

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

VYKINTAS SAMAITIS

**ULTRAGARSINIAI KOMPOZITINIŲ OBJEKTŲ
STEBĖSENOS METODAI**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2016, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2016 metais Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Liudas MAŽEIKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T)

Elektros ir elektronikos inžinerijos (01T) mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

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

Prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T, informatikos inžinerija – 07T);

Doc. dr. Alberto RODRIGUEZ MARTINEZ (Miguel Hernandez de Elche universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

Doc. dr. Reimondas ŠLITERIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

Prof. dr. Algimantas VALINEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Lietuvių kalbos redaktorė:

Inga Nanartonytė

Leidykla „Technologija“

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties (01T) disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2016 m. rugsėjo 30 d. 11 val. Kauno technologijos universiteto Disertacijų gynimo salėje.

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

Tel. +370 37 300 042, el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2016 m. rugpjūčio 30 d.

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

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VYKINTAS SAMAITIS

**ULTRASONIC METHODS FOR STRUCTURAL HEALTH
MONITORING OF COMPOSITE OBJECTS**

Summary of doctoral dissertation
Technological sciences, Electrical and Electronics engineering (01T)

2016, Kaunas

This research was accomplished during the period of 2012–2016 at Prof. Kazimieras Baršauskas Ultrasound Research Institute of Kaunas University of Technology. The research was granted by the Research Council of Lithuania.

Scientific supervisor:

Prof. Dr. Liudas MAŽEIKA (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronics Engineering – 01T)

Dissertation defence board of Electrical and Electronics Engineering science field:

Prof. Habil. Dr. Arūnas LUKOŠEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronics Engineering – 01T) – **chairman;**

Prof. Habil. Dr. Genadijus KULVIETIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T, Informatics Engineering – 07T);

Assoc. Prof. Dr. Alberto RODRIGUEZ MARTINEZ (Miguel Hernandez University of Elche, Technological Sciences, Electrical and Electronics Engineering – 01T);

Assoc. Prof. Dr. Reimondas ŠLITERIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronics Engineering – 01T);

Prof. Dr. Algimantas VALINEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronics Engineering – 01T).

Language editor:

Inga Nanartonytė

The official defence of the dissertation will be held at 11 a.m. on 30th of September, 2016 at the public meeting of Dissertation defence board of Electrical and Electronics Engineering science field (01T) in Dissertation Defence Hall at Kaunas University of Technology.

Address: K. Donelaičio St. 73-403, LT44249 Kaunas, Lithuania.

Tel. no. (+370) 37 300 042, e-mail doktorantura@ktu.lt.

Summary of doctoral dissertation was sent on 30th of August, 2016.

The doctoral dissertation is available on the internet <http://ktu.edu> and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio St. 20, LT44239 Kaunas, Lithuania).

ĮVADAS

Nagrinėjamos problemos aktualumas

Inžinerinių objektų struktūros vientisumo įvertinimas yra vienas iš svarbiausių uždavinių siekiant užtikrinti saugią, patikimą ir optimalią jų eksploataciją. Įvairių neardomųjų bandymų metodų taikymas atominės ir atsinaujinančių šaltinių energetikos, aviacijos, civilinės inžinerijos srityse leidžia įvertinti šių objektų tinkamumą naudoti, sumažinti katastrofų tikimybę, prognozuoti ir pailginti patikimo naudojimo trukmę. Deja, tradiciniai neardomųjų bandymų metodai negali būti taikomi objektų eksploatacijos metu, dažnai reikalauja visiško arba dalinio išardymo, yra subjektyvūs, brangūs ir lėti, ypač tiriant didelius objektus. Pavyzdžiui, įvairiais tyrimais nustatyta, jog apie 27 % visų orlaivio eksploatacijos sąnaudų sudaro neardomųjų bandymų ir su jų atlikimu susijusios išlaidos [1]. Dėl šių priežasčių kuriamos įvairios struktūros vientisumo stebėsenos sistemos (angl. *Structural Health Monitoring Systems*), kurios užtikrina nuolatinę arba periodinę kontrolę integruotu jutiklių tinklu nestabdant objekto eksploatacijos. Tokių sistemų įdiegimas leidžia organizuoti inžinerinio objekto priežiūros darbus pagal jo tikrąją būklę, taip sumažinant minėtųjų darbų skaičių, trukmę ir su tuo susijusias išlaidas. Be to, sumažinama operatoriaus įtaka, dažnai išvengiama ardymo. Kaip teigiama įvairiuose literatūros šaltiniuose, efektyvi struktūros vientisumo stebėsenos sistema leidžia sumažinti priežiūros išlaidas ir tam sugaištą laiką nuo 30 % iki 40 % [2].

Viena perspektyviausių ir daugiausia galimybių teikiančių technologijų, tinkamų įvairių objektų stebėsenai atlikti, yra pagrįsta ultragarsinių nukreiptųjų bangų panaudojimu. Ultragarstinės nukreiptosios bangos yra jautrios medžiagos elastinių savybių pokyčiams ir pasižymi santykinai mažu slopimu. Tai leidžia tirti didelius objektus ir aptikti tiek paviršinius, tiek struktūrinius defektus. Nukreiptųjų bangų panaudojimas stebėsenos sistemose užtikrina pakankamą paviršiaus aprėptį, greitą ir pigią struktūros vientisumo kontrolę. Dėl šių priežasčių, naudojant vos kelis matavimo taškus, galima tirti objektus jų eksploatacijos metu, taip pat esančius vor vandeniui, įkastus į grindinį arba padengtus įvairiomis dangomis. Literatūroje aprašoma nemažai mokslinių tyrimų, atliktų taikant ultragarstines nukreiptąsias bangas defektams aptikti vamzdžiuose [3, 4], betoninėse struktūrose [5, 6], plieniniuose trosuose [7, 8]. Šios bangos taip pat naudotos geležinkelio bėgių [9], slėgio indų [10], metalinių [11], kompozitinių [12, 13] ir įvairių aviacijos komponentų [14] tyrimams.

Toks platus ultragarsinių nukreiptųjų bangų taikymas įvairiose srityse rodo didelį jų potencialą ir galimybes. Deja, dauguma šių tyrimų vis dar atliekami tik laboratorinėmis sąlygomis, nes praktinį jų taikymą riboja sudėtingi nukreiptųjų bangų sklidimo dėsningumai ir komplikuota tyrimų metu užregistruotų signalų analizė. Ultragarstinės nukreiptosios bangos pasižymi daugiamodiškumu, fazinio ir grupinio greičio priklausomybe nuo sklidimo krypties ir dažnio. Be to,

nukreiptosioms bangoms atsispindint nuo objekto kraštų arba nuo nevienalyčių struktūros dalių atsiranda modų virsmas, kai dalis vienos modos energijos virsta kitos modos energija, ir atvirkščiai. Dėl šios priežasties priimti signalai būna iškraipyti dėl dispersijos ir tarpusavyje interferavę dėl daugkartinių atspindžių, daugiamodiškumo ir modų virsmo. Todėl reikia sudėtingų signalų apdorojimo metodų, kurie leistų ne tik geriau suprasti, interpretuoti ir prognozuoti tokių bangų sklidimo struktūroje dėsningumus, bet ir sudėtinguose signaluose atskirti defektų sukeltus atspindžius nuo reiškinių, nulemtų objekto geometrijos arba aplinkos.

Dauguma dabartinių stebėsenos sistemų leidžia aptikti defektus lyginant dvi to paties objekto būsenas – esamą ir pamatinę. Dažniausiai, objekte integravus keitiklių tinklą, tarp visų egzistuojančių keitiklių porų užregistruojami signalai, kurie vėliau laikomi pamatiniais. Tada objekto eksploatacijos metu įrašyti signalai, atspindintys esamą objekto būseną, lyginami su pamatiniais, o bet koks užregistruotas pokytis suprantamas kaip galimo defekto atsiradimo požymis. Deja, šis principas, nors ir labai paprastas, nėra patikimas, nes jis gali būti taikomas tik defekto atsiradimo faktui nustatyti, tačiau netinka defekto vietai ar jo parametrams įvertinti. Taikant tokį principą ir norint įsitikinti, kad aptiktas tam tikro tipo ir dydžio defektas, reikia visą įtariamų sukėlusią sritį iš naujo tirti taikant tradicinius neardomųjų bandymų metodus arba turėti daugybę atraminių bandinių, kurie atspindėtų skirtingo dydžio ir skirtingų tipų defektų įtaką bandinyje užregistruotiems signalams. Akivaizdu, kad tokia atraminių bandinių duomenų bazė turėtų būti labai didelė, todėl šis metodas yra nepraktiškas ir neveiksmingas, ypač tiriant sudėtingus objektus. Be to, signalai, atsispindėję nuo defektų, paprastai yra mažos amplitudės, todėl juos tampa dar sunkiau aptikti veikiant įvairiems aplinkos veiksniams, pvz., temperatūrai ar dinaminėms apkrovoms. Taigi tradicinis dviejų objekto būsenų palyginimo metodas negali būti patikimai taikomas defektams aptikti ir juo labiau jų parametrams nustatyti.

Minėti nukreiptųjų bangų sklidimo dėsningumai ir šiuo metu dažniausiai taikomų defektų aptikimo metodų trūkumai leidžia suformuluoti **mokslinę technologinę hipotezę**: gali būti sukurti ultragarsiniai nukreiptųjų bangų stebėsenos metodai, kurie leistų suprasti bei tinkamai interpretuoti nukreiptųjų bangų sąveiką su tiriamą struktūra ir analizuojamuose signaluose išskirti pokyčius, nulemtus atsiradusių defektų ir jų parametrų.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Daktaro **disertacijos tikslas** – sukurti ir ištirti ultragarsinius nukreiptųjų bangų stebėsenos metodus, kurie leistų aptikti, apibūdinti lakštinėse kompozitinėse struktūrose atsiradusius defektus ir patvirtinti jų atsiradimą.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti **uždaviniai**:

1. Ištirti, paaiškinti nukreiptųjų bangų žadinimo mechanizmą ir sukurti matematinis metodus, leidžiančius analizuoti ir prognozuoti atskirų modų spektrines charakteristikas iškart po jų sužadinimo.

2. Sukurti ir patikrinti analitinį modelį, kuris palengvintų sudėtingą nukreiptųjų bangų signalų analizę ir interpretavimą lakštinėse anizotropinėse struktūrose.
3. Sukurti ir įvertinti metodus, tinkamus nukreiptųjų bangų faziniam greičiui matuoti ir modoms atpažinti daugiamodžiuose, dispergavusiuose signaluose, užregistruotuose integruotu keitiklių tinklu.
4. Pasiūlyti ir iširti metodus, skirtus aptikti atsisluoksniavimo tipo defektams kompozitinėse struktūrose, nustatyti jų dydžiui ir gyliui.
5. Sukurti stebėsenos sistemų patikrinimo ir kalibravimo metodus, leidžiančius įvertinti įdiegtos stebėsenos sistemos tinkamumą naudoti ir jautrį defektams nesuardant tiriamo objekto struktūros.

Mokslinis naujumas

1. Pasiūlytas naujas, Furjė analize pagrįstas matematinis metodas, leidžiantis analizuoti nukreiptųjų bangų žadinimą ir prognozuoti atskirų modų spektrines charakteristikas esant įvairioms žadinimo sąlygoms. Pasiūlytas metodas susieja sužadintos nukreiptųjų bangų modos dažnių spektrą su erdviu virpamojo greičio pasiskirstymu žadinimo srityje, keitiklio matmenimis ir objekto dispersinėmis charakteristikomis.
2. Sukurtas realiojo laiko matematinis-analitinis modelis, palengvinantis nukreiptųjų bangų signalų analizę ir interpretavimą. Modelis leidžia analizuoti atskirų modų sklidimą stačiakampiuose objektuose, prognozuoti modų atsklidimo į imtuvą laiko momentus, įvertinant daugkartinius atspindžius, ir atkurti modų sklidimo trajektorijas pasirinktais laiko intervalais.
3. Pasiūlytas nukreiptųjų bangų fazinio greičio įvertinimo metodas, pagrįstas dviejų signalų fazių spektro santykiu. Metodas leidžia atkurti modos dispersinės kreivės segmentą plačiame dažnių diapazone, kuris sutampa su keitiklio juosta -20 dB lygyje, naudojant tik du signalus. Pasiūlytas metodas gali būti taikomas modų greičiui tiksliai įvertinti ir nežinomoms ar modoms po virsmo atpažinti naudojant integruotą keitiklių tinklą.
4. Sukurtas atsisluoksniavimo defektų aptikimo, jų gylio ir dydžio nustatymo algoritmas, paremtas eksperimentinių signalų palyginimu su analitiškai apskaičiuotomis priklausomybėmis esant skirtingiems defektų parametrams. Metodas pagrįstas nukreiptųjų bangų žadinimu skirtingais dažniais, taip pat sklidimo laiko ir signalo amplitudės kitimo analize, kuri susieja vėlinimo laiką su defekto pločiu, o amplitudę – su defekto gyliu.
5. Pasiūlytas būdas imituoti atsisluoksniavimo defektą nesuardant tiriamo objekto struktūros. Metodas leidžia imituoti daugkartinius pakartotinius bangos atspindžius defekto viduje ant tiriamo objekto paviršiaus uždėjus specialiu parametru kalibravimo bloką. Taikant pasiūlytą metodiką galima

atkurti kartotinių atspindžių sklidimo laiką ir signalų amplitudes defekto viduje.

Praktinė tyrimo reikšmė

1. Pasiūlyta grupė signalų analizės metodų, kurie gali būti atskirai arba kartu taikomi nukreiptųjų bangų žadinimo, sklidimo analizei ir modų dekompozicijai lakštinėse anizotropinėse konstrukcijose. Pasiūlyti metodai supaprastina nukreiptųjų bangų pritaikymą stebėsenos sistemoms ir kartu leidžia tiksliau įvertinti defektų parametrus.
2. Sukurti ultragarsiniai metodai, kurie gali būti taikomi atsisluoksniavimo defektams aptikti, jų gyliui ir pločiui nustatyti. Tai leidžia tiksliau prognozuoti objekto patikimo naudojimo laiką, įvertinti defekto keliamą pavojų ir tikslingiau planuoti periodinius priežiūros darbus.
3. Pasiūlytas metodas stebėsenos sistemoms patikrinti ir kalibruoti, kuris gali būti taikomas tokių sistemų tinkamumui eksploatacijai testuoti realiosiomis sąlygomis, taip pat jų jautrumui įvairaus dydžio, vietos ir gylio defektams įvertinti.
4. Dauguma tyrimų metu sukurtų metodų nėra skirti tik kuriai nors vienai struktūrai, todėl gali būti lengvai pritaikomi naujiems objektams keičiant dispersines charakteristikas ir kitus įėjimo parametrus. Tik keli iš pasiūlytų metodų yra pritaikyti apibrėžtos geometrijos objektams, kiti šiuo atžvilgiu yra universalūs.

Disertacijoje pateikiami tyrimų rezultatai panaudoti moksliniams uždaviniams spręsti šiuose tarptautiniuose projektuose:

- Europos Sąjungos 7-osios bendrosios programos (BP7) projektas (Nr. SME-2012-1-315207) „In-situ Wireless Monitoring of on an Offshore Wind Turbine Blades Using Energy Harvesting Technology – Demonstration / Wintur Demo“.
- Europos Sąjungos 7-osios bendrosios programos (BP7) projektas (Nr. SME-2011-1-286989) „Demonstration of a Condition Monitoring System for Tidal Stream Generators / TidalSense Demo“.
- Europos socialinio fondo (ESF) programos projektas (Nr. VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-015) „Microsensors, Microprocessors and Microcontrollers for Mechatronic Systems / Go-Smart“.

Rezultatų apibavimas

Doktorantūros studijų metu gauti mokslinių tyrimų rezultatai paskelbti 7 publikacijose: 4 iš jų – leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (*ISI Web of Science*) referuojamų leidinių sąrašą, turinčiuose citavimo indeksą, kitos 3 publikacijos – recenzuojamų tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje. Perskaityta 15 pranešimų tarptautinėse mokslinėse konferencijose,

kurios vyko: Kaune, Vilniuje, Palangoje, Singapūre, Portorože, Prahoje, Krokuvoje, Liubline, Mančesteryje, Dresdene, Briuselyje ir Miunchene. 2014–2016 metais mokslinius tyrimus disertacijos tema rėmė Lietuvos mokslo taryba, skirdama doktoranto stipendiją. 2016 metais moksliniai pasiekimai įvertinti tarptautine Amerikos akustikų asociacijos stipendija.

Ginti pateikiami rezultatai

1. Metodas, skirtas nukreiptųjų bangų spektrinėms charakteristikoms prognozuoti įvertinant žadinančiojo keitiklio veikimo principą, dydį ir aplinkos dispersines savybes.
2. Analitinis modelis, skirtas nukreiptųjų bangų sklidimo laiko ir trajektorijų analizei įvertinant daugkartinius atspindžius struktūroje.
3. Fazių spektro analize pagrįstas nukreiptųjų bangų modų fazinio greičio įvertinimo metodas, kuris pagerina tradicinio fazinio metodo tikslumą ir gali būti taikomas stebėsenos sistemose su integruotu keitiklių tinklu.
4. Atsisluoksniavimo defektų aptikimo, jų dydžio ir gylio nustatymo metodas, pagrįstas A_0 modos sklidimo laiko ir interferencijos analize.
5. Defektų imitavimo metodas, leidžiantis atkurti defekto viduje pasikartojančių atspindžių sklidimo laiką ir amplitudes nesuardant tiriamo objekto struktūros.

Disertacijos struktūra

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, išvados, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų sąrašas. Bendra disertacijos apimtis – 152 puslapiai, kuriuose yra pateikti 74 paveiksai, 147 matematinės formulės, 5 lentelės ir 260 literatūros šaltinių sąrašas. Disertacija suskirstyta į šiuos skyrius:

1. Pirmajame skyriuje analizuojami mokslinės literatūros šaltiniai, nustatomos pagrindinės problemos ir sritys, reikalaujančios naujų stebėsenos ir signalų analizės metodų sukūrimo. Apžvelgiami naujausi moksliniai tyrimai, susiję su nukreiptųjų bangų sklidimo modeliavimu, selektyvioju modų žadinimu, signalų apdorojimo metodais ir defektų aptikimo algoritmais. Skyriaus pabaigoje suformuluojami darbo uždaviniai.
2. Antrajame skyriuje pristatoma keitiklio įtakos nukreiptųjų bangų žadinimui studija. Pateikiama nauja žadinimo funkcijos apskaičiavimo metodika, kuri leidžia nustatyti ir prognozuoti modų spektrines charakteristikas po jų sužadavimo objekte. Pristatomas pasiūlytos metodikos skaitmeninis ir eksperimentinis įvertinimas žadinant ultragarso bangas stiklo pluošto ir aliuminio bandiniuose.
3. Trečiajame skyriuje pateikiama siūlomo analitinio nukreiptųjų bangų sklidimo lakštinėse struktūrose prognozavimo modelio idėja ir jos matematinė formuluotė. Pademonstruojamas siūlomo modelio veikimas ir

pateikiami pagrindiniai jo pranašumai bei trūkumai, palyginti su paplitusiu baigtinių elementų metodu.

4. Ketvirtajame skyriuje pristatomas nukreiptųjų bangų fazinio greičio matavimo metodas, tinkamas atkurti modų dispersinės kreivės segmentui naudojant dispergavusius signalus, išmatuotus fiksuotose pozicijose. Įvertinamas pasiūlyto metodo tikslumas lyginant juo nustatytas ir teorines modų greičio vertes, apskaičiuotas pagal medžiagos elastines savybes.
5. Penktajame skyriuje supažindinama su siūlomu atsisluoksniavimo defektų aptikimo ir jų parametrų – dydžio ir gylio – nustatymo metodu. Trumpai apibūdinama nukreiptųjų bangų A_0 modos sąveika su atsisluoksniavimo defektu ir siūlomas defekto parametrų įvertinimo būdas. Pademonstruojamas metodo veikimas aptinkant ir apibūdinant du skirtingo dydžio defektus, esančius skirtingame gylyje.
6. Paskutiniame šeštajame skyriuje pateikiama atsisluoksniavimo defektų imitavimo metodo idėja. Taikant baigtinių elementų metodą ir naudojant stiklo pluošto bandinį pademonstruojamas matematinis siūlomo metodo adekvatumas struktūriniam defektui analizuojant pakartotinių atspindžių sklidimo trukmę defekto srityje.

1. ULTRAGARSINIŲ STEBĖSENOS METODŲ APŽVALGA

Ultragarsinės nukreiptosios bangos turi didelį potencialą ir gali būti naudojamos įvairių pramonės sričių inžinerinių objektų stebėsenai, tačiau šiuo metu dauguma tokių sistemų yra tik prototipai, o tyrimai vis dar atliekami tik laboratorinėmis sąlygomis, nes praktinį jų taikymą riboja sudėtingi nukreiptųjų bangų sklidimo dėsningumai ir komplikuota užregistruotų signalų analizė. Kaip buvo minėta anksčiau, ultragarsinės nukreiptosios bangos pasižymi daugiamodiškumu, fazinio ir grupinio greičio priklausomybe nuo sklidimo krypties ir dažnio, taip pat modų virsmu. Dėl šių priežasčių priimti signalai būna iškraipyti ir interferavę, todėl reikia sudėtingų signalų apdorojimo metodų, kurie leistų ne tik geriau suprasti ir interpretuoti tokių bangų sklidimo struktūroje dėsningumus, bet ir sudėtinguose signaluose atskirti defektų sukeltus atspindžius nuo reiškinių, kurie nulemti objekto geometrijos arba aplinkos. Šiuo metu plėtojami nukreiptųjų bangų stebėsenos sistemų tyrimai mokslinėje literatūroje skirstomi į tris grupes. Tai: selektyviojo nukreiptųjų bangų žadinimo tyrimai, modų sklidimo dėsningumų analizė ir dekompozicija, defektų aptikimas ir jų parametų nustatymas.

Iš nukreiptųjų bangų žadinimo ir specialių keitiklių kūrimo tyrimų bene daugiausia dėmesio sulaukia selektyviojo sužadavimo metodai, kurių pagrindinis tikslas – sužadinti tik norimo tipo modą, kiek įmanoma sumažinant nepageidaujamų modų poslinkius. Tam naudojami sunertųjų elektrodų arba specialūs pjezoelektriniai keitikliai, kuriuose elemento plotis arba tarpas tarp gretimų elementų parenkamas pagal norimos sužadinti modos bangos ilgį. Selektyviai sužadinus tam tikro tipo modą palengvinama objekte užregistruotų signalų analizė. Tačiau tyrimai rodo, kad, nepaisant visų pastangų, vienu metu vis tiek žadinasi kelios modos, iš kurių viena būna dominuojanti. Tad selektyvusis žadinimas šiuo metu nėra labai veiksmingas ir universalus metodas, nes dėl skirtingo modų jautrumo defektams sistema gali aptikti tik tam tikro tipo defektus. Be to, nukreiptosioms bangoms sąveikaujant su struktūra, dėl daugkartinių atspindžių ir modų virsmo gaunami signalai vis tiek yra komplikuoti ir daugiamodžiai. Taigi, nors selektyviojo žadinimo būdai ir turi tam tikrų pranašumų, šiuo metu jie nepadeda iš esmės išspręsti problemos, todėl paprasčiau yra žadinti kelias nukreiptųjų bangų modas įprastais keitikliais, o signalų analizei taikyti apdorojimo metodus, kurie apima modų analizę jų generavimo, sklidimo ir priėmimo metu.

Kita tyrimų grupė susijusi su nukreiptųjų bangų sklidimo dinamikos analize ir priimtų signalų dekompozicija, kai sudėtinguose signaluose siekiama atpažinti nežinomus įvairių modų atspindžius. Nukreiptųjų bangų sklidimo dinamikos tyrimai dažniausiai atliekami taikant baigtinių elementų metodą ir įvairias jo modifikacijas. Šie metodai leidžia nuodugniai iširti bangų sklidimo dinamiką, sąveiką su objekto ribomis ir defektais, tačiau jie yra gana lėti dėl skaičiavimams naudojamų matricių inversijos, o greitaveikos stygius ypač pasireiškia analizuojant

aukštesnius dažnius arba tiriant didelius objektus. Taip pat tokie metodai turi daug perteklinės informacijos, nes sprendimas kiekvienu laiko momentu yra skaičiuojamas kiekvienam tiriamam objekto mazgui. O stebėsenos sistemoms aktualu prognozuoti signalą tik tam tikroje iš anksto žinomoje objekto vietoje, todėl nukreiptųjų bangų sklidimo analizei stebėsenos sistemose galėtų būti naudojami supaprastinti modeliai, pasižymintys didesne greitime. Iš signalų dekompozicijos metodų dažniausiai yra taikomi analizės laiko ir dažnio srityje metodai, tokie kaip Hilberto Huango, bangelių ar dvimatė Furjė transformacijos. Deja, dauguma šių metodų nėra patrauklūs kalbant apie signalų analizę stebėsenos sistemose, nes jų skiriamoji geba yra tiesiogiai proporcinga sukauptų signalų skaičiui. O stebėsenos sistemose paprastai analizuojamų signalų skaičius yra ribotas. Todėl nukreiptųjų bangų signalų dekompozicija reikalauja naujų metodų, gebančių išskirti modas nenaudojant didelių signalų masių.

Paskutinė plačiai tiriama stebėsenos panaudojant nukreiptąsias bangas sritis yra įvairių defektų aptikimo ir jų apibūdinimo metodai. Dažniausiai minimi defektų aptikimo būdai paremti atraminio signalo atėmimu, kai signalai, atspindintys defektų neturintį objektą, atimami iš užregistruotų eksploatacijos metu, laikant, kad tai leidžia eliminuoti objekto geometrijos įtaką ir palieka tik pokyčius, lemiamus struktūros. Deja, šis principas, nors ir labai paprastas, yra pastebimai jautrus aplinkos ir kitiems veiksniams ir neleidžia nustatyti defekto vietos ar jo parametrų. Defektų vietai nustatyti dažnai naudojami signalų sumavimo ir rekonstrukcijos algoritmai, kurių tikslas – skirtinguose objekto paviršiaus taškuose užregistruotų signalų interferencija. Yra aibė tokių metodų modifikacijų, o jų skyra yra gana gera, kai turima pakankamai keitiklių porų. Kita vertus, pasigendama tyrimų, kuriais siekiama ne tik aptikti defektus ar nustatyti jų vietą, bet ir apibūdinti jų parametrus, tokius kaip dydis ar gylis. Tokie įverčiai yra itin svarbūs norint prognozuoti objekto naudojimo laiką, efektyviai planuoti jo remontą ir siekiant užtikrinti saugią eksploataciją.

2. METODAS NUKREIPTŪJŲ BANGŲ MODŲ SPEKTRINĖMS CHARAKTERISTIKOMS NUSTATYTI

Siekiant tinkamai interpretuoti nukreiptųjų bangų sklidimo dėsningumus bet kokiaje struktūroje, svarbu suprasti jų žadinimo mechanizmą ir keitliklio įtaką žadinamų modų spektrinėms charakteristikoms. Šiame skyriuje pateikiamas disertacijoje pasiūlytas metodas, skirtas analizuoti ir prognozuoti atskirų objekte sužadintų modų amplitudžių spektrams.

Nukreiptųjų ir tūrinųjų bangų sužadinimo principai skiriasi, nors abiem atvejais gali būti naudojami tie patys keitikliai. Objekte sužadintos bangos tipas (tūrinė ar nukreiptoji) priklauso nuo sužadinimo dažnio. Siekiant sužadinti nukreiptąją bangą, bangos ilgis turi būti bent kelis kartus didesnis už objekto storį. O tūrinės bangos apibūdinamos kaip sklindančios begalinėje erdvėje, todėl šiuo atveju sužadinamos dviejų tipų bangos (išilginės arba skersinės), turinčios fiksuotą

fazinį greitį. Palyginimui paminėtina, kad nukreiptosios bangos sklinda apribotoje erdvėje ir gali būti išreikštos kaip nuo objekto ribų atsispindėjusių ir dėl modų virsmo pakitusių išilginių ir skersinių bangų superpozicija. Dėl to vienu metu gali egzistuoti begalinis skaičius modų, kiekviena kurių turi skirtingą nuo dažnio ir bandinio storio priklausomą fazinį ir grupinį greitį. Todėl, siekiant tinkamai analizuoti ir interpretuoti tokių bangų sklidimo dėsningumus, svarbu tiksliai suprasti nukreiptųjų bangų žadinimo ypatumus, ypač keitiklio įtaką kiekvienos modos spektrinėms charakteristikoms. Bet kurios objekte sužadintos nukreiptųjų bangų modos amplitudžių spektras $U(f)$ priklauso nuo trijų pagrindinių veiksnių: žadinimo tipo, keitiklio dydžio ir tiriamo objekto dispersinių savybių. Matematiškai jis gali būti išreikštas kaip žadinimo signalo spektro $U_{\text{ref}}(f)$ ir žadinimo funkcijos $H(f, u, l)$ (angl. *excitability function*), kuri priklauso nuo minėtų veiksnių, sandauga:

$$U(f) = U_{\text{ref}}(f) \cdot H(f, u, l); \quad (2.1)$$

čia l – keitiklio ilgis; u – virpamojo greičio pasiskirstymas žadinimo zonoje, nusakantis žadinimo tipą.

Daktaro disertacijos antrojo skyriaus tikslas – pasiūlyti metodą žadinimo funkcijai $H(f, u, l)$ nustatyti, kuris, žinant žadinimo signalo spektrą $U_{\text{ref}}(f)$, leistų prognozuoti kiekvienos modos amplitudžių spektrą po jos sužadavimo objekte. Darbe siūlomo metodo idėja grindžiama virpamojo greičio pasiskirstymo objekto paviršiuje žadinimo metu, kuris yra skirtingas kiekvienai modai, Furjė analize. Sakykime, kad nagrinėjamas 2D atvejis, kur virpamojo greičio pasiskirstymas žadinimo metu A_0 modai išreiškiamas (2.2) išraiška, o S_0 modai – atitinkamai (2.3) išraiška (žr. 2.1 pav.):

$$u_{A_0}(z) = \begin{cases} 1 & z = z_1 \text{ arba } z = z_2 \\ 0 & \text{kitu atveju} \end{cases}, \quad (2.2)$$

$$u_{S_0}(z) = \begin{cases} \frac{2z-l}{l} & z_1 < z < z_2; \\ 0 & \text{kitu atveju} \end{cases}; \quad (2.3)$$

čia z_1 ir z_2 – atitinkamai keitiklio priekinės ir galinės briaunos koordinatės; $l = z_2 - z_1$ – keitiklio plotis.

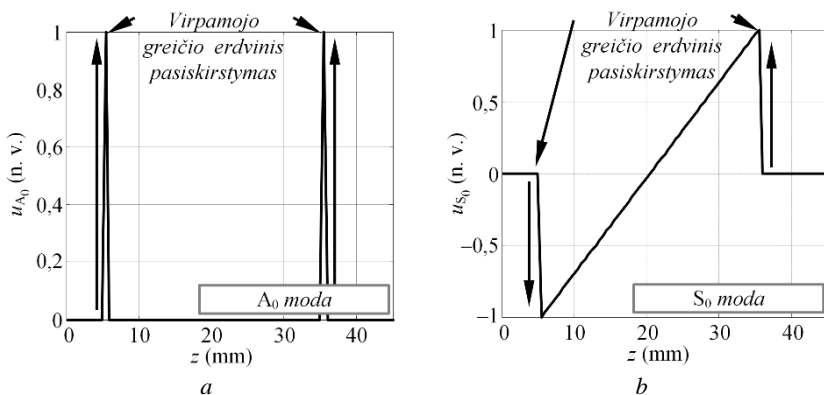
Šiuo atveju teorinis virpamojo greičio erdvinis pasiskirstymas parinktas atsižvelgiant į MFC (angl. *macro fibre composite*) keitiklio veikimo principą. Analizuojamas virpamojo greičio pasiskirstymas susijęs su objekto dispersinėmis savybėmis ir gali būti išreikštas ne tik kaip funkcija nuo keitiklio matmenų $u(z)$, bet ir virpamojo greičio ir laiko srityje kaip $u(t)$, kur $t = z/c_p(f_k)$. Tada žadinimo funkcija H dažnių srityje f A_0 ir S_0 modoms gali būti apskaičiuota nustatant tam

tikros modos virpamojo greičio $u(t)$ Furjė spektro amplitudę esant analizuojamam dažniui f_k , kur $f_k \in f$:

$$H_{A_0}(f_k) = U'_{A_0}(f) \Big|_{f=f_k}, \quad U'_{A_0}(f) = \left| \text{FT} \left[u_{A_0} \left(\frac{z}{c_{pA_0}(f_k)} \right) \right] \right|, \quad (2.4)$$

$$H_{S_0}(f_k) = U'_{S_0}(f) \Big|_{f=f_k}, \quad U'_{S_0}(f) = \left| \text{FT} \left[u_{S_0} \left(\frac{z}{c_{pS_0}(f_k)} \right) \right] \right|; \quad (2.5)$$

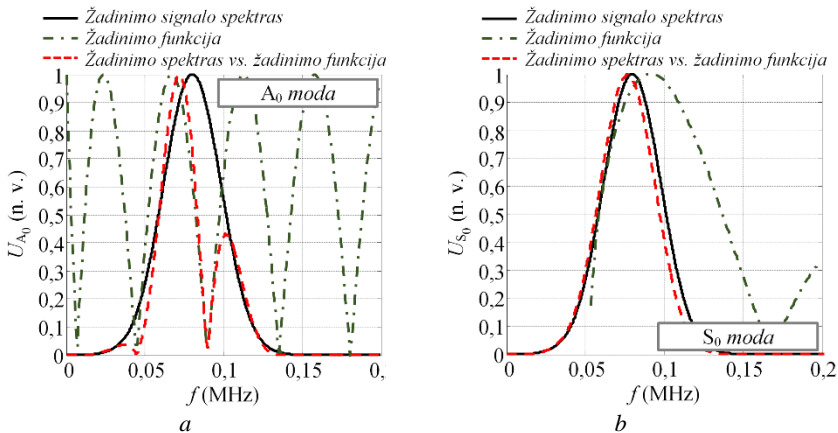
čia $H_{A_0}(f_k)$ ir $H_{S_0}(f_k)$ yra analitiškai apskaičiuotos žadinimo funkcijos A_0 ir S_0 modai; u_{A_0} ir u_{S_0} apibūdina virpamojo greičio erdvinį pasiskirstymą žadinimo metu; f_k yra analizuojamas dažnis; FT nusako Furjė transformacijos operaciją.



2.1 pav. Teorinis virpamojo greičio pasiskirstymas objekto paviršiuje žadinimo metu A_0 (a) ir S_0 (b) modai

Esant (2.2) ir (2.3) išraiškoms aprašytam erdviniam virpamojo greičio pasiskirstymui pagal (2.4) ir (2.5) formules apskaičiuotos A_0 ir S_0 modų žadinimo funkcijos pateiktos 2.2 pav. Jame taip pat matomas 3 periodų 80 kHz Gausinio žadinimo signalo spektras ir jo sandauga su analitine žadinimo funkcija. Skaičiavimams naudotos 4 mm stiklo pluošto plokštelės elastinės savybės. 2.2 pav. matyti, kad žadinimo funkcija yra skirtinga kiekvienai nukreiptųjų bangų modai. Ji priklauso nuo modos bangos ilgio ir labiau veikia asimetrines modas. Akivaizdu, kad, esant santykinai plačiajuosčiam žadinimui, tiek signalo laikinės, tiek spektrinės charakteristikos yra veikiamos šios žadinimo funkcijos, kuri lemia tam tikrų dažnio komponentių egzistavimą signale. Šios funkcijos nepaisymas gali lemti papildomas paklaidas analizuojant nukreiptųjų bangų sklaidimą ir kuriant tam skirtus signalų analizės įrankius. Daugumoje dabartinių signalų apdorojimo

metodų tokios žadinimo funkcijos nėra vertinamos, o kitos apskaičiavimo metodikos dažniausiai taikomos tik kuriant selektyviojo žadinimo keitiklius [15, 16, 17].

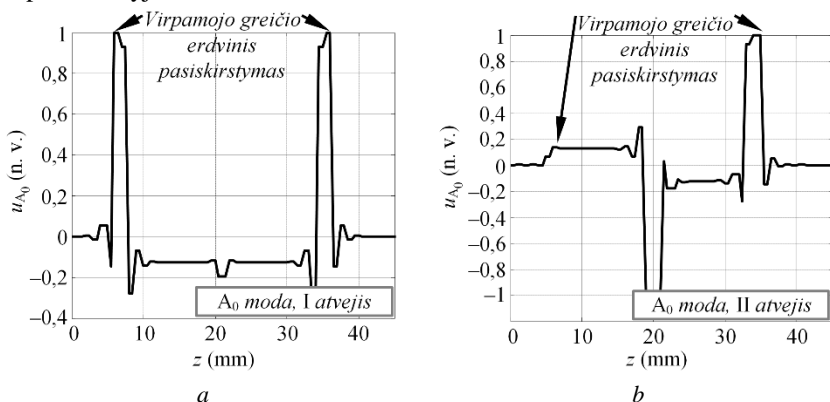


2.2 pav. Žadinimo funkcijos įtaka A_0 (*a*) ir S_0 (*b*) modos amplitudžių spektrui

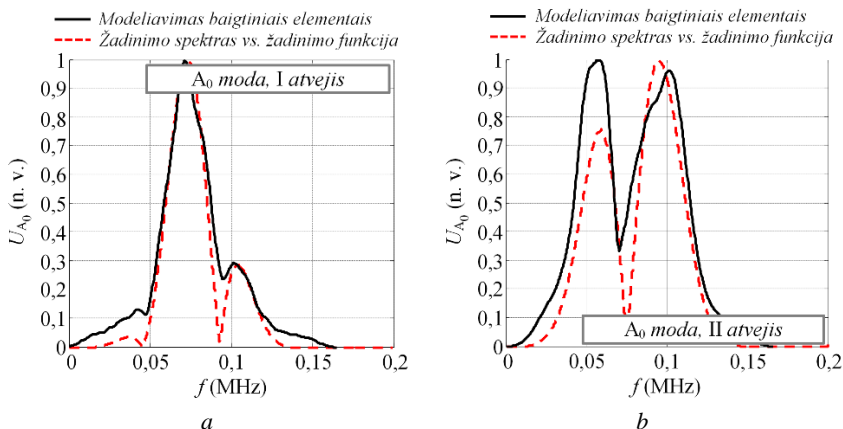
Darbe pasiūlytas žadinimo funkcijos įvertinimo metodas buvo patikrintas atliekant skaitmeninį modeliavimą baigtiniais elementais ir eksperimentinius tyrimus stiklo pluošto kompozito ir aliuminio bandiniuose. Disertacijos santraukoje pateikiami tik tie rezultatai, kurie susiję su stiklo pluošto kompozitu, o disertacijos tekste papildomai galima susipažinti su keitiklio matmenų įtakos žadinimo funkcijai eksperimentiniais tyrimais aliuminio bandinyje naudojant fazuotąją gardelę. Siekiant patikrinti pasiūlytą žadinimo funkcijos įvertinimo metodiką, pateikiami modeliavimo baigtiniais elementais 4 mm storio stiklo pluošto plokštelėje rezultatai esant dviem skirtingo tipo erdviniams virpamojo greičio pasiskirstymams (žr. 2.3 pav.), kurie buvo nustatyti iš vertikalios virpamojo greičio komponentės modeliavimo duomenų pirmu laiko momentu. Pirmasis atvejis (2.3 pav., *a*) atitinka MFC M-2814-P1 keitiklio d_{33} darbo režimą, o antrasis (2.3 pav., *b*) parinktas siekiant iliustruoti virpamojo greičio pasiskirstymo žadinimo metu įtaką žadinimo funkcijai. Disertacijos santraukoje pristatomi rezultatai tik asimetrinei A_0 modai dėl akivaizdesnės žadinimo funkcijos įtakos šios modos spektrinėms charakteristikoms. Išsamiau modeliuojamo uždavinio parametrai ir žadinimo būdas aprašomi disertacijos 2.3 skyriuje.

Modeliavimo baigtiniais elementais metu gauti A_0 modos amplitudžių spektrai buvo palyginti su pagal pateiktą metodiką analitiškai apskaičiuotu spektru, įvertinant žadinimo funkciją. Rezultatų palyginimas esant 2.3 pav. *a* dalyje pavaizduotam virpamojo greičio pasiskirstymui pateiktas 2.4 pav. *a* dalyje. Modeliuoto ir analitiškai apskaičiuoto A_0 modos spektro palyginimas esant

2.3 pav. *b* dalyje pavaizduotam virpamojo greičio pasiskirstymui pateiktas 2.4 pav. *b* dalyje.



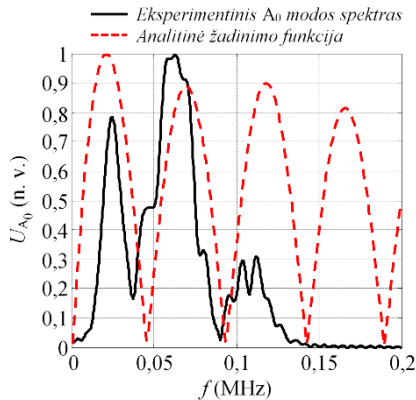
2.3 pav. Analizuojami virpamojo greičio pasiskirstymo objekto paviršiuje žadinimo metu atvejai A_0 modai



2.4 pav. Baigtiniais elementais gauto ir analitiškai pagal pasiūlytą metodiką apskaičiuoto A_0 modos amplitudžių spektro, kai virpamasis greitis pasiskirstęs pagal I (2.3 pav. *a*) ir II (2.3 pav. *b*) žadinimo atvejį, palyginimas

Pateikti rezultatai (2.4 pav.) iliustruoja pasiūlyto žadinimo funkcijos įvertinimo metodo adekvatumą ir įrodo, kad modos spektras po sužadavimo gali būti išreikštas kaip žadinimo signalo spektro ir žadinimo funkcijos sandauga. Eksperimentinio įvertinimo 4 mm storio stiklo pluošto plokštelėje rezultatai pateikiami 2.5 pav., kur matyti A_0 modos spektras ir analitinė žadinimo funkcija. Šiuo atveju, skaičiuojant analitinę žadinimo funkciją, buvo priimta, kad virpamojo greičio erdvinis pasiskirstymas žadinimo metu yra toks, kaip pavaizduota

2.3 pav. *a* dalyje. Eksperimentams buvo naudojamas MFC M-2814-P1 tipo keitiklis. Jis buvo žadinamas vienetiniu stačiakampiu 6,25 μ s trukmės impulsu. Eksperimentinė tyrimo schema ir išsamus jo aprašas pateikiamas disertacijos 2.4 skyriuje.



2.5 pav. Eksperimentiškai gauto A_0 modos amplitudžių spektro ir analitinės žadinimo funkcijos, apskaičiuotos pagal pasiūlytą metodą, palyginimas

Apibendrinant šiame skyriuje pateiktus rezultatus, galima teigti, kad žadinimo funkcijos apskaičiavimas leidžia paaiškinti ir kartu prognozuoti atskirų nukreiptųjų bangų modų spektrus esant įvairioms sąlygoms. Darbe pasiūlyta žadinimo funkcijos apskaičiavimo metodika yra universali ir gali būti taikoma esant bet kokiems įėjimo parametrams: virpamojo greičio pasiskirstymui, žadinimo tipui ir objekto dispersinėms savybėms.

3. NUKREIPTŪJŲ BANGŲ SKLIDIMO ANALIZĖS IR INTERPRETAVIMO MODELIS

Ankstesniame skyriuje pasiūlytas žadinimo funkcijos įvertinimo metodas leidžia analizuoti ir prognozuoti keitiklio įtaką sužadintam modų spektrinėms charakteristikoms. Tačiau tinkamai nukreiptųjų bangų analizei to nepakanka. Kitas svarbus uždavinys yra atskirti nukreiptųjų bangų sklidimo pokyčius, lemiamus objekto geometrijos, nuo pokyčių, kuriuos sukelia atsiradę defektai. Netgi defektų neturinčiose struktūrose nukreiptųjų bangų signalai būna daugiomodžiai ir sudėtingi, todėl juos sunku suprasti. Šiuo metu naudojami nukreiptųjų bangų sklidimo modeliavimo įrankiai, iš kurių labiausiai paplitęs baigtinių elementų metodas ir kitos jo modifikacijos [18, 19], yra lėti ir sunkiai pritaikomi bangų sklidimui dideliuose objektuose tirti. O stebėsenos sistemos išsiskiria tuo, kad dideli objektai yra tikrinami integruotu keitiklių tinklu, todėl jų analizei universalūs modeliavimo metodai ne visada tinka. Dėl šių priežasčių darbo metu buvo priimta prielaida, jog bendrieji nukreiptųjų bangų sklidimo

dėsningumai gali būti išaiškunami naudojant supaprastintus modelius, padedančius įvertinti įvairių modų atspindžius ir sklidimo trajektorijas. Šiame skyriuje pristatomas disertacijoje pasiūlytas analitinis modelis, kurio pagrindinis tikslas – palengvinti nukreiptųjų bangų signalų analizę ir sudaryti pagrindą atskirti objekto geometrijos įtaką nukreiptųjų bangų sklidimui nuo defektų įtakos. Siūlomas modelis yra grindžiamas atskirų nukreiptųjų bangų modų sklidimo nuo virtualaus siūstuvo iki virtualaus imtuvo laiko skaičiavimu įvertinant daugkartinius atspindžius nuo objekto ribų. Modelis leidžia gauti ir papildomą informaciją – stebėti atskirų modų sklidimo objekte trajektorijas ir prognozuoti imtuvu priimamą signalą, atsižvelgiant į žadinimo signalo parametrus. Tokie taikant modelį gauti duomenys leidžia įvairių modų sklidimo laiką palyginti su eksperimentiniais duomenimis atpažįstant nežinomus signalus, o modų sklidimo trajektorijos leidžia įvertinti galimas defektų padėtis.

Vienas pagrindinių reikalavimų disertacijoje siūlomam modeliui buvo greitaveika, todėl jis paremtas prielaida, kad modų sklidimo laiko ir trajektorijų analizei nereikia atlikti viso bangos sklidimo modeliavimo, koks yra atliekamas baigtinių elementų metodu. Pakanka sekti tik bangų fronto padėtis bandinio paviršiuje diskretiniais modeliavimo laiko momentais pagal nustatytą nukreiptųjų bangų greitį. Modelio darbui reikalingi pradiniai duomenys gali būti suskirstyti į siūstuvą, imtuvą ir tiriamą objektą apibūdinančių parametru grupes. Siūstuvai modelyje apibūdinami: centro koordinatėmis (x_e, y_e) , orientacijos kampų α_e ir kryptingumo diagrama $D_c(\alpha_e)$. Imtuvai nusakomi centro koordinatėmis (x_r, y_r) , ilgiu ir pločiu l_1, l_2 , orientacijos kampų α_r ir kryptingumo diagrama $D_r(\alpha_r)$. Tiriamas objektas visada analizuojamas kaip dvimatė stačiakampė plokštelė, kuri apibūdinama ilgiu x_o ir pločiu y_o . Objekto savybės, atsižvelgiant į tai, ar jis izotropinis, ar anizotropinis, nusakomos fazinio greičio dispersine kreive arba dispersine kreive 0° sklidimo kryptimi kartu su grupinio greičio priklausomybe nuo sklidimo krypties. Papildomai modelyje taip pat galima įvertinti žadinimo signalo parametrus ir žadinimo funkciją $H(f, u, l)$.

Modeliavimu metu virtualaus bangos fronto padėtis aprašoma kaip taškų su tam tikromis koordinatėmis masyvas, kurio padėtis kiekvienu modeliavimo laiko momentu t_k perskaičiuojama x ir y ašies kryptimi pagal šias lygtis:

$$x_f(t_k, \alpha_m) = c_g(f_c, \alpha_m) \cdot t_k \cdot \cos(\alpha_m) + x_e, \quad (3.1)$$

$$y_f(t_k, \alpha_m) = c_g(f_c, \alpha_m) \cdot t_k \cdot \sin(\alpha_m) + y_e, \quad (3.2)$$

$$t_k = (k-1) \cdot \Delta t + t_p, \quad k = 1 \div K, \quad K = \frac{t_g - t_p}{\Delta t} + 1, \quad (3.3)$$

$$\alpha_m = (m-1) \cdot \Delta \alpha, \quad m = 1 \div M, \quad M = \frac{2\pi}{\Delta \alpha} + 1; \quad (3.4)$$

čia $c_g(f_c, \alpha_m)$ apibūdina grupinio greičio priklausomybę nuo sklidimo krypties; t_k yra einamasis modeliavimo laiko momentas; Δt – žingsnis laiko srityje; t_p, t_g – atitinkamai pradinis ir galinis modeliavimo laiko momentai; α_m – bangos fronto taškų kampų masyvas; $\Delta \alpha$ – kampo tarp gretimų bangos fronto taškų kitimo žingsnis; x_e, y_e – virtualaus siūstuvo centro koordinatės. Modeliuojamo bangos fronto pavyzdys laiko momentais $t_1 = 28,5 \mu\text{s}$ ir $t_2 = 39,5 \mu\text{s}$ pateiktas 3.1 pav. (a ir b). Šiame paveiksle pateiktas bangos sklidimo 1 mm storio aliuminio 2024-T6 plokštelėje, kurioje A_0 modos grupinis greitis, esant 100 kHz žadinimo dažniui, yra 1769 m/s, modeliavimo pavyzdys. Tame pačiame paveiksle taip pat matomi C tipo vaizdai, gauti baigtinių elementų metodu, siekiant aiškiau pristatyti pasiūlyto modelio veikimo principą. Kaip matyti iš rezultatų, siūlomas modelis seka tik bangos fronto padėtį skirtingais laiko momentais, tai leidžia įvertinti modos sklidimo laiką ir pagreitinėti skaičiavimus.

Bangos fronto atspindžiai nuo objekto ribos įvertinami objekto krašto atžvilgiu invertuojant atitinkamų fronto taškų koordinatas ir imituojant už objekto ribų išėjusios bangos fronto dalies sklidimą priešinga kryptimi, kaip pavaizduota 3.1 pav. c dalyje. Nuo ribos atsispindėjusi bangos fronto dalis matematiškai aprašoma taip:

$$x_{f,m}(t_k) = |x_{f,m}(t_k)|, \forall m, x_{f,m}(t_k) < 0, \quad (3.5)$$

$$x_{f,m}(t_k) = x_o - (x_{f,m}(t_k) - x_o), \forall m, x_{f,m}(t_k) > x_o, \quad (3.6)$$

$$y_{f,m}(t_k) = |y_{f,m}(t_k)|, \forall m, y_{f,m}(t_k) < 0, \quad (3.7)$$

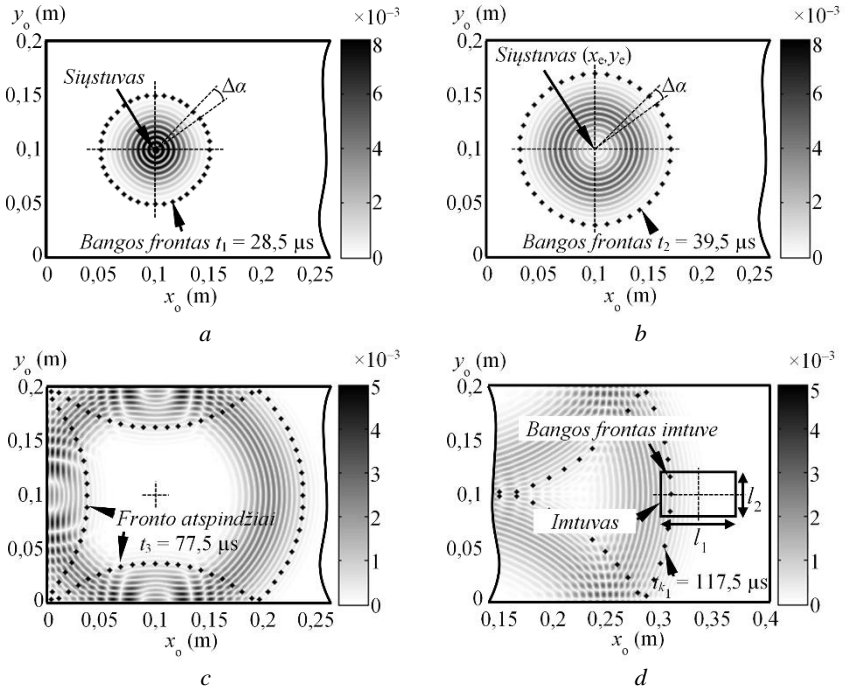
$$y_{f,m}(t_k) = y_o - (y_{f,m}(t_k) - y_o), \forall m, y_{f,m}(t_k) > y_o; \quad (3.8)$$

čia $x_{f,m}(t_k), y_{f,m}(t_k)$ – bangos fronto taškai, kurių koordinatės patenka už modeliuojamo objekto ribų; x_o, y_o – modeliuojamo objekto ilgis ir plotis.

Bangos fronto priėmimo metu į masyvą $h_0(t)$ įrašomos bangos fronto amplitudės vertės $A_e(t_{k_j})$ laiko momentais t_{k_j} , kurios patenka į imtuvo sritį L ($L = l_1 \cdot l_2$, kur l_1 ir l_2 nusako imtuvo ilgį ir plotį). Bangos fronto amplitudės, patekusios į imtuvo sritį, priklauso nuo siūstuvo bei imtuvo kryptingumo diagramų $D_e(\alpha_e), D_r(\alpha_r)$ ir į imtuvą patekusių bangos fronto taškų skaičiaus. Bangos frontas, patekęs į imtuvo sritį, registruojamas tol, kol jis sklinda per keitiklį, todėl pasibaigus modeliavimo laikui yra sukaupiamas bangos fronto amplitudžių rinkinys tam tikrais jų sklidimo per keitiklį laiko momentais:

$$h_0(t) = \{A_e(t_{k_1}), \dots, A_e(t_{k_N})\} \quad (3.9)$$

čia $j = 1, \dots, N$ atitinka laiko momentus, kai bangos frontas kerta imtuvo sritį. Bangos fronto priėmimo modeliavimo principas laiko momentu $t_4 = 117,5 \mu\text{s}$ grafiškai iliustruotas 3.1 pav. d dalyje.



3.1 pav. Siūlomo nukreiptųjų bangų sklaidimo analizės modelio veikimo principo iliustracija: suskaičiuotos bangos fronto padėties iki atspindžio laiko momentais $t_1 = 28,5 \mu\text{s}$ (a) ir $t_2 = 39,5 \mu\text{s}$; bangos fronto atspindžio įvertinimas laiko momentu $t_3 = 77,5 \mu\text{s}$ (c) ir bangos fronto priėmimo modeliavimo principas laiko momentu $t_4 = 117,5 \mu\text{s}$ (d)

Pasiūlytas signalų analizės modelis taip pat leidžia prognozuoti virtualiu imtuvu priimamą signalą. Nedispersinei aplinkai jis gali būti išreiškiamas kaip žadinimo signalo $u_{\text{ref}}(t)$ ir funkcijos $h_0(t)$ sąsūka, kuri gali būti laikoma objekto impulsine charakteristika pasirinktai siūstuvui ir imtuvui porai. Ji nurodo, kuriuo laiko momentu ir kokios amplitudės signalai yra priimami esant faktiškai vienetiniam siūstuvo sužadininimui:

$$u_{k_j}(t_{k_j})_{\text{nd}} = u_{\text{ref}}(t) \otimes h_0(t); \quad (3.10)$$

čia \otimes žymi sąsūkos operaciją. Atitinkamai dispersinei aplinkai priimamas signalas gali būti išreiškiamas kaip:

$$u_r(t) = \sum_{k_j} u_{k_j}(t_{k_j})_{\text{d}} \cdot A_e(t_{k_j}), \quad (3.11)$$

$$u_{k_j} \left(t_{k_j} \right)_d = u_{\text{ref}} \otimes \text{IFFT} \left(H_{k_j}(\omega) \right), \quad (3.12)$$

$$H(\omega) = e^{-\alpha(\omega)x} e^{\frac{-jx\omega}{c_p(\omega)}}; \quad (3.13)$$

čia $H(\omega)$ – sistemos perdavimo funkcija; $\alpha(\omega)$ – slopinimo funkcija; $c_p(\omega)$ – fazinis greitis; x – sklidimo atstumas.

Pagrindinis pasiūlyto metodo pranašumas, palyginti su esamais, yra galimybė atskirai analizuoti kiekvienos modos sklidimą realiuoju laiku: jos atsklidimo iki imtuvo laiko momentus, trajektorijas ir tikėtiną signalą imtuvo išėjime. Pasiūlytas modelis gali būti lengvai konfigūruojamas ir pritaikomas bangų sklidimo analizei įvairiose struktūrose, keičiant objektą, keitiklius ir žadinimo signalą apibūdinančius parametrus.

Darbe pasiūlytas analitinis modelis buvo patikrintas atliekant modeliavimo ir eksperimentinius tyrimus. Pagrindinis tyrimo tikslas buvo palyginti modeliuotus signalus su apskaičiuotais pasiūlytu analitiniu modeliu siekiant įvertinti jo adekvatumą. Tyrimo tikslui pasiekti atliktas nukreiptųjų bangų A_0 modos sklidimo modeliavimas baigtiniais elementais 400×200 mm matmenų aliuminio ir stiklo pluošto bandiniuose. Su sprendžiamo baigtinių elementų ir analitinio uždavinio parametrais galima susipažinti disertacijos 3.2 skyriuje. Atlikus modeliavimą užregistruotas vertikalios poslinkio komponentės signalas mazge, kurio koordinatės: $x_r = 300$ mm, $y_r = 100$ mm; jis palygintas su analitiškai prognozuojamu signalu, apskaičiuotu pagal (3.11) formulę. Grafinis baigtiniais elementais ir analitiniu modeliu apskaičiuotų signalų aliuminio ir stiklo pluošto bandiniuose palyginimas pateikiamas 3.2 ir 3.3 pav. Kiekvieno paveikslėlio b dalyje pateiktuose modeliavimo baigtiniais elementais rezultatuose sužymėtos pasiūlytu analitiniu modeliu atpažintos modos. Taip pat nurodoma, nuo kurios objekto vietos atsispindėjusios jos pasiekė imtuvą.

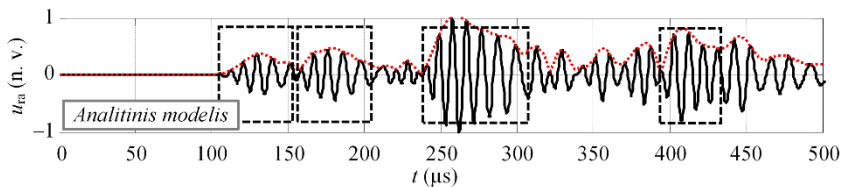
Siekiant kiekybiškai įvertinti 3.2 ir 3.2 pav. pateiktų signalų panašumą, darbe pasiūlyta skaičiuoti slenkančio lango abipusę koreliaciją, kuri įvertina analitinio $u_{ra}(t)$ ir baigtiniais elementais sumodeliuoto $u_{m}(t)$ signalo formos panašumą ir šių signalų tarpusavio suvėlinimą kiekvienoje lango padėtyje:

$$x(\tau) = \frac{\sum_{t=-\Delta\tau}^{\Delta\tau} u_{mw}(t, \tau) \cdot u_{raw}(t, \tau)}{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}, \quad (3.14)$$

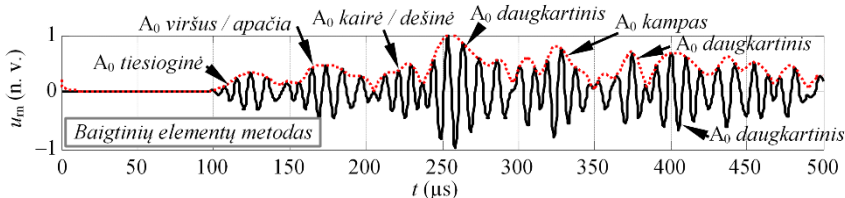
$$k_1 = \sum_t u_{mw}(t, \tau) \cdot u_{mw}(t, \tau), \quad k_2 = \sum_t u_{raw}(t, \tau) \cdot u_{raw}(t, \tau); \quad (3.15)$$

čia $u_{mw}(t, \tau) = u_m(t) \cdot u_w(t - \tau)$, $u_{raw}(t, \tau) = u_{ra}(t) \cdot u_w(t - \tau)$ apibūdina analitinį ir baigtiniais elementais sumodeliuotą signalus, padaugintus iš lango funkcijos;

$u_w(t)$ – lango funkcija; $\tau = 0 \div (t_m - \Delta t)$, t_m – analizuojamo signalo trukmė; $\Delta\tau$ – laikinio lango plotis.

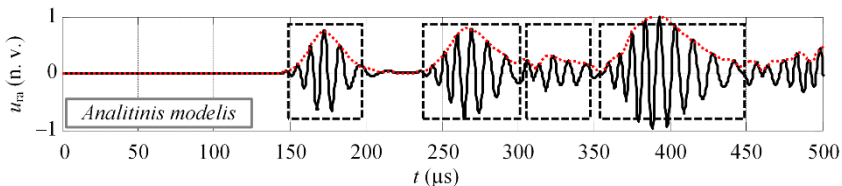


a

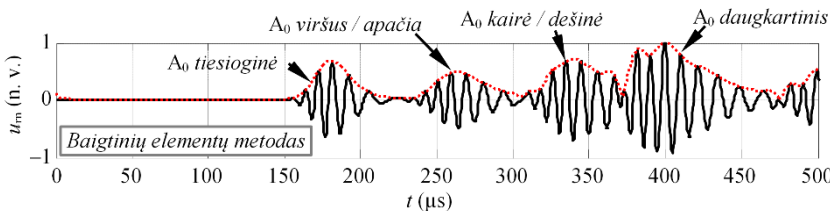


b

3.2 pav. Analitiškai apskaičiuotų ir baigtiniais elementais sumodeliuotų signalų aliuminio bandinyje palyginimas: analitiškai apskaičiuotas A_0 modos signalas (a), vertikali poslinkio komponentė, apskaičiuota baigtinių elementų metodu (b)



a



b

3.3 pav. Analitiškai apskaičiuotų ir baigtiniais elementais sumodeliuotų signalų stiklo pluošto bandinyje palyginimas: analitiškai apskaičiuotas A_0 modos signalas (a), vertikali poslinkio komponentė, apskaičiuota baigtinių elementų metodu (b)

Pagal (3.14) formulę apskaičiuotos slenkančio lango tarpusavio koreliacijos funkcijos reikšmės aliuminio ir stiklo pluošto bandiniams yra pateikiamos

3.1 lentelėje. Joje pateikiamos koreliacijos vertės tik tiems signalams, kurie 3.2 pav. ir 3.3 pav. a dalyse apibraukti punktyrais. Ties kiekviena lokaliąja koreliacijos maksimumo verte buvo įvertintas ne tik koreliacijos koeficientas, bet ir suvėlinimo laikas. Pastarasis leido nustatyti tiek analitinio modelio atkuriamo signalo formos, tiek sklidimo laiko nustatymo tikslumą. Disertacijoje (3.3 skyriuje) galima susipažinti su eksperimentiniu pasiūlyto modelio įvertinimu.

3.1 lentelė. Analitiškai skaičiuotų ir baigtiniais elementais modeliuotų signalų aliuminio ir stiklo pluošto bandiniuose palyginimas naudojant slenkančio lango koreliacijos įvertį

A ₀ moda, aliuminio bandinys			A ₀ moda, stiklo pluošto bandinys		
Signalas	Koreliacijos koeficientas	Suvėlinimas, μ s	Signalas	Koreliacijos koeficientas	Suvėlinimas, μ s
Tiesioginis	0,95	-6,5	Tiesioginis	0,97	8
Viršus / apačia	0,95	-3	Viršus / apačia	0,96	-6
I daugkartinis	0,88	-9,5	Kairė / dešinė	0,89	10,5
II daugkartinis	0,88	-8,5	I daugkartinis	0,94	5

Darbo metu taip pat buvo nustatyta, kad baigtinių elementų metodu sprendžiant 2D bangos sklidimo aliuminio ir stiklo pluošto bandiniuose uždavinį apytiksliai buvo sugaištos 27 ir 98 minutės. Be abejo, sprendimo trukmė šiuo atveju priklausė nuo tinklės dydžio, kuris susijęs su analizuojamos medžiagos tipu ir dažniu. O pasiūlyto modelio skaičiavimo trukmė yra nepriklausoma nuo medžiagos savybių ir leidžia rezultatą gauti realiuoju laiku.

4. FAZINIO GREIČIO MATAVIMU PAGRĮSTAS NUKREIPTŲJŲ BANGŲ MODŲ ATPAŽINIMO METODAS

Ankstesniame skyriuje pristatyto analitinio modelio tikslumas nemažai priklauso nuo iš anksto nustatytų medžiagos savybių, t. y. nukreiptųjų bangų greičio. Kuo tiksliau nustatomas šis parametras, tuo, tikėtina, sklidimo laiko atžvilgiu labiau sutaps tikri ir modeliuoti signalai. Tiriant tikrus objektus, jų savybės ir storis paprastai nėra tiksliai žinomi, todėl, norint tinkamai analizuoti ir interpretuoti nukreiptųjų bangų sklidimą, reikalingi jų greičio matavimo metodai. Be to, nukreiptosioms bangoms sąveikaujant su defektais ar kitomis nevienalytėmis struktūros dalimis, objekte atsiranda naujų nežinomų modų, o jų greičio įvertinimas leistų nustatyti modos tipą. Taigi, nukreiptųjų bangų greičio matavimas leistų ne tik tiksliau prognozuoti jų sklidimą pasiūlytu signalų analizės modeliu, bet ir atpažinti nežinomas modas, galimai nulemtas defektų. Šiuo metu yra nemažai fazinio greičio matavimo metodų, tokių kaip tarpusavio koreliacijos ar perėjimo per nulį [20] metodai, tačiau jie iš principo nėra tinkami didelį atstumą nusklidusiems dispersiniams signalams analizuoti. Be to, nukreiptųjų bangų atveju fazinis greitis pasižymi priklausomybe nuo dažnio, todėl dispersijos pobūdžiui įvertinti reikia greičio verčių esant skirtingiems dažniams. Kaip alternatyva gali būti taikomas dvimatės Furjė transformacijos metodas [21], kuris yra pakankamai

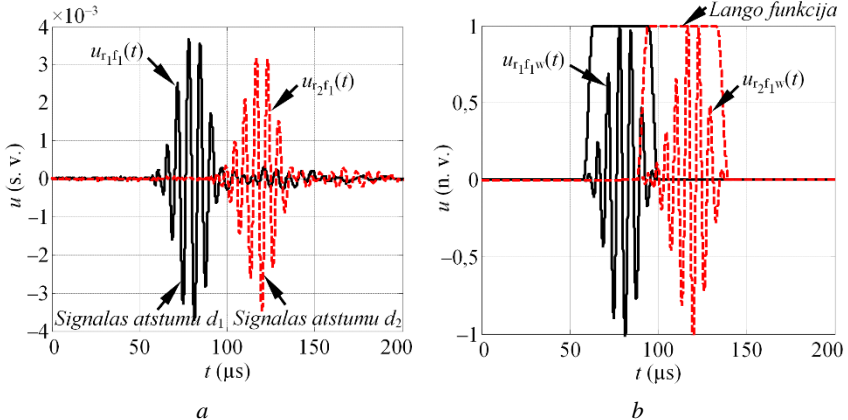
tikslus ir tinka dispersiniams, susiklojusiems signalams analizuoti. Tačiau šis metodas sunkiai pritaikomas stebėsenos sistemose su fiksuotose pozicijose įdiegtais keitikliais, nes jo tikslumas priklauso nuo diskretiniais atstumais sukauptų signalų skaičiaus.

Darbe pasiūlytas fazinio greičio dispersinės kreivės keitiklio dažnių juostoje atkūrimo metodas, grindžiamas fazių spektro analize. Jį taikant, keitiklis žadinamas skirtingo dažnio stačiakampiais impulsais ir pritaikomas modifikuotas fazių spektro analizės metodas, pasiūlytas W. Sachse [22]. Pagrindinis siūlomo metodo pranašumas yra tas, kad jis leidžia atkurti dispersinę kreivę plačiame dažnių ruože naudojant tik du signalus, išmatuotus žinomais atstumais. Bendras siūlomo fazinio greičio įvertinimo algoritmas aprašomas tokia seka:

1. Keitiklis sužadinamas stačiakampiu impulsu, kurio centrinis dažnis f_1 , ir priimamas dviem imtuvais r_1 , r_2 , esančiais atstumu d_1 ir d_2 nuo siųstuvo. Užregistruojami objekte sužadinti signalai $u_{r_1 f_1}(t)$, $u_{r_2 f_1}(t)$ (žr. 4.1 pav., a).
2. Signalai $u_{r_1 f_1}(t)$ ir $u_{r_2 f_1}(t)$ dauginami iš lango funkcijos $w(t)$ siekiant izoliuoti tam tikros vienos modos signalą (žr. 4.1 pav., b):

$$u_{r_1 f_1 w}(t) = u_{r_1 f_1}(t) \cdot w(t), \quad u_{r_2 f_1 w}(t) = u_{r_2 f_1}(t) \cdot w(t); \quad (4.1)$$

kur $u_{r_1 f_1 w}(t)$, $u_{r_2 f_1 w}(t)$ apibūdina signalus $u_{r_1 f_1}(t)$ ir $u_{r_2 f_1}(t)$, padaugintus iš lango funkcijos $w(t)$.



4.1 pav. Signalų, užregistruotų imtuvais r_1 ir r_2 , atitinkamais atstumais d_1 , d_2 pavyzdys (a) ir jų sandauga su lango funkcija siekiant izoliuoti tam tikrą modą (b)

3. Kiekvienas signalas $u_{r_1 f_1 w}(t)$, $u_{r_2 f_1 w}(t)$, siekiant išvengti paklaidų atkuriant fazę, paslenkamas laiko ašyje atitinkamai per $-t_{m_1}$ ir $-t_{m_2}$:

$$u_{r_1 f_1 s}(t) = u_{r_1 f_1 w}(t + t_{m_1}), \quad u_{r_2 f_1 s}(t) = u_{r_2 f_1 w}(t + t_{m_2}); \quad (4.2)$$

$$t_{m_1} = \arg\left(\max_t [\text{HT}(u_{r_1f_1w}(t))]\right), \quad t_{m_2} = \arg\left(\max_t [\text{HT}(u_{r_2f_1w}(t))]\right);$$

kur HT apibūdina Hilberto transformaciją; t_{m_1} , t_{m_2} – laiko momentai, atitinkantys signalų $u_{r_1f_1w}(t)$, $u_{r_2f_1w}(t)$ gaubtinės maksimumą. Signalo perstūmimas laiko ašyje grafiškai iliustruotas 4.2 pav. a dalyje.

4. Apskaičiuojamas kiekvieno laiko srityje perstumto signalo $u_{r_1f_1s}(t)$, $u_{r_2f_1s}(t)$ kompleksinis Furjė spektras:

$$U_{r_1f_1}(jf) = \text{FFT}[u_{r_1f_1s}(t)], \quad U_{r_2f_1}(jf) = \text{FFT}[u_{r_2f_1s}(t)] \quad (4.3)$$

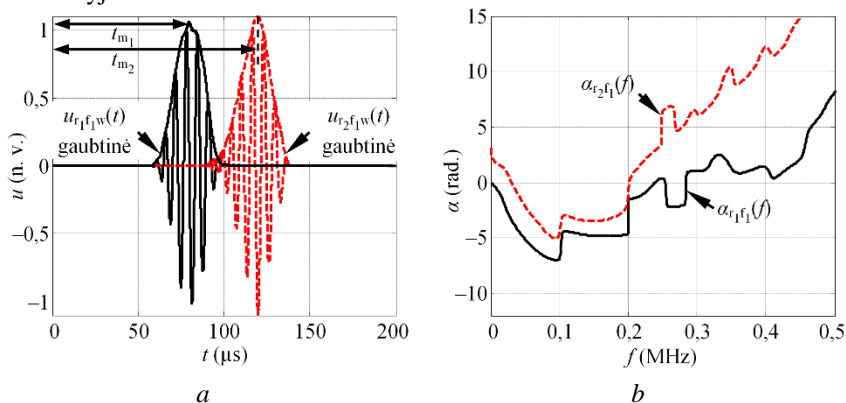
čia FFT – Furjė transformacija.

5. Nustatomas dviejų signalų $u_{r_1f_1s}(t)$, $u_{r_2f_1s}(t)$ fazių pokytis dažnių juostoje f :

$$\Delta\phi(f) = (\alpha_{r_1f_1}(f) - \alpha_{r_2f_1}(f)), \quad (4.4)$$

$$\alpha_{r_1f_1}(f) = \arctan\left[\frac{\text{Im}(U_{r_1f_1}(f))}{\text{Re}(U_{r_1f_1}(f))}\right], \quad \alpha_{r_2f_1}(f) = \arctan\left[\frac{\text{Im}(U_{r_2f_1}(f))}{\text{Re}(U_{r_2f_1}(f))}\right];$$

čia $\alpha_{r_1f_1}(f)$, $\alpha_{r_2f_1}(f)$ – signalų $u_{r_1f_1s}(t)$, $u_{r_2f_1s}(t)$ fazių spektrai – $\pi \dots \pi$ radianų diapazone. Signalų $u_{r_1f_1s}(t)$, $u_{r_2f_1s}(t)$ fazių spektrai pavaizduoti 4.2 pav. b dalyje.



4.2 pav. Signalų $u_{r_1f_1w}(t)$, $u_{r_2f_1w}(t)$ perstūmimas laiko srityje pagal Hilberto gaubtinės maksimumą (a) ir perstumtų signalų $u_{r_1f_1s}(t)$, $u_{r_2f_1s}(t)$ fazių spektrai (b)

6. Esant tam tikriems dažniams f_{k,f_1} , atitinkantiems lokaliuosius Furjė spektro maksimumus, apskaičiuojamas fazinis greitis:

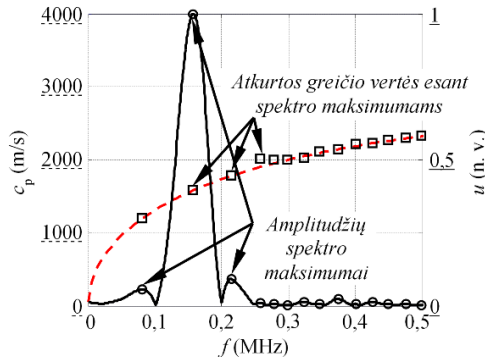
$$c_p(f_{k,f_1}) = \frac{2\pi f_{k,f_1} d}{\Delta\phi(f_{k,f_1}) - 2\pi f_{k,f_1} (t_{m_1} - t_{m_2})}; \quad (4.5)$$

kur f_{k,f_1} – dažniai, atitinkantys lokaliąsias maksimumo vertes Furjė amplitudžių spektre $|U_{r_1 f_1}(jf)|$; d – atstumas tarp imtuvų r_1 ir r_2 ($d = d_2 - d_1$). Fazinio greičio verčių atkūrimas pagal (4.5) lygtį grafiškai iliustruotas 4.3 pav.

7. Analogiškai randamos fazinio greičio vertės esant žadinimo dažniui f_2 ir t. t. Galutinė fazinio greičio dispersinė kreivė atkurama sukaupiant skaičiųvimų duomenis, kai keitiklio žadinimo dažniai $f_1 \dots f_m$:

$$c_p(f) = \{c_p(f_{k,f_1}), c_p(f_{k,f_2}), \dots, c_p(f_{k,f_m})\}; \quad (4.6)$$

kur m – žadinimo dažnių skaičius.



4.3 pav. Normuotas imtuvu r_1 priimto signalo amplitudžių spektras, kai žadinimo dažnis f_1 , su pažymėtomis lokališiomis spektro maksimumų padėtimis (harmonikomis), kuriose atkuriamos fazinio greičio vertės

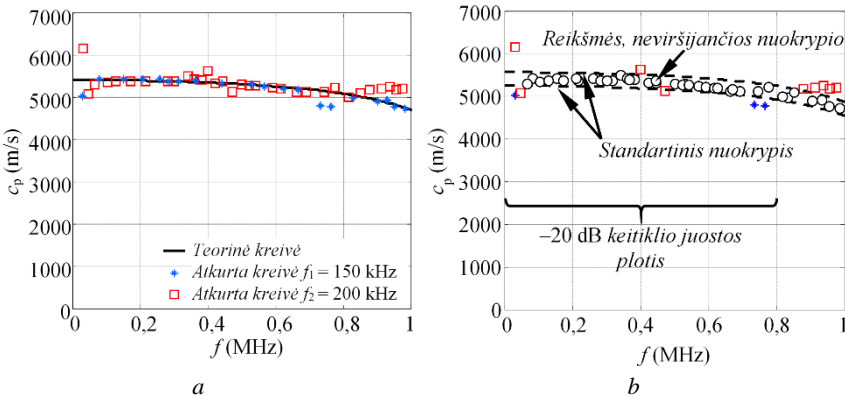
Šiuo algoritmu aprašytas fazinio greičio dispersinės kreivės atkūrimo metodas leidžia įvertinti modos fazinį greitį turint vos du matavimo taškus. Greičio atkūrimas esant lokališioms Furjė spektro maksimumo vėrtėms ir keičiant žadinimo dažnį taip pat leidžia dispersinę kreivę atkurti plačiame dažnių diapazone.

Pasiūlytas nukreiptųjų bangų fazinio greičio įvertinimo metodas buvo patikrintas atliekant modeliavimą baigtiniais elementais ir eksperimentinius tyrimus. Disertacijos santraukoje pateikiami tik eksperimentinio pagrindimo rezultatai, o su nukreiptųjų bangų signalų po modų virsmo greičio įvertinimu taikant baigtinių elementų metodą išsamiau susipažinti galima disertacijos 4.3 skyriuje. Eksperimentiniai pasiūlyto metodo tyrimai buvo atliekami aliuminio ir stiklo pluošto bandiniuose. Abiem atvejais bandiniuose užregistruoti signalai

buvo naudojami faziniam greičiui įvertinti pagal aprašytą algoritmą, o gautų rezultatų tikslumas palygintas su teorinėmis dispersinėmis kreivėmis tai pačiai struktūrai. Eksperimentiškai nustatytų greičio verčių išsibarstymas teorinės dispersinės kreivės atžvilgiu buvo įvertintas skaičiuojant standartinį nuokrypį:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2}; \quad (4.7)$$

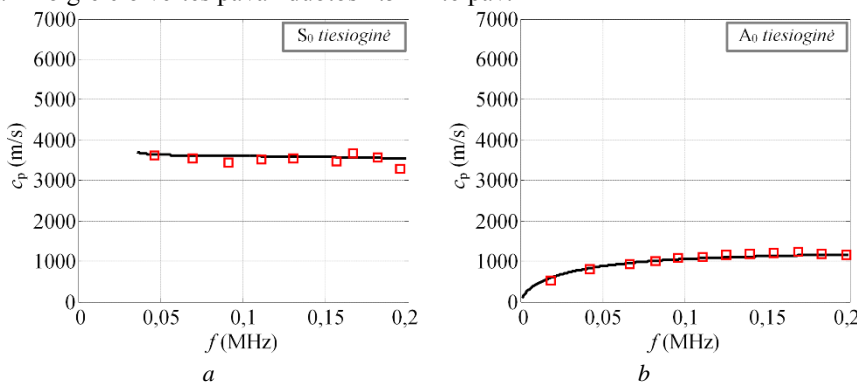
čia A – pasiūlytu metodu nustatytų fazinio greičio verčių deviacija teorinės dispersinės kreivės atžvilgiu ($A = c_p(f) - c_{pe}(f)$; $c_p(f)$ – teorinės greičio vertės; $c_{pe}(f)$ – greičio vertės, nustatytos iš eksperimentinių duomenų); μ – parametro A vidurkis. Eksperimentinio tyrimo aliuminio bandinyje rezultatai grafiškai iliustruoti 4.4 pav. Šio tyrimo metu buvo analizuojama tiesioginė S_0 moda, esant 3 periodų 150 kHz ir 200 kHz žadinimo signalo dažniams. Eksperimentai bei tyrimui naudotų keitiklių parametrai išsamiai aprašyti disertacijos 4.2 skyriuje. Eksperimentais nustatyta, kad standartinis nuokrypis S_0 modai aliuminio bandinyje yra 161,2 m/s. Analizuojant minėtus žadinimo dažnius, iš viso buvo atkurtos 52 diskrečiosios fazinio greičio vertės, kurių 40 (77 %) pateko į standartinio nuokrypio diapazoną. Iš rezultatų, pateiktų 4.4 pav. *b* dalyje, matyti, kad fazinio greičio vertės buvo tiksliai atkurtos dažnių ruože iki 0,8 MHz. Atsižvelgiant į tyrimams naudotų keitiklių dažnines charakteristikas, galima teigti, kad pasiūlytas metodas leidžia nustatyti fazinį greitį dažnių diapazone, kuris sutampa su keitiklio dažnių juosta –20 dB lygyje.



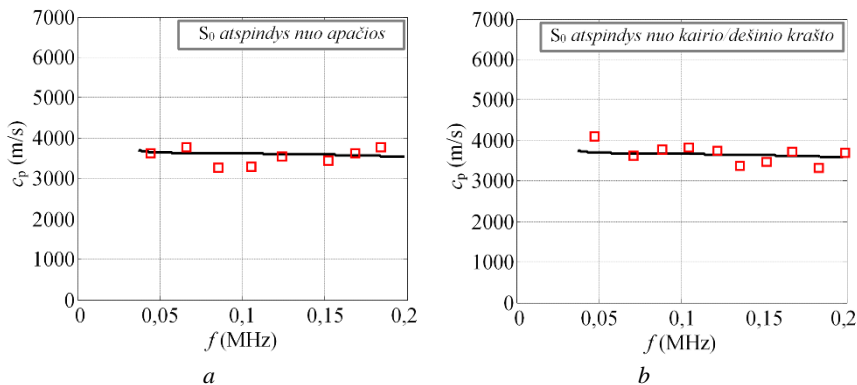
4.4 pav. Eksperimentiškai atkurtos S_0 modos fazinio greičio aliuminio bandinyje vertės esant 150 kHz ir 200 kHz žadinimo dažniui (*a*) ir standartinio nuokrypio iliustracija, rodanti nustatytų verčių išsibarstymą apie teorinę kreivę (*b*)

Eksperimentiniais tyrimais stiklo pluošto plokštelėje buvo siekiama nustatyti, kaip pasiūlytas metodas veikia analizuojant ne tik tiesioginius, bet ir

daug kartų atsispindėjusius ir iš dalies interferavusius signalus. Šįkart tyrimai buvo atliekami naudojant vieną žadinimo dažnį (100 kHz) ir analizuojant keturis signalus: A_0 ir S_0 modos tiesioginius signalus, S_0 modos atspindį nuo objekto apačios ir tos pačios modos atspindį nuo kairio (dešinio) bandinio krašto. Atkurtos fazinio greičio vertės pavaizduotos 4.5 ir 4.6 pav.



4.5 pav. Taikant pasiūlytą metodą eksperimentiškai atkurtos tiesioginių S_0 (a) ir A_0 (b) modų fazinio greičio dispersinės kreivės



4.6 pav. Eksperimentiškai atkurtos S_0 modos, atsispindėjusios nuo objekto apačios (a) ir nuo kairio (dešinio) krašto (b), fazinio greičio dispersinės kreivės

Eksperimentiškai nustatyta, kad šiuo atveju standartinis fazinio greičio nuokrypis tiesioginėms A_0 ir S_0 modoms (4.5 pav.) yra 75 m/s, vadinasi, vidutinė greičio atkūrimo paklaida yra iki 2,5 %. Atsispindėjusioms S_0 modoms (4.6 pav.) standartinis nuokrypis yra 213 m/s, tai sudaro apie 6 % paklaidą. Eksperimentiškai nustatytas standartinis nuokrypis skirtingiems nukreiptųjų bangų signalams stiklo pluošto plokštelėje pateiktas 4.1 lentelėje. Taigi tyrimo metu nustatyta, kad vidutinė pasiūlyto metodo paklaida yra apie 4 %. Galima palyginti: plačiai

taikoma dvimatė Furjė transformacija leidžia greitį atkurti maždaug su 1 % neapibrėžtimi, jei naudojami bent 64 signalai, sukaupti skirtingais atstumais [21]. O siūlomas metodas leidžia išvengti objekto skenavimo ir tiksliai atkurti dispersinės kreivės fragmentą plačiame dažnių diapazone, kuris sutampa su keitklio dažnių juosta –20 dB lygyje.

4.1 lentelė. Taikant pasiūlytą metodą nustatytų S_0 ir A_0 modų fazinių greičių stiklo pluošto bandinyje standartiniai nuokrypiai nuo teorinės dispersinės kreivės

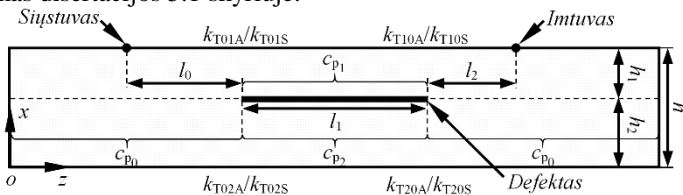
<i>Moda</i>	<i>Standartinis nuokrypis, σ (m/s)</i>
S_0 tiesioginė	97,4
A_0 tiesioginė	51,5
S_0 atspindys nuo apačios	202,7
S_0 atspindys nuo kairio (dešinio) krašto	224,5

5. ATSLUOKSNAVIMO DEFEKTŲ APTIKIMO, GYLIO IR MATMENŲ NUSTATYMO METODAS

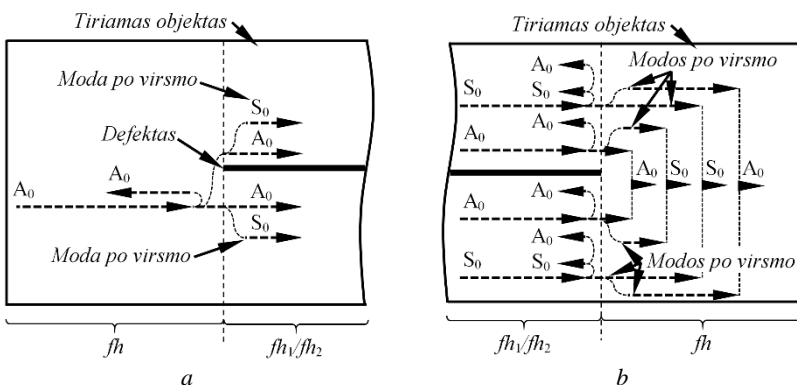
Anksčiau pasiūlyti signalų analizės ir interpretavimo metodai leidžia lengviau suprasti ir interpretuoti nukreiptųjų bangų sklaidimą apribotuose objektuose, neturiniuose defektų. Tačiau pagrindinis bet kokios stebėsenos sistemos tikslas yra aptikti atsiradusius defektus ir nustatyti jų parametrus. Literatūroje defektų aptikimas yra aprašomas kaip keturių žingsnių procesas, kuris apima defekto atsiradimo fakto, jo vietos, tipo ir įtakos objekto naudojimo laikui nustatymą. Šiuo metu yra daug metodų, kurie leidžia aptikti defektą ar net nustatyti jo vietą. Jie trumpai pristatomi disertacijos 1.5 skyriuje. Deja, siekiant prognozuoti defekto įtaką objekto tvirtumui, vien jo aptikti nepakanka, o tyrimų, kuriuose siūlomi defektų parametrų apibūdinimo metodai, nėra daug. Keletas tyrimų, kuriais siekta nustatyti defekto gylį ir matmenis, buvo atlikta N. Guo [23], E. A. Birtó [24] ir K. S. Tano [25]. Šių tyrimų pagrindu disertacijoje siūlomi atsisluoksnavimo defektų aptikimo, gylio ir matmenų nustatymo metodai kompozitinėms struktūroms. Pasiūlyti metodai yra palyginamieji, paremti analitinio skaičiavimo rezultatais ir grindžiami A_0 modos suvėlinimo laiko matavimu ir interferencijos už defekto analize. Šiuo atveju terminas „palyginamieji metodai“ reiškia, kad defektų parametrai nustatomi lyginant eksperimentiškai išmatuotas priklausomybes su analitiškai apskaičiuotomis tai pačiai struktūrai.

Pasiūlyto metodo veikimo principui iliustruoti santraukoje pirmiausia trumpai aptariama nukreiptųjų bangų A_0 modos sąveika su atsisluoksnavimo defektu objekte, kuris pavaizduotas 5.1 pav. A_0 modai susidūrus su atsisluoksnavimo tipo defektu, dalis bangos energijos atsispindi, dalis sklinda tolyn tos pačios A_0 modos ir pavirtusios į S_0 modą pavidalu. Atsisluoksnavimo defektas tiriamą struktūrą tarsi padalija į dvi dalis, todėl po sąveikos su defektu po dvi (A_0 ir S_0) modas atskirai sklinda tiek sluoksniu, esančiu virš defekto, tiek sluoksniu po defektu. Bangai pasiekus defekto galą vėl pasireiškia atspindžiai ir

modų virsmas. Grafiškai nukreiptųjų bangų sąveika su atsluoksniavimo defektu iliustruota 5.2 pav. Išsamiau A_0 modos sąveikos su defektu mechanizmas pristatomas disertacijos 5.1 skyriuje.



5.1 pav. Analizuojama 2D struktūra su atsluoksniavimo tipo defektu A_0 modos sąveikos mechanizmui iliustruoti



5.2 pav. Nukreiptųjų bangų A_0 modos sąveika su atsluoksniavimo defektu jo pradžioje (a) ir pabaigoje (b)

Šiame tyrime defektams aptikti ir jų parametrams nustatyti analizuojami du A_0 modos signalai, užregistruoti už defekto esančiu imtuvu: A_0 moda, kuri virsta į S_0 modą susidūrusi su defektu ir vėl virsta A_0 moda defekto pabaigoje (toliau vadinama A_0 moda po virsmo arba pakitusia A_0 moda), ir tiesiogiai prasklidusi A_0 moda (žr. 5.2 pav.). Matematiškai jie išreiškiami:

$$\begin{aligned}
 U_{IA_0}(\omega) &= U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{P_0A_0}, l_0) \cdot k_{T01A} \cdot H(\omega, c_{P_1S_0}, l_1) \cdot k_{T10S} \cdot \\
 &\cdot H(\omega, c_{P_0A_0}, l_2) + U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{P_0A_0}, l_0) \cdot k_{T02A} \cdot H(\omega, c_{P_2S_0}, l_1) \cdot \\
 &\cdot k_{T20S} \cdot H(\omega, c_{P_0A_0}, l_2) = \\
 &= \left(U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{P_0A_0}, L - l_1) \right) \cdot \left(k_{T01A} \cdot H(\omega, c_{P_1S_0}, l_1) \cdot k_{T10S} + \right. \\
 &\quad \left. + k_{T02A} \cdot H(\omega, c_{P_2S_0}, l_1) \cdot k_{T20S} \right),
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned}
U_{IIA_0}(\omega) &= U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_0) \cdot k_{T01A} \cdot H(\omega, c_{p_1A_0}, l_1) \cdot k_{T10A} \cdot \\
&\cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_2) + U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_0) \cdot k_{T02A} \cdot H(\omega, c_{p_2A_0}, l_1) \cdot \\
&\cdot k_{T20A} \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_2) = \\
&= \left(U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, L - l_1) \right) \cdot \left(k_{T01A} \cdot H(\omega, c_{p_1A_0}, l_1) \cdot k_{T10A} + \right. \\
&\quad \left. + k_{T02A} \cdot H(\omega, c_{p_2A_0}, l_1) \cdot k_{T20A} \right),
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$H(\omega, c_{pA_0}, l) = e^{-\alpha(\omega)x} e^{\frac{-jl\omega}{c_{pA_0}(\omega)}};$$

čia $U_{sA_0}(\omega)$ – sužadintos A_0 modos dažnių spektras; $H(\omega)$ – analizuojamos sistemos perdavimo funkcija; $\alpha(\omega)$ – slopinimo funkcija; $c_p(\omega)$ apibūdina fazinį greitį; l – bangos sklidimo atstumas; L – bendras atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo ($L = l_0 + l_1 + l_2$); k_{T01A} , k_{T02A} , k_{T10S} , k_{T20S} – perdavimo koeficientai A_0 ir S_0 modoms sluoksniui virš defekto ir po juo, skirtinguose defekto galuose. (5.1) išraiška aprašoma A_0 moda ($U_{IA_0}(\omega)$) po modų virsmo, kuri imtuvą pasiekia pirma, o (5.2) išraiška apibūdinama tiesioginė A_0 moda ($U_{IIA_0}(\omega)$).

Metodas defekto atsiradimui nustatyti. Disertacijoje pasiūlytas metodas defekto atsiradimui nustatyti pagrįstas pakitusios A_0 modos ($U_{IA_0}(\omega)$) (po modų virsmo) aptikimu. Jeigu struktūroje defektų nėra, imtuvą pasieks tik tiesioginė A_0 moda ($U_{IIA_0}(\omega)$) ir kitos modos, atsispindėjusios nuo objekto kraštų. O pakitusi A_0 moda ($U_{IA_0}(\omega)$) atsklinda greičiau nei tiesioginė ir gali būti naudojama kaip defekto atsiradimo indikatorius. Ji gali būti aptikta skaičiuojant slenkančio lango koreliaciją tarp eksperimentinio ir žadinimo signalų:

$$x(\tau) = \frac{\sum_{t=-\Delta\tau}^{\Delta\tau} u_e(t, \tau) \cdot u_{ref}(t)}{\sqrt{k_1 \cdot k_2}}; \tag{5.3}$$

čia $u_e(t, \tau)$ – eksperimentinis signalas; $u_{ref}(t)$ – žadinimo signalas. Siūlomas paprastas ir nuo aplinkos sąlygų nepriklausomas defekto aptikimo metodas. Tačiau jis nėra jautrus tais atvejais, kai defektas yra mažas, palyginti su bangos ilgiu, nes tada pakitusi ir tiesioginė A_0 modos gali susikloti laiko srityje. Be to, pakitusi moda gali būti sunkiai aptinkama ir tais atvejais, kai yra žemas santykis signalas–triukšmas.

Defekto gylio nustatymas. Siekiant nustatyti defekto gylį, pasiūlytas palyginamasis metodas, kurį taikant analizuojama skirtingais dažniais sužadintos tiesioginės A_0 modos ($U_{IIA_0}(t)$) amplitudė už defekto. Toks metodas tinka asimetriniams objekto storio atžvilgiu atsluoksniavimo defektams aptikti (kai $h_1 \neq h_2$, žr. 5.1 pav.) ir išnaudoja A_0 modos interferencijos už defekto dėsningumus

dėl skirtingo jos sklaidimo greičio sluoksnyje virš defekto ir po juo. Pasiūlytame metode eksperimentiškai nustatytas sužadintos ir pro defektą prasklidusios A_0 modos amplitudžių santykis $U_{A_0\text{exp}}$; jis pagal metodiką, aprašytą disertacijos 5.2 skyriuje, palyginamas su esant tam tikriems defekto parametrams analitiškai apskaičiuotu $U_{A_0\text{ref}}(f, h, x)$. Bendras defekto gylio nustatymo algoritmas gali būti aprašytas tokia tvarka:

1. Siekiant objekte sugeneruoti A_0 modą, siųstuvus E sužadinamas dažniu f_1 .
2. Sužadinta A_0 moda $U_{A_0}(t)$ priimama imtuvu R_{ref} ; apibūdinančiu signalą srityje, kurioje nėra defekto. O imtuvai R_i ($i = 1, \dots, N$) priima signalą $U_{IIA_0}(t)$, nusakantį stebimą objekto sritį, kurioje galimai yra defektas.
3. Esant žadinimo dažniui f_1 , apskaičiuojamas ir išsaugomas signalų $U_{A_0}(t)$ ir $U_{IIA_0}(t)$ pikinių amplitudžių santykis $U_{A_0\text{exp}f_1}$.
4. Ta pati procedūra kartojama esant kitiems žadinimo dažniams $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$; taip sukaupiamas eksperimentinių A_0 modos amplitudžių masyvas $U_{A_0\text{exp}}(f) = \{f, U_{A_0\text{exp}f_1}, U_{A_0\text{exp}f_2}, \dots, U_{A_0\text{exp}f_n}\}$.
5. Eksperimentinis A_0 modos amplitudžių masyvas $U_{A_0\text{exp}}(f)$ palyginamas su analitiškai apskaičiuotu $U_{A_0\text{ref}}(f, h, x)$, kuris nusako A_0 modos amplitudės kitimą esant skirtingam defekto gyliui (h) ir ilgiui (x). Kriterijai ieškant geriausio dviejų duomenų masyvo sutapimo aprašomi išraiškomis:

$$h_{\min_1} = \arg \min_h \left(\left| \text{mean}_x(u_{\text{mean}}(h, x)) \right| \right), \quad (5.4)$$

$$u_{\text{mean}}(h, x) = \text{mean}_f (U_{A_0\text{ref}}(f, h, x) - U_{A_0\text{exp}}(f)),$$

$$h_{\min_2} = \arg \min_h (u_{\text{std}}(h, x)),$$

$$u_{\text{std}}(h, x) = \text{std}_f (U_{A_0\text{ref}}(f, h, x) - U_{A_0\text{exp}}(f)), \quad (5.5)$$

kur h_{\min_1} , h_{\min_2} atitinka defekto gylį, rodantį geriausią eksperimentinio ir analitinio rezultato sutapimą; $U_{A_0\text{ref}}(f, h, x)$ – analitiškai suskaičiuotos amplitudžių priklausomybės; $U_{A_0\text{exp}}(f)$ – eksperimentiškai išmatuotos priklausomybės; h , x – atitinkamai defekto gylis ir ilgis, mean ir std apibūdina vidurkio ir standartinio nuokrypio skaičiavimo operacijas.

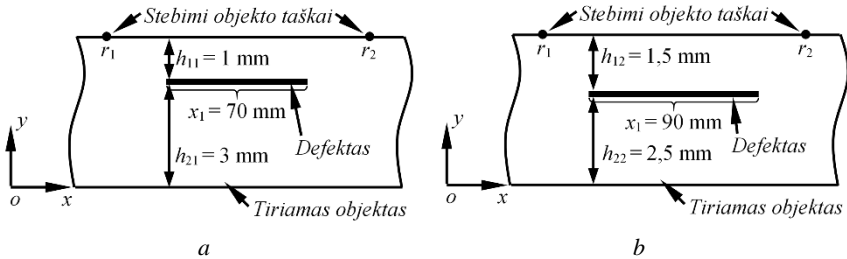
Remiantis pateiktu algoritmu, parametrai h_{\min_1} , h_{\min_2} nurodo defekto gylį, kuriam esant eksperimentiniai duomenys geriausiai sutampa su analitiniais.

Defekto ilgio įvertinimas. Atsisluoksniavimo defekto ilgis įvertinamas matuojant suvėlinimą Δt_{A_0} tarp A_0 ($U_{IA_0}(t)$) modos po virsmo ir tiesioginės A_0 ($U_{IIA_0}(t)$) modos, kuris yra proporcingas defekto ilgiui bangos sklaidimo kryptimi:

$$\Delta t_{A_0} = \arg \max_t [\text{HT}(U_{IIA_0}(t))] - \arg \max_t [\text{HT}(U_{IA_0}(t))]; \quad (5.6)$$

čia HT – Hilberto transformacija. Siūlomas defekto ilgio įvertinimo metodas paremtas suvėlinimų, aprašytų pagal (5.6) išraišką, įvertinimu esant skirtingiems žadinimo dažniams $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$. Vėliau gautos priklausomybės vėl palyginamos su analitiškai apskaičiuotomis priklausomybėmis. Disertacijos santraukoje nepateikiamos A_0 modos sklidimo laiko ir amplitudės priklausomybių skaičiavimo esant skirtingiems defekto parametrams metodikos ir jų patikrinimas. Su jomis galima susipažinti disertacijos 5.2 ir 5.3 skyriuose.

Pasiūlytas defektų aptikimo ir jų parametrų įvertinimo metodas buvo patikrintas baigtinių elementų metodu, analizuojant du atvejus, pateiktus 5.3 pav. Tyrimo metu analizuotos dvi 4 mm stiklo pluošto plokštelės. Pirmą plokštelę turėjo 70 mm ilgio atsiluoksniavimo defektą, esantį 1 mm gylyje. Antroje plokštelėje buvo sukurtas 90 mm ilgio defektas 1,5 mm gylyje.



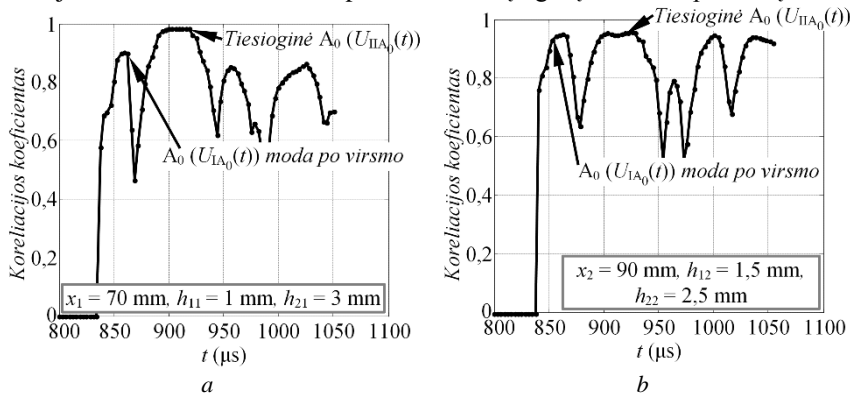
5.3 pav. Pasiūlytam metodui patikrinti analizuoti baigtinių elementų modeliai: bandinys su 70 mm ilgio defektu 1 mm gylyje (a) ir bandinys su 90 mm ilgio defektu 1,5 mm gylyje (b)

Defekto aptikimas. Pagal (5.3) formulę apskaičiuotos koreliacinės funkcijos tarp žadinimo signalo ir signalų, užregistruotų taške r_2 tiriamų bandinių paviršiuje, pateikiamos 5.4 pav. Rezultatai pateikiami esant 130 kHz žadinimo dažniui ir abiem atvejais rodo atsiradusią A_0 modą po virsmo prieš tiesioginį jos praėjimą. Nustatyta, kad esant 130 kHz žadinimo dažniui pakitusios A_0 modos $U_{IA_0}(t)$ amplitudė pirmajame bandinyje sudaro -10 dB, o antrajame – -4 dB praėjusio tiesioginio signalo $U_{IIA_0}(t)$.

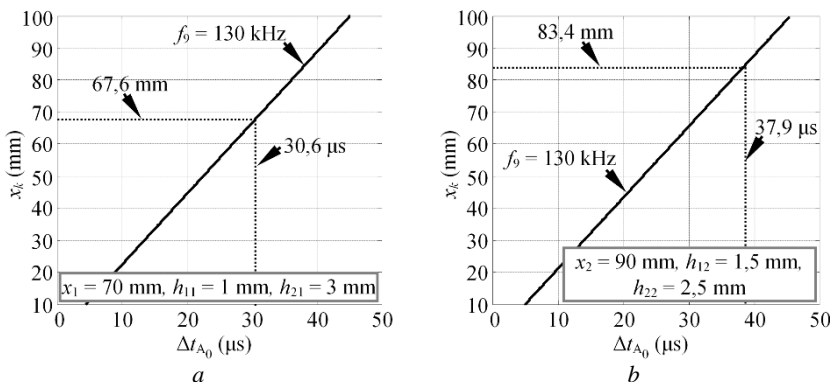
Defekto gylio įvertinimas. Defekto gyliui įvertinti palygintos modeliuotos ir analitiškai skaičiuotos tiesioginės A_0 modos amplitudės esant skirtingam žadinimo dažniui, defekto ilgiui ir gyliui analitiniame duomenų masyve. Iš viso buvo analizuojami trys skirtingi defekto gyliai ($h_{11} = 0,5$ mm ir $h_{21} = 3,5$ mm; $h_{12} = 1$ mm ir $h_{22} = 3$ mm; $h_{13} = 1,5$ mm ir $h_{23} = 2,5$ mm), iš kurių du atitiko tikrąjį defekto gylį baigtinių elementų modelyje. Pagal (5.4) ir (5.5) formules gauti įverčiai pateikti 5.1 lentelėje. Iš lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad mažiausios h_{\min} vertės pirmajam bandiniui gaunamos, kai analitiniame modelyje defektas yra

1 mm gylyje. Tai atitinka tikrąjį defekto gylį baigtinių elementų modelyje. O mažiausios h_{\min} vertės antrajame bandinyje gaunamos esant 1,5 mm defekto gyliui.

Defekto ilgio nustatymas. Defekto ilgiui įvertinti pagal (5.6) formulę nustatytas suvėlinimas tarp tiesioginės ir A_0 modos po virsmo; jis palygintas su analitiškai apskaičiuota priklausomybe tarp defekto ilgio ir suvėlinimo laiko. Rezultatai, gauti esant 130 kHz žadinimo dažniui, pateikiami 5.5 pav. Iš pateiktų duomenų matyti, kad nustatytas defekto ilgis pirmuoju atveju yra 67,6 mm, o antruoju – 83,4 mm. Tai sudaro apie 5 % defektų ilgio įvertinimo paklaidą.



5.4 pav. Slenkančio lango koreliacinės funkcijos pirmajam (a) ir antrajam (b) bandiniui, rodančios A_0 $U_{IA_0}(t)$ modos po virsmo atsiradimą



5.5 pav. Analitiškai apskaičiuota 130 kHz dažnio tiesioginės ir pakitusios A_0 modos suvėlinimo priklausomybė nuo defekto ilgio pirmajam (a) ir antrajam (b) bandiniui kartu su nustatytais defekto ilgio vertėmis

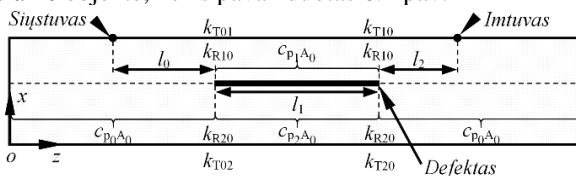
5.1 lentelė. $h_{\min 1}$ ir $h_{\min 2}$ vertės pirmajame ir antrajame analizuojamame bandinyje, kurios naudojamos defekto gyliui įvertinti

	I bandinys ($x_1 = 70$ mm, $h_{11} = 1$ mm)		II bandinys ($x_1 = 90$ mm, $h_{12} = 1,5$ mm)	
	$h_{\min 1}$	$h_{\min 2}$	$h_{\min 1}$	$h_{\min 2}$
$h_{11} = 0,5$ mm, $h_{21} = 3,5$ mm	-0,195	0,033	0,179	0,137
$h_{12} = 1$ mm, $h_{22} = 3$ mm	-0,03	0,018	0,344	0,091
$h_{13} = 1,5$ mm, $h_{23} = 2,5$ mm	0,034	0,035	0,158	0,036

6. ATSLUOKSNAVIMO DEFEKTŲ IMITAVIMO METODAS

Šiame skyriuje pristatomas metodas, skirtas imituoti atsisluoksniavimo defekto įtakai nukreiptųjų bangų signalams nesuardant tiriamo objekto struktūros. Ribotas sukurtų stebėsenos sistemų praktinis pritaikomumas lemia tokių metodų poreikį. Dauguma esamų metodų, skirtų korozijos, atsisluoksniavimo, įtrūkimų defektams aptikti stebėsenos sistemomis, yra gerai išbandyti laboratorinėmis sąlygomis, naudojant sumažintus objektų maketus su dirbtinai sukurtais defektais ir imituojant įvairias aplinkos sąlygas. Tačiau, tokią sistemą ir sukurtus algoritmus naudojant veikiančiam tikram objektui, kyla poreikis iš naujo patikrinti, ar sistema reaguoja į atsiradusį defektą ir veikia tinkamai. Deja, tikri objektai negali būti suardomi ar kitaip paveikiami, kaip yra įprasta atliekant tyrimus laboratorinėmis sąlygomis. Be to, nuolatos eksploatuojamų stebėsenos sistemų būklė blogėja, todėl pačios sistemos veikimas taip pat turi būti periodiškai tikrinamas. Dėl šių priežasčių kyla klausimas, kokiomis priemonėmis gali būti patikrinta, ar įdiegta stebėsenos sistema tikrame objekte veikia tinkamai. Taip pat svarbu nustatyti sistemos jautrį tam tikro dydžio ir įvairiose vietose esantiems defektams ne tik ją įdiegus, bet ir po tam tikro eksploatacijos laikotarpio.

Disertacijoje pasiūlytas metodas, kuris sudaro pagrindą stebėsenos sistemų kalibravimo ir tinkamumo įvertinimo tyrimams. Metodas leidžia atkurti pakartotinius tiesioginės A_0 modos atspindžius atsisluoksniavimo defekto viduje ant objekto paviršiaus pritvirtinus tam tikros geometrijos kalibravimo bloką. Metodo matematiniam adekvatumui įrodyti sakykime, kad analizuojamas tiesioginės A_0 bangos sklidimas ir daugkartiniai jos atspindžiai atsisluoksniavimo defektą turinčiame objekte, kuris pavaizduotas 6.1 pav.

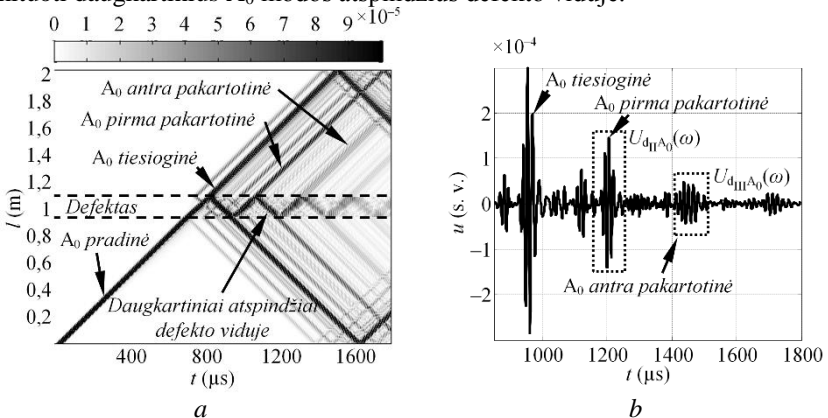


6.1 pav. Nukreiptųjų bangų sąveikai su defektu nustatyti analizuojama 2D struktūra

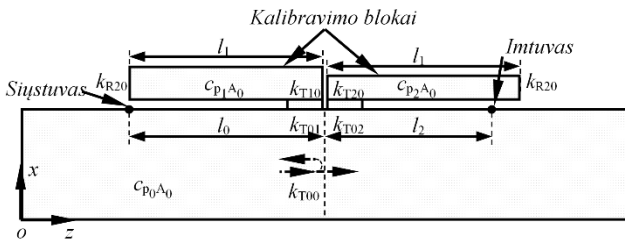
Apibendrintai tiesioginė A_0 moda ir daugkartiniai jos atspindžiai defekto viduje, atskleidę iki imtuvo, esančio atstumu L nuo siųstuvo, matematiškai gali būti išreiškiami:

$$U_{dA_0}(\omega) = (U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, L - l_1)) \cdot \sum_{N=0}^{N_g} \left((k_{T01} \cdot k_{T10} \cdot k_{R10}^{2N} \cdot H(\omega, c_{p_1A_0}, (2N+1) \cdot l_1)) + (k_{T02} \cdot k_{T20} \cdot k_{R20}^{2N} \cdot H(\omega, c_{p_2A_0}, (2N+1) \cdot l_1)) \right); \quad (6.1)$$

čia k_{T01} , k_{T02} , k_{T10} , k_{T20} – perdavimo koeficientai sluoksniui virš defekto ir po juo, atitinkamai defekto pradžioje ir jo gale; k_{R10} ir k_{R20} – atspindžio koeficientai sluoksniui virš defekto ir po juo; $N = 0, \dots, N_g$ – analizuojamas A_0 modos signalas; N_g – bendras analizuojamų daugkartinių atspindžių skaičius. Kai $N = 1$, (6.1) išraiška aprašo tiesioginę A_0 modą, prasklidusią pro defektą ir priimtą imtuvu. Kai $N > 1$, ši išraiška aprašo pakartotinius A_0 modos atspindžius defekto viduje. Šio tyrimo tikslas – atkurti pakartotinius A_0 modos atspindžius, aprašomus (6.1) išraiška, kai $N > 1$. Siekiami atkurti atspindžiai iliustruoti 6.2 pav., kuriame pateikiamas modeliuotas B tipo vaizdas ir signalas 1250 mm atstumu 4 mm storio stiklo pluošto plokštelėje su 150 mm ilgio atsisluoksniavimo defektu. Šio tyrimo metu siekiama atkurti atspindžius, 6.2 pav. *b* dalyje apibrauktus punktyrais. Tam siūloma kalibravimo bloko konfigūracija pateikiama 6.3 pav. Ji susideda iš dviejų bet kokios medžiagos detalių, kurių kiekviena atitinkamai imituoja bangos sklidimą sluoksnyje virš defekto ir po juo. Atitinkamai parenkant jų storį ir ilgį, su tam tikrais apribojimais juos galima susieti su defekto parametrais ir tokiu būdu imituoti daugkartinius A_0 modos atspindžius defekto viduje.



6.2 pav. Modeliuotas nukreiptųjų bangų vertikalios virpamojo greičio komponentės 4 mm stiklo pluošto bandinyje B tipo vaizdas, kai struktūroje yra 150 mm ilgio atsisluoksniavimo defektas 1,5 mm gylyje (*a*), ir atitinkamas signalas 1250 mm atstumu (*b*), rodantis siekiamus atkurti pakartotinius atspindžius



6.3 pav. Siūloma kalibravimo bloko konfigūracija, leidžianti imituoti daugkartinius A_0 modos atspindžius atsiluoksnavimo defekto viduje

Esant 6.3 pav. pasiūlytai konfigūracijai, pirmasis pakartotinis A_0 modos atspindys imtuve gali būti išreiškiamas:

$$\begin{aligned}
 U_{I_{H}A_0}(\omega) &= U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_0 + l_2) \cdot k_{T01} \cdot H(\omega, c_{p_1A_0}, 2l_1) \cdot k_{R20} \cdot \\
 &\cdot k_{T10} + U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_0 + l_2) \cdot k_{T02} \cdot H(\omega, c_{p_2A_0}, 2l_1) \cdot \\
 &\cdot k_{R20} \cdot k_{T20} = \\
 &= \left(U_{sA_0}(\omega) \cdot H(\omega, c_{p_0A_0}, l_0 + l_2) \right) \cdot \left(H(\omega, c_{p_1A_0}, 2l_1) \cdot k_{T01} \cdot k_{R20} \cdot k_{T10} + \right. \\
 &\left. + H(\omega, c_{p_2A_0}, 2l_1) \cdot k_{T02} \cdot k_{R20} \cdot k_{T20} \right).
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Akivaizdu, kad (6.1) išraiška, kai $N = 2$, ir (6.2) išraiška bus analogiškos, kai:

$$H(\omega, c_{p_xA_0}, 2 \cdot l_x) = \frac{H(\omega, c_{p_1A_0}, 3 \cdot l_1)}{H(\omega, c_{p_0A_0}, l_1)}. \tag{6.3}$$

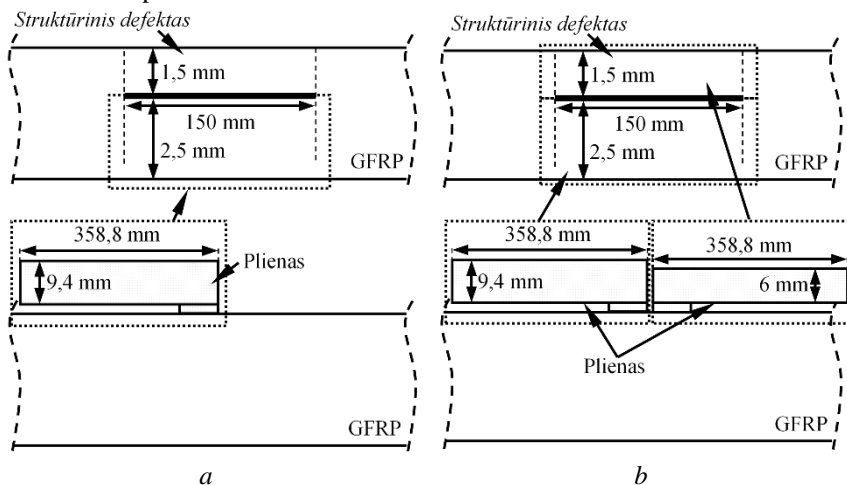
Pasinaudojant (6.3) išraiška gali būti apskaičiuojami kalibravimo bloko parametrai – ilgis ir storis, – priderinant jo parametrus prie defekto matmenų ir gylio. Sakykime, kad kalibravimo blokas gaminamas iš plieno ir žinomos jo dispersinės savybės ($c_{p_xA_0} = c_{p_{steel}}$). Tada bloko ilgis ir storis randamas išsprendus funkcijos minimizavimo uždavinį:

$$F(l_x, d) = \sum_{f=f_1}^{f_g} \left| \left(\frac{2 \cdot c_{p_1A_0} \cdot c_{p_0A_0}}{l_1 \cdot (3 \cdot c_{p_0A_0} - c_{p_1A_0})} + \frac{c_{p_{steel}}}{l_x} \right) \right|, \tag{6.4}$$

čia l_x , d – kalibravimo bloko ilgis ir storis. Išsamiau matematinė analogija tarp struktūrinio defekto ir siūlomos konfigūracijos yra paaiškinta disertacijos 6.1 skyriuje.

Pasiūlyta konfigūracija daugkartiniams A_0 modos atspindžiams imituoti buvo patikrinta atliekant nukreiptųjų bangų sklidimo modeliavimą baigtiniais elementais 4 mm storio stiklo pluošto plokštelėje. Iš viso buvo analizuojami trys

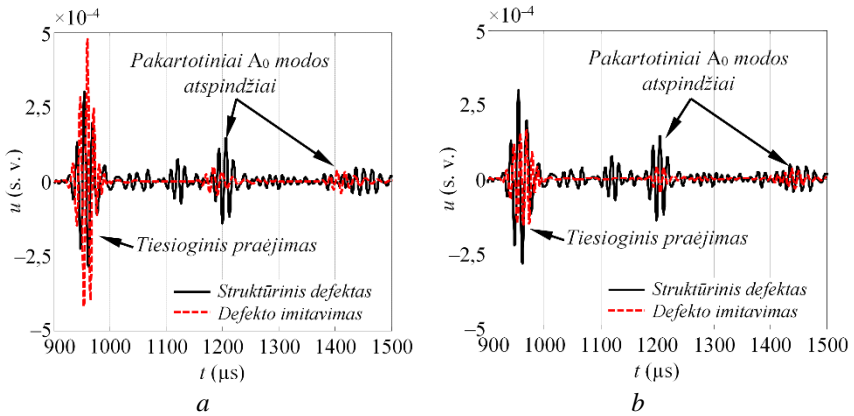
atvejai: plokštelė su struktūriniu 150 mm ilgio defektu, esančiu 1,5 mm gylyje; plokštelė su kalibravimo bloku objekto paviršiuje, kuris imituoja A_0 modos sklidimą tik sluoksnyje po defektu; plokštelė su dviem kalibravimo blokais, kurie imituoja tiek sluoksnį virš defekto, tiek sluoksnį po defektu. Tirti atvejai grafiškai iliustruoti 6.4 pav.



6.4 pav. Pasiūlytam metodui įvertinti analizuojami atvejai: kalibravimo blokas, kuris imituoja A_0 modos atspindžius tik sluoksnyje po defektu (a), ir kalibravimo blokas, imituojantis tiek sluoksnį virš defekto, tiek sluoksnį po defektu (b)

Naudojant (6.4) išraišką buvo nustatyta, kad 150 mm ilgio ir 2,5 mm storio sluoksnį po defektu atitinka plieninis blokas, kurio matmenys 358,8×9,4 mm. O tokio paties ilgio, tik 1,5 mm storio sluoksnį virš defekto atitinka plienas, kurio matmenys 358,8×6 mm. Modeliuojant gauti signalai (abiem tirtais atvejais) palyginti 6.5 pav.

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad pasiūlytas metodas leidžia atkurti pakartotinius A_0 modos signalus defekto viduje. Kiti atspindžiai ir modos po virsmo, matomos signale, užregistruotame objekte, kuris turi tikrą defektą, nėra atkuriami, nes pasiūlyta konfigūracija tinka tik tiesioginės A_0 modos daugkartiniams atspindžiams įvertinti. Siekiant nustatyti tirtų atvejų adekvatumą, gauti signalai buvo palyginti naudojant slenkančio lango koreliacinę funkciją, aprašytą (3.15) išraiška. Skaičiavimų rezultatai pateikti 6.1 lentelėje. Pasiūlytas defektų imitavimo metodas leidžia pakankamai tiksliai atkurti pakartotinius A_0 modos atspindžius jų sklidimo laiko atžvilgiu, ypač tuo atveju, kai imituojami abu sluoksniai: virš defekto ir po juo. Pasiūlyta konfigūracija gali būti naudojama stebėsenos sistemoms patikrinti, jautriui įvertinti bet kurioje objekto paviršiaus vietoje.



6.5 pav. Modeliavimo baigtinių elementų metodu palyginimas: signalai bandinyje su struktūriniu defektu ir kalibravimo bloku, imituojančiu bangos sklidimą sluoksnyje po defektu (a), ir signalai bandinyje su struktūriniu defektu ir kalibravimo bloku, imituojančiu sklidimą tiek virš defekto, tiek po juo (b)

6.1 lentelė. Slenkančio lango koreliacijos įverčiai, rodantys A_0 modos atspindžių formos sutapimą ir vėlinimą, kai lyginamas struktūrinis defektas ir jo imitacija

Signalas	Struktūrinis defektas ir I kalibravimo blokas		Struktūrinis defektas ir II kalibravimo blokas	
	Koreliacijos koeficientas	Vėlinimas (μ s)	Koreliacijos koeficientas	Vėlinimas (μ s)
I pakartotinis atspindys	0,86	22,5	0,98	0
II pakartotinis atspindys	0,77	26,88	0,92	1,875

IŠVADOS

1. Pasiūlyti ir ištirti ultragarsiniai stebėsenos metodai, kurie palengvina nukreiptųjų bangų signalų analizę bei interpretavimą ir leidžia aptikti, apibūdinti lakštinėse kompozitinėse struktūrose atsiradusius defektus ir patvirtinti jų atsiradimą. Pasiūlyti metodai padeda spręsti esmines su signalų analize ir defektų aptikimu susijusias problemas ir sudaro kompleksinį paprastesnio tokių sistemų realizavimo pagrindą.
2. Ištirta ir paaiškinta ultragarsinio keitiklio įtaka atskirų nukreiptųjų bangų modų spektrinėms charakteristikoms. Skaitmeniniu modeliavimu ir eksperimentiniais metodais įrodyta, kad kiekvienos modos amplitudžių spektras gali būti išreikštas kaip žadinimo signalo ir žadinimo funkcijos sandauga, kuri savo ruožtu priklauso nuo žadinimo tipo, tiriamos medžiagos savybių ir keitiklio dydžio. Pasiūlyta nauja žadinimo funkcijos apskaičiavimo metodika, pagrįsta virpamojo greičio pasiskirstymo

- žadinimo paviršiuje Furjė analize, kuri leidžia įvertinti ir iš anksto prognozuoti kiekvienos modos spektrinius išskrypimus po sužadavimo.
3. Pasiūlytas ir ištirtas analitinis modelis, skirtas palengvinti nukreiptųjų bangų sklidimo defektų neturiniuose objektuose analizei ir interpretavimui. Pademonstruota, kad pasiūlytas modelis leidžia analizuoti atskirų modų sklidimą, įvertinant daugkartinius bangos atspindžius, suskaičiuoti jų atėjimo į imtuvą laiko momentus ir nustatyti modų sklidimo trajektorijas. Nustatyta, kad pasiūlytas modelis leidžia pasiekti didelę greitaveiką ir santykinai didelį tikslumą, palyginti su plačiai taikomu baigtinių elementų metodu.
 4. Pasiūlytas nukreiptųjų bangų fazinio greičio dispersinės kreivės fragmento atkūrimo metodas, kuris leidžia nustatyti modos fazinį greitį plačiame dažnių diapazone, sutampančiame su keitiklio juosta -20 dB lygyje. Tam reikia dviejose skirtingose objekto vietose išmatuotų signalų. Nustatyta, kad, taikant pasiūlytą metodą, fazinis greitis atkuriamas vidutiniškai su ne didesne kaip 4 % paklaida, palyginti su teoriniais skaičiavimais, todėl jis gali būti naudojamas kaip įrankis siekiant įvertinti tikslų modų greitį tiriamame objekte ir atpažinti nežinomus signalus.
 5. Pasiūlytas palyginamasis metodas, skirtas aptikti ir apibūdinti atsiskuosiavimo defektams, grindžiamas A_0 modos žadinimu įvairiais dažniais keitiklio dažnių juostoje ir šios modos suvėlinimo laiko ir amplitudės po interferencijos matavimu. Tyrimais įrodyta, kad tiesioginė A_0 modos amplitudė yra jautri defekto gyliui, o suvėlinimas tarp tiesioginės A_0 modos ir A_0 modos po virsmo yra proporcingas defekto ilgiui. Nustatyta, kad pasiūlytas metodas leidžia įvertinti defekto matmenis su ne didesne nei 5 % paklaida.
 6. Sukurta specialaus kalibravimo bloko prototipo idėja. Šis kalibravimo blokas leidžia imituoti daugkartinius A_0 modos atspindžius defekto viduje nesuardant tiriamo objekto struktūros. Siūlomas prototipas paremtas bangos atspindžių imitavimu sluoksnyje virš defekto ir sluoksnyje po defektu, tokiu būdu gaunant reikiamą suvėlinimą tarp gretimų pakartotinių atspindžių. Matematiškai pademonstruota, kad, esant tam tikroms sąlygoms, pasiūlytas metodas yra adekvatus struktūriniam defektui, todėl išvystytas jis galėtų būti naudojamas stebėsenos sistemoms testuoti, jų jautrumui įvertinti tikruose objektuose.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. KESSLER, S. S., SPEARING, S. M. and SOUTIS, C. Damage Detection in Composite Materials using Lamb Wave Methods. *Smart Materials and Structures*, 2002, vol. 11, no. 2. pp. 269–278.
2. OCHÔA, P., INFANTE, V., SILVA, J. M. and GROVES, R. M. Detection of Multiple Low-Energy Impact Damage in Composite Plates using Lamb Wave Techniques. *Composites Part B: Engineering*, 10, 2015, vol. 80. pp. 291–298. ISSN 1359-8368.
3. YANG, F., et al. Experimental and Numerical Studies of the Oblique Defects in the Pipes using a Chaotic Oscillator Based on Ultrasonic Guided Waves. *Journal of Sound and Vibration*, 7/7, 2015, vol. 347. pp. 218–231. ISSN 0022-460X.
4. LEINOV, E., LOWE, M. J. S. and CAWLEY, P. Investigation of Guided Wave Propagation and Attenuation in Pipe Buried in Sand. *Journal of Sound and Vibration*, 7/7, 2015, vol. 347. pp. 96–114. ISSN 0022-460X.
5. SHARMA, A., SHARMA, S., SHARMA, S. and MUKHERJEE, A. Ultrasonic Guided Waves for Monitoring Corrosion of FRP Wrapped Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, 10/15, 2015, vol. 96. pp. 690–702. ISSN 0950-0618.
6. LU, Y., LI, J., YE, L. and WANG, D. Guided Waves for Damage Detection in Rebar-Reinforced Concrete Beams. *Construction and Building Materials*, 10, 2013, vol. 47. pp. 370–378. ISSN 0950-0618.
7. FARHIDZADEH, A. and SALAMONE, S. Reference-Free Corrosion Damage Diagnosis in Steel Strands using Guided Ultrasonic Waves. *Ultrasonics*, 3, 2015, vol. 57. pp. 198–208. ISSN 0041-624X.
8. RAIŠUTIS, R., et al. Ultrasonic Guided Wave-Based Testing Technique for Inspection of Multi-Wire Rope Structures. *NDT & E International*, 3, 2014, vol. 62. pp. 40–49. ISSN 0963-8695.
9. LOVEDAY, P. W. and LONG, C. S. Laser Vibrometer Measurement of Guided Wave Modes in Rail Track. *Ultrasonics*, 3, 2015, vol. 57. pp. 209–217. ISSN 0041-624X.
10. LI, F., et al. Propagation of Guided Waves in Pressure Vessel. *Wave Motion*, 1, 2015, vol. 52. pp. 216–228. ISSN 0165-2125.
11. RATHOD, V. T. and ROY MAHAPATRA, D. Ultrasonic Lamb Wave Based Monitoring of Corrosion Type of Damage in Plate using a Circular Array of Piezoelectric Transducers. *NDT & E International*, 11, 2011, vol. 44, no. 7. pp. 628–636. ISSN 0963-8695.
12. MUSTAPHA, S. and YE, L. Propagation Behaviour of Guided Waves in Tapered Sandwich Structures and Debonding Identification using Time Reversal. *Wave Motion*, 9, 2015, vol. 57. pp. 154–170. ISSN 0165-2125.
13. EREMIN, A. A., GLUSHKOV, E. V., GLUSHKOVA, N. V. and LAMMERING, R. Evaluation of Effective Elastic Properties of Layered Composite Fiber-Reinforced Plastic Plates by Piezoelectrically Induced Guided Waves and Laser Doppler Vibrometry. *Composite Structures*, 7, 2015, vol. 125. pp. 449–458. ISSN 0263-8223.
14. MASSEREY, B., RAEMY, C. and FROMME, P. High-Frequency Guided Ultrasonic Waves for Hidden Defect Detection in Multi-Layered Aircraft Structures. *Ultrasonics*, 9, 2014, vol. 54, no. 7. pp. 1720-1728. ISSN 0041-624X.

15. XU, B. and GIURGIUTIU, V. Single Mode Tuning Effects on Lamb Wave Time Reversal with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 26, no. 2. pp. 123. ISSN 0195-9298.
16. GRONDEL, S., et al. Design of Optimal Configuration for Generating A0 Lamb Mode in a Composite Plate using Piezoceramic Transducers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, vol. 112, no. 1. pp. 84.
17. LANZA DI SCALEA, F., MATT, H. and BARTOLI, I. The Response of Rectangular Piezoelectric Sensors to Rayleigh and Lamb Ultrasonic Waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, vol. 121, no. 1. pp. 175–187. Available from: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/121/1/10.1121/1.2400668>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/1.2400668>.
18. GRAVENKAMP, H., BIRK, C. and SONG, C. Simulation of Elastic Guided Waves Interacting with Defects in Arbitrarily Long Structures using the Scaled Boundary Finite Element Method. *Journal of Computational Physics*, 8/15, 2015, vol. 295. pp. 438–455. ISSN 0021-9991.
19. BENMEDDOUR, F., TREYSSÈDE, F. and LAGUERRE, L. Numerical Modeling of Guided Wave Interaction with Non-Axisymmetric Cracks in Elastic Cylinders. *International Journal of Solids and Structures*, 3/1, 2011, vol. 48, no. 5. pp. 764–774. ISSN 0020-7683.
20. ANDRIA, G., ATTIVISSIMO, F. and GIAQUINTO, N. Digital Signal Processing Techniques for Accurate Ultrasonic Sensor Measurement. *Measurement*, 9, 2001, vol. 30, no. 2. pp. 105–114. ISSN 0263-2241.
21. ALLEYNE, D. and CAWLEY, P. A Two-Dimensional Fourier Transform Method for the Measurement of Propagating Multimode Signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, vol. 89, no. 3. pp. 1159–1168. Available from: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/89/3/10.1121/1.400530>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/1.400530>.
22. SACHSE, W. and PAO, Y. On the Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 8. pp. 4320-4327. Available from: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/49/8/10.1063/1.325484>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.325484>.
23. GUO, N. and CAWLEY, P. Lamb Wave Reflection for the Quick Non-Destructive Evaluation of Large Composite Laminates. *Materials Evaluation*, 1994, vol. 52, no. 3. pp. 404–411. ISSN 0025-5327.
24. BIRT, E. A. Damage Detection in Carbon-Fibre Composites using Ultrasonic Lamb Waves. *Insight*, 1998, vol. 40, no. 5. pp. 335.
25. TAN, K. S., GUO, N., WONG, B. S. and TUI, C. G. Experimental Evaluation of Delaminations in Composite Plates by the use of Lamb Waves. *Composites Science and Technology*, 1995, vol. 53, no. 1. pp. 77–84. ISSN 0266-3538.

PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai, paskelbti Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. **Samaitis, V.**; Mažeika, L. Investigation of diffuse Lamb wave sensitivity to the through-thickness notch in structural health monitoring of composite objects // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2014, vol. 20, no. 3, p. 48–51. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source] [IF (E): 0,561 (2014)].
2. 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 // NDT & E international. Oxford: Elsevier Science. ISSN 0963-8695. 2014, vol. 62, p. 40–49. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Academic Search Premier; Chemical Abstracts (CAplus); Compendex; Science Direct] [IF (E): 2,225 (2014)].
3. Raišutis, R.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A.; Draudvilienė, L.; Griškevičius, P.; Juzėnas, K. Analysis of ultrasonic guided waves propagation in complex composite structures // International journal of structural stability and dynamics. Singapore: World Scientific Publishing Co. ISSN 0219-4554. 2014, vol. 14, iss. 8, Article No. 1440024, p. [1–19]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Current Contents (Engineering, Computing & Technology); Scopus] [IF (E): 0,764 (2014)].
4. Raišutis, R.; Kažys, R.; Mažeika, L.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Draudvilienė, L.; Vladišauskas, A. An adjustment-free NDT technique for defect detection in multilayered composite constructions using ultrasonic guided waves // International journal of structural stability and dynamics. Singapore: World Scientific Publishing Company. ISSN 0219-4554. 2014, vol. 14, iss. 8, Article No. 1440025, p. [1–15]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Current Contents (Engineering, Computing & Technology); Scopus] [IF (E): 0,764 (2014)].

Straipsniai, paskelbti recenzuojamų tarptautinių mokslinių konferencijų pranešimų medžiagoje

1. Raišutis, R.; Kažys, R.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Draudvilienė, L.; Vladišauskas, A. The contact type NDT technique for defect detection in multi-layered composite constructions using ultrasonic guided waves // Application of contemporary non-destructive testing in engineering: conference proceedings of the 12th international conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Portorož, 4–6 September 2013, Slovenia. Ljubljana: Slovenian Society for Non-Destructive Testing, 2013, ISBN 9789619353707. p. [1–7].
2. Raišutis, R.; Mažeika, L.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A.; Mayorga, P.; Garcia, A.; Correa, M.; Neal, B. Application of ultrasonic guided waves for investigation of composite constructional components of tidal power plants // Application of contemporary non-destructive testing in engineering: conference proceedings of the 12th international conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing,

Portorož, 4–6 September 2013, Slovenia. Ljubljana: Slovenian Society for Non-Destructive Testing, 2013, ISBN 9789619353707. p. [1–8].

3. Raišutis, R.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A.; Draudvilienė, L.; Griškevičius, P.; Juzėnas, K. Application of ultrasonic guided waves for investigation of composite constructions made of honeycomb materials // Mechatronic systems and materials: abstracts of the 11th international conference, MSM 2015, 7–9 July 2015, Kaunas, Lithuania. Kauno technologijos universitetas. ISSN 1822-8283. 2015, p. 29–30.

Santraukos mokslinių konferencijų medžiagoje

1. **Samaitis, V.**; Mažeika, L. Novel NDT technique for detection of delamination type defects in structural health monitoring of composites. „19th World Conference on Non-Destructive Testing WCNDT“, Miunchenas, Vokietija, 2016.06.13–17.
2. Raišutis, R.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A.; Draudvilienė, L.; Griškevičius, P.; Juzėnas, K. Application of ultrasonic guided waves for investigation of composite constructions made of honeycomb materials. „11th international conference on Mechatronic systems and materials“, Kaunas, Lietuva, 2015.07.07–09.
3. Mažeika, L.; **Samaitis, V.**; Kažys R.; Wilkinson, A.; Deere, M. Application of the SAFT at low frequencies for detection of the concentrated defect in sprinkler pipe. „6th International Conference on Emerging Technologies in NonDestructive Testing“, Briuselis, Belgijos Karalystė, 2015.05.27–29.
4. **Samaitis, V.**; Mažeika, L. Investigation of spatial filtering effects on generation and mode identification of ultrasonic guided waves. „11th International Conference on Non-Destructive Testing ECNDT“, Praha, Čekijos Respublika, 2014.10.06–10.
5. Raišutis, R.; Kažys, R.; Mažeika, L.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Draudvilienė, L.; Vladišauskas, A. Application of ultrasonic guided waves for testing and structure health monitoring of honeycomb based composite constructions. „11th International Conference on Non-Destructive Testing ECNDT“, Praha, Čekijos Respublika, 2014.10.06–10.
6. **Samaitis, V.**; Mažeika, L. Influence of dimensions of the transducers on guided wave mode identification in structural health monitoring of composite objects. „11th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies“, Mančesteris, Jungtinė Karalystė, 2014.07.09–13.
7. Raišutis, R.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A.; Draudvilienė, L.; Griškevičius, P.; Juzėnas, K. Analysis of ultrasonic guided waves propagation in Honeycomb composite structures. Tarptautinis seminaras „Nonlinear and Multiscale Dynamics of Smart Materials in Energy Harvesting“, Liublinas, Lenkija, 2014.02.17–18.
8. **Samaitis, V.**; Mažeika, L.; Raišutis, R. Application of diffuse guided waves for detection of originating defects in structural health monitoring of composite objects. Tarptautinis seminaras „Nonlinear and Multiscale Dynamics of Smart Materials in Energy Harvesting“, Liublinas, Lenkija, 2014.02.17–18.

9. Mažeika, L.; Raišutis, R.; Kažys, R.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A. Structural health monitoring of wind turbine blades using ultrasonic guided waves. „International Symposium on Piezocomposite Applications“, Dresdenas, Vokietija, 2013.09.19–20.
10. Raišutis, R.; Mažeika, L.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A.; Maragoya, P.; Garcia, A.; Correa, M.; Neal, B. Application of ultrasonic guided waves for investigation of composite constructional components of tidal power plants. „12th International Conference on Application of Contemporary Non-destructive testing in Engineering“. Portorožas, Slovėnija, 2013.09.04–06.
11. Raišutis, R.; Kažys, R.; Mažeika, L.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Draudvilienė, L.; Vladišauskas, A. The contact type NDT technique for defect detection in multi-layered composite constructions using ultrasonic guided waves. „12th International Conference on Application of Contemporary Non-destructive testing in Engineering“. Portorožas, Slovėnija, 2013.09.04–06.
12. **Samaitis, V.**; Mažeika, L.; Raišutis, R.; Kažys, R. Application of diffuse guided waves for detection of originating defects in structural health monitoring of composite objects. „The Tenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies“, Krokva, Lenkija, 2013.07.18–20.
13. **Samaitis, V.**; Mažeika, L. Investigation of diffuse Lamb wave sensitivity to the through-thickness notch in structural health monitoring of composite objects. „17th International Conference on Electronics 2013“, Palanga, Lietuva, 2013.07.17–19.
14. Raišutis, R.; Kažys, R.; Mažeika, L.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.**; Jankauskas, A. Investigation of propagation of ultrasonic guided waves along twisted multi-wire ropes. „International Congress on Ultrasonics ICU2013“. Singapūras. 2013.05.02–05.
15. **Samaitis, V.**; Mažeika, L.; Raišutis, R.; Kažys, R. Application of ultrasonic guided waves for monitoring of the constructional components made of multi-layered composites. The „19th International Congress on Sound and Vibration“. Vilnius, Lietuva, 2012 07 08–12.

Studijų literatūra

Mokomosios knygos

1. Jasiūnienė, E.; Žukauskas, E.; **Samaitis, V.** Ultragaros matavimų laboratoriniai darbai: mokomoji knyga / Kauno technologijos universitetas. Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas. Kaunas: Technologija, 2013. 91 p. ISBN 9786090208359.

INFORMACIJA APIE DISERTACIJOS AUTORIŲ

Vykintas Samaitis gimė 1987 m. Kaune.

Išsilavinimas

- 2006 m. baigė Kauno Eigulių vidurinę mokyklą.
- 2010 m. su pagyrimu baigė Kauno technologijos universitetą (Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetą) ir įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį.
- 2012 m. su pagyrimu baigė Kauno technologijos universitetą (Telekomunikacijų ir elektronikos fakultetą) ir įgijo matavimų ir metrologijos magistro kvalifikacinį laipsnį.
- 2012–2016 m. studijavo elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties (01T) doktorantūroje Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute.

Darbo patirtis

- 2010–2013 m. Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute dirbo inžinieriumi.
- Nuo 2013 m. Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute dirba jaunesnioju mokslo darbuotoju.

Svarbiausi pasiekimai

Vykintas Samaitis yra 10 mokslinių publikacijų bendraautoris. 5 iš jų paskelbtos mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą. Jis taip pat yra 22 tarptautinių konferencijų pranešimų autorius, svariai prisidėjęs prie daugiau kaip 8 tarptautinių Europos 7-osios bendrosios programos projektų įgyvendinimo Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute. Už mokslinius rezultatus 2014–2016 m. gavo Lietuvos mokslo tarybos stipendiją. 2016 m. apdovanotas Amerikos akustikų sąjungos stipendija ir KTU rektoriaus padėka už universiteto vardo garsinimą. Nuo 2016 metų yra Amerikos akustikų asociacijos narys.

El. paštas vykintas.samaitis@ktu.lt

ABSTRACT

Relevance of the work

The integrity assessment is critical to maintain the safe, reliable and optimal performance of ageing in-service engineering structures. The use of non-destructive testing (NDT) techniques in the areas of nuclear and green energy, aerospace and civil infrastructure allows the structural integrity to be assessed, to estimate and prolong the expected life-cycle, to minimize the risk of catastrophic failures or any other unexpected incidents. However, the conventional NDT techniques are not optimized in terms of periodicity, usually require disassembly (to have access to parts), are quite operator dependent, and are slow and costly, especially for large engineering structures. Various studies reveal that up to 27% of an aircraft life-cycle cost is spent on conventional inspection and repair routines [1]. As an alternative for conventional NDT, a structural health monitoring (SHM) systems may be used, which provides an on-demand health inspection through embedded sensors. It enables the periodic maintenance with condition-based maintenance to be changed, to minimize downtime and human involvement, to avoid dismounting parts and to ensure constant reliability and maintenance costs during the whole life-cycle of the structure. According to different sources, an effective SHM reduces the maintenance costs and inspection time from 30% to 40% [2].

One of the most promising inspection techniques for SHM in terms of sensitivity to damage and propagation range is ultrasonic guided waves (GW). The GW are sensitive to the change in elastic modulus of the material and possess minor amplitude damping, which enables large structures to be inspected using only a few measurement positions and to detect both surface and internal defects. GW based SHM provides fast, low-cost inspection with good spatial coverage and the ability to inspect structures under water, ground, coatings or insulation. Many studies have been carried out on the application of guided waves (GW) for damage detection in pipes [3, 4], concrete structures [5 ,6], steel strands [7, 8], rails [9], pressure vessels [10], metallic structures [11], composites [12 ,13] and other aircraft components [14].

The application of GW in such a wide variety of areas, looking for different kinds of defects, shows huge potential for GW inspection, unfortunately there is still a lack of practical applications due to its complicated propagation physics. The GW possess multiple wave modes, each with different dispersive and directional properties. This leads to many distorted wave packets traveling in the structure with a different frequency and direction dependent velocities. Moreover, mode conversion occurs after the interaction of the GW with an object's boundaries or with other reflectors, such as defects. As a result, the signals captured from the structure are distorted and overlapped, while the damage-scattered components are concealed within. All these challenges require the

development of an advanced signal analysis methods that would help to analyse, interpret and predict the complex behaviour of the GW and to extract the information about the presence of damage.

The current success of the SHM systems relies on the comparison between two system states, the current and the baseline. Typically, when the transducers are permanently attached to the surface of the structure, the initial time traces between all the possible transducer pairs are recorded and referred as baseline data. Then in order to detect the damage, the algebraic difference is calculated between the current time trace and the baseline, which represents the structure without the damage. As a result, the residual signal ideally should contain the information only about the damage, removing all possible boundary reflections. From the NDT technique development point of view, this approach is not attractive due to difficulties in verification and calibration of the monitoring system. Moreover, such approach gives an indication about the presence of damage only, however, it does not say anything about the features (type, size, depth, location) of the defect.

In order to verify that a certain type of defect has been detected, the appropriate database of the experiments on the reference samples with artificial defects possessing known parameters (size, depth, position) is required. Then the residual signal captured during the operational life of the structure can be compared to the residuals from the defective reference sample database, looking for the best match. However, considering the variety of possible defects and the fact that there are no two identical structures, such database of the reference experiments becomes very large, impractical and unreliable, especially for complex structures. Moreover, the defects are usually weak reflectors whereas the amplitude of the residual can be significantly affected by the environmental and operational conditions, such as temperature and loads. Therefore, currently the baseline comparison can only give an indication about the changes in the structure, but unfortunately cannot be used for reliable damage detection and feature extraction. This leads to the **scientific hypothesis** that special signal processing methods exist, which would allow the guided wave interaction within the analysed structure to be understood and to be able distinguish changes that are caused by the originating defects.

Objective and tasks

The **objective of the thesis** is to develop ultrasonic guided wave methods for structural health monitoring of plate-like structures, enabling the feature extraction of detected damage, and techniques for the validation of the monitoring system.

In order to achieve the objectives, the following tasks were foreseen:

1. To investigate and explain the mechanism of GW generation, and to develop mathematical methods to analyse and predict the spectral characteristics of separate GW mode packets.

2. To develop and verify an analytical model that simplifies the analysis and interpretation of the complex propagation of GW in plate-like anisotropic structures.
3. To create and validate the methods for GW phase velocity estimation in multimodal, overlapped signals captured by spatially distributed sensors, which can be used for the identification of unpredicted modes and modal decomposition purposes.
4. To propose and investigate methods for the detection of the delamination type defects and extraction of its features such as the size and the depth.
5. To create and validate methods suitable for the verification and calibration of the monitoring system, without using the database of the reference samples, that describe different states of the damage.

Scientific novelty

1. The novel mathematical approach for GW data analysis was proposed, which allow the frequency response of GW modes on any structure under any excitation conditions to be analysed and predicted if input parameters are known. The method relates the frequency response of a single generated GW mode to the spatial particle velocity distribution at the excitation area, dimensions of the transducer and dispersive properties of the material.
2. The analytical model was developed for the rapid analysis of the propagation of GW signals. The model allows the propagation of separate GW mode packets in the plate-like rectangular anisotropic structures to be analysed, to calculate the arrival times after multiple reflections at virtual receivers positioned anywhere on the object and to retrace the wave propagation paths at specific time intervals.
3. The method for the GW phase velocity estimation was introduced, which is based on the phase spectrum method. The method requires only two time-series measured at different locations and enables the segment of the dispersion curve of the phase velocity to be reconstructed within the -20 dB level frequency bandwidth of the transducer, thus identify the unpredicted modes in the multimodal signals.
4. The novel method was proposed for the detection and description of delamination type defects in composite structures. The method exploits the frequency sweep excitation and combines the set of analytically calculated dependencies to detect the damage and to extract its features, such as size and depth.
5. The novel technique was proposed for the verification and calibration of the monitoring system, which is based on the non-destructive imitation of signal trapping behaviour within the delamination, which is commonly observed in the presence of such defect. The technique enables to get the similar

response in terms of time-of-flight as the structural delamination type defects.

Practical value of the work

1. The proposed signal analysis methods can be used as a framework to predict the complex mechanism of guided wave generation, to analyse multi-modal propagation and to decompose the GW signals captured on plate-like anisotropic structures.
2. The developed ultrasonic measurement methods can be used as a tool to detect and extract the size and depth of the delamination type defects situated across the path of permanently attached sensors.
3. The presented ideas related to the verification and calibration of SHM systems can be used as a basis for development of novel non-destructive structural defect imitation techniques, which can be further used to solve the issues related to the estimation of sensitivity to certain types of defects, minimum detectable defect size and etc.
4. Most of the methods presented in this research are designed in a way not to be attached to the particular structure and exploits the dispersive properties of composite materials, which can be easily modified. Thus the proposed methods can be applied to different types of materials with different properties and other parameters. Only a few of the proposed methods rely on the geometrical shape of the investigated object.

Some parts of this work were used in the reports of the following international projects:

- European Union Framework Programme 7 (FP7) project (SME-2012-1-315207) “In-situ wireless monitoring of on an offshore wind turbine blades using energy harvesting technology – Demonstration/ WINTUR Demo”.
- European Union Framework Programme 7 (FP7) project (SME-2011-1-286989) “Demonstration of a Condition Monitoring System for Tidal Stream Generators / TIDALSENSE DEMO”.
- European Social Fund (ESF) programme project (VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-015) “Micro sensors, Microprocessors and Microcontrollers for Mechatronic Systems / Go-Smart”.

Approbation

The scientific results obtained during the period of the dissertation were published in 7 publications: 4 articles were published in international journals referred in Thomson Reuters ISI Web of Science, while the other 3 publications were accepted to the reviewed proceedings of international conferences. The results were also presented in 15 international conferences held in Kaunas, Vilnius, Palanga, Singapore, Portoroz, Prague, Krakow, Lublin, Manchester,

Dresden, Brussels and Munich. In 2014–2016, a doctoral scholarship, provided by the research council of Lithuania, was received. In 2016, the research was granted an international student grant by the Committee for International Research and Education (CIRE) of the Acoustical Society of America (ASA).

Results presented in defence of the thesis

1. The excitability function estimation technique, which enables the frequency response of separate guided wave modes to be predicted, based on the material properties of the structure, size of source and type of excitation.
2. The analytical model for analysis and interpretation of GW propagation in plate-like anisotropic structures, which provides the arrival times of separate wave packets after multiple reflections and enables wave propagation paths to be retraced.
3. Enhanced phase velocity estimation techniques, based on the phase spectrum method, which enables the accuracy of the conventional method to be improved and to effectively use it in SHM applications.
4. The method to detect and evaluate the size and depth of delamination type defects in composite structures, based on the arrival time estimation and constructive/destructive interference of the A_0 mode.
5. The structural damage imitation technique, which enables the reproduction of the delamination type defect in terms of ToF of the “trapped” wave without intervention into the structure.

Structure and coverage of the thesis

The thesis consists of an introduction, six chapters, conclusions, list of references and authors scientific publications. Overall the dissertation is composed of 152 pages, including 74 figures, 147 equations, 5 tables and 260 bibliographic references. The contents of the thesis are organized as follows:

1. In the first chapter, the extensive review of available literature is presented, which reveals the existing gaps and open areas, where the new SHM methods and signal processing techniques are required. The current state of the art in different SHM areas, such as means of guided wave simulation, selective mode excitation, signal processing and damage detection is presented as well as the tasks of the research are anticipated.
2. The second chapter presents the study on the source influence to the excitation of GW. The developed excitability function estimation technique is introduced, theoretically formulated and verified with the numerical simulations and experiments on glass fibre reinforced plastic (GFRP) and aluminium samples.
3. The third chapter reveals the concept of the developed analytical model for analysis and interpretation of GW propagation in plate-like structures. The

major benefits and limitations of the proposed technique are discussed, using the numerical finite element (FE) method as a reference.

4. In the fourth chapter the developed guided wave phase velocity estimation technique is formulated, followed by numerical and experimental validation. The accuracy of the proposed technique is discussed, by comparing the extracted phase velocities of direct and reflected/converted modes with the theoretical predictions.
5. The fifth chapter presents the method to detect and describe the delamination type damage in composite structures. The physics of general GW interaction with a delamination type defect is presented and the theoretical foundation of the proposed technique is introduced. The operation of developed method is verified detecting defects of different sizes situated at different depths.
6. In the sixth chapter, the approach to non-destructively imitate the delamination type defect is briefly introduced. The adequacy of the proposed set-up in terms of ToF of the repetitive A_0 mode transmissions is mathematically proved and demonstrated by numerical modelling on a GFRP composite sample.

CONCLUSIONS

1. In this thesis, the set of novel ultrasonic signal analysis and interpretation methods, which are mandatory in order to properly analyse the complex behaviour of GW, to extract the features of detected damage and to validate the monitoring system, were proposed. The methods developed in this research, aim to solve the most essential problems in the field of guided wave structural health monitoring.
2. The source influence on the frequency response of guided wave modes was demonstrated and explained. It was shown with the numerical simulations and the experiments that the frequency response of each guided wave mode is a product of the spectrum of excitation pulse and the excitability function, which itself depends on the loading type, material properties and size of source. Novel excitability function estimation technique based on Fourier analysis of particle velocity distribution on the excitation area was proposed, which enables to estimate the response amplitude as a function of frequency separately for each mode under any type of complex surface loading. The technique developed in this study was validated with the appropriate numerical simulations and experiments and can be further used as a tool to explain and predict differences in frequency bandwidths of each guided wave mode.
3. The analytical model, which enables to better understand, analyse and interpret the propagation of GW in plate-like structures has been developed. The proposed model allows to analyse the propagation of separate GW

mode packets in the plate-like rectangular structures, to calculate the arrival times of the wavepackets after multiple reflections at virtual receiver positioned anywhere on the object and to retrace the wave propagation paths at specific time intervals. It was demonstrated that the proposed model offers tremendous improvement in terms of solution time of transient wave propagation problem, compared to the commonly used FE method and provides high accuracy in terms of ToF of different wavepackets if the initial phase and group velocities are properly defined.

4. The method for phase velocity estimation based on phase spectrum technique was developed. The proposed method enables to reconstruct the dispersion relations in the -20 dB level bandwidth of the transducer, employing the time series measured at two distinct locations. In contrast to the conventional phase spectrum technique, the proposed method is applicable to the narrowband transducers, maintaining the wide reconstruction bandwidth and accurate velocity estimation. It was determined that experimentally the velocities are estimated with an average spread of 4%, compared to the theoretical predictions. The incident modes are reconstructed more accurately (with deviation up to 2.5%), while the reflected modes are spread out over a wider range of values, up to the 6%. Due to the abovementioned reasons the proposed method can be effectively used in SHM systems as the tool to estimate the actual velocity of GW modes in the structure and to identify unknown reflections.
5. The model based baseline method to detect and describe the delamination type defect was proposed, exploiting the frequency sweep excitation, mode conversion and constructive/destructive interference of the A_0 mode. It was shown that the magnitude of the direct transmission of A_0 mode appeared to be significantly sensitive to the depth of damage, meanwhile the delay time between the direct and converted transmission of A_0 mode can be reliably used for damage size extraction. The investigations revealed that the proposed features of A_0 mode can tell the depth and the size of damage with an error of approximately 5% even in relatively thin structures, at wavelengths which are at least twice as the thickness of investigated structures.
6. The technique to non-destructively imitate the delamination type defect in terms of wave trapping inside the defect was proposed, which uses the two-beam structure attached to the surface of the sample, where each of them represents wave propagation in the layer above and below the defect. The proposed set-up was mathematically validated showing that under the certain circumstances it may be adequate to the structural damage in terms of ToF between the repetitive A_0 wave transmissions. This technique can be used as a tool to proof the correctness of the performance of the SHM systems upon installation to an in-service structure.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vykintas Samaitis was born in 1987 in Kaunas (Lithuania).

Education

- In 2006 graduated Kaunas „Eiguliai“ secondary school.
- In 2010 got the bachelor degree in electronics engineering at Kaunas University of Technology, faculty of Telecommunications and electronics (cum laude diploma).
- In 2012 got the masters degree in measurements and metrology at Kaunas University of Technology, faculty of Telecommunications and electronics (cum laude diploma).
- During the period of 2012 – 2016 was a doctoral student at prof. Kazimieras Barsauskas Ultrasound Research Institute of Kaunas University of Technology (Technological sciences, Electrical and electronics engineering – 01T).

Work experience

- In 2010–2013 worked as an engineer at prof. Kazimieras Barsauskas Ultrasound Research Institute of Kaunas University of Technology.
- Since 2013 employed as a junior researcher engineer at prof. Kazimieras Barsauskas Ultrasound Research Institute of Kaunas University of Technology.

Achievements

Vykintas Samaitis is a co-author of 10 research publications and 22 conference presentations. He worked in more than 8 international European Framework programme 7 projects at prof. Kazimieras Barsauskas Ultrasound Research Institute. In 2014–2016, he received a doctoral stipend, provided by the research council of Lithuania. In 2016, the research was granted an international student grant by the Committee for International Research and Education (CIRE) of the Acoustical Society of America (ASA). Since 2016 he is a student member of the ASA.

UDK 620.179.16 (043.3)

SL344. 2016-08-17, 3,5 leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz. Užsakymas 278.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas