuso signalą (*sweep* tipo signalas). Tiriamojo keitiklio dažninė charakteristika randama kaip reakcija į etaloninio keitiklio žadinimą.



11 pav. Tiesioginio AEK sąlyčio kalibravimo metodo įrangos struktūrinė schema

AEK keitiklio reakcija į bet koki mechaninį poveikį išreiškiama kaip sistemos impulsinės reakcijos ir poveikio signalo kompozicijos integralas (10):

$$s(t) = h(t) \times e(t); \quad (10)$$

čia  $s(t)$  – AEK reakcija (išėjimo signalas), V;  $e(t)$  – etaloninio keitiklio mechaninis poveikis, nm (sistemos įėjimas);  $h(t)$  – žadinimo sistemos, kurią sudaro etaloninis keitiklis ir generatorius impulsinė reakcija.

AEK įėjimo dydis yra siūstuvo režimu veikiančio AEK mechaninis poveikis. Išėjimo dydis išmatuotas ir sustiprintas elektrinis AEK signalas  $s(t)$ . Kompozicijos integralas laiko srityje, suskaičiavus Furjė transformaciją, keičiasi į sandaugą dažnių srityje:

$$S_t(j\omega) = H(j\omega)E(j\omega); \quad (11)$$

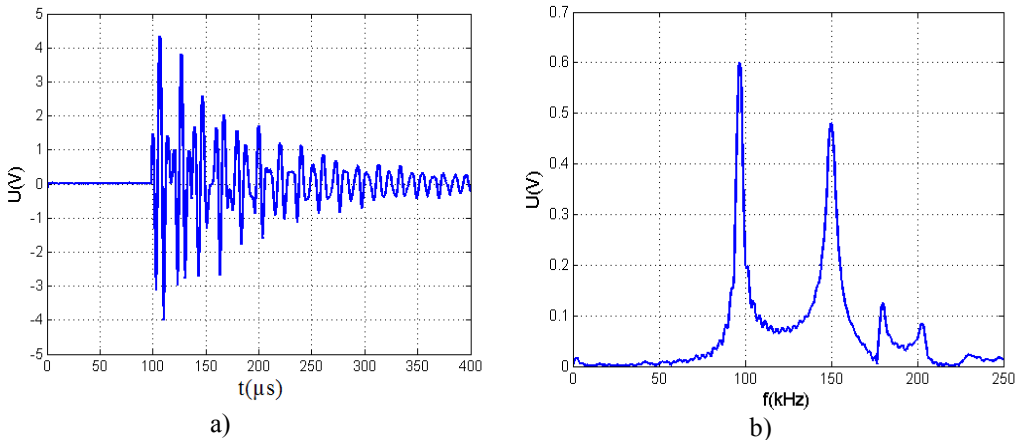
čia  $S_t(j\omega)$  – tiriamojo keitiklio reakcijos spektras, V;  $E(j\omega)$  – etaloninio keitiklio, m/s, poveikio signalo spektras;  $H(j\omega)$  – sistemos impulsinės reakcijos spektras, V.

Tuomet tiriamojo AEK dažninė charakteristika įvertinama pagal (12) formulę:

$$K_{AEK}(j\omega) = \frac{K_{ET}(j\omega)S_t(j\omega)}{S_{ET}(j\omega)}; \quad (12)$$

čia  $S_t(j\omega)$  – tiriamojo keitiklio reakcijos į kintamojo dažnio sinuso signalą spektras, V;  $S_{ET}(j\omega)$  – etaloninio keitiklio reakcijos į kintamojo dažnio sinuso signalą spektras, V;  $K_{ET}(j\omega)$  – etaloninio keitiklio dažninė charakteristika, išreiškiama absoliučiaisiais vienetais, m/s arba nm.

Taikant tiesioginio sąlyčio metodą, išmatuotos AEK impulsinės reakcijos pavyzdys ir apskaičiuotas jos spektras pateikiamas 12 pav. Matavimai buvo atliekami pagal 11 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.



**12 pav.** AEK charakteristikos: a) impulsinė reakcija, gauta tiesioginio sąlyčio kalibravimo metodu; b) apskaičiuotas impulsinės reakcijos spektras

Iš pavaizduotų matavimo duomenų (12 pav.) matoma, kad AEK turi rezonansus esant dviem dažniams: 90 kHz ir 150 kHz. Yra žinoma, kad, taikant šį matavimo metodą, yra neišvengiami atspindžiai tarp keitiklių, taigi turi būti gaunamas papildomas rezonansas, kuris negali būti siejamas su konkrečiu AEK, tačiau su matavimo sistema.

Papildomo rezonanso buvimą patvirtino ir vėlesni matavimo rezultatai, atlikti pagal 40 pav., a, parodytą struktūrinę schemą, naudojant naujo tipo AEK charakteristikų matavimo įrangą, siūlomą šiame darbe. Matavimo rezultatai pateikiami **6 priede**.

Tiesioginio AEK sąlyčio metodas yra paprastas, tačiau tinka tik lyginamiesiems AEK charakteristikų matavimams ir gali būti priskiriamas įrangai, pagamintai pagal standartą **E976**.

Metodo privalumai:

- Paprasta matavimams skirta įranga.

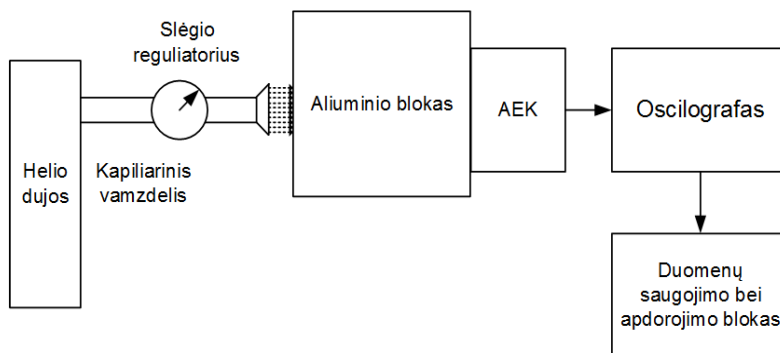
Metodo trūkumai:

- Matuojant neišvengiami rezonansai, susiję su naudota matavimų įranga, tačiau šie rezonansai negali būti vertinami kaip AEK charakteristika.
- Matavimai pagrįsti etaloninio keitiklio charakteristikomis, šio tipo keitiklį būtina kalibruoti su kitokia matavimo įranga.
- AEK charakteristikos matuojamos vieno tipo banga.

Metodas gali būti priskiriamas standartui **E976**, t. y. lyginamiesiems AEK charakteristikų matavimams atlikti.

### 1.2.7. Baltojo triukšmo, naudojamo AEK charakteristikoms matuoti, metodo analizė

Baltuoju triukšmu AEK kalibruojamas pagal 13 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą [20]. Kaip akustinių bangų šaltinis naudojamos suslėgtosios helio dujos (gali būti naudojamos ir kitokios dujos). Dujų srautas nukreipiamas į kalibruoti naudojamo bloko paviršių. Sukeliamas dujų srauto poveikis atitinka AEK žadinimą baltuoju triukšmu.



**13 pav.** Kalibravimo stendo struktūrinė schema

Matavimo metodas leidžia įvertinti AEK spektrą, tačiau matuojant nėra gaunama AEK impulsinė reakcija. Mechaninio poveikio atsikartojimui užtikrinti naudojamas dujų slėgio reguliatorius. Dėl šio reguliatoriaus konstrukcijos ir eksploataavimo sąlygų gali atsirasti didelių mechaninio poveikio amplitudės neapibrėžčių. Metodas gali būti taikomas lyginamiesiems AEK charakteristikų matavimams atlikti pagal standartą **E976**,

tačiau AEK jautrumo kitimą įvertinti gali būti sudėtinga, priklausomai nuo turimos slėgio regulatoriaus konstrukcijos.

Metodo privalumai:

- Paprasta matavimų įranga.

Metodo trūkumai:

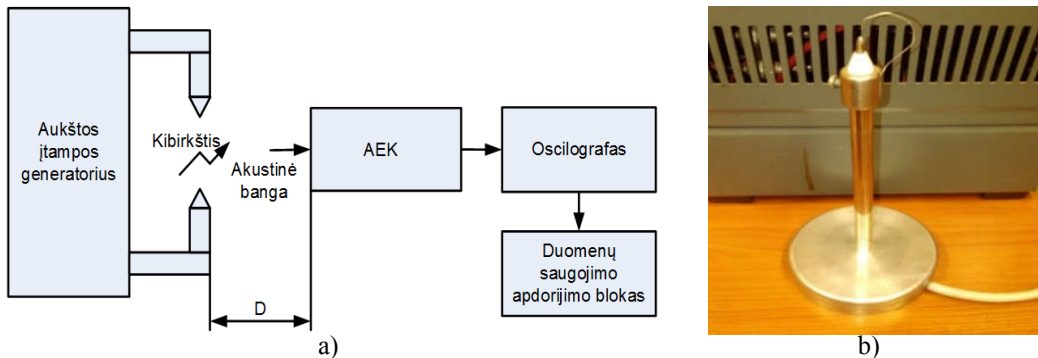
- Matuojant nėra gaunama impulsinė AEK reakcija.
- Akustinio šaltinio atsikartojimas priklauso nuo dujų slėgio regulatoriaus konstrukcijos.

Metodas gali būti priskiriamas standartui **E976**, t. y. lyginamiesiems AEK charakteristikų matavimams atlikti.

### 1.2.8. Kibirkšties išlydžio AEK charakteristikų matavimo metodo analizė

AEK gali būti naudojami įvairiose aplinkose ir priklausomai nuo aplinkos, kurioje atliekami matavimai, gaunamos skirtingos to paties AEK charakteristikos. Standartas **E1106-86** skirtas AEK kalibruoti Relėjaus tipo banga, jame taip pat pateikiamos rekomendacijos AEK apertūros funkcijai įvertinti. Tačiau neapkrauto AEK charakteristikos yra skirtingos, ir matavimai pagal standartą **E1106-86** neleidžia įvertinti AEK charakteristikų ore. Šiems matavimams atlikti siūlomas kibirkšties išlydžio matavimo metodas.

AEK kalibravimas kibirkšties išlydžiu [21] atliekamas pagal 14 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Kaip akustinių bangų šaltinis naudojamas aukštosios įtampos sukeliama kibirkštis išlydis ore. Šis metodas leidžia sužadinti trumpus, mikrosekundžių eilės akustinius signalus. Poveikio trukmė priklauso nuo atstumo tarp kibirkštį sukeliančio generatoriaus elektrodų. Tiriamasis keitiklis pastatomas nuotoliu  $D$  nuo akustinių bangų šaltinio. AEK dažninė charakteristika randama pagal (13) formulę. Metodas dažniausiai taikomas AE mikrofonams kalibruoti.



14 pav. a) Kalibravimo stendo struktūrinė schema; b) kalibravimo stendo nuotrauka

$$K_{AEK}(j\omega) = \frac{S_t(j\omega)}{Y_a(j\omega)}; \quad (13)$$



čia  $S_t(j\omega)$  – tiriamojo keitiklio reakcijos spektras, V;  $Y_d(j\omega)$  – akustinio lauko slėgio spektras nuotoliu  $D$  nuo akustinių bangų šaltinio, Pa.

Metodo privalumai:

- Išmatuojamos neapkrauto AEK charakteristikos, pagal standartą E1106-86 pagaminta įranga neleidžia atlikti tokio tipo matavimų.

Metodo trūkumai:

- Akustinių bangų poveikio atsikartojimo užtikrinimas.

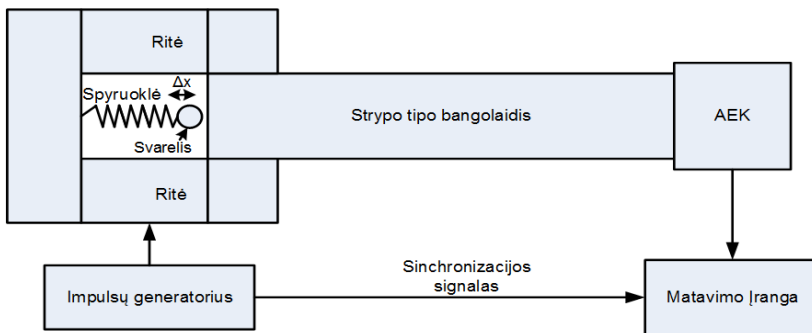
### 1.2.9. Elektromechaninio AEK charakteristikų matavimo metodo analizė

Mechaninis poveikis, leidžiantis kalibruoti AEK, gali būti sukeliamas tam tikros masės kūno smūgiavimo į bangolaidžio paviršių [22]. Akustinės emisijos keitiklių dažninė charakteristika tuomet randama pagal (14) formulę:

$$K_{AEK}(j\omega) = \frac{S_t(j\omega)}{Y(j\omega)}, \quad (14)$$

čia  $S_t(j\omega)$  – tiriamojo keitiklio reakcijos į bangolaidžio galo virpėjimą spektras, V;  $Y(j\omega)$  – bangolaidžio galo virpėjimo spektras, V.

Šis kalibravimo metodas buvo išbandytas praktiškai. Kaip bangų sklidimo aplinka buvo naudojamas 1 m ilgio 0,025 m skersmens plieninis strypas. Struktūrinė įrangos prijungimo schema pavaizduota 15 pav., a.

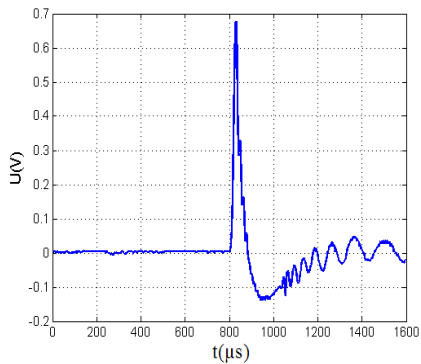


a)

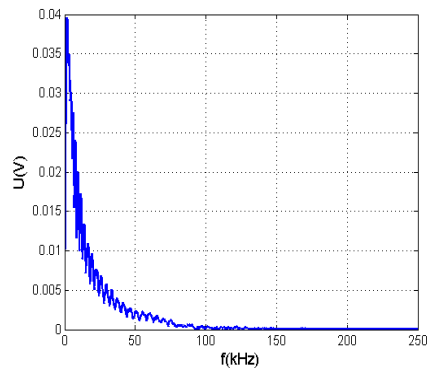
b)

15 pav. a) Elektromechaninio muštuko naudojimo struktūrinė schema; b) elektromechaninis muštukas

Buvo išmatuotos impulsinė ir apskaičiuota dažninė bangolaidžio galo virpėjimo charakteristikos. Rezultatai pateikiami 16 pav.



a)



b)

16 pav. a) Išmatuotas bangolaidžio galo poslinkis, gautas panaudojus elektromechaninį muštuką; b) apskaičiuotasis poslinkio spektras

Muštukui smūgiuojant ne į bangolaidžio galo centrą, gaunamas papildomas šoninis bangolaidžio lankstymasis (sužadinama daugiau nei viena moda). Tai gali būti matoma iš pateiktų (16 pav., a) matavimo rezultatų, laiko intervalu nuo 1000  $\mu\text{s}$  iki 1600  $\mu\text{s}$ . Šis lankstymasis tokiu atveju yra matavimo stendo charakteristika ir, kalibruojant AEK, yra nepageidaujamas. Jis gali būti mažinamas arba pašalinamas, užtikrinant muštuko smūgiavimą į bangolaidžio galo centrą.

Nepriklausomai nuo muštuko smūgiavimo vietos, gautame mechaniniame poslinkyje matoma dispersijos požymių. Dispersija yra tiesiogiai susijusi su bangolaidžio geometrija, strypo tipo bangolaidžio atveju jo skersmeniu ir bangos sklidimo nuotoliu. Dėl šios priežasties matuoti impulsinę AEK charakteristiką galima tik tam tikrame dažnių ruože. Dažninė AEK charakteristika su pagamintu stendu gali būti vertinama dažnių ruože nuo 2 kHz iki 50 kHz (16 pav., b).

Metodo privalumai:

- Galimybė matuoti AEK charakteristikas dažnių ruože nuo kelių kilohercų.
- Paprasta stendo konstrukcija.
- Didelė, palyginti su standartu E1106-86, matavimo sparta.

Metodo trūkumai:

- Mechaninio poveikio atsikartojimo užtikrinimas.
- Ribotos galimybės keisti mechaninio poveikio formą.
- Matavimo rezultatą veikia bangolaidžio dispersinės savybės.

### 1.3. Skyriaus išvados

1. 2 pav. pateikti AEK charakteristikų matavimo pavyzdžiai rodo impulsinės AEK charakteristikos pateikimo būtinybę kartu su AEK dažnine charakteristika. Tai matoma pagal kartais besiskiriančią impulsinių charakteristikų trukmę, kai pateiktuose pavyzdžiuose AEK dažninės charakteristikos juostos pločiai panašūs.
2. Standartuose **E1106-86 ir E1781-98** apibūdinami kalibravimo metodai leidžia matuoti AEK impulsinę ir dažninę charakteristikas. Pagrindinis šios įrangos trūkumas yra nepakankamai išsamūs matavimo duomenys. Pateikiami kalibravimo rezultatai atspindi AEK charakteristikas Relėjaus tipo bangoms matuoti, o dažniausiai šie keitikliai matuoja Lambo tipo bangas, taip pat galimi ir išilginių bangų matavimai. Visais atvejais būtini papildomi matavimo duomenys arba teorinis įvertinimas, kuris įprastai dėl ribotų duomenų apie AEK konstrukciją yra sudėtingas.
3. Standarte **E976** pateikiamos rekomendacijos įrangai, skirtai santykiniam AEK charakteristikų palyginimui. Įranga, pagaminta pagal šias rekomendacijas, neleidžia atlikti AEK kalibravimo absoliučiaisiais vienetais. Taip pat šis standartas neužtikrina rezultatų atsikartojimo tarp skirtingų kalibravimo įrenginių ar matavimo laboratorijų.
4. Tarpusavio sąveikos ir baltojo triukšmo naudojimo AEK kalibruoti metodai leidžia matuoti tik AEK dažninę charakteristiką. Pateikiant tik dažninę charakteristiką, yra sudėtinga įvertinti AEK impulsinę reakciją.
5. Taikant AEK kalibruoti tiesioginio sąlyčio metodą, dėl atspindžių atsiranda papildomas rezonansas. Tai matoma iš matavimo rezultatų, pateikiamų 12 pav. ir **6 priede**. Šis rezonansas yra matavimo stendo charakteristika ir negali būti pašalinamas. Dėl šios priežasties metodas gali būti taikomas AEK charakteristikų kitimui įvertinti, tačiau ne AEK kalibruoti absoliučiaisiais vienetais.
6. Elektromechaninio muštuko naudojimo privalumas, lyginant su pjezokeraminiais žadinimo metodais, yra galimybė matuoti AEK charakteristikas dažnių ruože nuo 2 kHz iki 50 kHz. Metodo trūkumas – nėra galimybių kompensuoti dispersijos įtakos. Sudėtinga išvengti papildomo bangolaidžio galo lankstymosi, atsirandančio dėl muštuko smūgiavimo pozicijos.
7. Esami standartiniai AEK kalibravimo metodai leidžia matuoti AEK charakteristikas tik tai vieno tipo banga. AEK poveikio signalo formavimo metodai riboja matavimo greitaveiką arba neleidžia matuoti AEK impulsinės reakcijos. Matavimams būtinos akustinės vėlinimo linijos matmenys parenkami vengiant bangų dispersijos vėlinimo linijoje, o tai nėra būtina taikant dispersiją kompensuojančius žadinimo metodus. Dėl šių priežasčių yra prasmingi nauji AEK kalibravimo metodai, leidžiantys, naudojant norimos formos mechaninius poveikius, matuoti impulsines ir dažnines AEK charakteristikas išilgine bei paviršine bangomis.

## 2. NORIMOS FORMOS MECHANINIŲ POVEIKIŲ SINTEZĖ BANGOLAIDŽIUOSE

Su trumpų signalų generavimo dispersinėse aplinkose problemomis susiduriama šviesolaidžių sistemose, atliekant neardomąją kontrolę, povandeninėje akustikoje ir t. t. [28, 32]. Problemai spręsti taikomi signalų apdorojimo metodai. Jie leidžia įvertinti bangų dispersiją ir koreguoti žadinimo signalą norimoje dispersinės aplinkos vietoje, siekiant gauti norimos formos poveikį [33–45].

Dispersijai kompensuoti šiuo metu naudojami signalų dekompozicijos ir laikinio apgręžimo metodai. Laikinio apgręžimo metodas dėl savo paprastumo gali būti taikomas sistemose su ribotais skaičiavimo pajėgumais, tačiau turi kai kurių eile trūkumų, palyginti su dekompozicijos metodu.

Siekiant gauti norimos formos mechaninį poveikį dispersiniuose bangolaidžiuose buvo išbandyti abu metodai. Laikinio apgręžimo metodas neįvertina signalų slopinimo bangolaidyje, taip pat pasižymi mažesniu atsparumu triukšmams. Dėl šios priežasties taikant laikinio apgręžimo metodą iš ilgo, kelių šimtų mikrosekundžių trukmės mechaninio poveikio signalo galima gauti kelių mikrosekundžių poveikį, tačiau jo forma nėra prognozuojama. Taip pat dėl žemo atsparumo trikdžiams galimas papildomas foninis triukšmas. Dekompozicija grįstas metodas neįvertina turimo kodas analogas keitiklio bitų skaičiaus, kas tam tikrais atvejais įneša papildomų triukšmų ir sintezuoto poveikio formos iškraipymų.

Tyrimo rezultatai parodė ribotas šių metodų taikymo galimybes norint gauti norimos formos mechaninį poveikį bangolaidžiuose. Dėl šios priežasties pasiūlytas ir išbandytas modifikuotas dekompozicijos metodas. Kadangi literatūroje nėra pateikiama kriterijaus, leidžiančio įvertinti gautus norimos formos poveikius, šiam įvertinimui pasiūlytas norimos formos signalo kokybės kriterijus  $Q$ . Šis kriterijus taip pat leido palyginti metodus, leidžiančius gauti mikrosekundžių eilės mechaninius poveikius dispersinėse aplinkose.

### 2.1. Bangolaidžio matmenų parinkimas

Akustinių bangų vėlinimo linija, kalibruojant AEK, leidžia išmatavus išvengti bangų atspindžių įtakos. Standarte **E1106-86** vėlinimo linija yra metalinis blokas. Šiame darbe siūloma naudoti strypo ir plokštės tipo bangolaidžių konstrukcijas. Bangų vėlinimo laikotarpis siūlomuose bangolaidžiuose priklausys nuo bangolaidžio matmenų ir medžiagos.

Tariama, kad mažiausiasis suvėlinimo laikotarpis žemojo dažnio AEK kalibruoti nuo AEK sužadimo iki atspindžio atsklidimo iki AEK privalo būti ne mažesnis kaip 100  $\mu$ s. Tokiu atveju bangolaidžio matmenys parenkami atsižvelgiant į didžiausią kalibruoti naudojamą bangos ilgį. Atliekant matavimus nustatyta, kad strypo tipo bangolaidžių matmenys turi būti parenkami pagal (15) formulę, o plokštės atveju vienos briaunos ilgis randamas pagal (16) formulę:

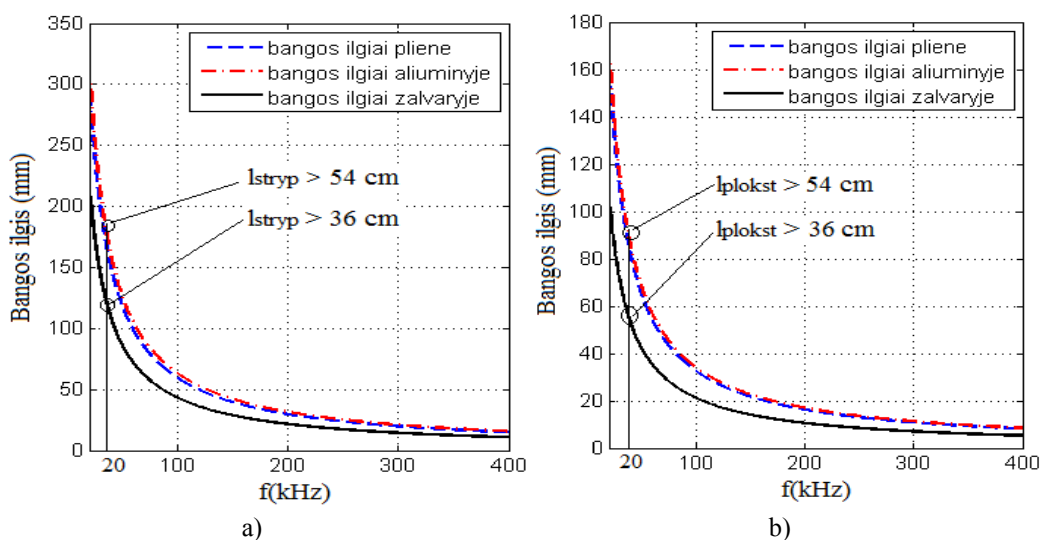
$$l_{stryp} \geq 3\lambda_{max}; \quad (15)$$

čia  $l_{stryp}$  – strypo tipo bangolaidžio ilgis, m;  $\lambda_{max}$  – didžiausias kalibruoti naudojamas bangos ilgis, m.

$$l_{plokst} \geq 6\lambda_{max}; \quad (16)$$

čia  $l_{plokst}$  – plokštės tipo bangolaidžio vienos briaunos ilgis, m;  $\lambda_{max}$  – didžiausias kalibruoti naudojamas bangos ilgis, m.

Kaip pavyzdys, 17 pav. pateikiamos kai kurių dažnai naudojamų medžiagų bangos ilgio ir dažnio priklausomybės esant išilginei ir skersinei bangoms. Iš pateiktų charakteristikų matoma, kad, esant 20 kHz mažiausiajam kalibravimo dažniui, strypo ilgis ir plokštės vienos briaunos ilgis plieniniam bei aliumininiam bangolaidžiams privalo būti didesni kaip 54 cm, o žalvariniam bangolaidžiui – didesni kaip 36 cm.



17 pav. a) Bangos ilgiai esant išilginėms bangoms; b) bangos ilgiai esant skersinėms bangoms

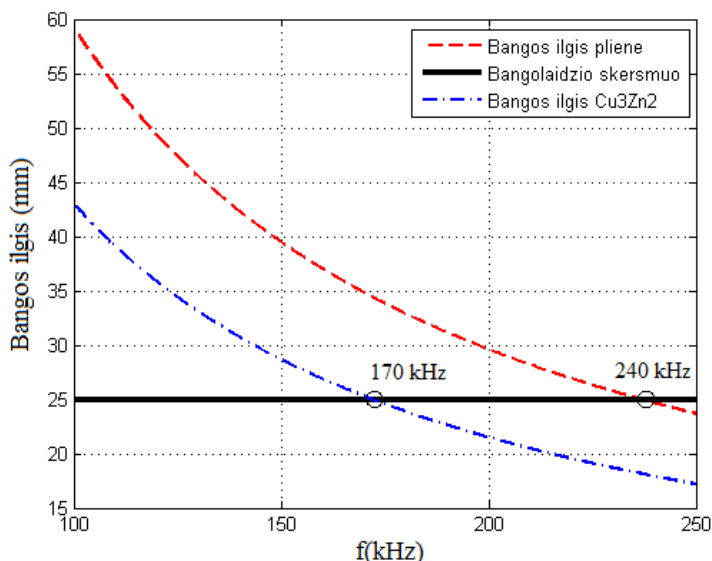
Apertūros funkcijos vertinimo metodika pateikiama 1.2.2 skirsnyje. Šios funkcijos įvertinimas įprastai yra sudėtingas dėl ribotų žinių apie tiriamo keitiklio konstrukciją. Įvertinimas yra svarbus ir būtinas, kai keitiklis naudojamas išilginei bangai matuoti, o kalibruota buvo su paviršine banga.

Naudojant strypo ir plokštės tipo bangolaidžius, apertūros funkcijos įvertinimas tampa nereikalingas, nes gaunamos dvi charakteristikos, kurios atspindi AEK reakciją, jį veikiant paviršine ir išilgine bangomis.

Norint užtikrinti kalibruoti naudojamo mechaninio poveikio sinchroniškumą visame keitiklio apertūros plote, privalo būti įvertinamas būtinas strypo tipo bangolaidžio skersmuo. Atliekant eksperimentinius tyrimus nustatytas šio tipo bangolaidžio skersmuo turi būti parenkamas pagal (17) formulę:

$$D_b > \frac{\lambda_{min}}{2}; \quad (17)$$

čia  $D_b$  – cilindrinio bangolaidžio skersmuo, m;  $\lambda_{min}$  – mažiausias kalibruoti naudojamas bangos ilgis, m.



**18 pav.** Sinchroniško strypo poslinkio įvertinimas plieno ir žalvario bangolaidžiams

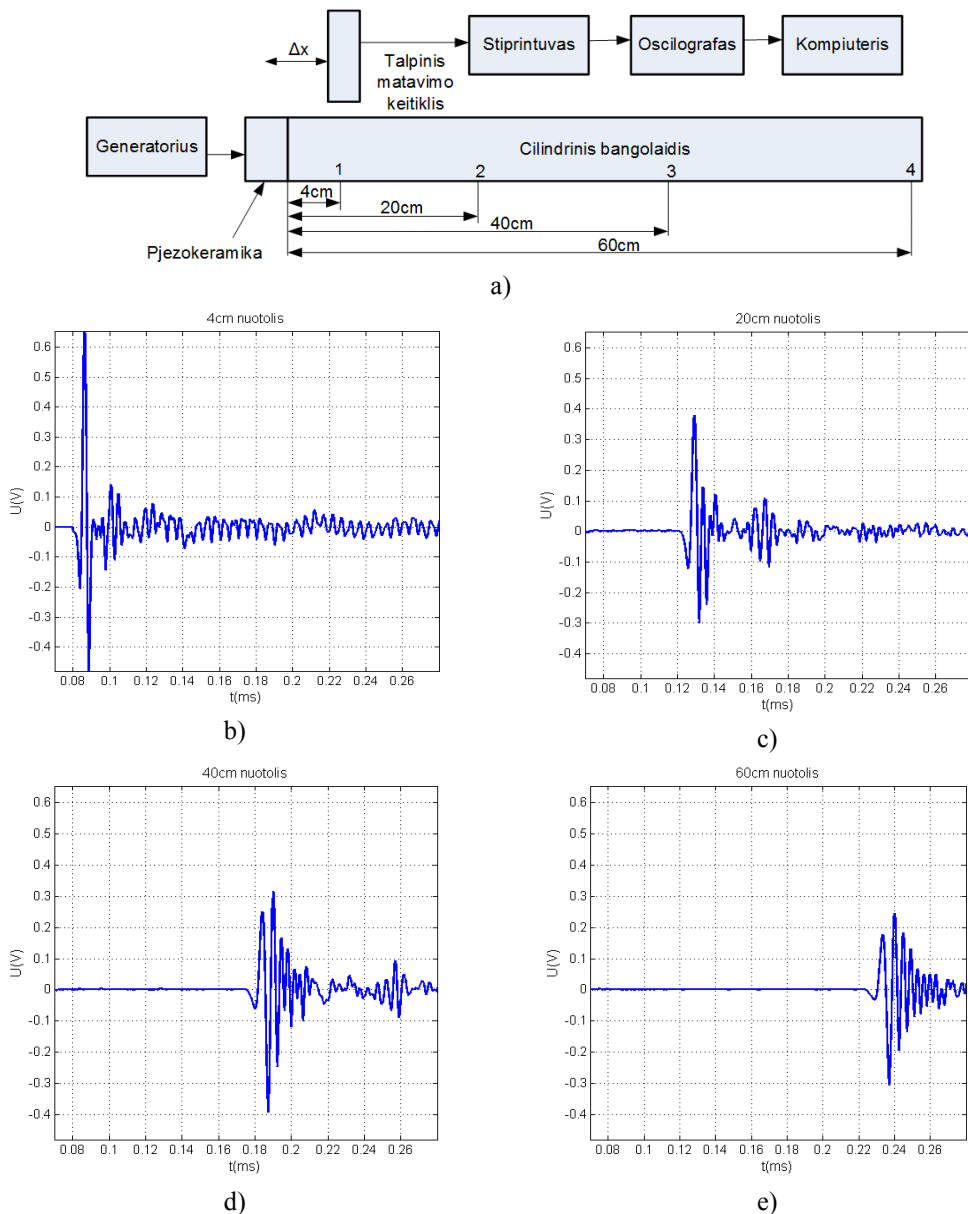
Pagal (17) formulę galima įvertinti, kuriame dažnių ruože gaunamas sinchroniškas mechaninis poveikis, naudojant strypo tipo bangolaidį. Plieninio ir žalvarinio strypų skersmens įvertinimo pavyzdys pateikiamas 18 pav. Parinkus 25 mm strypo skersmenį, kuris yra artimas maksimaliai galimam AEK apertūros plotui, sinchroniškas strypo galo virpėjimas plieniniame bangolaidyje gaunamas dažnių ruože iki 240 kHz, žalvariniame bangolaidyje – iki 170 kHz siekiančiame dažnių ruože.

## 2.2. Bangų dispersija bangolaidžiuose

Bangų dispersija – bangos sklidimo greičio priklausomybė nuo bangos ilgio. Dispersinės bangų sklidimo savybės strypuose aprašytos 1876 m. Pochhammerio ir Chree lygtimi [45–47], plokštėse – Relėjaus ir Lambo lygtimis. Akustinių bangų dispersija taip pat plačiai nagrinėta eksperimentiškai strypuose [48] ir plokštėse [49–51].

AEK kalibruoti būtinas mikrosekundžių eilės mechaninis poveikis. Pats paprasčiausias metodas tokiam poveikiui gauti yra pjezokeramikos žadinimas reikiamos trukmės elektriniu impulsu. Toks žadinimo metodas neįvertina pjezokeramikos dažninės charakteristikos, tačiau leidžia išgauti atsikartojantį, kelių mikrosekundžių eilės pjezokeramikos suvirpėjimą. Problemos, atsirandančios taikant tokį žadinimo metodą – būtinybė sužadintą poveikį perduoti į AEK per dispersinį bangolaidį. Siekiant iliustruoti bangų dispersijos įtaką impulsiniam žadinimo metodui, išmatuotas šoninis strypo tipo

bangolaidžio virpėjimas skirtingais nuotoliais nuo žadinimo šaltinio. Matavimo rezultatai ir struktūrinė įrangos prijungimo schema pavaizduota 20 pav.

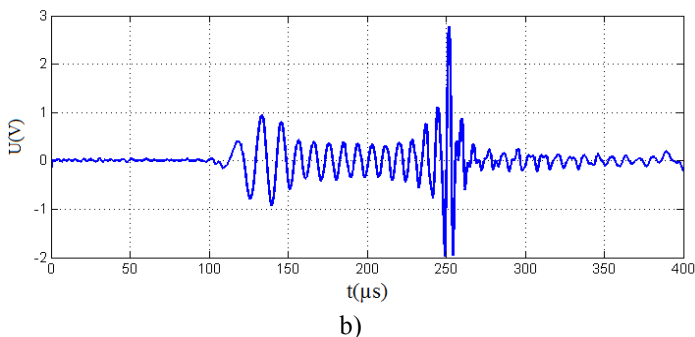
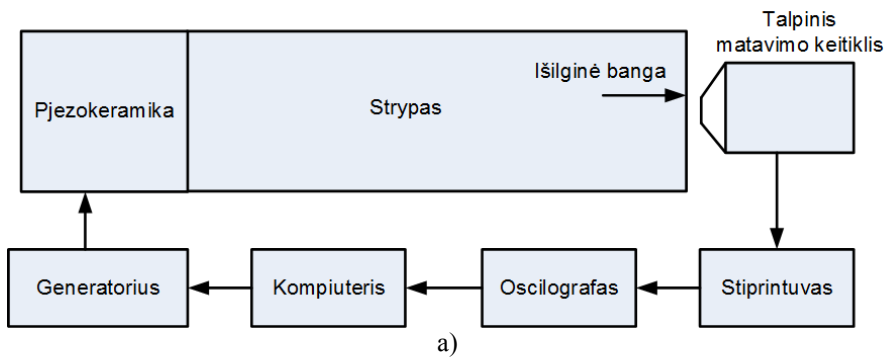


19 pav. ) Išmatuoti 0,8 cm skersmens ir 100 cm ilgio strypo briaunos šoniniai poslinkiai (matomas poslinkio formos kitimas dėl dispersijos): a) matavimo stendo struktūrinė schema; b) pirmame matavimo taške 5 cm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio; c) antrame matavimo taške 20 cm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio; d) trečiame matavimo taške 40 cm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio; e) ketvirtame matavimo taške 60 cm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio

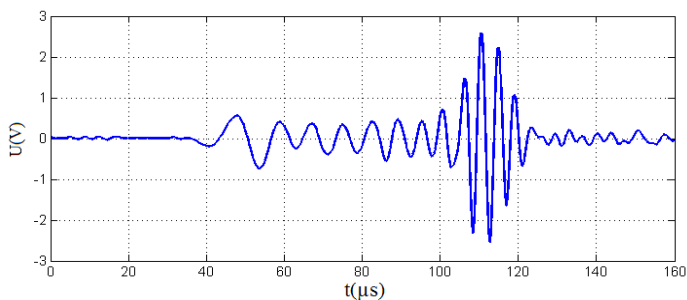
19 pav. pateikti matavimo rezultatai gauti žadinant pjezokeramiką 1  $\mu$ s trukmės ir 10 V amplitudės elektriniu impulsu. Pjezokeramika buvo pritvirtinta prie 0,8 cm skersmens ir 100 cm ilgio žalvarinio strypo galo. Matavimai atlikti pagal 19 pav., a, pavaizduotą struktūrinę schemą. Išmatuotos šoninės bangolaidžio deformacijos keturiuose bangolaidžio taškuose, skirtingai nutolusiuose nuo žadinimo šaltinio, rezultatai pateikiami 19 pav., b, c, d ir e. Matuojant turėta įranga leido užtikrinti iki 2 % siekiantį pjezokeramikos mechaninių poveikių atsikartojimą. Tuo buvo įsitikinta atliekant pakartotinius matavimus visuose bangolaidžio taškuose.

Iš pateiktų matavimo rezultatų matoma, kad, didėjant bangų sklidimo nuotoliui, impulso tipo mechaninė deformacija keičiasi į artimą čirpsniui poveikį, taip pat matoma, kad nulinės modos žemųjų dažnių bangos sklinda greičiau nei aukštųjų dažnių. Tikrai mažu nuotoliu, pateiktu atveju ne daugiau kaip 10 cm nuo šaltinio, gaunamas mechaninis poveikis artimas impulsui. Visais kitais atvejais būtinas kitoks žadinimo metodas, įvertinantis dispersines bangolaidžio savybes.

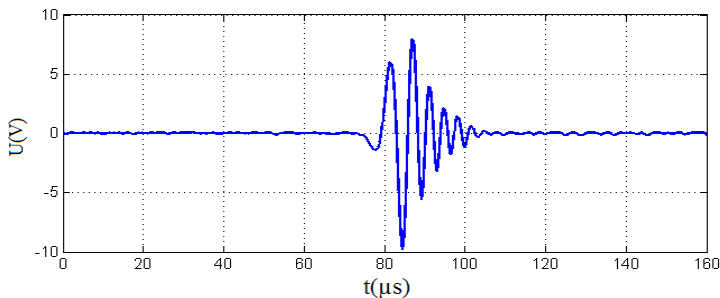
19 pav. pavaizduoti matavimo rezultatai rodo dispersijos įtaką mechaninei deformacijai, priklausomai nuo bangų sklidimo nuotolio. Dispersinės bangolaidžių savybės priklauso ne tik nuo sklidimo nuotolio, bet ir nuo bangolaidžio skersmens bei ilgio. Tai matoma pagal 20 pav. pateikiamus matavimo rezultatus, gautus pagal 20 pav., a, pavaizduotą struktūrinę schemą.







c)



d)

**20 pav.** Išmatuotas strypo galo virpėjimas:: a) matavimo stendo struktūrinė schema; b) 24 mm skersmens ir 60 cm ilgio plieninio strypo tipo bangolaidžio galo virpėjimas, c) 24 mm skersmens ir 30 cm ilgio plieninio strypo tipo bangolaidžio galo virpėjimas; d) 5 mm skersmens ir 30 cm ilgio žalvarinio strypo tipo bangolaidžio galo virpėjimas

### 2.3. Norimos formos mechaninių poveikių generavimas dispersiniuose bangolaidžiuose

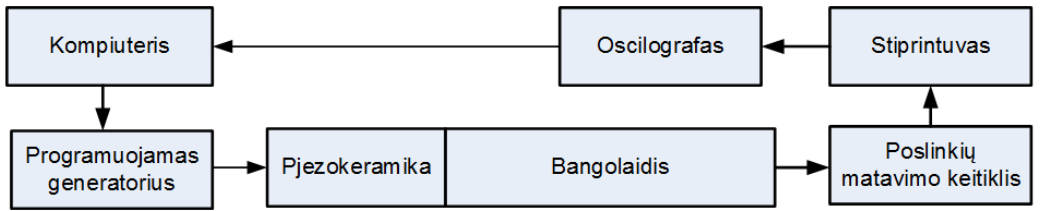
Žemiesiems dažniams AEK kalibruoti naudojant strypo arba plokštės tipo akustinius bangolaidžius, bangų dispersija neišvengiama. Dėl dispersijos, norimos formos mechaninius poveikius gauti tokiuose bangolaidžiuose, taikant įprastinius žadinimo metodus, yra neįmanoma.

Norimos formos poveikių gavimo problema dispersiniuose bangolaidžiuose nėra nauja, su ja susiduriama ir kitose srityse. Šiai problemai spręsti literatūroje pateikiami šie metodai [33–42]:

Laikinio apgręžimo metodas.

Dekompozicija grįstas metodas.

Norimos formos tipo poveikis abiem atvejais gaunamas iš sistemos impulsinės reakcijos, apskaičiuojant žadinimo signalą, leidžiantį kompensuoti dispersijos įtaką. Nepriklausomai nuo to, koks dispersijos kompensavimo metodas taikomas, visais atvejais AEK kalibravimo stendas sudaromas pagal 21 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Toks stendas leidžia matuoti sistemos, kurią sudaro generatorius, pjekokeramika, bangolaidis ir stiprintuvas, impulsinę reakciją ir generuoti sudėtingus žadinimo signalus.



**21 pav.** Strypo tipo bangolaidžio galo virpėjimo matavimo struktūrinė schema

Iš žinomų metodų laikinio apgręžimo metodas yra paprastas ir reikalauja minimalių skaičiavimo išteklių [33–42]. Šis metodas išreiškiamas pagal (18) formulę laiko srityje arba (19) formulę dažnių srityje [43]:

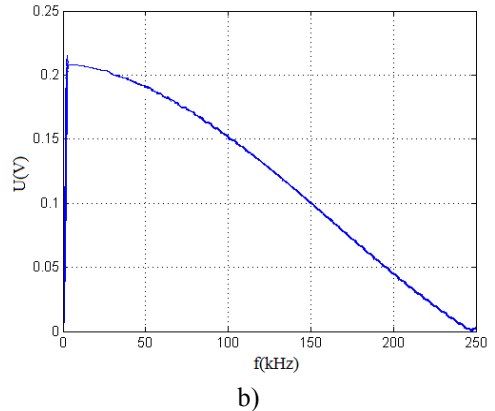
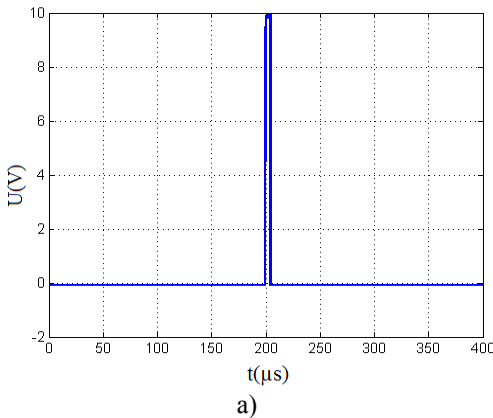
$$x_i = h_{N-i}, \text{ kai } i = 1, \dots, N; \quad (18)$$

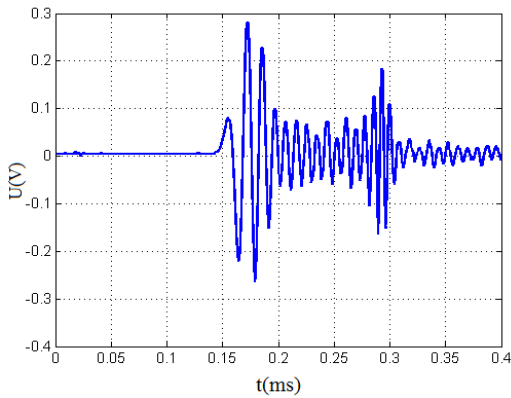
čia  $x_i$  – žadinimo signalo imtis;  $N$  – atskaitų kiekis;  $i$  – signalo atskaitos numeris;  $h$  – bangolaidžio impulsinė reakcija;

$$X(j\omega) = H^*(j\omega); \quad (19)$$

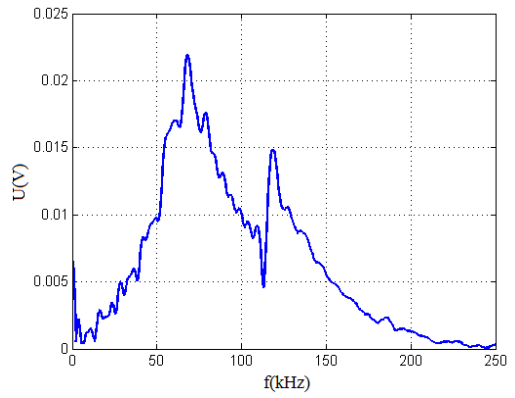
čia  $H^*(j\omega)$  – bangolaidžio impulsinės reakcijos spektro kompleksinės jungtinės reikšmės;  $X(j\omega)$  – bangolaidžio žadinimo signalo spektras.

Metodą taikyti tikslinga laiko srityje. Tuomet naudojami minimalūs skaičiavimo ištekliai. Kadangi, skaičiuojant žadinimo signalą, atliekamos tikrai manipuliacijos su signalo imties indeksais, metodas nepasižymi atsparumu triukšmams ir signalo slopinimui. Metodo taikymo pavyzdys pateiktas 22 pav.

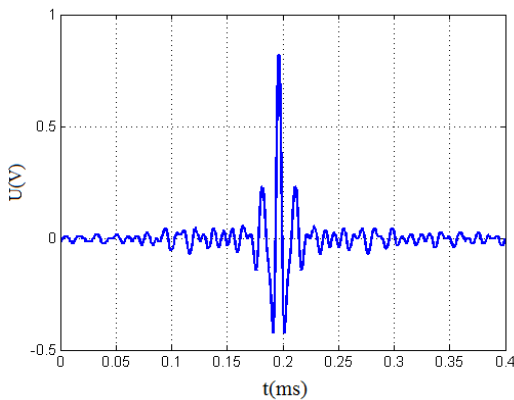




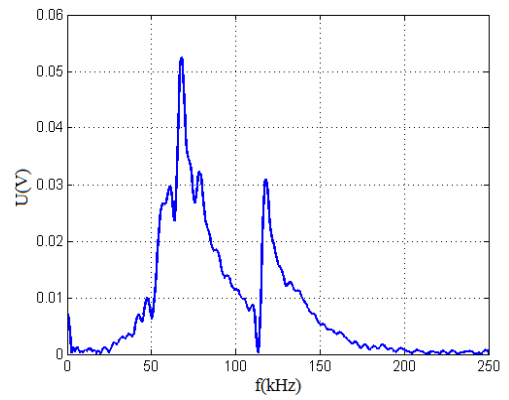
c)



d)



e)



f)

**22 pav.** Laikinio apgręžimo metodo taikymo pavyzdys: a) žadinimo signalas  $x(t)$ , skirtas sistemos impulsinei reakcijai matuoti; b) apskaičiuotas žadinimo signalo spektras; c) išmatuotas bangolaidžio galo virpėjimas; d) apskaičiuotas virpesių signalo spektras; e) apgręžimo metodu gautas bangolaidžio galo virpėjimas; f) apskaičiuotas signalo spektras

Dekompozicija grįstas metodas realizuojamas pagal (20) formulę. Metodams, kuriuos taikant naudojama dekompozicija, būtinas teorinis signalas  $y(t)$  arba  $Y(j\omega)$ . Signalas  $y(t)$  trukmė privalo būti apribojama, atsižvelgiant į bangolaidžio impulsinės reakcijos spektro  $H(j\omega)$  dažnių juostos plotį, kuris atitinkamai priklauso nuo pjezokeraminio keitiklio konstrukcijos ir bangolaidžio matmenų. Šio metodo realizacijai, taip pat kaip ir laikinio apgręžimo metodu, būtina matuoti sistemos impulsinę reakciją ir generuoti sudėtingus žadinimo signalus. Kai sistemos impulsinė reakcija yra žinoma, išėjimo signalas randamas apskaičiuojant kompozicijos integralą [38].

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau, \quad (20)$$

čia  $y(t)$  – išėjimo signalas (norimos formos mechaninis poveikis gaunamas strypo tipo bangolaidžio gale);  $x(t)$  – įėjimo signalas (apskaičiuotas bangolaidžio žadinimo signalas);  $h(\tau)$  – sistemos impulsinė reakcija (kalibravimo stendo, kurį sudaro žadinti naudojama pjezokeramika, generatorius ir bangolaidis, impulsinė reakcija).

Kompozicijos integralas laiko srityje atitinka sandaugą dažnių srityje [46], todėl sistemos išėjimo signalo spektras dažnių srityje, kai yra žinoma sistemos dažninė charakteristika, randamas pagal (21) formulę:

$$Y(j\omega) = H(j\omega) \times X(j\omega); \quad (21)$$

čia  $X(j\omega)$  – kompleksinis žadinimo signalo spektras (sistemos įėjimo signalas);  $Y(j\omega)$  – kompleksinis norimos formos signalo spektras (sistemos išėjimas);  $H(j\omega)$  – kompleksinis impulsinės reakcijos spektras.

Žadinimo signalas  $x(t)$ , žinant sistemos impulsinę reakciją ir norimos formos signalo  $y(t)$  spektrą, randamas pagal (22). Toks žadinimo signalo skaičiavimo metodas yra signalų dekompozicijos taikymas, turinti kai kurių trūkumų. Pagrindinė problema, atsirandanti su šiuo skaičiavimo metodu, yra dalyba iš  $H(j\omega)$ . Santykis tarp didžiausios ir mažiausios  $H(j\omega)$  verčių gali viršyti 60 dB, taip pat kai kurios vertės gali būti lygios nuliui. Skaičiuojant žadinimo signalą, tokiu atveju gaunamas nepageidaujamas triukšmas. Taip pat nėra įvertinamos žadinimo įrangos galimybės – kodas analogas keitiklio bitų skaičius. Kaip galimas sprendimas pasiūlyta (23) formulė, kurioje naudojama lango funkcija.

$$x(t) = IFFT\left(\frac{Y(j\omega)}{H(j\omega)}\right); \quad (22)$$

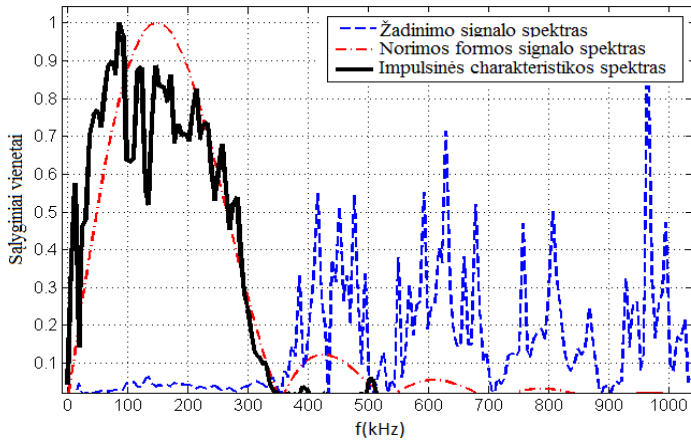
čia  $IFFT$  – atvirkštinė sparčioji Furjė transformacija;

$$X(j\omega) = \frac{Y(j\omega) \times L(j\omega)}{H(j\omega)}; \quad (23)$$

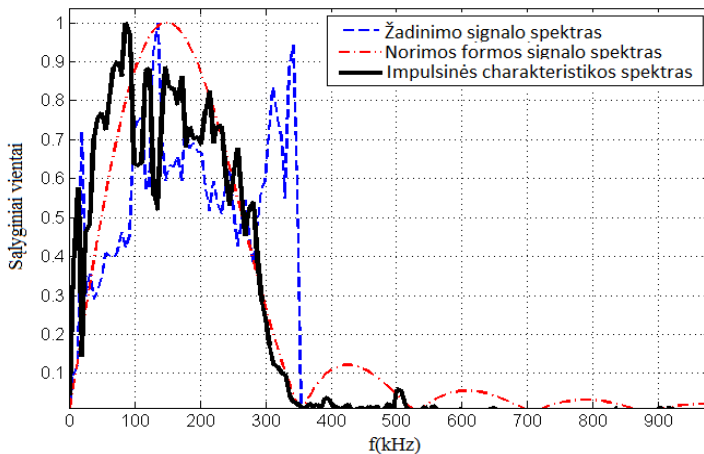
čia  $L(j\omega)$  – lango funkcija.

Lango funkcijos dažnių ruožas ir tipas, parenkamas atsižvelgiant į impulsinės reakcijos ir norimos formos signalo spektrus. Paprasčiausiu atveju naudotinas stačiakampis langas. Tai išsprendžia atsirandančių aukštojo dažnių triukšmų problemą. Tokio lango naudojimo pavyzdys pateiktas 23 pav., matavimai atlikti pagal 21 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.

Pateiktas lango funkcijos naudojimo pavyzdys rodo lango funkcijos naudojimo privalumus, tačiau toks sprendimas galimas tikrai tam tikrais atvejais. Galimi atvejai, kai pasirinktame dažninės charakteristikos spektre yra amplitudės netolygumų, tokiu atveju paprasta lango funkcija (stačiakampė, Tukey ir kt.) neišsprendžia dalybos iš mažų  $H(j\omega)$  verčių problemos.



a)



b)

**23 pav.** Lango funkcijos taikymas: a) signalų spektrai netaikant lango funkcijos; b) signalų spektrai taikant lango funkciją

Siekiant išspręsti dalybos iš mažų  $H(j\omega)$  verčių problemą, literatūroje [29] siūloma žadinimo signalą skaičiuoti naudojant (24) formulę, pritaikant koeficientą  $k$ :

$$X(j\omega) = \frac{Y(j\omega)H^*(j\omega)}{|H(j\omega)|^2 + k^2}; \quad (24)$$

čia  $X(j\omega)$  – žadinimo signalo spektras;  $k$  – konstanta;  $H(j\omega)$  – impulsinės sistemos charakteristikos spektras;  $H^*(j\omega)$  – impulsinės sistemos charakteristikos kompleksinės jungtinės reikšmės;  $Y(j\omega)$  – norimos formos poveikio Furjė transformacija.

Konstanta  $k$ , kuri sumuojama su  $H(j\omega)$  (24), visiems dažniams yra vienoda. Todėl buvo pasiūlytas kitoks žadinimo signalo skaičiavimo metodas (žr. (25) formulę). Pagal ją skaičiuojama lango funkcija, kurios vertės parenkamos atsižvelgiant į dažninės ir impulsinės charakteristikų amplitudžių santykį:

$$X(j\omega) = \frac{Y(j\omega)L(j\omega)}{H(j\omega)} = \left( \frac{Y(j\omega)}{H(j\omega)} \right) \times \left( 1 - \frac{C_{max}}{C(j\omega)} \right)^W; \quad (25)$$

čia  $L(j\omega)$  – lango funkcija;  $C(j\omega) = \left| \frac{Y(j\omega)}{H(j\omega)} \right|$ ,  $W$  – 1–10, skaičius parenkamas atsižvelgiant į skaičių  $Q$  (norimos formos signalo kokybę).

Dalybos iš mažų  $H(j\omega)$  verčių problemai spręsti darbe taip pat pasiūlytas ribinių koeficientų metodas (26). Žadinimo signalo spektras, taikant šį metodą, randamas pagal dekompozicijos, modifikuotos dekompozicijos arba laikinio apgręžimo metodus. Apskaičiuotas žadinimo signalo spektras vėliau koreguojamas ribinių koeficientų metodu. Siūlomas metodas leidžia surasti žadinimo signalo spektre nepageidaujamus netolygumus ir juos pašalinti. Spektro netolygumai randami nustatant koeficientą  $l$  ir lyginant šio koeficiento vertes su verte  $r_i$ . Ši vertė atitinka spektro dedamosios ir vidutinės spektro amplitudžių verčių santykį. Spektras koreguojamas pagal (26) formulę. Optimalios koeficiento  $l$  vertės parenkamos naudojant  $N$  iteracijų, kurių metu vertinamas gaunamo norimos formos poslinkio  $y(t)$  kriterijus  $Q$  (žr. (36) formulę) ir koeficientas  $l$ . Koeficientas  $l$  parenkamas pagal didžiausiąją kriterijaus  $Q$  vertę.

$$X_i(j\omega) = \begin{cases} \frac{X_i(j\omega)}{r_i}, & \text{kai } r_i > l, \\ X_i(j\omega), & \text{kai } r_i < l; \end{cases} \quad (26)$$

čia  $X_i(j\omega)$  – žadinimo signalo spektro atskaita  $i$ ;  $r_i = \frac{|X_i(j\omega)|}{\text{mean}|X(j\omega)|}$ ,  $l$  – ribinis koeficientas.

Skaičiuojant žadinimo signalą  $x(t)$  būtina pasirinkti norimo poveikio  $y(t)$  dažnių juostą. Juostos plotis ir atitinkamai poveikio trukmė priklauso nuo taikymo, tačiau negali būti bet kokia. Poveikio trukmė ir forma apribojama sistemos, kurią sudaro pjezokeramika, bangolaidis ir stiprintuvai, impulsinės reakcijos spektro  $H(j\omega)$  dažnių juostos pločiu.

Galimi atvejai, kai būtina optimaliai išnaudoti impulsinės reakcijos juostos plotį – atitinkamai gauti mažiausiosios galimos trukmės poveikį  $y(t)$ . Tokiam poveikiui gauti šiame darbe buvo pasiūlytas parametras  $z_{min}$ . Šio parametro skaičiavimo eiga pateikiama (27)–(31) formulėmis.

Norimos formos poveikis gali būti parenkamas įvairiais metodais, tačiau AEK kalibruoti buvo būtinas poveikis, turintis pastovios galios spektrą (buvo išbandyti ir kitokio tipo poveikiai), tokį spektrą turi sinc (atitinka  $\sin(x)/x$  funkciją) tipo signalas. Kadangi kriterijus, leidžiantis gauti optimalios trukmės poveikį, pradžioje nežinomas, pagal (27) formulę formuojamas masyvas, kurį sudaro  $N$  galimų poveikių su skirtingomis trukmėmis.

$$y(t)_g = \left( \frac{\sin(t_g)}{t_g} \right)^2, \text{ kai } g = 0, 1 \dots N; \quad (27)$$

čia  $N$  – galimų norimos formos poveikių kiekis;  $g$  – signalo indeksas;  $t$  – laikas, s.

Signalų spektrai randami pagal (31) formulę.

$$Y(j\omega)_g = FFT(y(t)_g). \quad (28)$$

Kai yra žinomi spektrai  $Y(j\omega)$ , randami galimi  $H$   $Y(j\omega)$  ir  $Y(j\omega)$  spektrų pagal (32) formulę.

$$Z_g = \left| \left| \sum_{i=1}^N \frac{Y_{max}}{Y_i(j\omega)_g} \right| - \left| \sum_{i=1}^N \frac{H_{max}}{H_i(j\omega)} \right| \right|; \quad (29)$$

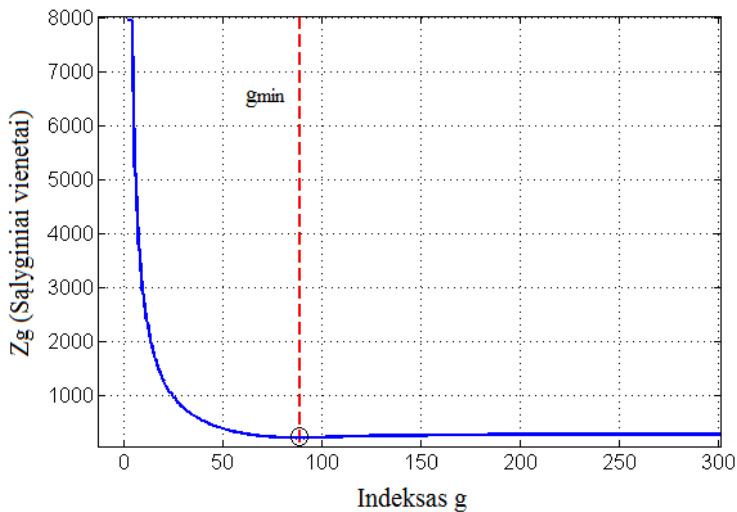
čia  $Y_{max} = \max(Y(j\omega)_g)$ ,  $H_{max} = \max(H(j\omega)_g)$ ;  $Z_g$  – skaičius, rodantis spektrų persidengimą.

Parametro  $z_g$  mažiausioji vertė atitinka geriausią galimą spektrų  $H(j\omega)$  ir  $Y(j\omega)$ . Šis parametras randamas naudojant signalų indeksą  $g_{min}$  (33), kuris vėliau naudojamas signalui  $y(t)$  apskaičiuoti (34). Apskaičiuotų spektrų verčių ir rasto minimumo pavyzdys pateikiamas 24 pav.

$$z_{min}(g) = \min(z_g) \rightarrow g_{min}, \quad (30)$$

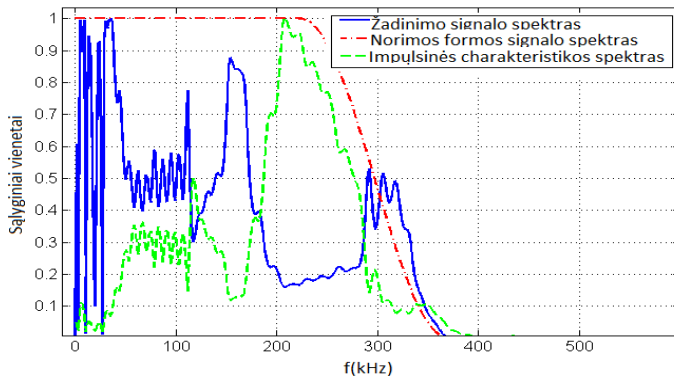
$$y(t) = (\text{sinc}(t \times g_{min}))^2 \rightarrow FFT(y(t)) = Y(j\omega). \quad (31)$$

Signalas  $y(t)$ , rastas naudojant indeksą  $g_{min}$ , gautą iš (30), atitinka mažiausiosios trukmės signalą, gaunamą esant impulsinės reakcijos spektrui  $H(j\omega)$ .

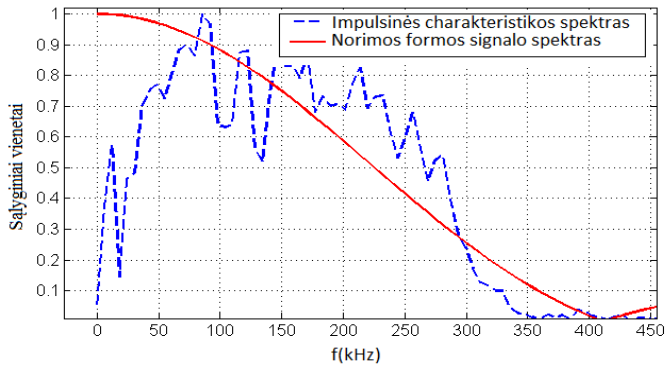


**24 pav.** Spektrų vertės ir minimumo indeksas

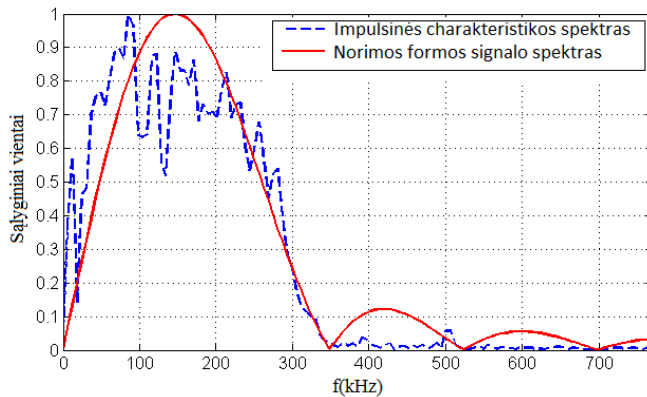
Trijų tipų signalų spektrų vertinimo pavyzdžiai: sinuso periodo, pusės sinuso periodo ir pastovios galios spektro signalo – pateikiami 25 pav.



a)



b)



c)

**25 pav.** Skirtingų bangolaidžių norimos formos signalo ir impulsinės reakcijos spektrų : a) sinc tipo signalo (esant 25 mm skersmens ir 600 mm ilgio strypo tipo bangolaidžiui); b) pusės sinuso periodo signalo (esant 25 mm skersmens ir 1000 mm ilgio strypo tipo bangolaidžiui); c) sinuso periodo signalo (esant 25 mm skersmens ir 1000 mm ilgio strypo tipo bangolaidžiui)



## 2.4. Norimos formos signalo kokybinis įvertinimas

Teorinis norimos formos mechaninis poveikis apskaičiuojamas sąlyginiais vienetais pagal (20) formulę. Žadinimo signalas, taikant vieną iš 2.3 poskyryje analizuotų metodų. Kriterijai, pagal kuriuos parenkamas poveikis, yra dažnių juosta ir jo forma. Poveikio dažnio juosta parenkama atsižvelgiant į sistemos impulsinę reakciją, mažiausiosios trukmės atveju – pagal (27)–(31) formules.

Idealus poveikis, kuris būtų tinkamas AEK kalibravimui, – be galo trumpas impulsas. Praktiškai toks impulsas yra negalimas ir realiomis sąlygomis jo trukmė priklauso nuo sistemos impulsinės reakcijos spektro dažnio juostos, o norimos formos poveikio forma nėra ideali. Kartu su reikiamu AEK kalibruoti poveikiu visuomet generuojami papildomi poveikiai, kurie dažnai gali būti mažinami, koreguojant žadinimo signalo skaičiavimo metodą, tačiau visiškai juos pašalinti negalima. Papildomi poveikiai atsikartoja, žinomos formos ir taip pat numatomi pagal (20) formulę.

Taigi realiomis sąlygomis bangolaidyje gaunamas mechaninis poveikis negali būti bet kokios formos ir trukmės. Kiekvienas bangolaidis pasirinktame dažnių ruože gali turėti vieną optimalų poveikį, kuris gali būti laikomas AEK kalibravimo stendo charakteristika. Poveikio tinkamumas AEK kalibruoti privalo būti įvertinamas atsižvelgiant į:

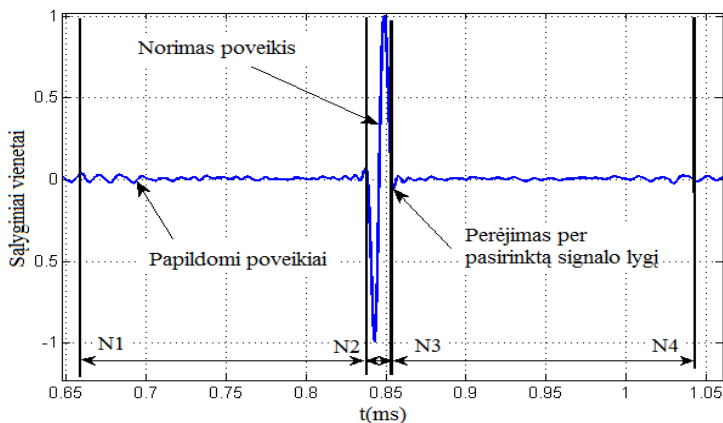
Gaunamų papildomų poveikių amplitudę ir formą.

Poveikio formos iškraipymus, lyginant apskaičiuotus pagal (20) formulę.

Triukšmus.

Kriterijus, leidžiantis įvertinti poveikio formą ir tinkamumą AEK kalibruoti, literatūros šaltiniuose nėra pateikiamas. Jo trūkumą galima paaiškinti tuo, kad darbe yra siūlomi nauji metodai, skirti mechaniniam poveikiui gauti. Taikant siūlomus metodus atsiranda problemų, susijusių su generuojamais papildomais poveikiais, kurių esančiose kalibravimo sistemose neatsiranda (nelaikant atspindžių, kurie nėra matuojami). Dėl šios priežasties kriterijus, vertinantis generuojamus poveikius, iki šiol nebuvo būtinas.

Norimos formos poveikiui įvertinti pasiūlyta jį dalyti į tris laiko intervalus (26 pav.).



26 pav. Sintezuoto signalo vertinimo laikinis langas

Intervalai N1–N2 ir N3–N4 atitinka momentus, kai neturi būti generuojamas poveikis. Praktiškai šiuose laiko intervaluose visuomet gaunami tam tikros amplitudės ir trukmės poveikiai, kurių pašalinti negalima. Laiko intervalas N2–N3 atitinka norimos formos signalo trukmę.

Galimi keli laiko intervalo radimo metodai:

Intervalo N2–N3 radimas pagal nustatytą išmatuotos įtampos lygį.

Laikinių langų parinkimas pagal visiems lyginamiems signalams vienodą sinchronizacijos tašką.

Pirmasis metodas sudaro neapibrėžtį, susijusią su įtampos lygio parinkimu, tačiau gali būti taikomas, kai sinchronizacijos taškas ne visiems matavimams vienodas. Reikiamos įtampos lygis parenkamas atsižvelgiant į turimo signalo formą ir triukšmo lygį.

Poveikio dalijimas į tris laiko intervalus nėra vienareikšmiškas. Laiko intervalas N2–N3 priklauso nuo norimos formos poveikio dažnių juostos. Didžiausias galimas intervalas N3–N4 priklauso nuo bangolaidžio atspindžių laiko, tačiau jo trukmė nebūtinai privalo būti lygi didžiausiajai. Intervalas N1–N2 darbe rekomenduojamas laikyti lygiam intervalui N3–N4.

Siūlomas norimos formos poveikio įvertinimas darbe atliktas pagal (32) formulę.

$$Q = \frac{\frac{1}{N_3 - N_2} \sum_{i=N_2}^{N_3} y_i^2}{\frac{1}{N_2 - N_1} \sum_{i=N_1}^{N_2} y_i^2 + \frac{1}{N_4 - N_3} \sum_{i=N_3}^{N_4} y_i^2}; \quad (32)$$

čia  $Q$  – norimos formos signalo  $y(t)$  kokybės kriterijus;  $N_1, N_2, N_3, N_4$  – laikinio lango sričių ribiniai indeksai;  $y_i$  – signalo imtys.

Parametras  $Q$  skaičiuojamas kaip vidutinių kvadratinų signalo verčių santykis imčių ruožuose N2–N3 ir N1–N2, N3–N4. Laikinis langas parenkamas atsižvelgiant į norimos formos signalo taikymo reikalavimus.

Siūlomas kriterijus darbe gali būti interpretuojamas kaip norimos formos poveikio kokybė. Kriterijus  $Q$  leidžia palyginti ir įvertinti skirtingus norimos formos gavimo metodus ir galimas skirtingas kalibravimo stendo konstrukcijas.

Kriterijus  $Q$  įvertina gautą norimos formos poveikį (kitais sakant, galutinį bangų sintezės rezultatą), tačiau dėl įvairių priežasčių teoriškai nustatyta norimos formos poveikio forma visuomet skiriasi nuo išmatuojamos. Įprastai šios priežastys yra ribotos įrangos galimybės ir kalibravimo stendo impulsinės reakcijos matavimo neapibrėžtys.

Siekiant įvertinti galutinio rezultato, gaunamo realioje sistemoje, atitiktą teorinio poveikio formai, darbe siūlomas kriterijus  $Q_s$ , apskaičiuojamas pagal (33) formulę. Teorinis poveikis randamas pagal (20) formulę, skaičiuojant signalų kompoziciją:

$$Q_s = 1 - \left( \frac{Q_t - Q_{is}}{Q_t} \right); \quad (33)$$

čia  $Q_s$  – santykinis norimos formos poveikio kokybės kriterijus;  $Q_{is}$  – išmatuoto norimos formos poveikio kokybės kriterijus;  $Q_t$  – apskaičiuotas teorinis norimos formos poveikio kokybės kriterijus.

Kriterijus  $Q_s$  nėra vienintelis, leidžiantis atlikti tokio tipo įvertinimą. Jo pasirinkimas nulemtas būtinybės atlikti santykinį kriterijaus  $Q$  įvertinimą esant teoriniam ir išmatuotam poveikiams. Šis kriterijus gali būti keičiamas, taikant signalų koreliaciją, tiesinę regresiją ir kitus metodus.

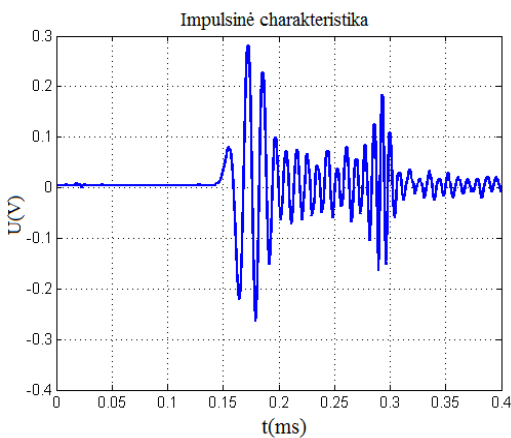
## 2.5. Sintezės metodų taikymas strypo tipo bangolaidžiuose

Skirtingų žadinimo metodai lyginami pagal 20 pav., a, pavaizduotą struktūrinę schemą. Matavimai atlikti naudojant talpinį poslinkių matavimo keitiklį. Buvo generuojamas norimos formos sinc (atitinka  $\sin(x)/x$ ) tipo poslinkis  $y(t)$  plieniniame 24 mm skersmens ir 60 cm ilgio strypo tipo bangolaidyje.

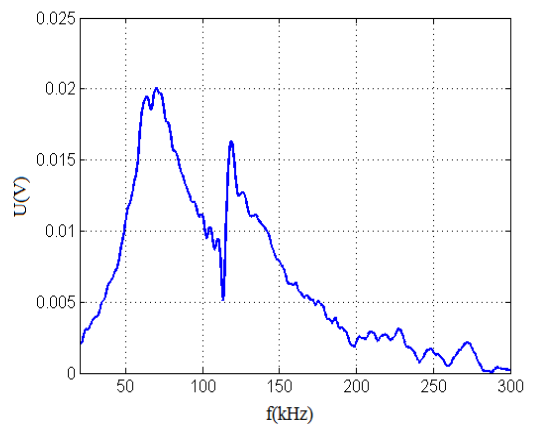
Siekiant palyginti skirtingus žadinimo signalo skaičiavimo metodus, pagal (25) formulę apskaičiuotas žadinimo signalas  $x(t)$ . Žinant žadinimo signalą  $x(t)$ , pagal (20) formulę apskaičiuojamas teorinis signalas  $y(t)$ . Šio signalo skaitinė vertė  $Q$  laikoma atramine ir jos atžvilgiu gali būti palyginami signalai  $y(t)$ , gauti skirtingais žadinimo metodais. Apskaičiuotas signalas  $y(t)$  ir išmatuota bangolaidžio impulsinė reakcija pateikiama 27 pav.

Norimos formos signalui skaičiuoti pasiūlytas modifikuotas dekompozicijos metodas (žr. (25) formulę), taip pat ribinių koeficientų metodas (žr. (26) formulę), kuris gali būti taikomas su bet kuriuo iš žadinimo signalo skaičiavimo metodu.

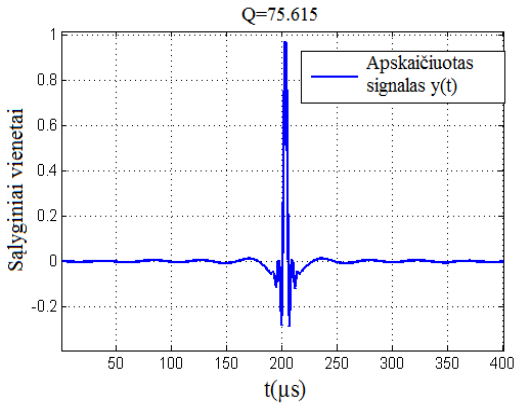
Siekiant įvertinti skirtingus žadinimo signalo skaičiavimo metodus, vertinti du atvejai, kai impulsinės reakcijos spektre santykis tarp didžiausiosios bei mažiausiosios spektro amplitudės verčių neviršija 20 dB bei viršija 60 dB. Kai santykis tarp didžiausiosios ir mažiausiosios spektro verčių viršija 60 dB, gaunama dalyba iš mažų verčių. Dėl šios priežasties apskaičiuoto žadinimo signalo spektre, priklausomai nuo skaičiavimo metodo, gali atsirasti spektro dedamųjų verčių, gerokai didesnių už vidutinę. Dėl riboto bitų skaičiaus tai gali sukelti signalo formos iškraipymus, nepageidaujamus AEK kalibravimo uždaviniui.



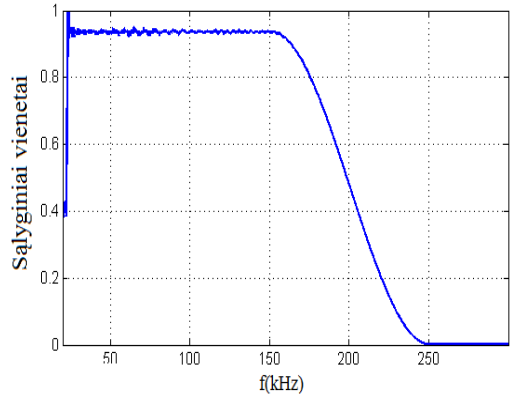
a)



b)



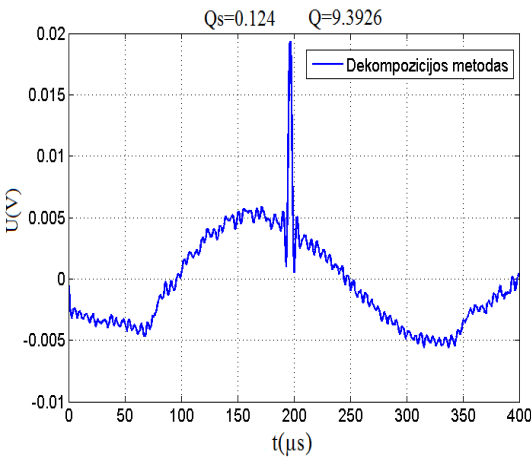
c)



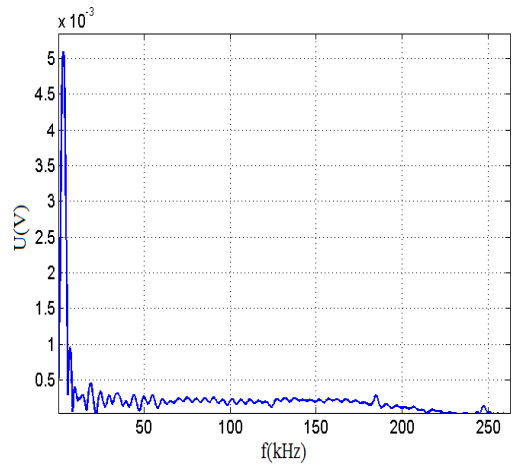
d)

**27 pav.** a) Išmatuota impulsinė reakcija  $h(t)$ ; b) apskaičiuotas norimos formos signalas  $y(t)$  ir rasta vertė  $Q$ ; c) apskaičiuotas impulsinės reakcijos spektras; d) apskaičiuotas norimos formos signalo spektras

Visi žadinimo metodai palyginti ant to paties bangolaidžio. Matavimai atlikti pagal 20 pav., a, pavaizduotą struktūrinę schemą. Skaičiuojant žadinimo signalą  $x(t)$  visais atvejais formuojamas toks pat pageidaujamas signalas  $y(t)$  (šis signalas pavaizduotas 27 pav., c). Skirtingi žadinimo signalo skaičiavimo metodai palyginti tarpusavyje naudojant parametrus  $Q$  ir  $Q_s$ . Kaip atraminis, kurio atžvilgių lyginami žadinimo signalo skaičiavimo metodai, naudotas 27 pav., c, pavaizduotas signalas, apskaičiuotas pagal 20 pav., a.



a)



b)

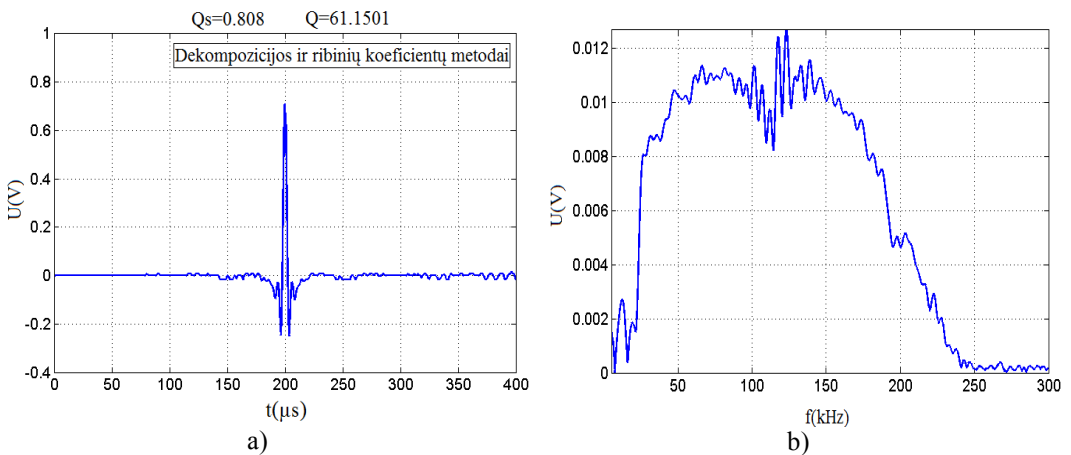
**28 pav.** Norimos formos signalo  $y(t)$  gavimas strypo tipo bangolaidžio gale, kai  $H(j\omega)$  santykis tarp didžiausiosios ir mažiausiosios verčių siekia 60 dB: a) išmatuotas signalas  $y(t)$ , gautas dekompozicijos metodu; b) apskaičiuotas signalo spektras  $Y(j\omega)$

Skirtingi žadinimo signalo skaičiavimo metodai, kai santykis tarp didžiausiosios ir mažiausiosios impulsinės reakcijos verčių siekia 60 dB, palyginami 28 pav., 29 pav. ir

1 lentelėje. Norimos formos signalas  $y(t)$  (28 pav., a) buvo gautas pagal literatūroje siūlomą dekompozicijos metodą (žr. (24) formulę). Koefficiento  $k$  vertės buvo parinktos pagal literatūroje pateikiamas rekomendacijas [29]. Dėl dalybos iš mažų verčių apskaičiuotame norimos formos signalo spektre (28 pav., b) matomos žemųjų dažnių dedamosios, atsirandančios dėl ribotų kodas analogas keitiklio galimybių.

Pagal (23) formulę apskaičiuotas žadinimo signalo spektras  $X(j\omega)$  buvo koreguojamas ribinių koeficientų metodu. Gauti matavimo rezultatai pateikiami 29 pav.

Ribinių koeficientų metodas leido aptikti ir sumažinti žadinimo signalo spektre dažnių dedamąsias, kurios buvo  $N$  kartų didesnės už vidurkį. Dėl šios priežasties (29 pav., a) matomas norimos formos signalas yra kur kas mažiau iškraipytas, palyginti su teoriniu. Taip pat matoma, kad parametrai  $Q_s$  ir  $Q$  padidėjo, palyginti su rezultatais, pateiktais 28 pav.



**29 pav.** Norimos formos signalo  $y(t)$  gavimas strypo tipo bangolaidžio gale, kai  $H(j\omega)$  santykis tarp didžiausios ir mažiausios verčių siekia 60 dB: a) išmatuotas signalas  $y(t)$ , gautas dekompozicijos ir ribinių koeficientų metodais; b) apskaičiuotas signalo spektras  $Y(j\omega)$

Modifikuotas dekompozicijos metodas (žr. (25) formulę) gali būti taikomas kartu su ribinių koeficientų metodu. Įvertintos kriterijaus  $Q_s$  ir  $Q$  vertės, taikant modifikuotą dekompozicijos metodą ir ribinių koeficientų metodus, kai  $H(j\omega)$  santykis tarp didžiausios ir mažiausios verčių siekia 60 dB, pateikiamos 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Kriterijaus  $Q_s$  vertės, kai  $H(j\omega)$  santykis tarp didžiausios ir mažiausios verčių siekia 60 dB

Metodas	Kriterijaus $Q_s$ vertė	Kriterijaus $Q$ vertė
Modifikuotas dekompozicijos metodas	0,870	65,86
Modifikuotas dekompozicijos ir ribinių koeficientų metodai	0,833	63,213

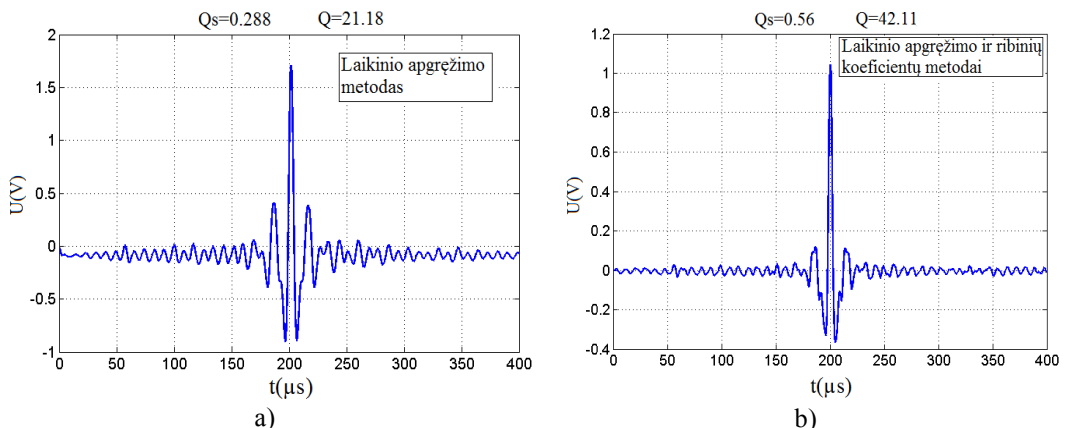
Nekeičiant norimos formos poslinkio  $y(t)$ , palyginti skirtingi žadinimo signalo skaičiavimo metodai, kai santykis tarp impulsinės reakcijos didžiausiosios ir mažiausiosios vertės siekia 20 dB. Iš matavimo duomenų apskaičiuotos kriterijaus  $Q_s$  ir  $Q$  vertės pateikiamos 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Kriterijaus  $Q$  vertės, kai  $H(j\omega)$  santykis tarp didžiausiosios ir mažiausiosios verčių siekia kaip 20 dB

Metodas	Kriterijaus $Q_s$ vertė	Kriterijaus $Q$ vertė
Dekompozicijos metodas	0,941	71,18
Dekompozicijos ir ribinių koeficientų metodai	0,933	70,62
Modifikuotas dekompozicijos metodas	0,902	68,21
Modifikuotas dekompozicijos ir ribinių koeficientų metodai	0,903	68,27

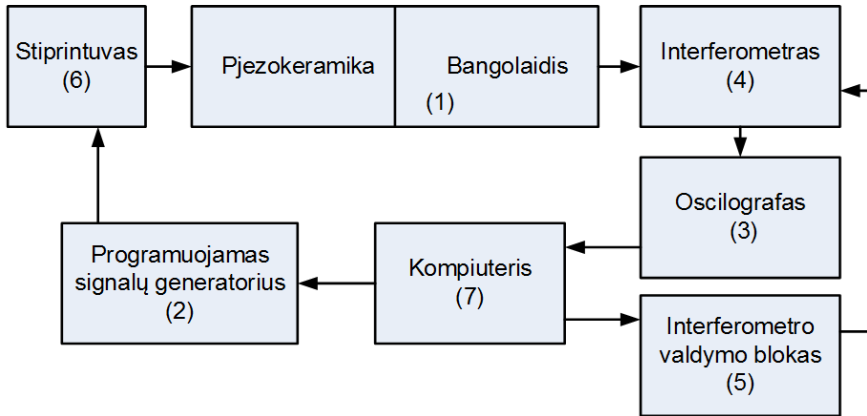
Laikinio apgręžimo metodas, palyginti su metodais, kai taikoma dekompozicija, reikalauja kur kas mažiau skaičiavimo išteklių, tačiau metodas pasižymi ribotomis galimybėmis koreguoti norimą gauti mechaninį poveikį. Šis metodas gali būti taikomas taip pat ir dažnių srityje, todėl gali būti derinamas kartu su ribinių koeficientų metodu. Išmatuotas abiejų metodų taikymo rezultatas matomas 30 pav. Matavimai atlikti pagal 20 pav., a, pavaizduotą struktūrinę schemą.

Taikant ribinių koeficientų metodą, pastebima, kad išauga kriterijaus  $Q$  vertė, tačiau jo vertė išlieka mažesnė, lyginant su dekompozicijos metodų taikymo atvejais. Metodas leidžia kompensuoti dispersijos įtaką, bet dėl atsirandančių papildomų poveikių šio metodo taikyti AEK kalibravimo uždaviniui negalima.

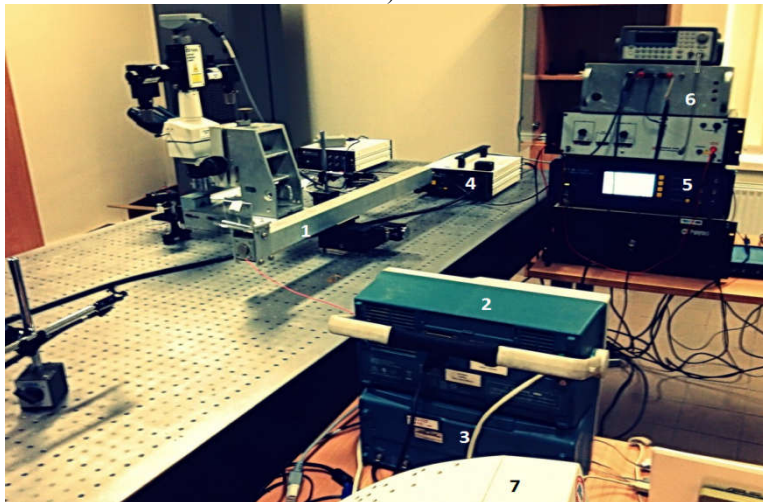


**30 pav.** Norimos formos mechaninio poveikio  $y(t)$  gavimas strypo tipo bangolaidžio gale, kai  $H(j\omega)$  santykis tarp didžiausiosios ir mažiausiosios verčių mažesnis kaip 20 dB: a) išmatuotas signalas  $y(t)$ , taikant laikinio apgręžimo metodą; b) išmatuotas signalas  $y(t)$ , taikant laikinio apgręžimo ir ribinių koeficientų metodus

AEK kalibravimui atlikti būtina išmatuoti norimos formos poveikį absoliučiaisiais vienetais. Šiam uždaviniui spręsti buvo panaudota „Polytech“ interferometrinė matavimo sistema OFV-512 (jautrumas – 2 V/μm) ir VD-02 (jautrumas – 5 V/mm/s). Matavimo sistemos struktūrinė schema ir stendas pavaizduoti 31 pav., a.



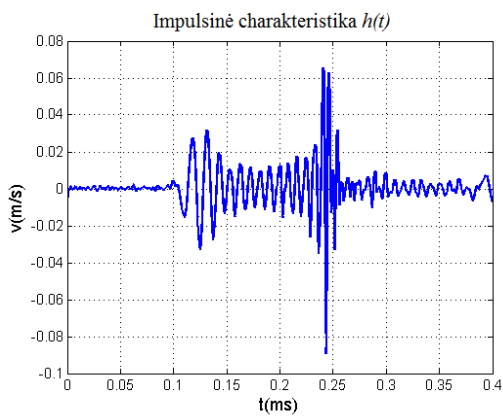
a)



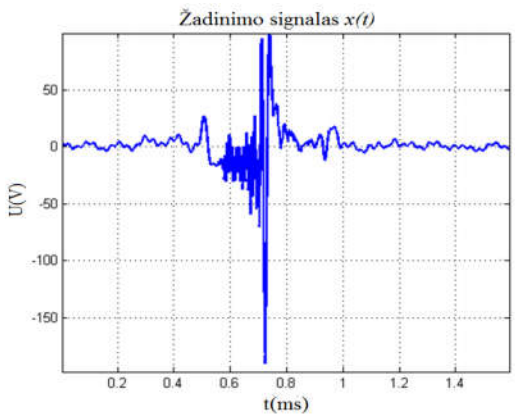
b)

**31 pav.** Matavimo stendas: a) struktūrinė įrangos prijungimo schema; b) matavimo stendas

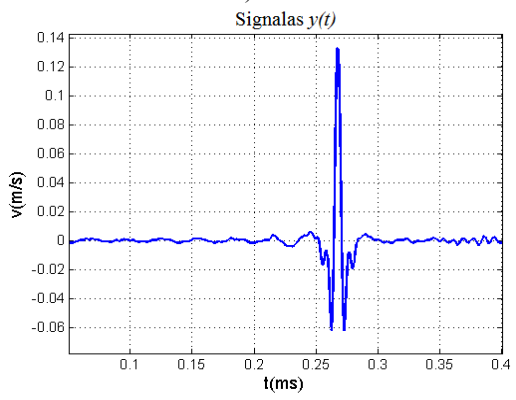
Buvo matuojamas 24 mm skersmens ir 60 cm ilgio nerūdijančiojo plieno strypo galo virpėjimas. Žadinti buvo naudotas pjzokeraminis diskas, priklijuotas bangolaidžio gale. Dėl didelio jo talpumo (6 nF) taip pat naudojamas EPA-104 tiesinis signalų stiprintuvas stiprinantis 20 kartų. Matavimo rezultatai, pateikiami 32 pav. ir 33 pav., leido įvertinti strypo galo virpėjimą absoliučiaisiais vienetais.



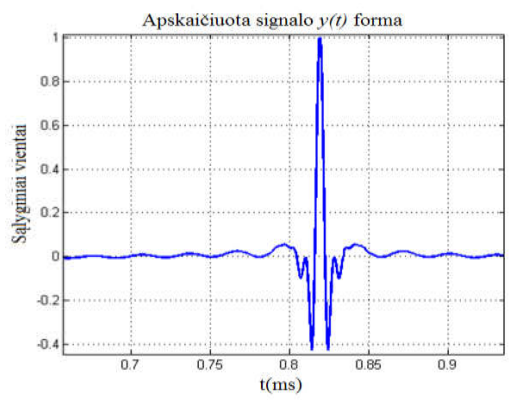
a)



b)

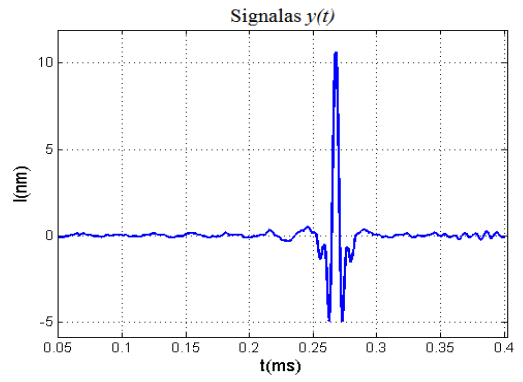


c)

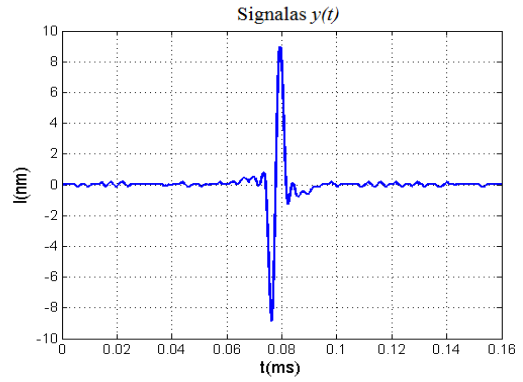


d)

**32 pav.** Strypo tipo bangolaidžio galo virpamojo greičio matavimas interferometru: a) išmatuota impulsinė reakcija; b) išmatuotas žadinimo signalas; c) išmatuotas strypo galo suvirpėjimas; d) apskaičiuotas strypo galo suvirpėjimas



a)



b)

**33 pav.** Strypo tipo bangolaidžio galo poslinkio matavimas interferometru: a) išmatuotas pusės sinuso periodo tipo mechaninis poslinkis; b) išmatuotas sinuso periodo tipo mechaninis poveikis

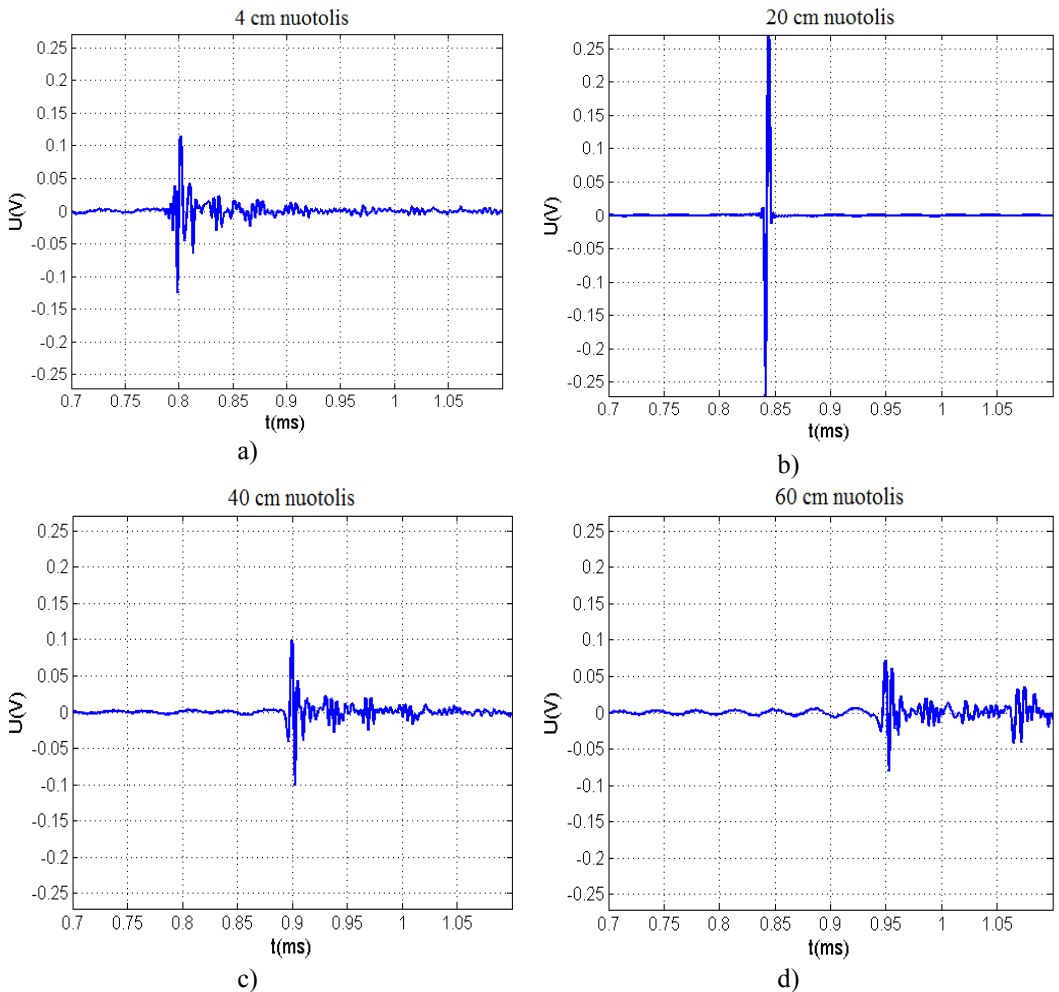


Siekiant įvertinti galimybes gauti norimos formos poveikius bangolaidžio ilgyje, skirtingais nuotoliais nuo žadinimo šaltinio buvo matuojamos bangolaidžio šoninės deformacijos. Matavimai atlikti naudojant matavimo stendą, sujungtą pagal 19 pav., a. Rezultatai pavaizduoti 34 pav.

Išmatavus impulsinę reakciją, antrame bangolaidžio taške (20 cm atstumu nuo žadinimo vietos) apskaičiuotas žadinimo signalas, kuris leidžia gauti šiame taške sinuso periodo formos poslinkį.

Norimos formos poveikio amplitudė dėl sintezės yra didžiausia impulsinės reakcijos matavimo taške. Amplitudė išauga dėl bangų energijos sumavimosi.

Atliktas tyrimas rodo galimybes gauti norimos formos poveikius bet kurioje bangolaidžio vietoje su sąlyga, kad yra žinoma joje gaunama sistemos impulsinė reakcija (sistema šiuo atveju yra generatorius, stiprintuvas, pjzokeramika ir matavimo keitiklis).

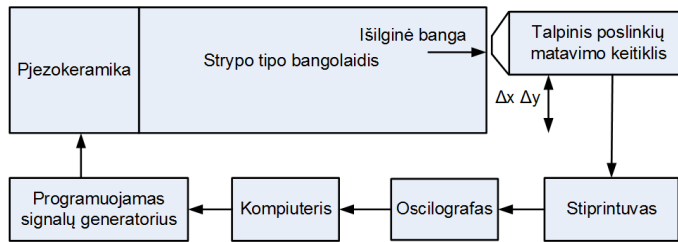


**34 pav.** Bangų sintezės taikymo 0,8 cm skersmens ir 100 cm ilgio žalvariniame strype iliustracija: išmatuotos šoninės strypo tipo bangolaidžio deformacijos skirtingais nuotoliais nuo žadinimo šaltinio: a) 4 cm nuotoliu; b) 20 cm nuotoliu; c) 40 cm nuotoliu; d) 60 cm nuotoliu

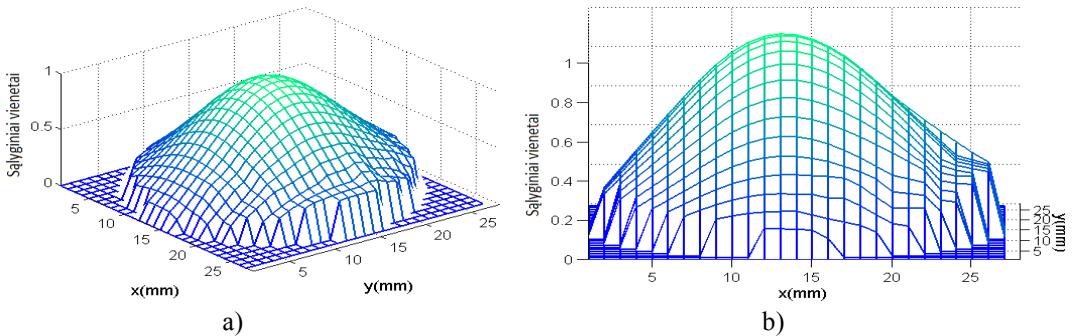
## 2.6. Bangų vizualizacija

Žadinimo signalas  $x(t)$  skaičiuojamas naudojant impulsinę reakciją  $h(t)$ , išmatuotą viename bangolaidžio taške. Tuomet impulsinės reakcijos  $h(t)$  matavimo taške, taikant siūlomus žadinimo signalo skaičiavimo metodus, gali būti gaunamas norimas poveikis  $y(t)$ . Problema, atsirandanti nepriklausomai nuo žadinimo metodo, yra impulsinės reakcijos netolygumas AEK kalibruoti naudojamame bangolaidžio plote. Siekiant įvertinti šio netolygumo įtaką bangolaidžio plote generuojamam mechaniniam poveikiui, buvo skenuotas strypo ir plokštės tipo bangolaidžių paviršiaus virpėjimas.

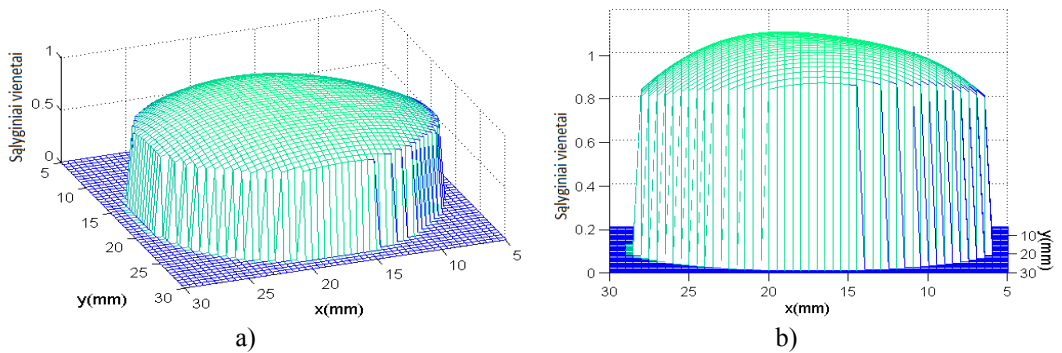
Nuskenutas 24 mm skersmens plieninio strypo tipo bangolaidžio galas. Matavimai atlikti pagal 35 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Žadinimo signalas  $x(t)$  skaičiuotas centriniam taškui modifikuotu dekompozicijos metodu (žr. (25) formulę). Žadinimo signalo dažnių juosta parinkta pagal (17) formulę.



35 pav. Struktūrinė įrangos prijungimo schema



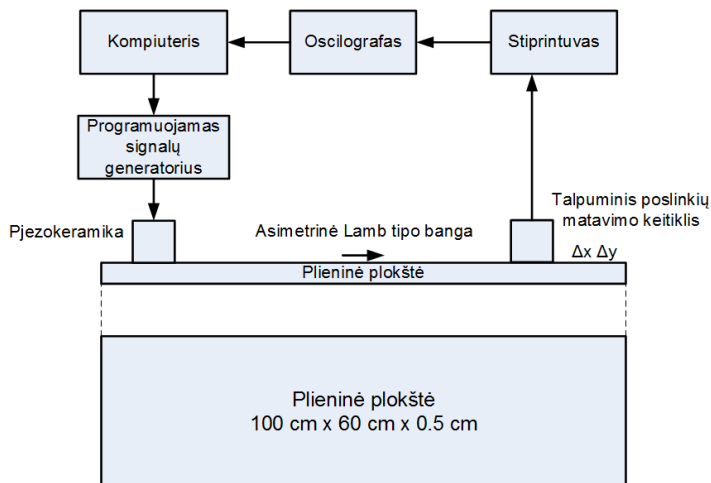
36 pav. Nuskenutas 24 mm skersmens plieninio strypo galo virpėjimas, žadinimo signalo  $x(t)$  dažnių juosta 270 kHz: a) paviršiaus deformacija, esant didžiausiai virpėjimo amplitudei; b) paviršiaus deformacijos  $x$ - $z$  plokštumoje



**37 pav.** Nuskenutuotas 24 mm skersmens plieninio strypo galo virpėjimas, žadinimo signalo  $x(t)$  dažnių juosta 150 kHz: a) paviršiaus deformacija esant didžiausiai virpėjimo amplitudei; b) paviršiaus deformacijos  $x-z$  plokštumoje

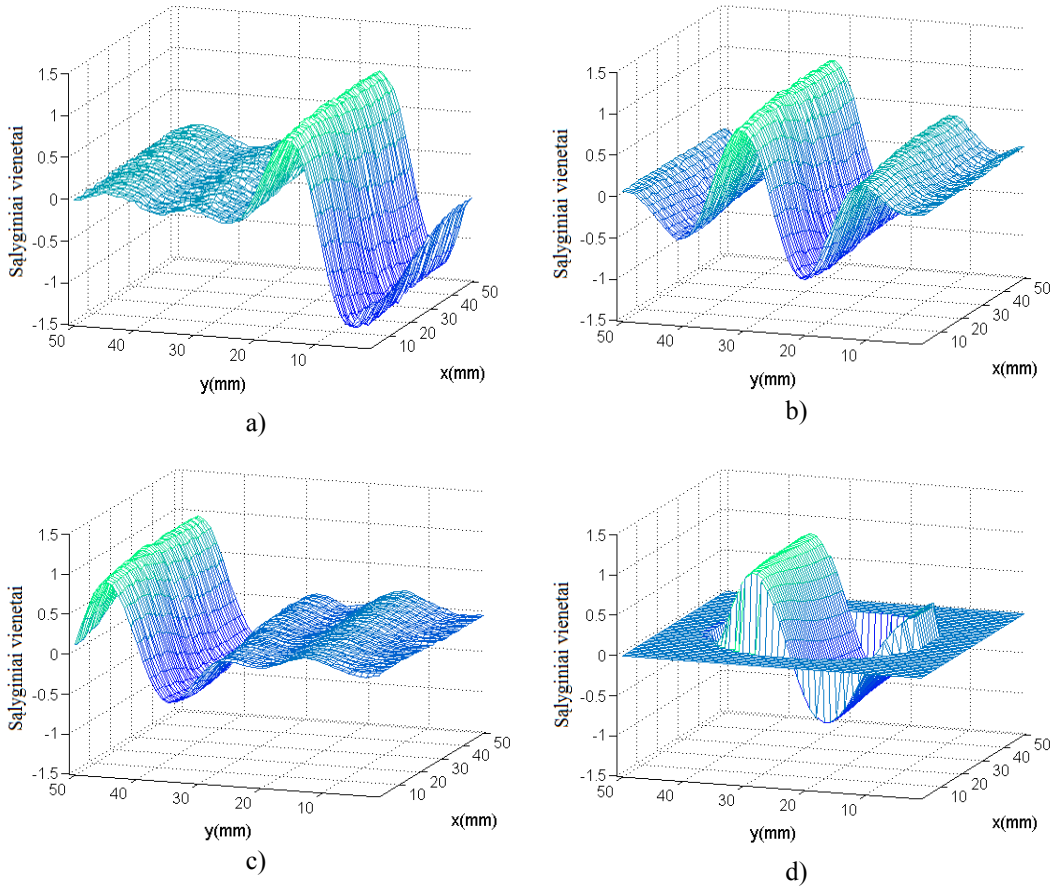
Gauti matavimo rezultatai rodo, kad strypo tipo bangolaidžiuose, naudojant bangų sintezę, yra galimas sinchroniškas strypo galo paviršiaus suvirpėjimas. Rezultatai taip pat parodo šio bangolaidžio matmenų ir žadinimo signalo dažnio juostos parinkimo svarbą. Apribojant žinomo skersmens strypo bangolaidžio žadinimo signalo dažnių juostą, pagal kriterijų pateikiamą (17) formulėje, gaunamas tolygesnis paviršiaus virpėjimas. Tai yra matoma iš 37 pav. pateikiamų matavimo rezultatų.

Norimos formos mechaninių poveikių generavimas AEK kalibruoti yra svarbus ne vien strypuose, bet ir plokštėse. Siekiant įrodyti, kad norimos formos poveikiai gali būti gaunami ne tik tam tikrame strypo plote, bet ir plokštėje, atliktas 5 mm storio plieninės plokštės paviršiaus skenavimas. Matavimai atlikti pagal 38 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.



**38 pav.** Struktūrinė įrangos prijungimo schema

Žadinimo signalas apskaičiuotas pagal (25) formulę modifikuotu dekompozicijos metodu, sugeneruotas sinuso periodo tipo mechaninis poveikis. Rezultatai pateikiami 39 pav. Nuskenuotas 2500 mm<sup>2</sup> plokštės plotas, kuriame vaizduojamas generuojamas poveikis  $\gamma(t)$  skirtingais nuotoliais nuo žadinimo šaltinio.



**39 pav.** Plokštės paviršiaus skenavimas, nuskenuotas plokštės plotas, kuriame gaunamas sinuso periodo tipo mechaninis poslinkis  $\gamma(t)$ : a) sinuso periodo tipo poveikis  $\gamma(t)$  320 mm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio; b) sinuso periodo tipo poveikis  $\gamma(t)$  340 mm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio; c) sinuso periodo tipo poveikis  $\gamma(t)$  350 mm nuotoliu nuo žadinimo šaltinio; d) poveikis  $\gamma(t)$  AEK apertūros plote

Gauti matavimo rezultatai rodo, kad siūlomi bangų sintezės metodai gali būti taikomi bet kurioje sistemoje, kurios impulsinė reakcija yra žinoma. Modifikuotu dekompozicijos metodu pavaizduota galimybė plokštės tipo bangolaidžiuose gauti norimos formos mechaninius poveikius. Atitinkamai rodoma galimybė panaudoti šio tipo bangolaidžius AEK kalibruoti paviršine banga.

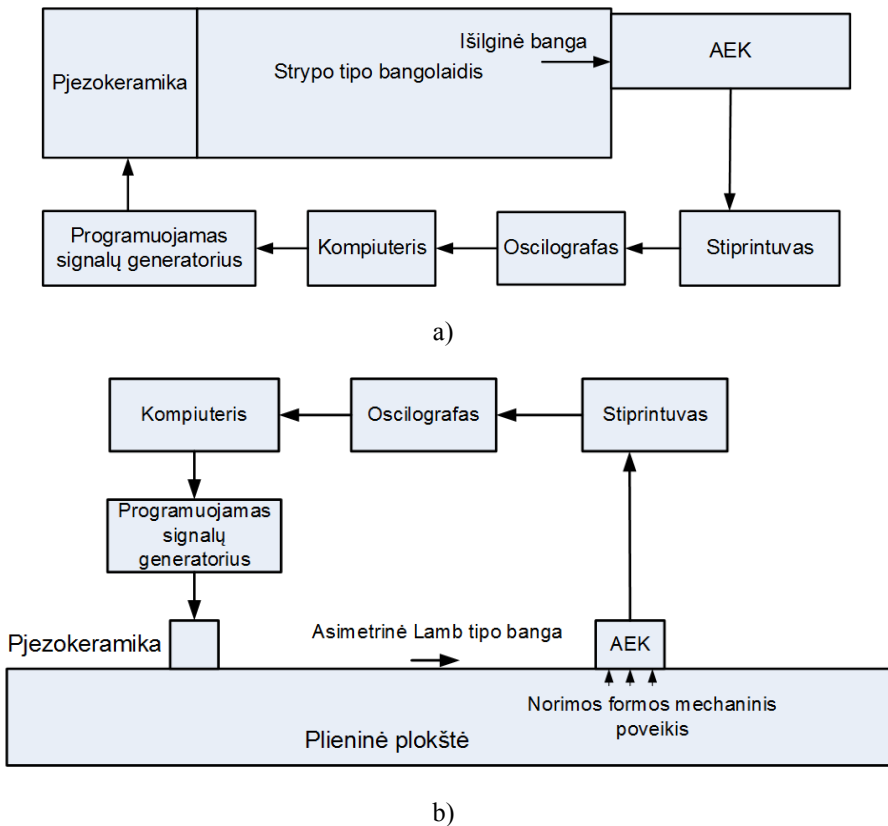
## 2.7. Skyriaus išvados

1. Strypo tipo bangolaidžio skersmens ir ilgio pasirinkimui įtaką daro būtinybė gauti sinchronišką jo galo virpėjimą. Įvertinus kalibravimo stendams būtinus bangolaidžio matmenis, galima teigti, kad, taikant įprastinius žadinimo metodus, dėl dispersijos gauti norimos formos mechaninius poslinkius nėra įmanoma. Dėl šios priežasties kalibravimo sistemos, kuriose naudojami bangolaidžiai su dispersinėmis savybėmis, reikalauja žadinimo signalo, leidžiančio kompensuoti arba sumažinti dispersijos įtaką generuojamam poslinkiui.
2. Sužadinto poslinkio forma dėl dispersijos kinta priklausomai nuo bangų sklidimo nuotolio ir dispersinių bangolaidžio savybių. Atlikti poslinkių matavimai strypo tipo bangolaidžiuose parodė, kad pasiūlytu metodu impulsinės reakcijos matavimo vietoje galima kompensuoti dispersijos įtaką ir gauti norimos formos mechaninius poslinkius.
3. Žinomi metodai, leidžiantys strypo ir plokštės tipo bangolaidžiuose gauti norimos formos poslinkius, parodė ribotas šių metodų galimybes. Problemai spręsti pasiūlytas modifikuotas dekompozicijos ir ribinių koeficientų metodai. Šių metodų taikymo privalumai matomi iš darbe pateikiamų matavimo rezultatų.
4. Pasiūlytas parametras  $Q$  gali būti siejamas su sintezuoto poslinkio kokybe. Šis parametras leidžia palyginti skirtingus norimos formos poslinkio generavimo metodus. Taip pat atsiranda galimybė automatizuoti žadinimo signalo skaičiavimo metodų koeficientų parinkimą, atitinkamai sumažinant skaičiavimo laiką ir sumažinant norimos formos signalo iškraipymus.
5. Sintezuoto poslinkio amplitudės išaugimo įvertinimas yra sudėtingas ir priklauso nuo žadinimo signalo juostos pločio, žadinimo signalo skaičiavimo algoritmo ir bangolaidžio savybių. Nepaisant to, buvo įrodyta, kad visais nagrinėtais atvejais, naudojant bangų sintezę, dispersiniuose bangolaidžiuose mechaninių poslinkių amplitudė išaugo. Amplitudės išaugimo nauda – galimybė, naudojant tą pačią įrangą, gauti didesnės amplitudės poslinkius.
6. Strypo tipo bangolaidžio galo skenavimas įrodė, kad, parinkus šio bangolaidžio matmenis ir žadinimo signalo juostą pagal (17) formulę, gaunamas sinchroninis viso bangolaidžio galo paviršiaus virpėjimas. Sintezė plokštėje parodė, kad tam tikrame plokštės plote gali būti gaunamas norimos formos paviršiaus poslinkis, kuris gali būti naudojamas AEK kalibruoti.
7. Atlikti matavimai įrodė, kad pasiūlytuose bangolaidžių tipuose, strypuose ir plokštėse gali būti generuojami norimos formos mechaniniai poslinkiai. Tai leidžia šiuos bangolaidžius panaudoti AEK kalibruoti Lembo ir išilgine bangomis.

### 3. AEK CHARAKTERISTIKŲ MATAVIMO SISTEMOS

#### 3.1. AEK kalibravimo sistemos su strypo ir plokštės tipo bangolaidžiais

Akustinės emisijos keitiklių kalibravimo sistemų struktūrinės schemas, kuriose naudojami dispersiniai strypo ir plokštės tipo bangolaidžiai, pavaizduotos 40 pav. AEK abiem atvejais yra kalibruojami naudojant norimos formos mechaninius poveikius, gaunamus modifikuotu dekompozicijos metodu (25). Kalibravimo stenduose naudojamų bangolaidžių matmenys parenkami pagal (15) – (17) formules. Abu kalibravimo standai leidžia matuoti AEK impulsinę reakciją, iš kurios pagal (51) apskaičiuojama AEK dažninė charakteristika. Impulsinė AEK reakcija siūlomuose kalibravimo stenduose išmatuojama su 5 % matavimo neapibrėžtimi (skaičiavimo rezultatai pateikiami 4 skyriuje). Pagamintų AEK kalibravimo stendų nuotraukos pateikiamos **5 priede**.

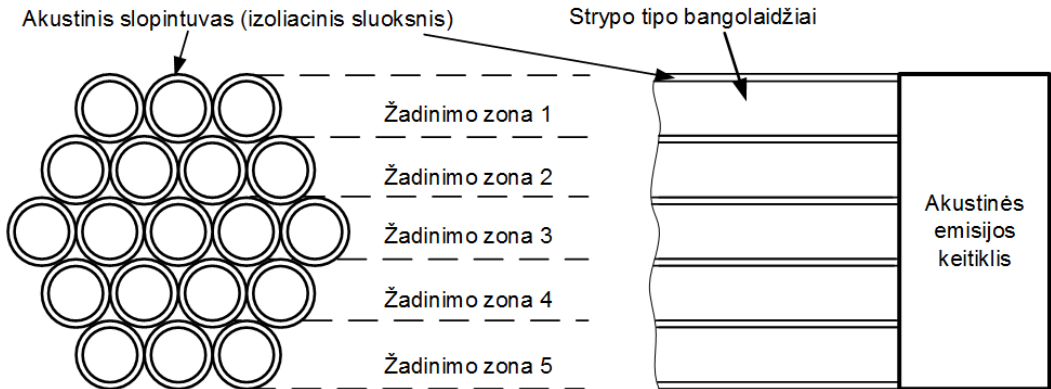


40 pav. Akustinės emisijos keitiklių kalibravimo struktūrinės schemas: a) kalibravimo sistema su strypo tipo bangolaidžiu; b) kalibravimo sistema su plokštės tipo bangolaidžiu

### 3.2. AEK kalibravimo sistema su gardelė iš $N$ strypo tipo bangolaidžių

AEK kalibruoti paviršine ir išilgine bangomis buvo pasiūlyti dviejų rūšių bangolaidžiai: strypai ir plokštės. Atlikti tyrimai parodė, kad abiejų tipų bangolaidžiuose galima generuoti norimos formos mechaninius poveikius ir juos naudoti AEK kalibruoti.

Daug skirtingų AEK kalibravimo stendų nėra patogu. Todėl pasiūlyta AEK kalibravimo sistema, sujungianti galimybes kalibruoti AEK išilgine ir paviršine bangomis. Vienas iš esminių tokios kalibravimo sistemos elementų yra gardelė, sudaryta iš  $N$  strypo tipo bangolaidžių.



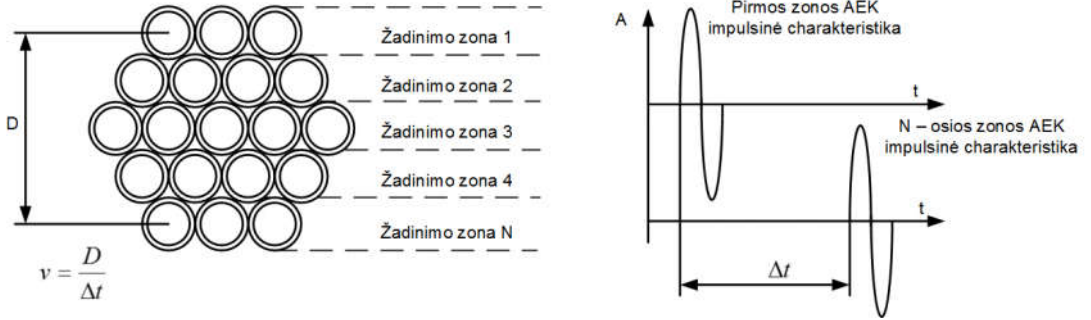
41 pav. Gardelės, sudarytos iš  $N$  bangolaidžių, struktūrinė schema

Kalibravimo sistemos idėja – sudėtingos formos paviršiaus poveikių generavimas naudojant gardelę, sudarytą iš  $N$  strypo tipo bangolaidžių. Sudėtingas suminis paviršiaus poveikis gaunamas sumuojant norimos formos, skirtingų bangolaidžių gardelės žadinimo zonų poveikius. Kiekvienas iš bangolaidžių yra tvirtinamas greta kito, sudarant tam tikrą paviršiaus geometriją. Vienas iš galimų paviršiaus geometrijos atvejų pavaizduotas 41 pav. Ant bangolaidžių galų tvirtinamas kalibruojamasis AEK. Bangolaidžiai suskirstomi į  $N$  žadinimo zonų ir atskiriami vienas nuo kito akustiškai. Akustinis atskyrimas realizuojamas naudojant vieną iš galimų slopintuvo konstrukcijų. Kiekvienas iš bangolaidžių turi po atskirą pjezokeramiką. Pjezokeramikos yra žadinamos skirtingais signalais, naudojant komutuojamą signalų generatoriaus išėjimą. Žadinimo zonose, įvertinant tos zonų impulsines charakteristikas, gaunamas norimos formos mechaninis poveikis.

Bangolaidžiai žadina AEK išilgine banga, skirtingais laiko intervalais. Laiko intervalai išlaikomi ilgi, kad būtų išmatuojama AEK impulsinė reakcija. Išmatavus  $N$  AEK impulsinių charakteristikų, galima įvertinti bet kokią AEK poveikį.

Bangolaidžių gardelė negali žadinti AEK paviršine banga, todėl vartojama virtualiojo greičio sąvoka. Kiekviena iš išmatuotų impulsinių charakteristikų yra suvėlinama tam tikru laiko intervalu. Suminis suvėlinimas tarp pirmosios ir  $N$ -tosios

žadavimo zonų yra visų vėlinimo laikų suma  $\Delta t$ . Žinant laiko intervalą  $\Delta t$  ir nuotolį  $D$  tarp pirmosios bei paskutinės žadavimo zonos, galima laikyti, kad yra turimas paviršinės bangos, sklidusios greičiu  $v$ , poveikis. Virtualusis greitis įvertinamas pagal 42 pav. Jeigu virtualusis greitis yra lygus nuliui, nėra suvėlinimo tarp atskirų išmatuotų impulsinių charakteristikų. Tuomet tariama, kad AEK yra veikiamas išilginės bangos.



42 pav. Virtualiojo greičio įvertinimas

Išmatuota tokioje AEK kalibravimo sistemoje AEK impulsinė reakcija priklauso nuo keitiklio apertūros skersmens ir virtualiojo bangos sklidimo greičio:

$$h(t)_{\Sigma} = f(S, v); \quad (34)$$

čia  $h(t)_{\Sigma}$  – AEK suminė visų žadavimo zonų impulsinė reakcija,  $V$ ;  $S$  – AEK apertūros plotas,  $m^2$ .

Kai virtualusis greitis lygus nuliui (atitinka žadimą išilgine banga), AEK impulsinė reakcija randama kaip visų poveikio zonų signalų suma:

$$h(t)_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N h(t)_k; \quad (35)$$

čia  $N$  – žadavimo linijų (zonų) skaičius;  $k$  – žadavimo zonos indeksas;  $h(t)_k$  – poveikio zonos impulsinė reakcija,  $V$ .

Tarus, kad AEK žadinama paviršine banga, būtina atsižvelgti į kiekvienos iš žadavimo zonų vėlinimo laiko intervalą. Jis parenkamas atsižvelgiant į norimą gauti virtualųjį greitį, tuomet AEK impulsinė reakcija skaičiuojama pagal (36) formulę:

$$h(t)_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N h(t + (k - 1)t_{vel})_k; \quad (36)$$

čia  $t_{vel}$  – vienos žadavimo zonos vėlinimo laiko intervalas tarp zonų žadavimo signalų, s:.

Suminė AEK dažninė charakteristika randama pagal (37) formulę:

$$K(j\omega)_{\Sigma} = \frac{Y_{\Sigma}(j\omega)}{H_{\Sigma}(j\omega)}. \quad (37)$$

čia  $K(j\omega)_{\Sigma}$  – suminė AEK dažninė charakteristika;  $H_{\Sigma}(j\omega)$  – suminės impulsinės reakcijos AEK spektras,  $V$ ;  $Y_{\Sigma}(j\omega)$  – suminis visų gardelės žadavimo zonų suvirpėjimo spektras,  $V$ .



Suminis visų gardelės žadinimo zonų suvirpėjimo spektras  $Y_{\Sigma}(j\omega)$  randamas pagal (38) formulę:

$$Y_{\Sigma}(j\omega) = FFT(\sum_{k=1}^n y(t + (k-1)t_{vel})_k); \quad (38)$$

čia  $y(t)$  – žadinimo zonos poslinkis, nm.

Siekiant ištirti aprašytą AEK kalibravimo sistemą, buvo pagamintos sudėtingos konstrukcijos akustinių bangolaidžių sistemos, naudojant apskritojo ir kvadratinio bangolaidžių išdėstymo schemas. Pagaminti bangolaidžiai pavaizduoti 43 pav. Eksperimentiniai tyrimai atliekami pagal 44 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.

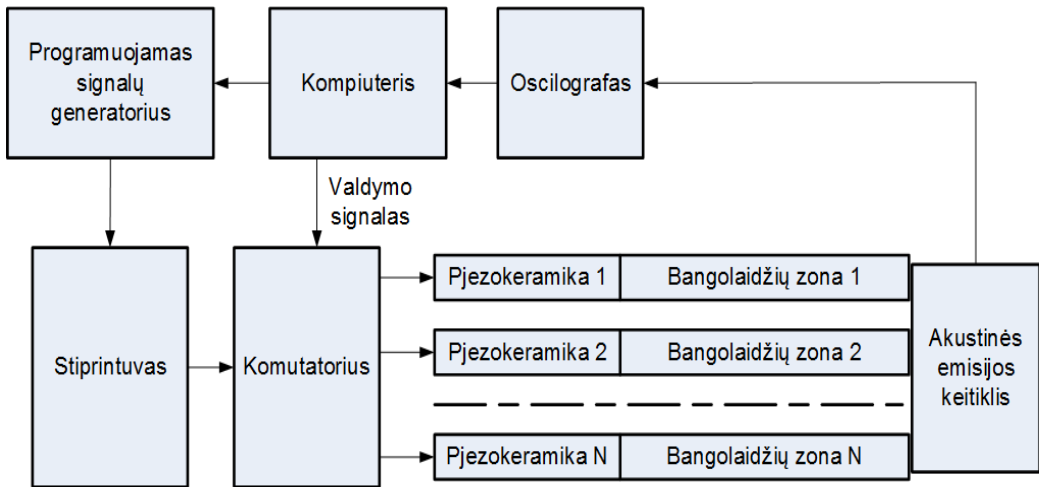


a)



b)

**43 pav.** Bangolaidžiai su  $N$  žadinimo zonų: a) naudojant apskritojo profilio strypus; b) naudojant kvadratinio profilio strypus

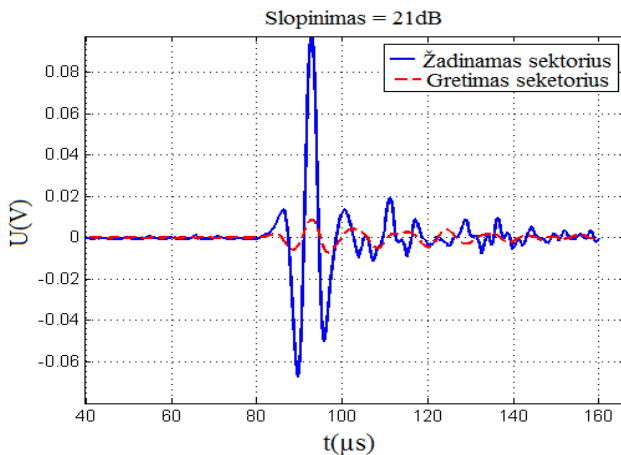


44 pav. AEK kalibravimo sistemos su  $N$  bangolaidžių struktūrinė schema

Kiekvienas iš bangolaidžių privalo tiesiogiai nesiliesti su kitu. Tokiu atveju gauti norimos formos poslinkius pasirinktame bangolaidžio apertūros plote tampa sudėtinga. Norint atskirti vieną bangolaidį nuo kito, kaip galimas sprendimas panaudotas varinis laidas, tvirtinamas tarp gretimų bangolaidžių. Šis sprendimas leidžia sumažinti akustinio kontakto plotą.

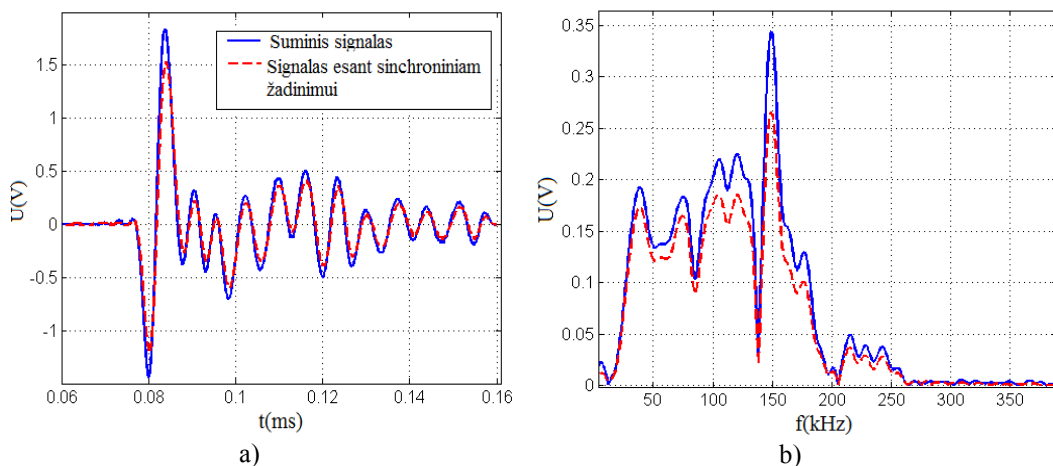
Siekiant įvertinti naudoto akustinio slopintuvo savybes, buvo tiriama, kaip akustinės bangos pereina iš vieno bangolaidžio į kitą (tiriama 43 pav., a, pavaizduota konstrukcija). Matuota pagal 44 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą, naudojant 2 mm apertūros plačiajuostį AEK. Matuojami dviejų gretimų bangolaidžių galų suvirpėjimai. Vieno bangolaidžio pjezokeramika žadinama 1  $\mu$ s ir 10 V signalu. Gretimas bangolaidis nebuvo žadinamas. Gauti matavimo rezultatai pateikiami 45 pav.

Pasirinkta konstrukcija leido tarp gretimų bangolaidžių gauti bangų slopinimą iki 21 dB (galimi ir kitokie konstrukciniai sprendiniai, leidžiantys padidinti slopinimą).



45 pav. Akustinių bangų slopinimas tarp gretimų bangolaidžių

Esant idealiam akustinių bangų slopinimui, atskirose žadinimo zonose gautų impulsinių charakteristikų suma privalo atitikti impulsinę reakciją, gautą žadinant visas poveikio zonas sinchroniškai. Tačiau dėl to, kad slopinimas nėra idealus, žadinama didesnė AEK matavimo apertūros ploto dalis. Dėl šios priežasties AEK suminė impulsinė reakcija gali būti didesnės amplitudės, nei būtų gaunama, esant sinchroniniam visų zonų žadinimui. Tai buvo įrodyta atliktais matavimo ir skaičiavimo rezultatais, pateikiamais 46 pav. Matuota pagal 44 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Matuojama 20 mm skersmens AEK impulsinė reakcija esant sinchroniniam žadinimui ir komutuojant atskiras žadinimo zonas.

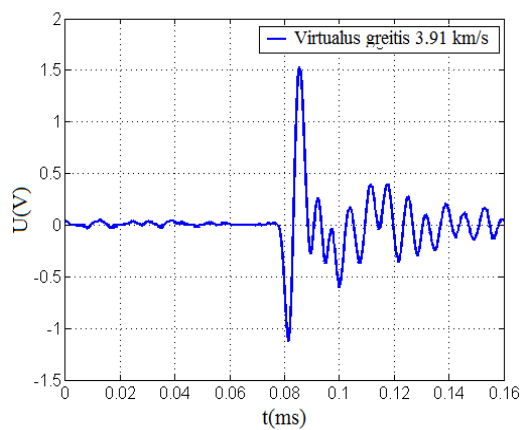


**46 pav.** a) AEK impulsinė reakcija, išmatuota esant sinchroniniam visų poveikio zonų žadinimui ir apskaičiuota sumuojant impulsines charakteristikas, gautas žadinant kiekvieną iš poveikio zonų paėiliui; b) apskaičiuoti signalų spektrai

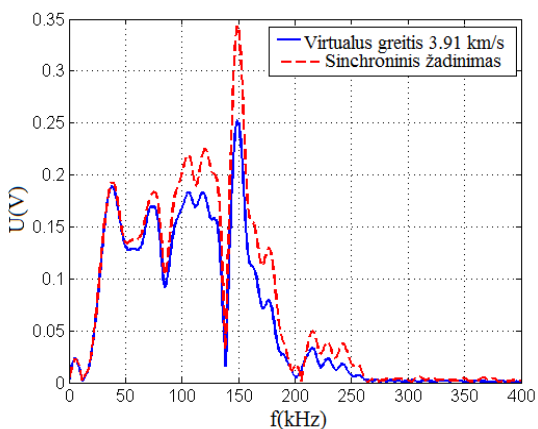
Paviršinės bangos AEK apertūros atžvilgiu sklinda tangentine kryptimi, dėl šios priežasties ne visa AEK apertūra sužadinama vienu metu. Panašus poveikis gali būti generuojamas naudojant bangolaidžių gardelę su  $N$  žadinimo zonų. Kiekviena iš žadinimo zonų AEK apertūros atžvilgiu sukelia mechaninius poveikius normaline kryptimi. Tačiau kiekviena iš žadinimo zonų gali būti sužadinama bet kokios norimos formos mechaniniu poveikiu, dėl šios priežasties galimas paviršinės bangos sklidimo poveikio imitavimas naudojant išilgines bangas ir  $N$  žadinimo zonų.

Siekiant įvertinti virtualiojo greičio įtaką AEK charakteristikai, išmatuotos ir apskaičiuotos 20 mm skersmens AEK impulsinės reakcijos, esant skirtingiems virtualios bangos sklidimo greičiams. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikiami 47 pav.

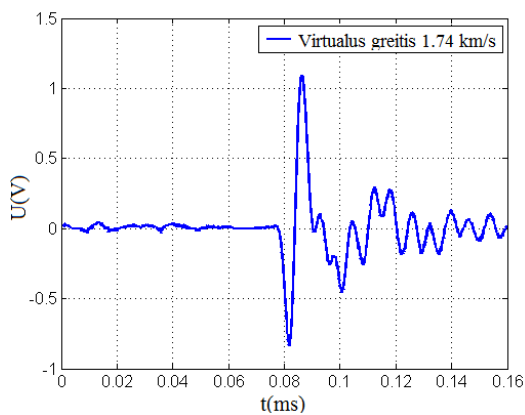
AEK charakteristikos, esant skirtingiems virtualiesiems bangos sklidimo greičiams, gaunamos pagal (38) formulę, sumuojant kiekvienos iš poveikio zonų sukiamas AEK impulsines charakteristikas ir sudarant norimo dydžio fazinį vėlinimą kiekvienai iš gautų charakteristikų (pavyzdys pateikiamas 47 pav.).



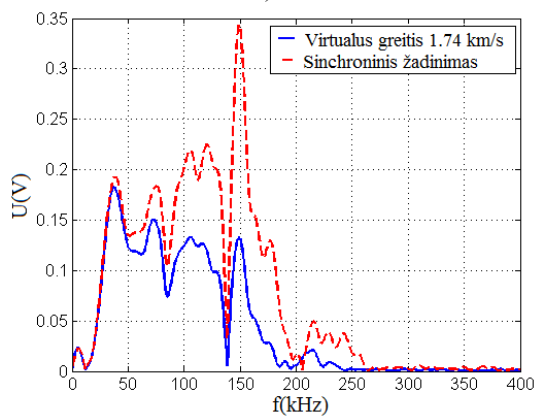
a)



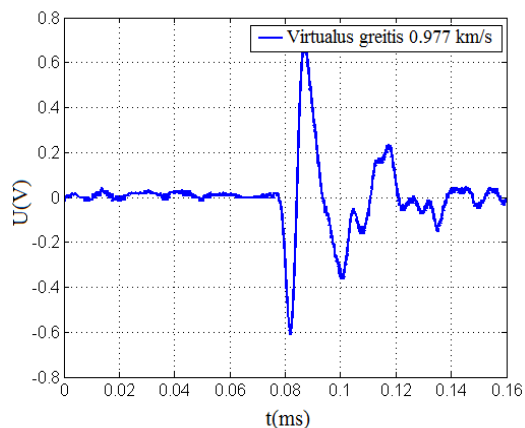
b)



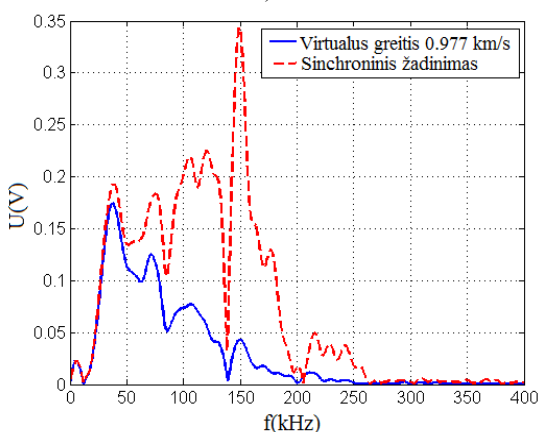
c)



d)



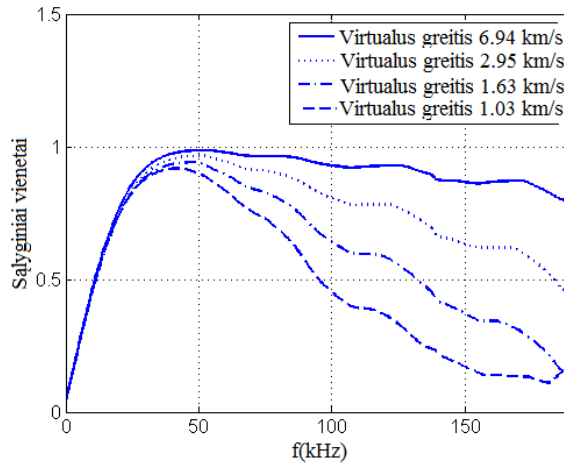
e)



f)

47 pav. AEK impulsinės reakcijos ir apskaičiuoti spektrai esant skirtingiems virtualios bangos greičiams

Mažėjant virtualiajam bangos greičiui, didėja aukštųjų dažnių slopinimas, tai matoma iš apskaičiuotų impulsinių ir dažninių charakteristikų (47 pav.). Dažninės AEK charakteristikos, esant skirtingiems virtualiesiems bangos greičiams, pateikiamos 48 pav.



**48 pav.** AEK dažninės charakteristikos, esant skirtingiems virtualiesiems greičiams

Gautos charakteristikos atitinka 6 pav. pavaizduotos apertūros funkcijos pobūdžio slopinimą.

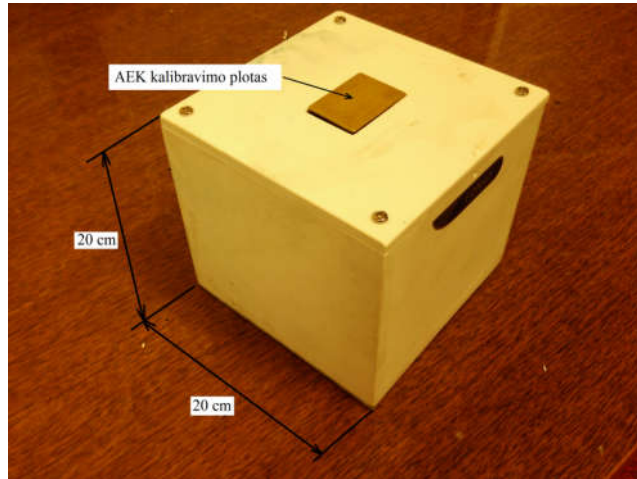
### 3.2.1 Kalibravimo stendas su pluoštiniu slopintuvu

Jeigu matuojant AEK impulsinę reakciją atsiranda bangų atspindžiai nuo bangolaidžio sienelių, AEK charakteristikoje gaunamas rezonansas (arba rezonansai, priklausomai nuo aplinkos geometrijos). Šis rezonansas yra visos matavimo sistemos, tačiau ne AEK charakteristika. Dėl šios priežasties viena iš sudėtinių kalibravimo stendo dalių yra akustinis bangolaidis. Atsiradę atspindžiai sklinda bangolaidžiu. Jo matmenys parenkami taip, kad būtų galima išmatuoti AEK impulsinę reakciją, išvengiant atsiradusio atspindžio įtakos matavimo rezultatui.

Kitas galimas sprendimas – atsiradusių atspindžių slopinimas. Slopintuvo matmenys įprastai yra gerokai mažesni už bangolaidžio, tačiau sudėtinga pagaminti slopintuvą, kuris leistų veiksmingai slopinti atsirandančius atspindžius.

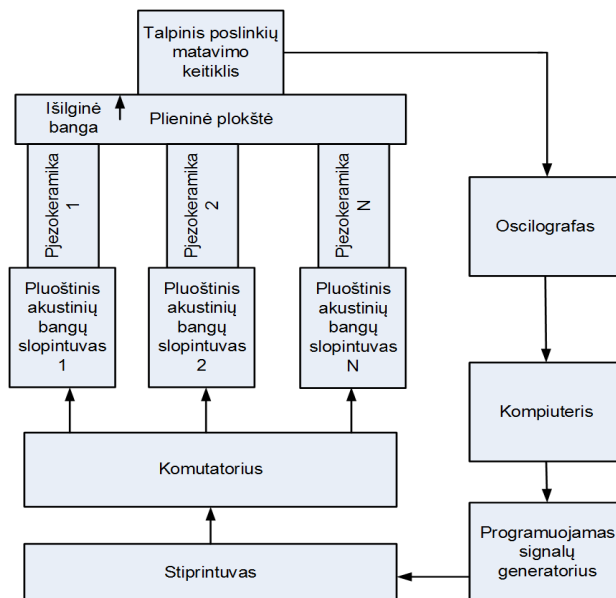
Įprastai slopintuvai naudojami plačiajuosčių AEK konstrukcijose. Literatūroje pateikiamos slopintuvų konstrukcijos [18, 53] dažniausiai yra tam tikros formos akustinio vėlinimo linijos, kuriuose atspindžiai nėra iki galo nuslopunami. Dėl šios priežasties panaudota pluoštinio akustinio slopintuvo konstrukcija. Šią konstrukciją sudaro pluoštinis akustinis bangolaidis, tvirtinamas prie pjekokeramikos. Atsirandančios išilginės bangos tokio tipo slopintuve keičiamos į lankstymosi tipo bangas, kurios stipriai slopinamos priklausomai nuo sklidimo nuotolio.

Siekiant ištirti slopintuvų naudojimo galimybes AEK kalibruoti, buvo pagamintas AEK kalibravimo stendas. Pagamintas stendas iliustruojamas 49 pav.



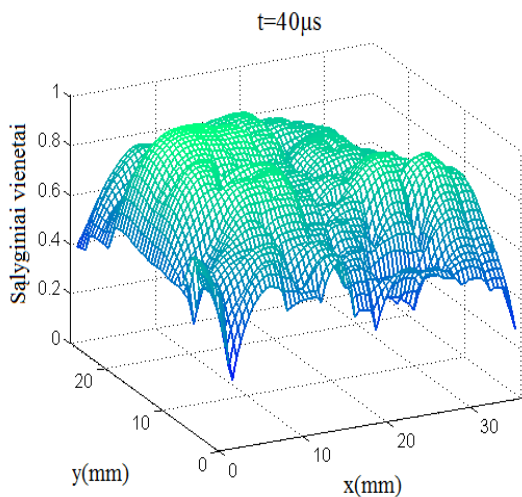
49 pav. Stendas su pluoštiniu slopintuvu

Stendo su pluoštinių slopintuvu gabaritų sumažėjimas, palyginti su kitais galimais sprendimais, gali būti skaičiuojamas kartais. Pagamintame stende numatyta galimybė kalibruoti AEK išilgine ir paviršine bangomis. Dėl šios priežasties suformuota gardelė iš  $N$  žadinimo zonų. Kalibravimas AEK paviršine banga imituojamas komutuojant atskiras žadinimo zonas. Pagamintos kalibravimo sistemos struktūrinė schema pateikiama 50 pav.

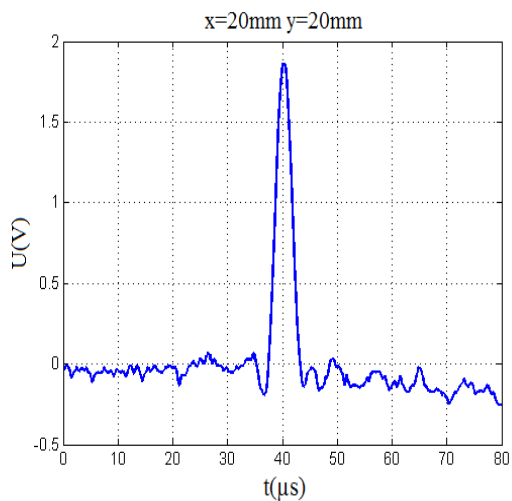


50 pav. AEK kalibravimo stendo su pluoštiniu slopintuvu struktūrinė schema

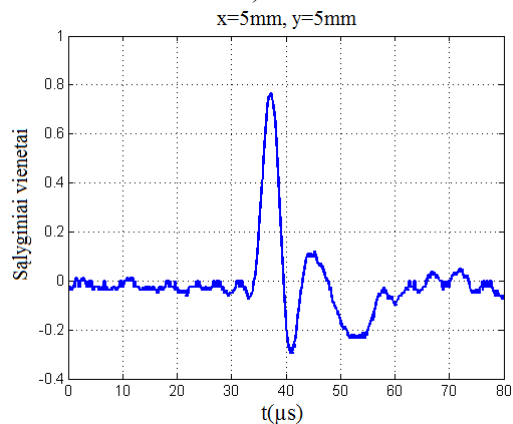
Naudojant talpinį poslinkių matavimo keitiklį, nuskenuotas pagaminto stendo AEK kalibruoti skirto paviršiaus virpėjimas. Matavimo tikslas – įvertinti pluoštinių atspindžių slopintuvų naudojimo galimybes AEK kalibruoti. Matavimo duomenys pateikiami 51 pav. Žadinimo signalas apskaičiuotas pagal (25) formulę, taikant modifikuotą dekompozicijos metodą. Signalas sintezuotas pagal centrinį kalibravimo ploto tašką. Šiame taške su talpiniu keitikliu išmatuotas signalas, proporcingas gaunamo poslinkio formai, pateikiamas 51 pav., b.



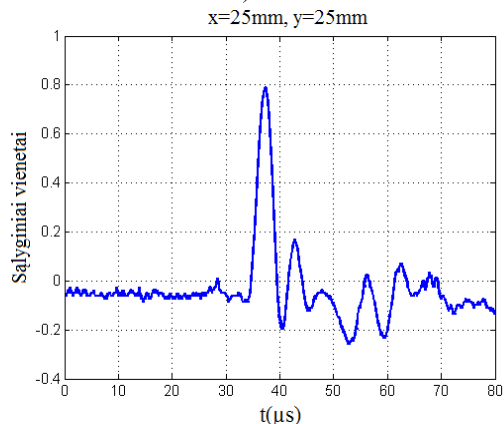
a)



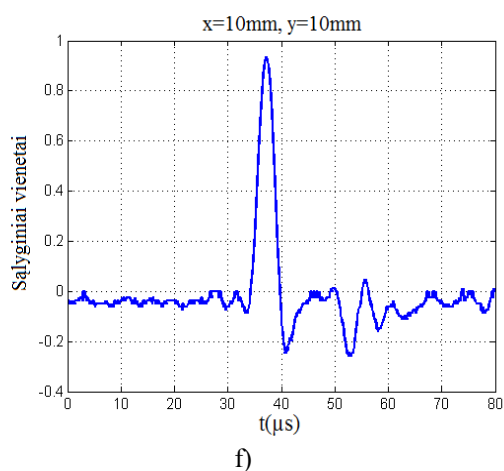
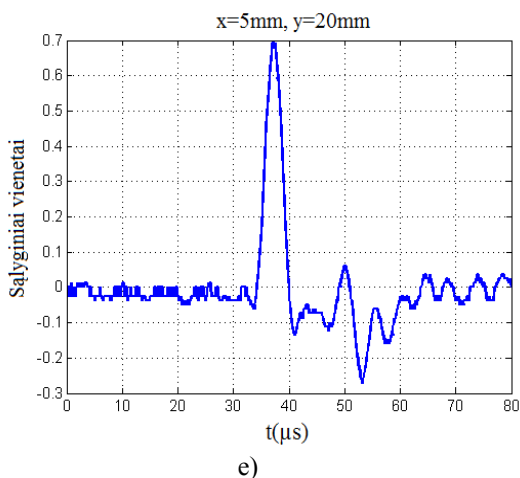
b)



c)



d)



**51 pav.** a) Nuskenutas kalibruoti skirto paviršiaus virpėjimas ties 40  $\mu\text{s}$  nuo žadinimo signalo pradžios; b–f) išmatuoti signalai, proporcingi kalibravimo stendo paviršiaus suvirpėjimui skirtinguose paviršiaus taškuose

Žadinimo signalo skaičiavimo metodas (25) ne tik leidžia kompensuoti dispersijos įtaką bangolaidžiuose, jis taip pat gali būti taikomas virpėjimo formai koreguoti ir atsirandantiems atspindžiams slopinti, todėl 51 pav. b, nėra matomi atspindžiai nuo bangolaidžio sienelių.

Žadinimo signalas apskaičiuotas pagal impulsinę reakciją, išmatuotą kalibravimo paviršiaus centre. Dėl bangų atspindžių ir atskirų konstrukcijos elementų parametų sklaidos impulsinė reakcija kituose paviršiaus taškuose gali skirtis nuo išmatuotos centriniame taške. Todėl tiksliai impulsinės reakcijos matavimo taške gaunamas sintezuotas signalas be bangų atspindžių.

Matavimo rezultatai, pateikti 51 pav., atlikti skirtingose kalibruoti skirto paviršiaus taškuose, nekeičiant buvusio žadinimo signalo. Šie matavimai patvirtina, kad pagamintoje konstrukcijoje atspindžiai nebuvo iki galo nuslopinami, todėl ties 52  $\mu\text{s}$  nuo žadinimo pradžios matomas priešingos fazinės suvirpėjimas. Taip pat pastebimas iki 30 % siekianti suvirpėjimo amplitudės sklaida, susijusi su atskirų žadinti naudojamų elementų parametrais.

### 3.3. Poslinkių matavimo keitikliai

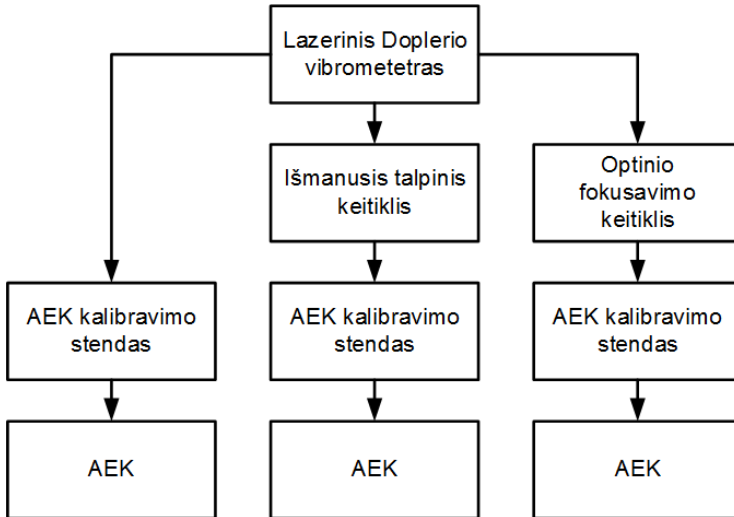
Kalibruoti naudojamų poslinkių amplitudė gali siekti nuo šimtų pikometrų iki mikrometrų eilės. AEK žadinimo poveikio matavimas absoliučiaisiais vienetais (nm/V, mm/s/V) būtinas, norint įvertinti AEK charakteristikas. Atlikti eksperimentiniai tyrimai leido suformuluoti AEK kalibruoti taikomoms matavimo priemonėms techninius reikalavimus:

- Matavimo dinaminis ruožas nuo 0,1 nm iki 1  $\mu\text{m}$ .
- Darbo dažnių ruožas nuo 20 kHz iki 300 kHz.
- Mažiausioji įtaka virpesių pobūdžiui (matuojant neapkraunamas virpantis paviršius).
- Atsparumas išoriniams trikdžiams.



Atsižvelgiant į šiuos reikalavimus, matavimai buvo atliekami naudojant interferometrines, talpines ir optinio fokusavimo matavimo priemones.

Matavimai, atlikti su interferometru, leido įvertinti matuojamus virpesius absoliučiaisiais vienetais (nm, mm/s). Kitų matavimo priemonių rezultatai siejami su gautais panaudojus interferometrą. Atsižvelgiant į naudotas matavimo priemones, sudaryta matavimo sistės grandinė, pavaizduota 52 pav.



52 pav. Matavimo sistės grandinės

### 3.3.1. Lazerinis Doplerio vibrometras

Interferometrus galima suskirstyti į dvi rūšis: matuojančius poslinkį arba greitį [54]. matuojant poslinkį įvertinamas fazių skirtumas, esantis tarp atraminio ir atsispindėjusio spindulių. Matuojant greitį naudojamas Doplerio efektas, vertinamas atsispindėjusio spindulio dažnio pokytis, kuris yra proporcingas greičiui:

$$\sigma f = \frac{2v}{\lambda}; \quad (39)$$

čia  $v$  – objekto judėjimo greitis, m/s;  $\lambda$  – lazerio, krintančio į judantį objektą, bangos ilgis, m;  $\sigma f$  – atsispindėjusio lazerio spindulio dažnių pokytis, Hz.

Dėl sistemos sudėtingumo interferometro konstrukcijos pasirinkimas buvo apribotas esančia technine įranga. Bangolaidžių paviršiaus vibracijų matavimams panaudoti Mechanikos ir Mechatronikos fakultete bei Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo instituto laboratorijose esantys „Polytech“ lazeriniai Doplerio vibrometrai. Naudoto matavimams interferometro techninės charakteristikos pateikiamos 3 lentelėje.

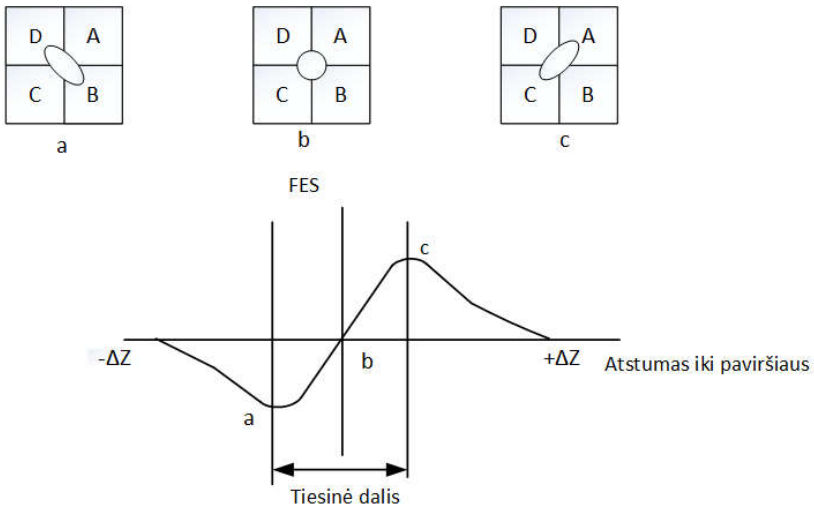
### 3 lentelė. Interferometrinės matavimo sistemos charakteristikos [55]

OVF-512 vibrometro jutiklinė dalis	
Lazeris helio neono, bangos ilgis	$\Lambda = 633 \text{ nm}$
Lazerio galingumo stabilumas	$\pm 0,2 \% \text{ per } 1 \text{ h}$
Lazerio dažnių stabilumas	$4,7 \times 10^{14} \text{ Hz} \pm 2 \times 10^6 \text{ Hz}$
Lazerio galingumas.	$P_1 < 1 \text{ mW}$
Lazerio moduliacijos dažnis.	$f_m = 40 \text{ Mhz}$
Greičio dekoderis VD-02	
Dažninė charakteristika 5 mm/s/V, 20–100 kHz .	$\pm 0,1 \text{ dB}$
Dažninė charakteristika 5 mm/s/V, 100–250 kHz .	$+0,2/-1 \text{ dB}$
Dekoderio kalibravimo paklaida 5 mm/s/V, $T_u = 25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 1 \%$
Dekoderio kalibravimo paklaida 5 mm/s/V, $T_u = 5 \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 1,5 \%$
Teisiškumo paklaida 5 mm/s/V	1 %
Poslinkio matavimo dekoderis DD-200	
Amplitudinė dažnių priklausomybė 0–100 kHz	$\pm 0,5 \%$
Amplitudinė dažnių priklausomybė 100–200 kHz	$\pm 1 \%$
Modulio kalibravimo paklaida – 2 $\mu\text{m/V}$ skalė	$\pm 1 \%$
Teisiškumo paklaida	$\pm 2 \%$

#### 3.3.2. Optinio fokusavimo poslinkių matavimo keitiklis

Mikroposlinkių matavimo įrenginiai, pagrįsti optinio fokusavimo metodu, pagal optinės sistemos sudėtingumą gali būti lyginami su interferometriniais. Šios konstrukcijos įrenginiai dažniausiai naudojami optiniuose duomenų saugojimo laikmenose [55]. Įprastai matuojami dydžiai siekia keletą šimtų nanometrų, tačiau literatūroje pateikiami ir šių įrenginių taikymo pavyzdžiai, kai matuojami kelių nanometrų dydžio poslinkiai [57]. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta įvertinti tokių matavimo įrenginių taikymo galimybes kuriamoje AEK kalibravimo įrangoje. Tyrimų metu pagamintas optinio fokusavimo poslinkių matavimo keitiklis. Tokio keitiklio struktūrinė schema pateikiama 7 priede.

Šio tipo keitiklyje nuotolis iki objekto įvertinamas pagal atsispindėjusio lazerio spindulio apertūrą, kuri atitinkamai priklauso nuo krantančio į objektą spindulio fokusavimo. Matavimai atliekami naudojant fotoimtuvinės matricos skirtuminį signalą, gaunamą pagal (40) formulę.



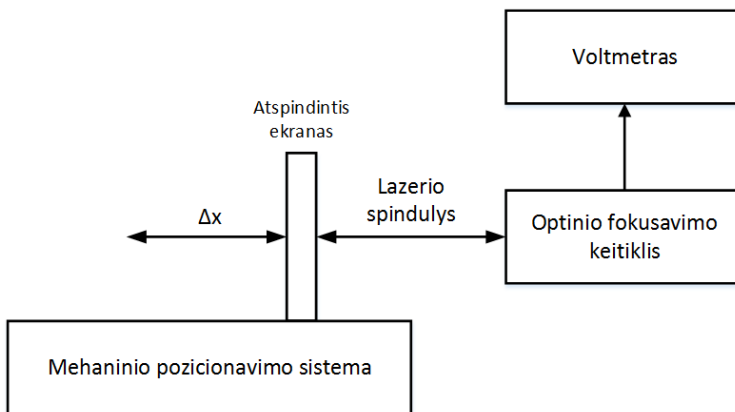
**53 pav.** Fotoimtuvinės matricos skirtuminio signalo formavimas priklausomai nuo atsispindėjusio spindulio apertūros

$$FES = (S_A + S_C) - (S_B + S_D); \quad (40)$$

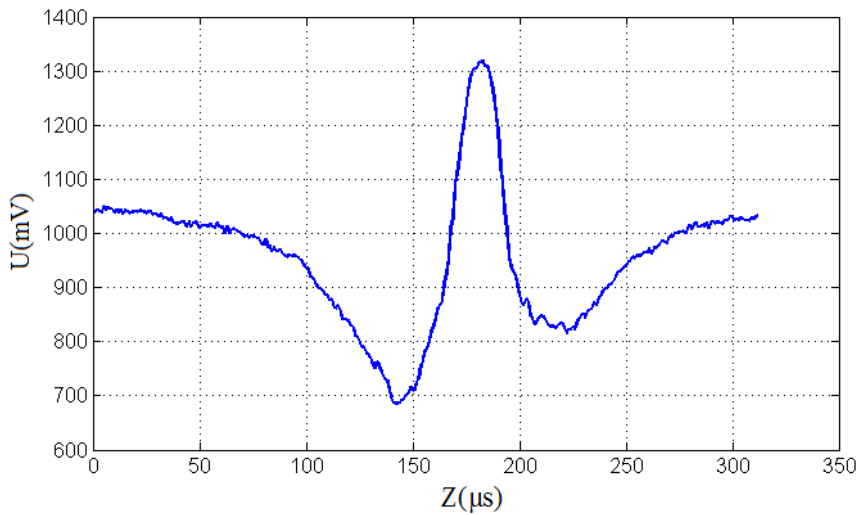
čia  $FES$  – skirtuminis signalas, V;  $S_A, S_B, S_C, S_D$  – fotoimtuvinės matricos atskirų zonų signalai, V.

Pagal pavaizduotą skirtuminio signalo charakteristiką 53 pav. matyti, kad fokusavimo dinaminis ruožas yra tiesinis tik tam tikroje srityje. Remiantis literatūros šaltiniais [47], šio ruožo dydis, tiesinė dalis įprastai siekia apie  $6 \mu\text{m}$ . Matavimai yra galimi tik tai tiesinėje charakteristikos dalyje, esant tam tikram spindulio fokusavimui.

Siekiant įvertinti turimos optinio fokusavimo sistemos skirtumines charakteristikas, pagal 54 pav. pateiktą struktūrinę schemą išmatuoti atskirų optinės matricos elementų signalai. Apskaičiuota skirtuminė charakteristika pateikiama 55 pav.



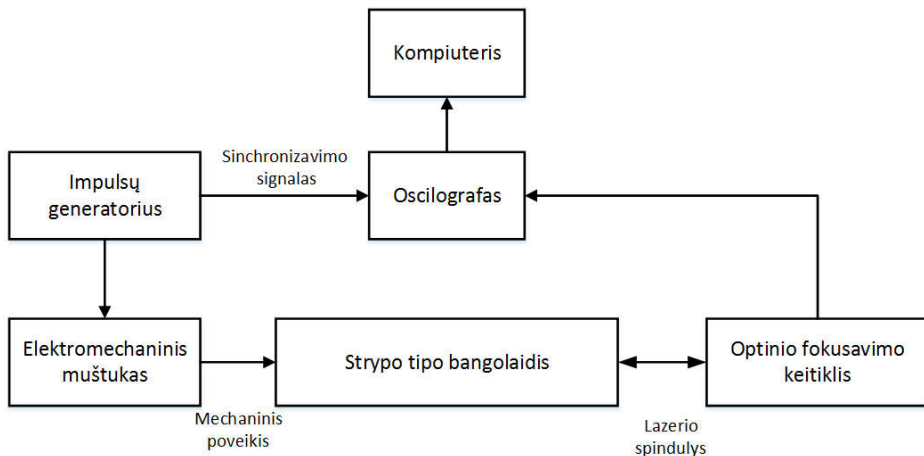
**54 pav.** Skirtuminė optinio fokusavimo sistemos charakteristika matavimo struktūrinė schema



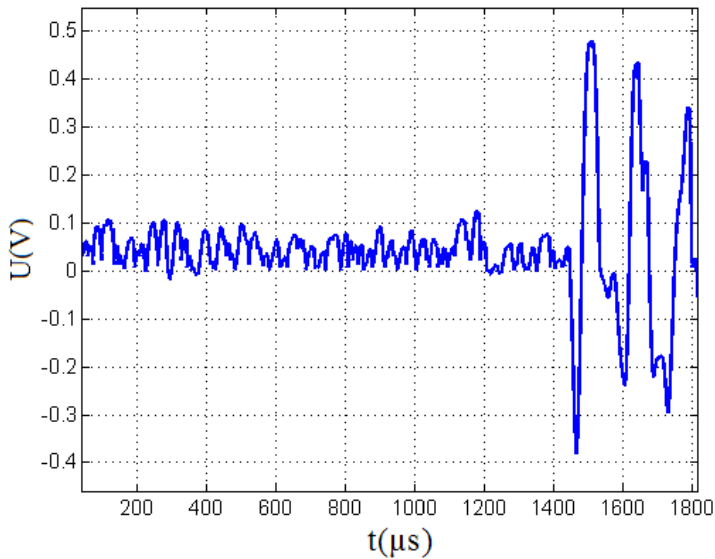
**55 pav.** Skirtuminė optinio fokusavimo sistemos charakteristika FES

Gautoje skirtuminėje charakteristikoje matoma atitiktis teorinei, pateiktai 53 pav. Naudojant 55 pav. pateiktą charakteristiką, galima įvertinti mikroposlinkius absoliučiaisiais vienetais.

Optinio fokusavimo matavimo keitiklis panaudotas strypo tipo bangolaidžio galo virpėjimui matuoti. Matavimai atlikti pagal 56 pav. pateiktą struktūrinę schemą. Žinoma, kad turimo optinio fokusavimo keitiklio jautrumas yra mažesnis nei interferometro, todėl žadinti buvo pasirinktas elektromechaninis muštukas, taip buvo tikimasi sukelti iki 100 nm siekiančius bangolaidžio paviršiaus poslinkius. Išmatuotas bangolaidžio galo virpėjimas pateikiamas 57 pav.



**56 pav.** Skirtuminės optinio fokusavimo sistemos charakteristikos FES matavimo struktūrinė schema



**57 pav.** Bangolaidžio galo virpėjimas, išmatuotas optinio fokusavimo matavimo keitikliu

Iš gautų matavimo rezultatų 57 pav. matoma, kad optinio fokusavimo matavimo keitiklis gali būti naudojamas bangolaidžių poslinkiams matuoti. Tačiau, siekiant naudoti šį keitiklį dešimčių nanometrų dydžio poslinkiams matuoti, būtini mechaniniai ir elektrotechniniai sprendimai, leidžiantys sumažinti išorinių trikdžių įtaką. Šie trikdžiai matomi iš matavimo rezultatų (57 pav.) laiko intervalu nuo 0 iki 1400  $\mu s$ . Signalas, proporcingo paviršiaus suvirpėjimui, periodas siekia 150  $\mu s$ . Jis atitinka atspindžių periodą.

### 3.3.3. Talpinis poslinkių matavimo keitiklis

Norint matuoti optinių mikroposlinkių matavimo sistemas, reikia stabilaus, išorines vibracijas izoliuojančio pagrindo, taip pat jų techninė realizacija dažnai yra sudėtinga. Paprastesnis sprendimas – talpinio mikroposlinkių matavimo keitiklio naudojimas. Šio tipo keitiklių naudojimas taip pat apibūdintas standarte **E1106-86**. Jie leidžia matuoti nanometrų dalių paviršiaus poslinkius [57].

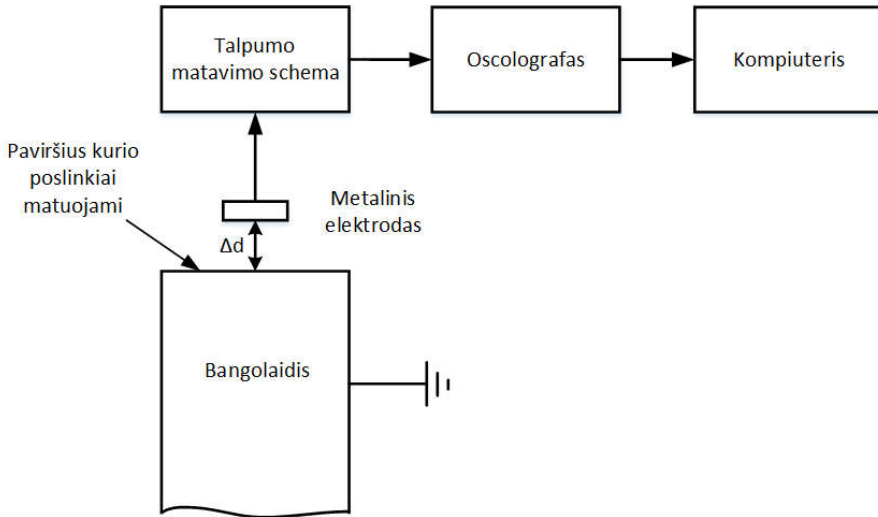
Galimų talpinių keitiklių konstrukcijų ir pritaikymo sričių yra be galo daug, tačiau, nepriklausomai nuo konstrukcijos, visuomet turimi du ar daugiau elektrodų, tarp kurių matuojama elektrinė talpa. Ji priklauso nuo :

- Elektrodų apertūros ploto.
- Atstumo tarp elektrodų.
- Dielektrinės skverbies.

Žinant talpinio keitiklio paviršiaus plotą, dielektrinę skverbį ir talpą, galima nustatyti, kokio dydžio yra atstumas tarp keitiklio elektrodų (41):

$$d = \frac{S \times \epsilon_m \times \epsilon_0}{C}. \quad (41)$$

Bangolaidžio paviršiaus poslinkių matavimai, naudojant talpinį poslinkių matavimo keitiklį, atliekami pagal 58 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Bangolaidžio paviršius privalo būti metalinis. Vienas iš talpinio keitiklio elektrodų įžeminamas. Matavimo elektrodo atstumas  $d$  iki bangolaidžio ir gaunami poslinkiai gali būti įvertinami pagal (41) formulę:

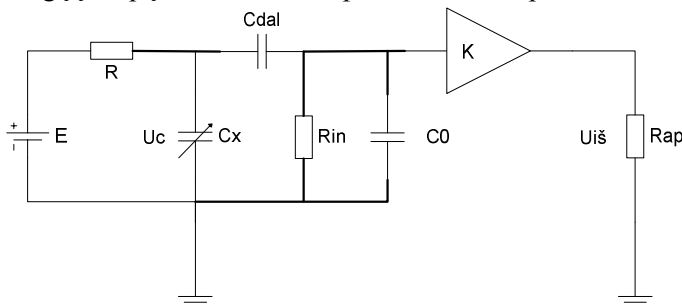


58 pav. Mikroposlinkių matavimo talpiniu keitikliu struktūrinė schema

Galimos schemas, leidžiančios matuoti talpą:

- Naudojama RC grandinė, talpa matuojama kaip generatoriaus dažnio pokytis.
- Matuojamas kondensatoriaus impedansas, esant tam tikram dažniui.
- Naudojama integruojanti grandinė, talpa randama lyginant žinomų parametrų ir tiriamos integravimo grandžių laiko pastoviąsias.
- Kondensatoriaus talpos pokytis išreiškiamas kaip įtampos kitimas.

Pati paprasčiausia iš galimų talpos matavimo schemų – kondensatoriaus talpos keitimas į proporcingą įtampą. Tokia schema pavaizduota 59 pav.



59 pav. Kondensatoriaus krūvio keitimo į įtampą elektrinė schema

Kondensatoriaus talpa randama taip:

$$C = \frac{Q'}{U_c}; \quad (42)$$

čia  $Q'$  – kondensatoriaus krūvis,  $C$ ;  $U_c$  – įtampa ant kondensatoriaus.

Pasikeitus kondensatoriaus talpai  $C_x$ , tačiau esant pastoviam krūviui  $Q'$ , pasikeičia įtampos kritimas ant kondensatoriaus. Varža  $R$  parenkama pagal laiko pastoviąją  $RC$ , kuri parenkama pagal toliau pateiktą formulę:

$$RC \gg \frac{1}{\omega_{\min}}; \quad (43)$$

Siekiant gauti laiko pastoviąją, kuri atitiktų (43), varžos  $R$  nominalas turi būti  $R > 10^9 \Omega$ , nes kondensatoriaus  $C_x$  talpa gali siekti  $C_x < 10^{-11}$  pF. Atsirandantis įtampos pokytis yra proporcingas (44):

$$\Delta U = -E \frac{\Delta C}{C}; \quad (44)$$

čia  $E$  – įtampa tarp matavimo elektrodo ir bangolaidžio, V.

Taigi netgi paprasčiausiu atveju, remiantis (64 pav.) pavaizduota elektrine schema, išmatuotos išėjimo įtampos pokytis priklauso nuo kai kurių veiksnių (45):

$$K = \frac{\Delta U_{is}}{\Delta d} = f(d, \varepsilon, E, C_0, K_{st}); \quad (45)$$

čia  $K$  – matavimo sistemos perdavimo funkcija,  $\Delta U_{is}$  – stiprintuvo išėjimo įtampa, V;  $K_{st}$  – stiprintuvo perdavimo funkcija;  $C_0$  – stiprintuvo įėjimo talpa, nF.

Dydžių  $E$ ,  $C_0$ ,  $K_{st}$  įtaka matavimo rezultatui susijusi su naudojamų komponentų parametrais ir, priklausomai nuo turimos įrangos, gali sudaryti iki kelių procentų siekiančią matavimo neapibrėžtį.

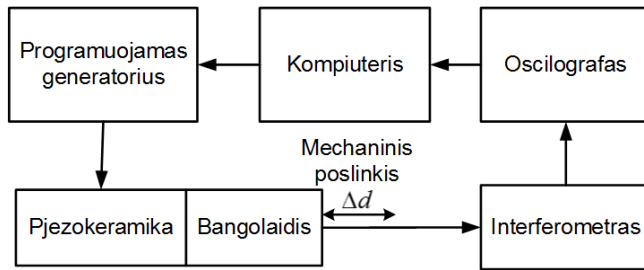
Kur kas didesnę įtaką talpinio keitiklio matavimams turi pradinis keitiklio pozicionavimas matavimo paviršiaus atžvilgiu ir dielektrinė skverbtis  $\varepsilon$ .

Su talpinio keitikliu matuojant paviršiaus poslinkius per oro tarpą, atstumas tarp matuojamo paviršiaus ir talpinio keitiklio elektrodo privalo neviršyti dešimčių mikrometrų, taip yra didžiausias jautrumas. Keitiklio jautrumas nuo atstumo priklauso netiesiškai, matavimo rezultatas, esant 1  $\mu\text{m}$  neapibrėžčiai, gali skirtis dešimtimis procentų. Dėl šios priežasties, atliekant matavimus per oro tarpą, būtinas pozicionavimo mechanizmas, užtikrinantis šimtų nanometrų eilės keitiklio pozicionavimo tikslumą.

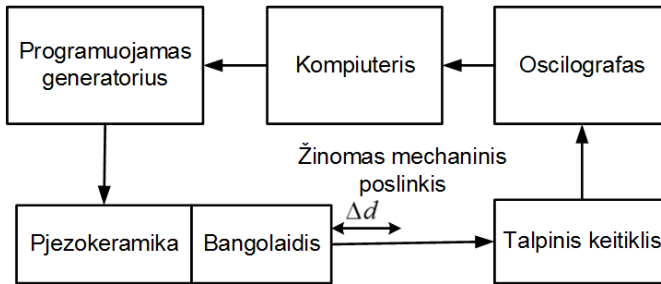
### 3.3.4. Talpinio keitiklio kalibravimas

60 pav. pavaizduotoje elektrinėje schemeje, talpumo pokytis keičiamas į įtampos pokytį, kuris sustiprinamas stiprintuvu. Talpos pokytis gali būti susietas su jį sukėlusiu mechaniniu poveikiu pagal (41) formulę, tačiau toks įvertinimas įneša kai kurių neapibrėžčių. Jų gali būti išvengiama kalibruojant talpinį keitiklį. Tai atliekama dviem etapais:

Pagal 60 pav., a, išmatuojamas bangolaidžio poslinkis su interferometru. Nekeičiant žadinimo signalo (60 pav., b), bangolaidžio galo poslinkis išmatuojamas su talpiniu keitikliu.



a)



b)

**60 pav.** Talpinio poslinkių matavimo keitiklio kalibravimas

Su interferometru išmatuojamas signalas, proporcingas mechaniniam poslinkiui, pateikiamas voltais. Mechaninis poslinkis apskaičiuojamas taip:

$$d_{int} = U_{int} K_{int}; \quad (46)$$

čia  $d_{int}$  – išmatuotas su interferometru poslinkis, nm;  $U_{int}$  – su interferometru išmatuotas signalas, V;  $K_{int}$  – interferometro jautrumas, nm/V.

Su talpiniu keitikliu, taip pat kaip ir su interferometru, išmatuojamas signalas proporcingas poslinkiui, tačiau šiuo atveju nėra žinomas talpinio keitiklio jautrumas. Jautrumui įvertinti naudojami matavimo duomenys, gauti su interferometru. Tuomet talpinio keitiklio jautrumas apskaičiuojamas pagal (47):

$$K_{talp} = \frac{d_{imax}}{U_{imax}}; \quad (47)$$

čia  $K_{talp}$  – talpinio keitiklio jautrumas, nm/V;  $U_{imax}$  – su talpiniu keitikliu išmatuoto signalo didžiausioji vertė, V;  $d_{imax}$  – su interferometru išmatuoto poslinkio didžiausioji vertė, nm.

Žinant talpinio keitiklio jautrumą, mechaniniai poslinkiai randami pagal (48):

$$d_{talp} = U_{talp} K_{talp}; \quad (48)$$



čia  $d_{talp}$  – su talpinio keitikliu išmatuoti poslinkiai, nm;  $U_{talp}$  – su talpinio keitikliu išmatuotas signalas, proporcingas poslinkiui, V;  $K_{talp}$  – talpinio keitiklio jautrumas, nm/V.

Talpinio keitiklio matavimo rezultato įvertinimas absoliučiais vienetais reikalauja jo pozicionavimo, elektronikos komponentų ir dielektrinės skverbties įvertinimo. Ši problema gali būti sprendžiama naudojant interferometrą. Tokiu atveju matavimo rezultato įvertinimas priklauso nuo lyginamiesiems matavimams naudoto poslinkio atsikartojimo ir interferometro parametrų.

Nepaisant to, kad interferometro naudojimas talpiniam keitikliui kalibruoti išsprendžia daug problemų, jis neleidžia iki galo išspręsti talpinio keitiklio pozicionavimo įvertinimo būtinybės.

### 3.3.5. Išmanusis talpinis keitiklis

Įprastinė talpinio keitiklio konstrukcija lemia, kad šis keitiklis turi būti kalibruojamas su papildoma matavimo priemone. Naudoti papildomą matavimo priemonę matuojant kaskart nėra įmanoma. Dėl šios priežasties pasiūlyta naujo tipo talpinio keitiklio konstrukcija (61 pav., a). Pagaminto keitiklio nuotrauka pateikiama 61 pav., b.

Naujo tipo talpinio keitiklio konstrukcijoje numatytas bangolaidis su pritvirtinta pjezokeramika. Bangolaidis sujungtas su talpinio keitiklio matavimo elektrodu. Siunčiant į pjezokeramiką kelių mikrosekundžių trukmės elektrinį impulsą, sukeliamas atsikartojantis matavimo elektrodo suvirpėjimas.

Kalibruojant naujos konstrukcijos išmanųjį talpinį keitiklį su interferometru, matuojamas talpinio keitiklio elektrodo suvirpėjimas. Nekeičiant pjezokeramikos žadinimo signalo, talpinio keitiklio elektrodo suvirpėjimas yra atsikartojantis ir žinomas. Taigi, pridėjus talpinį keitiklį prie norimo matuoti bangolaidžio paviršiaus, kiekvieno matavimo metu galima kalibruoti talpinį keitiklį be papildomų matavimo priemonių.

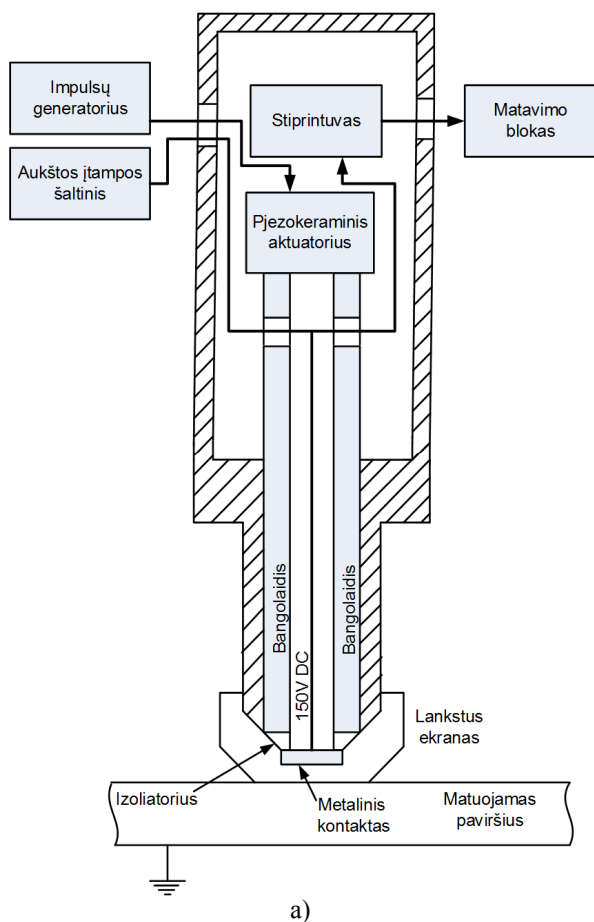
Išmaniojo talpinio keitiklio kalibravimo eiga:

Su interferometru išmatuojamas talpinio elektrodo virpėjimas. Matuojama vieną kartą, po keitiklio gamybos, neskaitant būtino periodinio keitiklio kalibravimo.

Talpinis keitiklis pozicionuojamas ant numatomo matuoti bangolaidžio paviršiaus.

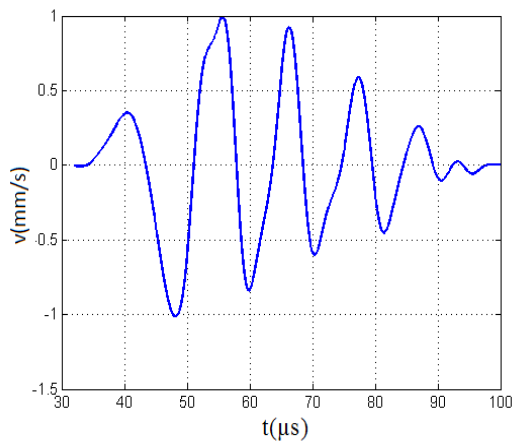
Talpinio keitiklio matavimo elektrodas žadinamas su elektriniais impulsais, sukeliančiais žinomos amplitudės matavimo elektrodo poslinkius. Poslinkių amplitudė yra žinoma iš matavimo rezultatų, gautų su interferometru.

Pagal (49) formulę įvertinamas talpinio keitiklio jautrumas. Žinant talpinio keitiklio jautrumą, kalibravimas yra baigtas. Atjungiamas matavimo elektrodo poslinkius sukeliantis impulsinis žadinimas. Matuojamo paviršiaus mechaniniai poslinkiai įvertinami pagal (50) formulę.

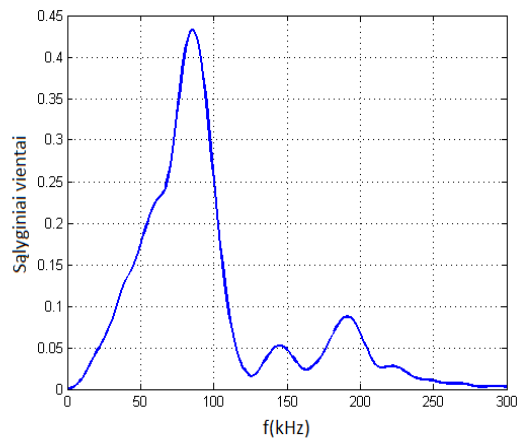


**61 pav.** Išmanusis talpinis keitiklis: a) struktūrinė schema; b) pagamintas keitiklis

Naudojant interferometrą, išmatuotas pagaminto išmaniojo talpinio keitiklio matavimo elektrodo virpėjimas. Pjezokeramikai žadinti naudotas  $2 \mu\text{s}$  trukmės  $12 \text{ V}$  elektrinis impulsas. Gauti signalai, proporcingi virpamajam greičiui ir poslinkiui, pateikiami 62 pav. ir 63 pav. Šie matavimo rezultatai leidžia vertinti paviršiaus virpėjimą absoliučiaisiais vienetais.

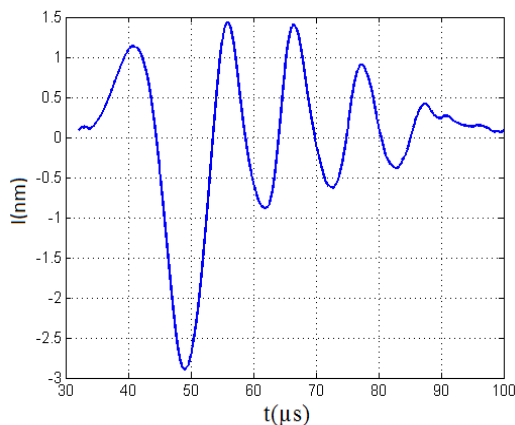


a)

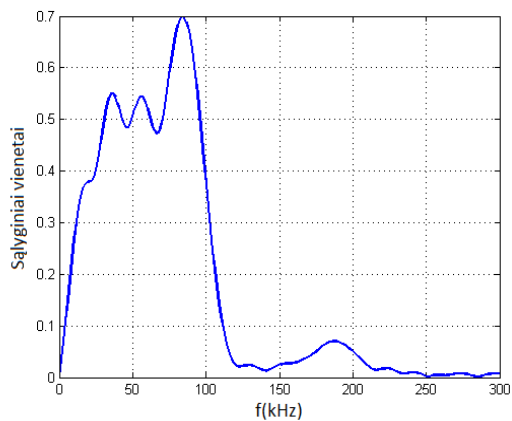


b)

**62 pav.** Talpinio keitiklio elektrodo virpėjimo matavimas: a) signalas, proporcingas suvirpėjimo greičiui, išmatuotas su interferometru; b) apskaičiuotas spektras



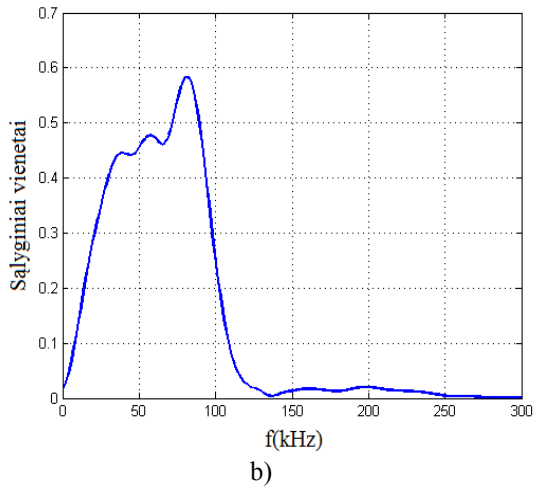
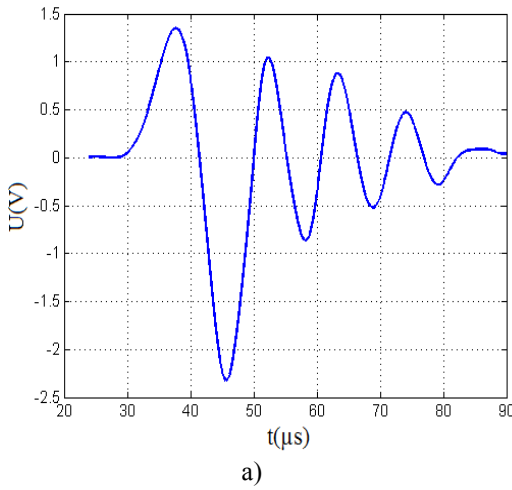
a)



b)

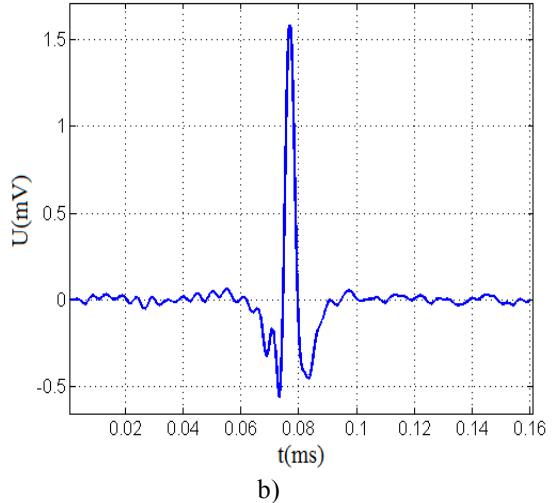
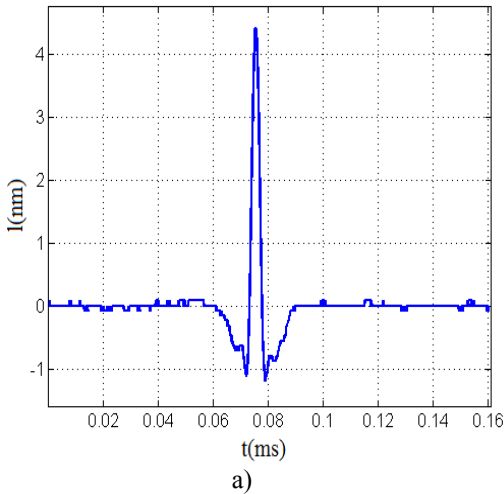
**63 pav.** Talpinio keitiklio elektrodo virpėjimo matavimas: a) signalas, proporcingas suvirpėjimo poslinkiui, išmatuotas su interferometru; b) apskaičiuotas spektras

Esant tokiam pačiam pjezokeramikos žadinimui, elektrodo virpėjimas išmatuotas su talpiniu keitikliu, matavimo rezultatai pateikiami 64 pav. Buvusiomis matavimo sąlygomis gautas talpinio keitiklio jautrumas – 1,17 nm/V. Žinant talpinio keitiklio jautrumą, galimas bangolaidžio paviršiaus, ant kurio pozicionuojamas keitiklis, poslinkių matavimas ir įvertinimas absoliučiaisiais vienetais.



**64 pav.** Talpinio keitiklio elektrodo virpėjimo matavimas: a) signalas, proporcingas talpinio elektrodo poslinkiui, išmatuotas su talpiniu keitikliu, b) apskaičiuotas spektras

Siekiant patikrinti talpinio keitiklio naudojimo galimybes norimos formos mechaninio poveikio matavimui, pagal 20 pav., a, pateiktą struktūrinę schemą išmatuotas 24 mm skersmens strypo tipo bangolaidžio galo virpėjimas. Matavimai atlikti su interferometru ir talpiniu keitikliu. Bangolaidžio gale, taikant modifikuotą dekompozicijos metodą, sintezuojamas impulso tipo signalas. Gauti matavimo rezultatai pateikiami 65 pav.



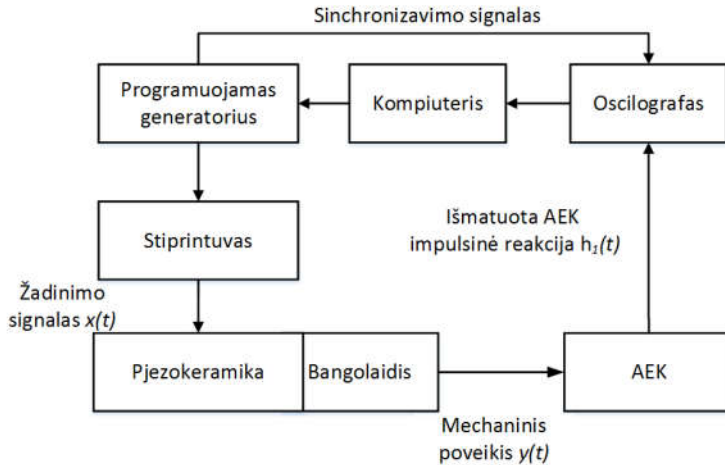
**65 pav.** Bangolaidžio galo virpėjimo matavimas: a) matavimas interferometru; b) matavimas talpiniu keitikliu

### 3.4. Skyriaus išvados

1. Pagal (20) formulę eksperimentiškai nustatytos sąlygos, kai strypo tipo bangolaidžio galas virpa sinchroniškai. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad konstrukcija, kurioje naudojama strypo tipo bangolaidžių gardelė, leidžia kalibruoti AEK platesniame dažnių ruože, palyginti su konstrukcija, kurioje naudojamas vienas, strypo tipo bangolaidis.
2. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, pateikiami 3.2 poskyryje, rodo bangolaidžių gardelės naudojimo galimybes AEK kalibruoti išilgine ir paviršine bangomis. Taigi siūloma konstrukcija leidžia pakeisti strypo ir plokštės tipo bangolaidžius viena bangolaidžių sistema, kuri leidžia kalibruoti AEK platesniame dažnių ruože.
3. Gardelės tipo AEK kalibravimo sistemoje nėra įmanomas idealus akustinis atskirų žadinimo zonų atskyrimas. Todėl kiekviena žadinimo zona privalo turėti skirtingą žadinimo signalą.
4. Iš pateiktų matavimo rezultatų matoma, kad AEK kalibruoti naudojant stendą su gardelės tipo bangolaidžiu būtinas koeficientas, įvertinantis atskirų žadinimo zonų akustinį atskyrimą. Priešingu atveju apskaičiuota AEK impulsinė reakcija yra didesnės amplitudės, nei būtų gaunama žadinant visas bangolaidžio zonas sinchroniškai.
5. Gardelės tipo kalibravimo sistemos su pluoštiniu slopintuvu privalumas – mažiausieji galimi sistemos matmenys; trūkumas – tokioje kalibravimo sistemoje sudėtinga pašalinti atsirandančius atspindžius, dėl to matavimo rezultatas yra stendo, o ne AEK charakteristika. Sistema galėtų būti naudojama AEK kalibruoti, patobulinus slopintuvo konstrukciją.
6. Atlikta analizė parodė ribotas optinio fokusavimo metodo taikymo galimybes AEK kalibruoti. Pagrindinė problema – matavimams būtina įranga, leidžianti sumažinti išorinių trikdžių įtaką.
7. Siekiant panaudoti talpinį keitiklį AEK kalibruoti, buvo susidurta su šio keitiklio kalibravimo problema. Problema išsprendžiama, naudojant pasiūlytą naujo tipo talpinio keitiklio, kuris gali susikalibruoti, konstrukciją. Siūlomos konstrukcijos privalumai, lyginant su esamomis, įrodyti darbe pateiktais matavimo rezultatais.

#### 4. AEK KALIBRAVIMO SISTEMŲ NEAPIBRĖŽČIŲ ĮVERTINIMAS

Buvo nagrinėti įvairūs AEK kalibravimo stendai su dispersiniais bangolaidžiais. Nepriklausomai nuo to, koks stendas ir kokio tipo banga yra kalibruojamas AEK, šie keitikliai kalibruojami pagal 66 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.



66 pav. AEK kalibravimo struktūrinė schema

Šioje struktūrinėje schemoje nėra detalizuojamas naudojamo bangolaidžio tipas, tai gali būti strypo, plokštės tipo bangolaidis, taip pat gardelės tipo bangolaidžių sistema su  $N$  žadinimo zonų (šiuo atveju atsiranda papildomų neapibrėžčių, susijusių su virtualiuoju bangos greičiu).

AEK dažninė charakteristika randama pagal (49) formulę, impulsinė AEK reakcija išmatuojama su oscilografu ar kitokia signalų matavimo priemone ir pateikiama V:

$$K_{AEK}(j\omega) = 20 \log \left( \frac{S_t(j\omega)}{Y(j\omega)} \right); \quad (49)$$

čia  $K_{AEK}(j\omega)$  – AEK dažninė charakteristika, dB;  $S_t(j\omega)$  – išmatuotos AEK impulsinės reakcijos spektras, [V];  $Y(j\omega)$  – norimos formos mechaninio bangolaidžio suvirpėjimo spektras, nm arba m/s.

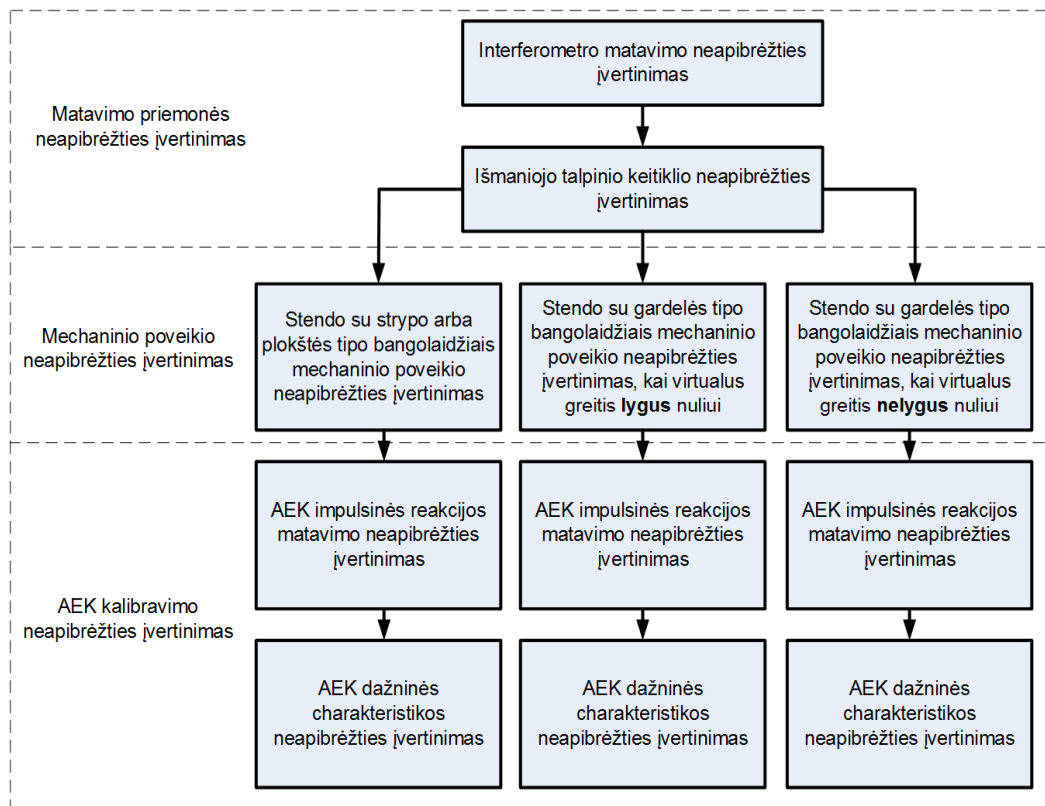
Norimos formos mechaninis poveikis  $y(t)$  privalo būti pateikiamas nm arba m/s. Poveikiui išmatuoti, numatytos šios matavimo priemonės:

- Interferometrinė matavimo sistema.
- Išmanusis talpinis keitiklis.

Matavimo rezultatai susiejami pagal 52 pav. numatytą matavimo sieties grandinę.

#### 4.1. AEK kalibravimo neapibrėžčių įvertinimo metodika

Galutinis AEK kalibravimo rezultatas yra impulsinė ir dažninė keitiklio charakteristikos. Gaunamų charakteristikų neapibrėžtys įvertinamos pagal 67 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.



67 pav. AEK kalibravimo neapibrėžčių įvertinimas

AEK kalibravimo neapibrėžtys įvertinamos atliekamas trimis etapais:

1. Įvertinamos naudojamos matavimo priemonės neapibrėžtys.
2. Įvertinamos generuojamo mechaninio poveikio neapibrėžtys.
3. Įvertinamos AEK kalibravimo neapibrėžtys.

Darbe neapibrėžtys vertintos pagal literatūroje pateikiamą metodiką [59–61]. Remiantis šia metodika, gauto rezultato neapibrėžtis gali turėti kai kurių komponentų, kurie skirstomi į dvi rūšis pagal tai, kokie metodai taikyti skaitinėms neapibrėžčių vertėms apskaičiuoti.

Jeigu matavimo neapibrėžtis vertinama statistiniais metodais, tariama, kad turima A tipo neapibrėžtis. Kai neapibrėžtis vertinama remiantis kitokiais metodais, tariama, kad turima B tipo neapibrėžtis. B tipo neapibrėžčiai priskiriami:

- Anksčiau atliktų matavimų rezultatai, išankstinė informacija apie matavimo instrumentų, medžiagų savybės, parametrus, charakteristikas.
- Gamintojų specifikacijos (matavimo prietaiso paklaida).
- Kalibravimo ir kitokių ataskaitų duomenys.

Su matavimo priemone gauto matavimo rezultato vidurkis laikomas labiausiai tikėtina matavimo dydžio verte ir randamas pagal (50) formulę:

$$q_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i; \quad (50)$$

čia  $q_v$  – išmatuotų reikšmių aritmetinis vidurkis;  $q_i$  – matavimo reikšmė su indeksu  $i$ ;  $N$  – matavimo reikšmių skaičius.

Matavimo rezultato atsitiktinių reikšmių sklaida įvertinama skaičiuojant eksperimentinį standartinį nuokrypį (51).

$$S(q_j) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (q_i - q_v)^2}. \quad (51)$$

Matavimo rezultato vidurkio standartinė neapibrėžtis randama pagal tokią formulę:

$$\sigma_A(q_v) = \frac{S(q_j)}{\sqrt{N}}. \quad (52)$$

Kai neapibrėžtis yra B tipo, ji įvertinama pagal (53) formulę:

$$\sigma_B = \frac{a}{\alpha_k}; \quad (53)$$

čia  $\alpha_k$  – koeficientas, priklausantis nuo sklaidos dėsnio.

Suminė standartinė neapibrėžtis randama pagal tolia pateiktą formulę:

$$u_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N W'^2 \sigma^2(q_v)}; \quad (54)$$

čia  $W'$  – neapibrėžties komponentės įtakos koeficientas.

Įtakos koeficientas randamas kaip turimos funkcijos dalinė išvestinė:

$$W' = \frac{\delta F}{\delta x_i}; \quad (55)$$

Neapibrėžtys vertinamos santykiniais arba absoliučiaisiais vienetais. Dažnai patogiau vertinti santykiniais vienetais, tuomet įtakos koeficientas taip pat privalo būti santykinis dydis ir randamas pagal (56) formulę:

$$W'_s = \left( \frac{\delta F}{\delta x_i} \right) \left( \frac{x_i}{F} \right). \quad (56)$$

Suminė standartinė neapibrėžtis, apskaičiuota pagal (54) formulę, atitinka vieną sigma reikšmę, o tai normaliojo skirstinio atveju atitinka 68 % pasikliautinumo intervalą.



Įprastai rezultatai pateikiami esant dviejų arba didesnei sigma reikšmei, tuomet skaičiuojama suminė išplėstinė neapibrėžtis (57), dauginant suminės neapibrėžties reikšmę iš aprėpties koeficiento.

$$U = \alpha_{\Sigma} \delta_{\Sigma}; \quad (57)$$

čia  $\alpha_{\Sigma}$  – aprėpties koeficientas, priklausantis nuo suminio sklaidos dėsnio ir matavimo rezultato pasikliautinumo intervalo.

## 4.2. Matavimo priemonių neapibrėžčių įvertinimas

Mechaniniai poveikiai numatomi matuoti su išmaniuoju talpiniu keitikliu. Šio keitiklio konstrukcija leidžia jį kalibruoti be interferometro, kai žinomas jo matavimo elektrodo virpėjimas absoliučiaisiais vienetais. Tam tikrais atvejais šis virpėjimas nėra žinomas, todėl būtina kalibruoti šį keitiklį, naudojant papildomą matavimo priemonę. Šiuo atveju interferometrą, kurio parametrai pateikiami 1 lentelėje.

Keitiklis kalibruojamas pagal 60 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. Norint kalibruoti be interferometro, būtinas signalų generatorius ir duomenų surinkimo sistema (tam tikrais atvejais žadinimo signalui sustiprinti gali būti naudojamas stiprintuvas). Darbe naudotos įrangos parametrai pateikiami 4 lentelėje.

**4 lentelė.** Naudotos įrangos parametrai

<i>TiePie Handyscope</i> HS5 oscilografo bloko parametrai	
Bitų skaičius	16 bitų
Matavimo paklaida	±0,25 %
<i>TiePie Handyscope HS5</i> generatoriaus bloko parametrai	
Analoginio kodo keitiklio bitų skaičius	14 bitų
Paklaida	±0,4 %

Įprastai su interferometru atliekama daugiau kaip dešimt elektrodo virpėjimo matavimų. Tuomet galima tarti, kad matavimo neapibrėžtis pasiskirsčiusi pagal normalųjį sklaidos dėsnį. Interferometras ir talpinis keitiklis kaip galutinį rezultatą išduoda signalą, proporcingą virpėjimui arba greičiui. Signalas skaitmeninamas ir saugomas kompiuterio atmintyje, naudojant duomenų surinkimo sistemą. Įprastai šios sistemos neapibrėžties pateikiamos specifikacijoje. Naudotos įrangos atveju buvo pateiktos ribinės neapibrėžties reikšmės, todėl joms priskiriamas stačiakampis sklaidos dėsnis.

Talpinių keitiklių kalibravimui yra svarbus jo elektrodo matavimas absoliučiaisiais vienetais. Pirminis šio elektrodo virpėjimo įvertinimas atliekamas su interferometru. Gaunamas mechaninis poveikis tuomet gali būti apibūdinamas pagal (58) formulę. Pateiktoje išraiškoje (58) pjezokeramikos, bangolaidžio bei bangolaidžio ir pjezokeramikos akustinis kontaktas įvertinamas naudojant interferometro perdavimo funkciją  $K_{int}$ :

$$d_{int} = U_g K_{int} K_M K; \quad (58)$$

čia  $d_{int}$  – mechaninis poveikis, įvertintas su interferometru, nm arba mm/s;  $U_g$  – generatoriaus žadinimo signalas, siunčiamas į pjezokeramiką, V;  $K_{int}$  – interferometro perdavimo koeficientas, nm/V arba m/s/V;  $K_M$  – matavimo priemonės perdavimo koeficientas (matavimo priemonė šiuo atveju oscilografas);  $K$  – suderinimo koeficientas, 1/V.

Santykiniai įtakos koeficientai, randami pagal (56) formulę, visiems neapibrėžties komponentams yra vienodi ir lygūs vienetui. Įtakos koeficientai skaičiuoti (58) išraiškai. Talpinio keitiklio elektrodo poslinkių matavimo neapibrėžtis su interferometru pateikta 5 lentelėje. Suminė išplėstinė neapibrėžtis skaičiuota esant 95 % pasikliautinumo intervalui ir esant normaliam pasiskirstymo dėsnii. Suminis pasiskirstymo dėsnis parinktas remiantis centrine ribine teorema – normalus (Gauso).

**5 lentelė.** Interferometro matavimo neapibrėžties įvertinimas

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$K_{int}$	Interferometro kalibravimo neapibrėžtis	2 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	1,15 %
$K_M$	Oscilografo matavimo neapibrėžtis	0,25 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,15 %
$U_g$	Impulsų generatoriaus neapibrėžtis	2 % (vertinta esant dešimčiai matavimų)	Normalusis	A	1	0,63 %
Suminė neapibrėžtis $u_\Sigma = 1,32 \% \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsnii (koeficientas 2) $U = 2,65 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

Išmaniajam talpiniam keitikliui kalibruoti pirmiausia būtina įvertinti jo jautrumą. Keitiklio jautrumas įvertinamas pagal (59) išraišką. Jautrumui įvertinti reikalingi anksčiau su interferometru gauti talpinio keitiklio elektrodo virpėjimo matavimo rezultatai. Taip pat elektrodo virpėjimo įvertinimas talpinio keitikliu. Matavimo neapibrėžčių įvertinimas pateikiamas 6 lentelėje.

$$K_{talp} = \frac{d_{int}}{U_g' K_{st} K_M'}; \quad (59)$$

čia  $K_{st}$  – vidinio talpinio keitiklio stiprintuvo stiprinimo koeficientas.

**6 lentelė.** Talpinio keitiklio matavimo neapibrėžties įvertinimas

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$d_{int}$	Mechaninio poveikio matavimo neapibrėžtis, gauta su interferometru (anksčiau gauti matavimo duomenys)	2,65 %	Normalusis	B	2	1,32 %
$K'_M$	Oscilografo matavimo neapibrėžtis	0,25 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,15 %
$U'_g$	Generatoriaus neapibrėžtis (naudojamas pagamintas impulsų generatorius)	2 % (vertinta atlikus dešimt matavimų)	Normalusis	A	1	0,63 %
$K_{st}$	Vidinio talpinio keitiklio stiprinimo koeficiento neapibrėžtis	1 % (vertinta atlikus dešimt matavimų)	Normalusis	A	1	0,31 %
Suminė neapibrėžtis $u_\Sigma = 1,67 \% \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsniiui (koeficientas 2) $U = 3,34 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

**4.3. Mechaninio poveikio matavimo neapibrėžties įvertinimas**

AEK kalibruojamas veikiant kelių mikrosekundžių trukmės norimos formos mechaniniu poveikiu. Šis poveikis numatomas matuoti su išmaniuoju talpiniu keitikliu. Išmatuojamas mechaninis poveikis įvertinamas pagal (60) formulę. Įvertintos matavimo neapibrėžtys pateikiamos 7 lentelėje.

$$d = U''_g K_{talp} K''_M K. \quad (60)$$

**7 lentelė.** Su talpiniu keitikliu matuojamo mechaninio poveikio matavimo neapibrėžtis

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$K_{talp}$	Talpinio keitiklio jautrumo neapibrėžtis	3,34 %	Normalusis	B	2	1,67 %
$K''_M$	Oscilografo matavimo neapibrėžtis	0,25 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,15 %
$U''_g$	Generatoriaus neapibrėžtis ( <i>Handyscope</i> HS5)	0,4 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,23 %

generatorius)					
Suminė neapibrėžtis $u_{\Sigma} = 1,77 \% \%$					
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsniai (koeficientas 2) $U = 3,54 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %					

#### 4.4. AEK impulsinės charakteristikos neapibrėžties įvertinimas

Darbe siūlomos skirtingos kalibravimo sistemos, besiskiriančios naudojamo AEK kalibruoti bangolaidžio tipu. Kai AEK kalibruoti naudojami standai su strypo ir plokštės tipo bangolaidžiais, impulsinė keitiklio reakcija įvertinama pagal (61) išraišką. Neapibrėžčių įvertinimas pateikiamas 8 lentelėje.

$$U_k = U_g''' K_{talp} K_M''' K_P K; \quad (61)$$

čia  $K_P$  – akustinio kontakto tarp AEK ir bangolaidžio paviršiaus perdavimo koeficientas;  $U_k$  – gauta AEK impulsinė reakcija.

**8 lentelė.** AEK impulsinės reakcijos matavimo su išmaniuoju talpiniu keitikliu standams su plokštės bei strypo tipo bangolaidžiais neapibrėžčių įvertinimas

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$d$	Mechaninio poveikio matavimo neapibrėžtis	3,54 %	Normalusis	B	2	1,77 %
$K_M'''$	Oscilografo matavimo paklaida	0,25 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,15 %
$K_P$	Akustinio kontakto neapibrėžtis (seniau atliktų matavimų duomenys)	4 %	Normalusis	B	2	2 %
$U_g'''$	Generatoriaus neapibrėžtis (Handyscope HS5 generatorius)	0,4 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,23 %
Suminė neapibrėžtis $u_{\Sigma} = 2,68 \% \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsniai (koeficientas 2) $U = 5,37 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

Kai AEK impulsinė reakcija matuojama naudojant standus su gardelės tipo bangolaidžiais, gaunama AEK impulsinė reakcija, kai virtualusis greitis lygus nuliui, ji gali būti apibūdinama pagal (62) formulę:

$$U_k = U_g^{IV} K_{talp} K_M^{IV} K_P K_A K; \quad (62)$$

čia  $K_A$  – gardelės perdavimo koeficientas.

**9 lentelė.** AEK impulsinės reakcijos matavimo su išmaniuoju talpiniu keitikliu standui su gardelės tipo bangolaidžiu, kai virtualusis greitis lygus nuliui, neapibrėžčių įvertinimas

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$K_{tal}$	Mechaninio poveikio matavimo neapibrėžtis	3,54 %	Normalusis	B	2	1,77 %
$K_M^{IV}$	Oscilografo matavimo paklaida	0,25 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,15 %
$K_A$	Neapibrėžtis dėl atskirų kalibravimo zonų amplitudės sklaidos (seniau atliktų matavimų duomenys)	5 %	Normalusis	B	2	2,5 %
$K_P$	Akustinio kontakto neapibrėžtis (seniau atliktų matavimų duomenys)	4 %	Normalusis	B	2	2 %
$U_g^{IV}$	Generatoriaus neapibrėžtis ( <i>Handyscope</i> HS5 generatorius)	0,4 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,23 %
Suminė neapibrėžtis $u_\Sigma = 3,67$ %						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsniumi (koeficientas 2) $U = 7,34$ %, pasikliautinumo lygis 95 %						

Kai virtualusis greitis nelygus nuliui, AEK impulsinė reakcija gali būti apibūdinama pagal (63) formulę. Matavimo neapibrėžtys įvertintos ir pateiktos 10 lentelėje.

$$U_k = U_g^V K_{talp} K_M^V K_P K_{AG} K_A K; \quad (63)$$

čia  $K_{AG}$  – gardelės perdavimo koeficientas, kai virtualusis greitis nelygus nuliui.

**10 lentelė.** AEK impulsinės reakcijos matavimo su išmaniuoju talpiniu keitikliu standui su gardelės tipo bangolaidžiu, kai virtualusis greitis nelygus nuliui, neapibrėžčių įvertinimas

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$K_{talp}$	Mechaninio poveikio matavimo neapibrėžtis	3,54 %	Normalusis	A	2	1,77 %
$K_M^V$	Oscilografo matavimo paklaida	0,25 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0,15 %
$K_A$	Neapibrėžtis dėl atskirų kalibravimo zonų amplitudės	5 %	Normalusis	A	2	2,5 %

	sklaidos					
$K_{AG}$	Virtualiojo greičio vertinimo neapibrėžtis	2 %	Stačiakampis	A	$\sqrt{3}$	1.15 %
$K_P$	Akustinio kontakto neapibrėžtis (seniau atliktų matavimų duomenys)	4 %	Normalusis	B	2	2 %
$U_g^V$	Generatoriaus neapibrėžtis ( <i>Handyscope</i> HS5 generatorius)	0,4 %	Stačiakampis	B	$\sqrt{3}$	0.23 %
Suminė neapibrėžtis $u_{\Sigma} = 3,84 \% \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsniai (koeficientas 2) $U = 7,68 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

#### 4.5. AEK dažninės charakteristikos matavimo neapibrėžties įvertinimas

AEK dažninė charakteristika skaičiuojama pagal (51) formulę, o kalibruojama pagal 67 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą. AEK dažninės charakteristikos neapibrėžtys įvertinamos 11–13 lentelėse. Neapibrėžtims įvertinti būtini norimos formos mechaninio poveikio ir AEK impulsinės reakcijos matavimo duomenys.

**11 lentelė.** AEK dažninės charakteristikos neapibrėžtis, gauta naudojant išmanųjį talpinį keitiklį kalibravimo stendams su strypo ir plokštės tipo bangolaidžiais

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė $\pm$	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$S_t(j\omega)$	AEK impulsinės reakcijos matavimo neapibrėžtis	5,37 %	Normalusis	B	2	2,57 %
$Y(j\omega)$	Norimos formos poveikio matavimo neapibrėžtis	3,54 %	Normalusis	B	2	1,77 %
Suminė neapibrėžtis $u_{\Sigma} = 3,22 \% \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsniai (koeficientas 2) $U = 6,44 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

**12 lentelė.** AEK dažninės charakteristikos neapibrėžtis, gauta naudojant išmanųjį talpinį keitiklį kalibravimo stendams su gardelės tipo bangolaidžių struktūromis, kai virtualusis greitis lygus nuliui

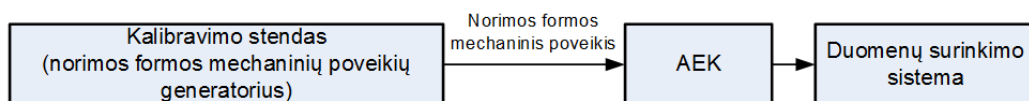
	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$S_t(j\omega)$	AEK impulsinės reakcijos matavimo neapibrėžtis	7,34 %	Normalusis	B	2	3,67 %
$Y(j\omega)$	Norimos formos poveikio matavimo neapibrėžtis	3,54 %	Normalusis	B	2	1,77 %
Suminė neapibrėžtis $u_\Sigma = 4,07 \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsnui (koeficientas 2) $U = 8,15 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

**13 lentelė.** AEK dažninės charakteristikos neapibrėžtis, gauta naudojant išmanųjį talpinį keitiklį kalibravimo stendams su gardelės tipo bangolaidžių struktūromis, kai virtualusis greitis nėra lygus nuliui

	Neapibrėžties šaltinis	Reikšmė ±	Skirstinys	Neapibrėžties tipas	Aprėpties koeficientas	Standartinė neapibrėžtis
$S_t(j\omega)$	AEK impulsinės reakcijos matavimo neapibrėžtis	7,68 %	Normalusis	B	2	3,84 %
$Y(j\omega)$	Norimos formos poveikio matavimo neapibrėžtis	3,54 %	Normalusis	B	2	1,77 %
Suminė neapibrėžtis $u_\Sigma = 4,23 \%$						
Išplėstinė neapibrėžtis esant normaliajam suminiam sklaidos dėsnui (koeficientas 2) $U = 8,47 \%$ , pasikliautinumo lygis 95 %						

#### 4.6. Kalibravimo stendo paruošimas darbui

Prieš atliekant matavimus būtina kalibravimo stendą paruošti darbui, kuris atliekamas pagal 68 pav. pavaizduotą struktūrinę schemą.



68 pav. Kalibravimo stendo paruošimo darbui struktūrinė schema

Stendas paruošiamas darbui palyginant etaloninio AEK charakteristikas su charakteristikomis, gautomis kalbruojant paskutinį šį keitiklį. Amplitudės matuojamos žadinant AEK norimos formos mechaniniu poveikiu.

Jeigu amplitudžių skirtumas neviršija pateikiamos matavimo neapibrėžties dydžio, stendas gali būti naudojamas AEK kalibruoti. Priešingu atveju būtina įvertinti priežastis, sukeliančias padidėjusias matavimo paklaidas, ir jas pašalinti. Toliau stendą naudoti galima po to, kai atliekamas pagal 4.1 poskyryje pateikiamą metodiką kartotinis stendo kalibravimas.

#### 4.7. Skyriaus išvados

1. Atlikta neapibrėžčių analizė parodė, kad mažiausia galima matavimų neapibrėžtis gaunama naudojant AEK kalibravimo standus su plokštės ir strypo tipo bangolaidžiais. AEK impulsinės reakcijos matavimo neapibrėžtis – 5,37 %, dažninės charakteristikos įvertinimo – 6,44 %. Ji gali būti mažinama naudojant geresnių parametrų signalų generavimo ir matavimo įrangą.
2. AEK kalibravimas, naudojant standus su gardelės tipo bangolaidžių konstrukcija, sudaro sąlygas matuoti AEK impulsinę reakciją, kai virtualusis greitis lygus nuliui, esant 7,34 % neapibrėžčiai, dažninę charakteristiką, esant 8,15 % matavimo neapibrėžčiai. Kai virtualusis greitis nelygus nuliui, impulsinė reakcija matuojama esant 7,68 %, o dažninė charakteristika – 8,47 % neapibrėžčiai. Neapibrėžtys gali būti mažinamos, tobulinant gardelės tipo stendo konstrukcijos akustinį kalibravimo zonų atskyrimą, virtualiojo greičio įvertinimą metodiką ir norimos formos poveikio generavimo bei matavimo įrangą.



## IŠVADOS

1. Darbe siūlomi du nauji norimos formos mechaninių poslinkių gavimo metodai, naudojant modifikuotą dekompozicijos ir ribinių koeficientų metodus. Pateikti matavimo rezultatai įrodo galimybę, taikant siūlomus metodus, dispersiniuose bangolaidžiuose gauti norimos formos mechaninius poslinkius. Šis kriterijus leido atlikti lyginamąją skirtingų norimos formos mechaninių poslinkių generavimo metodų analizę, kuri parodė siūlomų metodų privalumus, lyginant juos su esamais.
2. AEK kalibruoti darbe pasiūlytos konstrukcijos su strypo ir plokštės tipo bangolaidžiais, bangolaidžių gardelėmis, taip pat konstrukcija, kurioje naudojama gardelės tipo struktūra ir pluoštinis slopintuvas. Visos siūlomos konstrukcijos iki šiol nebuvo naudojamos AEK kalibruoti dėl ribotų galimybių jose gauti norimos formos mechaninius poslinkius. Siūlomų konstrukcijų pritaikymo galimybės AEK kalibruoti įrodytos darbe pateikiamais matavimų rezultatais.
3. AEK kalibruoti būtinos matavimo priemonės, leidžiančios išmatuoti norimos formos mechaninį poveikį absoliučiaisiais vienetais. Ištyrus interferometrines, optines ir talpines nanoposlinkių matavimo priemones nustatyta, kad geriausių išskirties slenkstį turi talpiniai matavimo keitikliai. Dėl talpinių keitiklių pozicionavimo atsikartojimo užtikrinimo, tokias matavimo priemones būtina kalibruoti. Šiai problemai spręsti pasiūlytas naujo tipo talpinis keitiklis galintis susikalibruoti. Jo naudojimo tikslingumas įrodytas darbe pateikiamais matavimo ir skaičiavimo rezultatais.
4. Atlikta matavimo neapibrėžčių analizė parodė, kad, naudojant siūlomas matavimo priemones, mažiausia AEK kalibravimo neapibrėžtis gaunama standuose su strypo ir plokštės tipo bangolaidžiais, impulsinė reakcija matuojama esant 5,37 %, dažninė charakteristika įvertinama esant 6,44 % neapibrėžtims.
5. AEK kalibravimas, naudojant standus su gardelės tipo bangolaidžių konstrukcija, leidžia matuoti AEK impulsinę reakciją, kai virtualusis greitis lygus nuliui esant 7,34 % neapibrėžčiai, dažninę charakteristiką – 8,15 % matavimo neapibrėžčiai. Kai virtualusis greitis nelygus nuliui, impulsinė reakcija matuojama esant 7,68 %, dažninė charakteristika – 8,47 % neapibrėžtims.
6. Didesnės AEK kalibravimo neapibrėžtys, naudojant standus su gardelės tipo konstrukcija, gali būti laikomos siūlomos konstrukcijos trūkumu. Tačiau jos gali būti mažinamos, tobulinant gardelės tipo stendo konstrukcijos akustinį kalibravimo zonų atskyrimą, virtualiojo greičio įvertinimą ir norimos formos poveikio generavimo bei matavimo įrangą.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. BUDENKOV G, KOROBENNIKOVA O. Application of the rod and torsional waves for testing the extended objects of oil extracting industry. *NDT for safety*, 31–38, 2007.
2. KWUN H. Guided wave inspection of nuclear fuel rods, *Developments in ultrasonic guided wave inspection*, p. 1–6, 2009.
3. BAHR B. Automated inspection for aging aircraft, in: *International Workshop on Inspection and Evaluation of Aging Aircraft*, 18–21. Carnegie Mellon University Pittsburgh, 1992.
4. LUTHI B. Physical acoustics in the solids state. Springer series in solid state sciences, p. 47–367. Springer, 2004.
5. SHUNG K. K., CANNATA J. M., ZHOU Q. F. Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: review. *Journal of Electroceram*, 140–145, 2007.
6. RAIŠUTIS R., KAŽYS R., MAŽEIKA L., ŽUKAUSKAS E., SAMAITIS V., JANKAUSKAS A. Ultrasonic guided wave-based testing technique for inspection of multi-wire rope structures. *Journal of NDT&E International* 62, 40–49. 2014.
7. CAGATAY S., KOC B. A 1.6-mm, Metal tube ultrasonic motor. *Journal of transactions of ultrasonics, ferroelectrics and frequency control* 50, 782–786. 2003.
8. MORITA T., KUROSAWA M. K. A cylindrical micro - ultrasonic motor (stator transducer size: 1.4mm in diameter and 5.0mm long). *Journal of ultrasonics* 38, 33–36. 2000.
9. JORDAN T. L., OUNAIES Z. *Piezoelectric Ceramics Characterization*, NASA Langley Research Center, NASA/CR-2001-211225, 1–22, 2001.
10. Effects of High Static stress on the Piezoelectric properties of transducer materials, *Technical Publications TP-220*, 1–6. Morgan Electro Ceramics.
11. *Standard method for primary calibration of acoustic emission sensors*, ASTM international, designation E1106 - 86.
12. *Standard practice for secondary calibration of acoustic emission sensor*, ASTM international, designation E1781 - 98.
13. *Standard Guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response*, ASTM international, designation E 976 - 00.
14. MONNIER, T., DIA S., GODIN N., ZHANG, F. Primary calibration of acoustic emission sensors by the method of reciprocity, theory and experimental considerations. *Journal of Acoustic Emission* 30, 152–166, 2012.
15. GOUJON L., BABOUX J. C. Behaviour of acoustic emission sensors using broadband calibration techniques. *Journal of Measurement Science and Technology*, 14, 903–908, 2003.
16. ONO K., CHO H., MATSIJA T. Bar and plate wave characterization of AE sensors, *European Working Group of Acoustic Emission*, 1–7, 2010.
17. KEPTR. J, BENES. P A comparison of AE sensor calibration methods. *Journal of Acoustic Emission*, 30, 60–71. 2008.

18. BENEŠ P., FIALKA J. Comparison of methods for absolute calibration of broadband AE sensors, in *30<sup>th</sup> European conference of acoustic emission testing & 7<sup>th</sup> international conference of acoustic emission of Granada*, 1–9, 12–15 September, 2012.
19. LAN H., YAN L., XIAO D., JIAO Z., CHEN I. Surface to surface calibration of acoustic emission sensors. *Journal Sensors and Actuators A: Physical*, 174, 16–23, 2012.
20. LESCHEK W. C. *Acoustic emission transducer calibration*. United states patent No. 4064735, 1977.
21. DUŠEK F., SEIDL C., SIEDLACEK J., PILECKI S. The acoustic emission transducer calibration using spark method. *Journal Archives of Acoustics*, 15, 1–15, 1990.
22. AUGUTIS V., GAILIUS D. A test method for evaluation of heat insulation layer of heat supply pipes. *Journal of The British Institute of Non destructive Testing*, 43(6), 389–394, . 2001.
23. GORMAN M. R., ZIOLA S. M. Plate waves produced by transverse matrix tracking. *Journal of Ultrasonics*, 29, 251, 1991.
24. GORMAN M. R. Plate Wave Acoustic Emission. *Journal of Acoustic. Society of America*, 90, 358–364, 1991.
25. DUNEGAN H. L. An alternative to pencil lead breaks for simulation of acoustic emission signal sources, *The Deci report*, 1–5. Dunegan engineering company, 2000.
26. BURKS B. Re-examination of nist acoustic emission sensor calibration: Part I – modeling the loading from glass capillary fracture. *Journal of Acoustic Emission*, 29, 167–174, 2011.
27. CHO S., LEE J. K. PZT transducer response to an epicentral acoustic emission signal during glass capillary breakage. *Journal of Korean Physical Society*, 53(6), 3313–3219, 2008.
28. COBO P., RANZ C., FERNANDEZ A., CUESTA M., ANTHONY D. K., SIGUERO M. Waveform shaping of sonar transducers for improving the vertical resolution in sub-bottom sediments profiling. *Marine Geophysical Research*, 26, 87–95, 2005.
29. SWINCER P., NGUYEN B., WOOD S. Method for the generation of broadband acoustic signals, *Proceedings of Acoustics 2012 - Fremantle*, 21–23, 1–8, Australian acoustic society, 2012.
30. DORN O. Time Reversal and the adjoint imaging method with application in telecommunication, Publisher Modeling and numerical simulation group, University Carlos III de madrid.
31. KAHLON N. H., KAUR G. Various dispersion compensation techniques for optical systems: A survey. *Open Journal of Communications and Software*, 1(1), 64–73, 2014.
32. KUMAR S. Compensation of third order dispersion using time reversal in optical transmission systems. *Journal Optics Letters*, 32(4), 346–348, 2007.
33. MATHIAS F. Time Reversal of Ultrasonics Fields – Part I: Basic Principles. *Journal Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 39(5), 555–566, 1992.
34. GANGADHARAN R., MURTHY C. R. L., GOPALAKRISHNAN S., BHAT M. R. Time reversal technique for health monitoring of metallic structure using Lamb waves. *Journal of ultrasonics*, 49, 703–705, 2009.

35. YAMASAKI T., TAMAI S., HIRAO M. Optimum excitation signal for long-range inspection of steel wires by longitudinal waves. *Journal of NDT&E International*, 34, 207–212, 2001.
36. BAHRAMI S., CHELDAVI A., ABDOLALI A. Moving target tracking using time reversal method. *Journal of Progress In Electromagnetic Research M*, 25, 39–52, 2012.
37. KUPERMAN W. A., HODKISS W. S., AKAI T., KIM S., EDELMANN G., SONG H. C. (2000). *Time-reversal acoustics*. Marine physical laboratory/SIO and SACLANTCEN undersea center, 1–6, Acoustics.
38. FINK M., PRADA C. Acoustic time-reversal mirrors, *Institute of physics publishing, Topical review*, 1–38, 2000.
39. ERNST R., DUAL J. Acoustic emission localization in beams based on time reversed dispersion. *Journal of Ultrasonics*, 54, 1522–1533, 2014.
40. PARK H. W., KIM S. B., SOHN H. Understanding a time reversal process in Lamb wave propagation. *Journal of Wave Motion*, 46, 451–467, 2009.
41. GRIFFA M., ANDERSON B. E., GUYER R. A., ULRICH T. J., JOHNSON P. A. Investigation of robustness of time reversal acoustics in solid media through the reconstruction of temporally symmetric sources. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41, 1–15, 2008.
42. WATKINS R., JHA R. A modified time reversal method for Lamb wave based diagnostics of composite structures. *Journal of Mechanical System and Signal Processing*, 31, 345–354, 2012.
43. ZENG L., LIN J. Chirp based dispersion precompensation for high resolution Lamb wave inspection. *Journal of NDT&E International*, 61, 35–44, 2014.
44. AUGUTIS V., VARANAUSKAS M. Synthesis of acoustic impulses in a solid waveguide. *Ultragarsas*, 1(38), 29–34, 2001.
45. BENATAR A., RITTEL D., YARIN A. L. Theoretical and experimental analysis of longitudinal wave propagation in cylindrical viscoelastic rods, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51, 1413–1431, 2003.
46. GRAFF K. F, *Wave motion in elastic solids*. Dover publications, 1975.
47. SHATALOV M., MARAIS J., FEDOTOV I., TENKAM M. D. Longitudinal Vibration of Isotropic Solid Rods: From Classical to Modern Theories, in: Matthias Schmidt (Ed.), *Advances in Computer Science and Engineering*, 187–214, 2011.
48. HAYASHI T., SONG W. J., ROSE J. L. Guided wave dispersion curves for a bar with arbitrary cross-section, a rod and rail example. *Journal of Ultrasonics*, 41, 175–183, 2011.
49. ROSE J. L. Dispersion curves in guided waves testing. *Materials evaluation*, 20–23, 2003.
50. ROSE J. L. *Ultrasonics waves in solid media*. Cambridge university press, 2004.
51. EDALATI K., GERMANI A., NADARETI B., PANAH B. Defects evaluation in Lamb wave testing of thin plates. *3rd MENDT - middle east nondestructive testing conference and exhibition*, Nov. 27–30, 2005.

52. PROCTOR T. M., Jr. Some details on the NBS conical transducer. *Journal of Acoustic Emissions*, 1(3), 173–178, 1982.
53. HARIHARAN P. *Optical interferometry*. 2nd edition. Elsevier 3, 2003.
54. *Vibrometer controller OFV-5000* Publisher Polytech, 7.1–7.11, 2002.
55. TOMINAGA J., NAKANO T. *Optical near field recording. Science and technology*. Springer, 2006.
56. HWU En-Te, HUANG K. Y., HUNG S. K., HWANG I. S. Measurement of cantilever displacement using compact disk. *Japanece Journal of Applied Physics*, 45(3B), 2368–2371, 2006.
57. BAXTER L. K. *Capacitive Sensors: Design and Applications*. Wiley IEEE press, 1997.
58. ZARNIK M. S., BELAVIC D. An experimental and numerical study of humidity effect on stability of capacitive ceramic pressure sensor. *Journal of Radio Engineering*, 21(1), 201–206, 2012.
59. TAYLOR J. R. *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. 2nd edition. Publisher University science books Sausalito, 1997.
60. FRENKEL R. B. *An introduction to uncertainty measurement*. Publisher Cambridge university press, 2010.
61. ŽILINSKAS R. P. *Matavimų rezultatų neapibrėžties įvertinimas*. Kaunas: Kauno technologijos universiteto leidykla, 2003.

# **MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS**

## **STRAIPSNIAI**

### **Tarptautinių duomenų bazių mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai**

#### **Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėse „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą**

1. Juška, Vladas; Vaštakas, Edgaras; Ibenskis, Edvardas. Laser beam optical focusing method for measurement of angular sensor glass scale quality parameters // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2012, Vol. 14, no. 1, p. 157–164.
2. Vygantas, Augutis; Darius Gailius; Edgaras Vaštakas; Pranas Kuzas. Evaluation of arbitrary waveform acoustic signal generation techniques in dispersive waveguides // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Vibromechanika. ISSN 1392-8716. 2015, Vol. 17, no. 7, p. 4047–4056.

#### **Kitų tarptautių bazių leidiniuose**

1. Vaštakas, Edgaras; Gailius, Darius; Augutis, Stasys Vygantas. Acoustic wave synthesis in dispersive media // Vibroengineering procedia: international conference Vibroengineering - 2014, Katowice, Poland, 13–15 October, 2014. Kaunas: JVE International. ISSN 2345-0533. 2014, vol. 3, p. 124–127.

#### **Tyrimų rezultatai, paskelbti mokslinėse konferencijose**

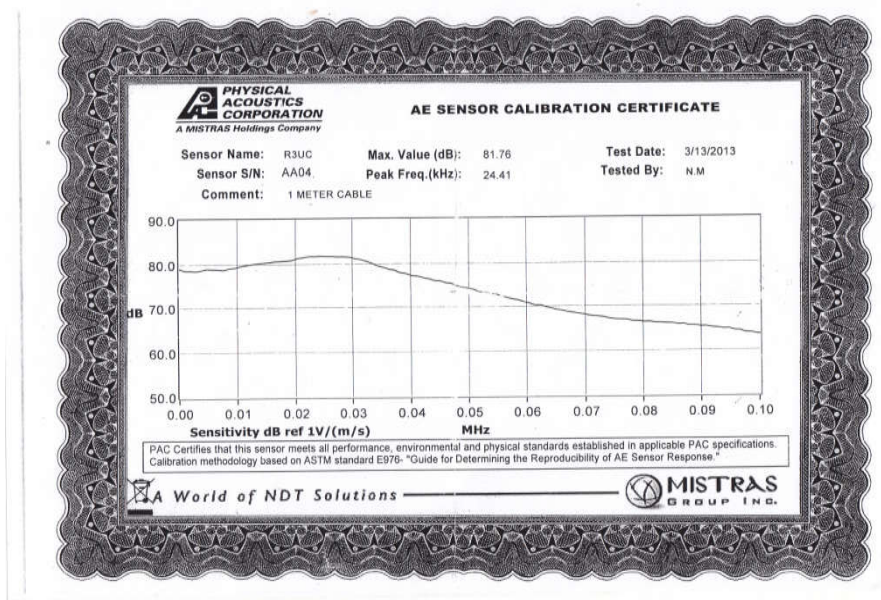
1. Darius, Gailius; Vygantas, Augutis; Edgaras, Vaštakas. Synthesis of arbitrary form nano displacements // Vibroengineering procedia: international conference Vibroengineering - 2012, Kaunas, Lithuania, 11–12 October, 2012.
2. Vaštakas, Edgaras; Gailius, Darius; Vygantas, Augutis. Acoustic wave synthesis in dispersive media // Vibroengineering procedia: international conference Vibroengineering - 2014, Katowice, Poland, 13–15 October, 2014.
3. Vygantas Augutis; Boris. Muravin; Edgaras. Vaštakas. Application of waveguides for the claibration of acoustic emission transducers // European conference of acoustic emission testing (EWGAE), Prague, Czech Republic , 7-9 September, 2016.

## PRIEDAI

### 1 priedas. AEK charakteristikų pavyzdžiai



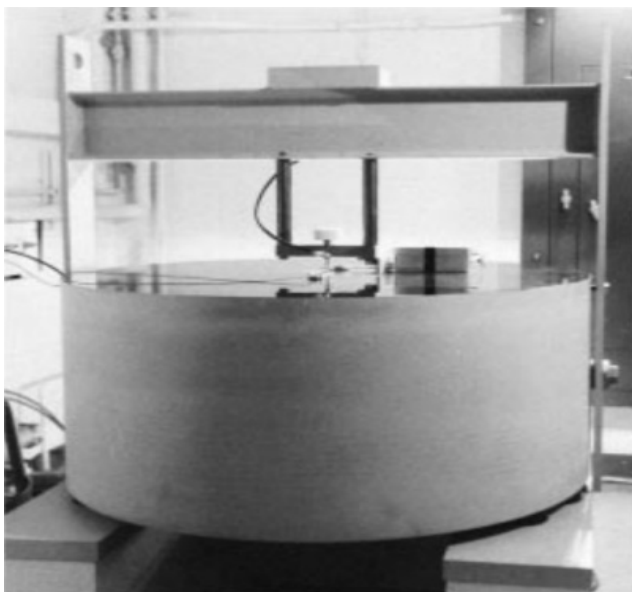
a)



b)

1pav. „Physical Acoustics Corporation“ akustinio keitiklio nuotrauka; b) gamintojo pateikiamas dokumentas

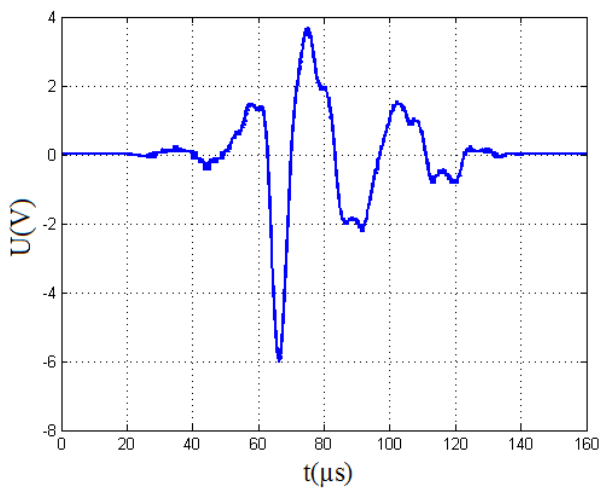
## 2 priedas. Kalibravimo standas



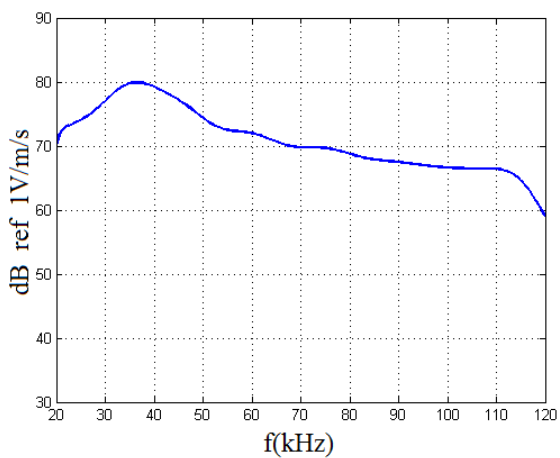
**2pav.** Kalibravimo standas, pagamintas pagal standartą E1106-86



### 3 priedas. Keitiklio R3CU kalibravimo rezultatai, gauti su pagaminta įranga



a)



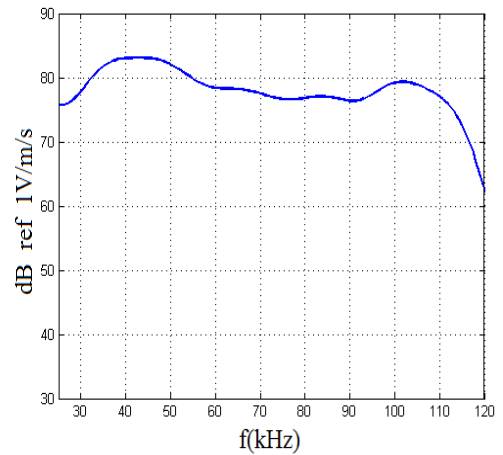
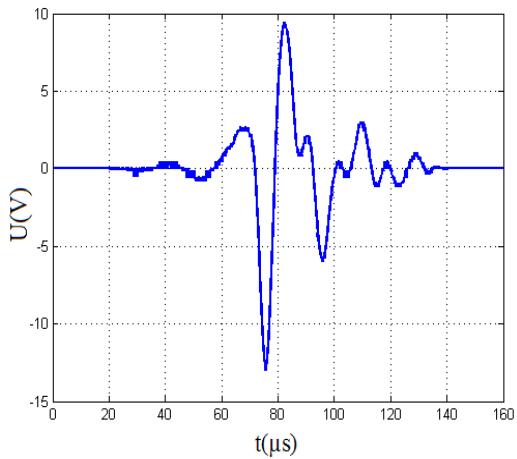
b)

**3pav. a)** „Physical acoustics corporation“ AEK R3CU išmatuota impulsinė reakcija; **b)** apskaičiuota keitiklio R3CU dažninė charakteristika

#### 4 priedas. Pagamintas AEK ir išmatuotos jo charakteristikos



a)



b)

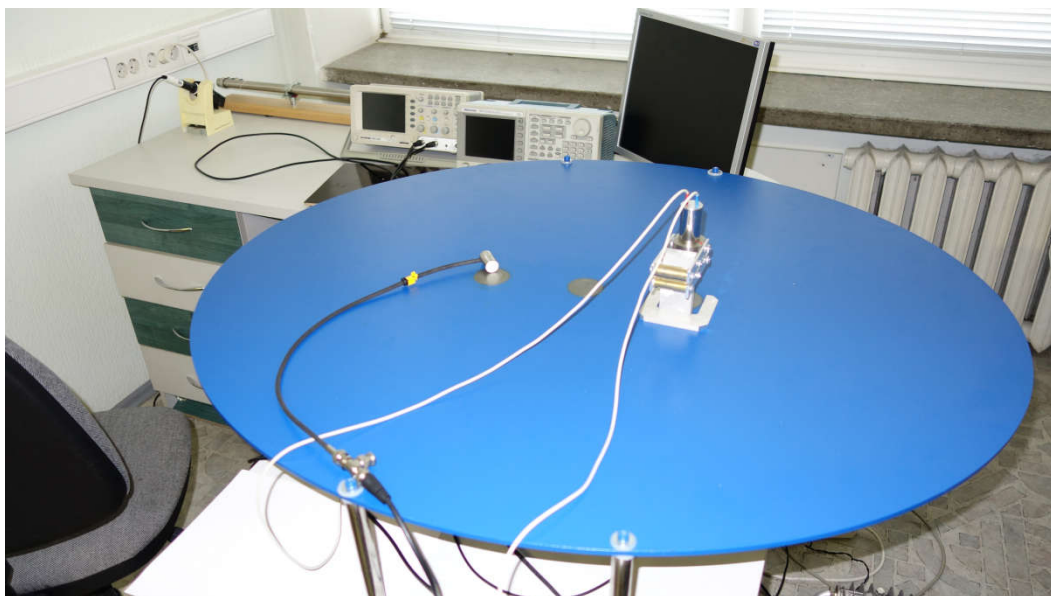
c)

**4pav.** a) Pagamintas žemųjų dažnių pjezokeraminis AEK; b) išmatuota impulsinė reakcija; c) apskaičiuota keitiklio dažninė charakteristika

## 5 priedas. Pagaminti kalibravimo standai



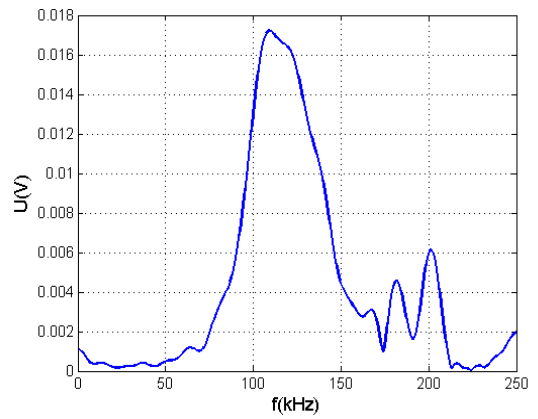
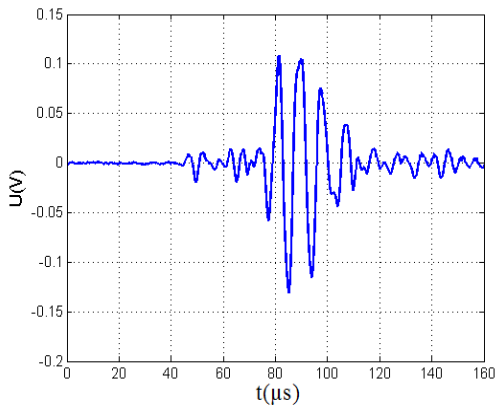
a)



b)

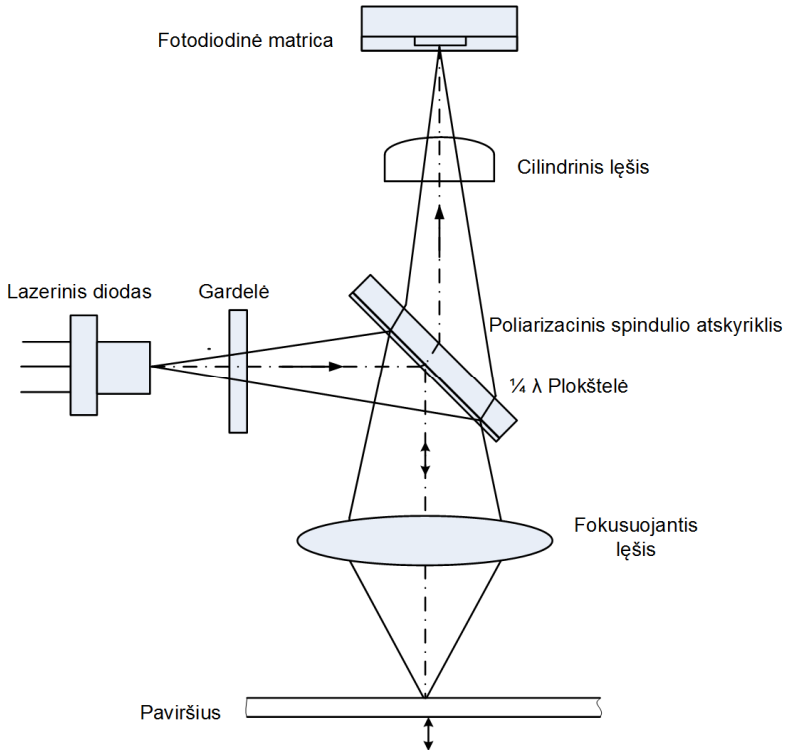
**Spav.** Pagamintų AEK kalibravimo standų nuotraukos a) standai su strypo tipo bangolaidžiais skirti kalibruoti AEK išilgine banga, b) kalibravimo standas su plokštės tipo bangolaidžiu

## 6 priedas. Išmatuota AEK impulsinė reakcija



**6 pav.** AEK charakteristikos: a) impulsinė reakcija, gauta ant strypo tipo bangolaidžio; b) apskaičiuotas impulsinės reakcijos spektras

## 7 priedas. Optinio fokusavimo keitiklio struktūra



7pav. Optinio fokusavimo keitiklio struktūrinė schema

Veikimo principas: lazerio spindulys patenka į spindulio daliklį, nuo kurio dalis spindulio atsispindi ir per lęšį fokusuojama į matuojamą paviršių. Nuo paviršiaus atsispindėjęs spindulys per cilindrinį lęšį patenka į fotoimtuvą. Fotoimtuvą sudaro keturi sektoriai, kuriuose priklausomai nuo atsispindėjusio spindulio fokusavimo, naudojant cilindrinį lęšį, formuojama atitinkama atsispindėjusio spindulio apertūra. Matavimai atliekami naudojant skirtuminį fotoimtuvinės matricos signalą.

SL344. 2016-08-19, 12,75 leidyb. apsk. 1. Tiražas 12 egz. Užsakymas 296.  
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas