

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

KUMAR ANUBHAV TIWARI

**MATAVIMO METODŲ KOMPOZICINIŲ MEDŽIAGŲ
STRUKTŪRŲ DEFEKTAMS APTIKTI IR ĮVERTINTI
NUKREIPTOSIOMIS ULTRAGARSO BANGOMIS SUKŪRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, matavimų inžinerija (T 010)

Kaunas, 2019

Disertacija rengta 2014–2018 metais Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institute. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Renaldas RAIŠUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, T 010)

Redagavo: Inga Nanaronytė (leidykla „Technologija“)

Matavimų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Rymantas KAZYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, T 010) – **pirmininkas**;

Prof. dr. Egidijus DRAGAŠIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009);

Prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009);

Prof. dr. Luca DE MARCHI (Bolonijos universitetas, Italija, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, T 010);

Dr. Vytautas PETKUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, T 010).

Disertacija bus ginama viešame matavimų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2019 m. rugsėjo 24 d. 14.00 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

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

Tel. +370 37 300 042; faks. +370 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2019 m. rugpjūčio 24 d.

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

IVADAS

Kompozicinės medžiagos yra gana plačiai pritaikomos įvairioms pramonės ir buities reikmėms dėl jų lengvo svorio, didelio atsparumo gniuždymui ir tempimui, didelio standumo ir mažo tankio, mažesnių techninės priežiūros išlaidų ir atsparumo korozijai. Apskritai kompozicinės medžiagos yra klasifikuojamos pagal jų rišamąsias medžiagas. Iš įvairių kompozicinių medžiagų plačiau yra naudojamas pluoštu sustiprintas plastikas (PSP, angl. *FRP*), nes jis užtikrina mažesnį konstrukcijų svorį ir geras stiprumo savybes. Anglies pluoštu sustiprintas plastikas (APSP, angl. *CFRP*) ir stiklo pluoštu sustiprintas plastikas (SPSP, angl. *GFRP*) yra dažniausiai naudojami konstrukcijų komponentų, kuriuos veikia cikliškos apkrovos, tarp jų orlaivių sparnų ir vėjo turbinų menčių, gamybai. Kompozitai turi nemažai privalumų, tačiau jų eksploatavimo arba gamybos metu atsiranda įvairių defektų.

Siekiant užtikrinti saugią inžinerinių objektų eksploataciją, reikia reguliariai atlikti kompozitinių objektų techninę priežiūrą ir patikras. Tyrimais nustatyta, kad orlaivių techninės priežiūros ir patikrų išlaidos sudaro 25 % visų išlaidų, susidarančių jų eksploatavimo laikotarpiu. Todėl, siekiant mažinti techninės priežiūros išlaidas ir išvengti sistemų gedimų, taikant kompozicines konstrukcijas, yra diegiamos struktūrinės būklės stebėjimo (angl. *SHM*) sistemos. Ankstesniais tyrimais nustatyta, kad optimali struktūrinės būklės stebėjimo sistema gali efektyviai sumažinti techninės priežiūros ir patikrų išlaidas nuo 30 iki 40 %. Duomenims registruoti ir defektų savybėms nustatyti pagal užregistruotus signalus šiose sistemose yra naudojami integruoti keitikliai. Konstrukcijų defektams aptikti, jų vietai nustatyti ir apskaičiuoti taikomi įvairūs neardomųjų bandymų (angl. *NDT*) metodai, pavyzdžiui, naudojamas ultragarsas, elektromagnetinės bangos, taikoma radiografija ir t. t.

Vienas iš daugiausia galimybių teikiančių metodų yra pagrįstas nukreiptųjų ultragarso bangų (angl. *GW*) panaudojimu, nes jis yra itin jautrus defektams ir leidžia ištirti didelius objektus. Be to, nukreiptųjų bangų tyrimai yra greitai atliekami, jais galima aptikti defektus didelėje srityje, taip pat defektus objektuose, esančiuose po žeme, vandeniui ar izoliacijos sluoksniu. Palyginti su nukreiptosiomis bangomis, tradiciniai ultragarsiniai tyrimai panaudojant tūrinės ultragarso bangas yra lėti, reikalauja specialaus personalo parengimo ir tiesioginės prieigos prie defektų turinčios srities. Dėl didelio nukreiptųjų bangų jautrumo tiriamos medžiagos elastinių savybių pokyčiams ir mažo slopinimo reikia atlikti vos kelis matavimus, norint patikrinti didelių gabaritų objektus, siekiant aptikti vidinius ir paviršinius defektus. Tyrėjai sėkmingai naudoja nukreiptąsias ultragarso bangas defektams aptikti metalinėse, betono konstrukcijose, taip pat vamzdžiams ir kompozicinėms konstrukcijoms tikrinti.

Nukreiptosios ultragarso bangos gali būti naudojamos defekto vietai ir dydžiui nustatyti kompozitiniuose bandiniuose. Tačiau daugiasluoksnės nehomogeniškos medžiagos lemia didelį nukreiptųjų bangų slopinimą. Nukreiptųjų bangų sąveikai su tiriamą struktūra įtakos turi įvairūs parametrai, tokie kaip žadinimo dažnis, tiriamos medžiagos savybės, geometrija, bangų sklaidimo kryptis. Nukreiptosioms bangoms sklindant daugiasluoksniuose kompozituose pasireiškia bangų refrakcija, sklaida ir modų konversija. Dėl to didėja registruojamų ultragarso bangų signalų kompleksiskumas, o tai labai apsunkina su defektais susijusios informacijos išgavimą. Įprastas C tipo skenavimo procesas netinka didelėms kompozicinėms konstrukcijoms, pasižyminčioms sudėtinga geometrija. A ir B tipo matavimai yra greitesni ir tinkami didelėms konstrukcijoms tirti naudojant nukreiptąsias bangas. Šiame darbe eksperimentais gaunami tik B arba A tipo vaizdai, kurie vėliau apdorojami. Tačiau defektų dydžio ir vietos įvertinimo tikslumas priklauso nuo įvairių veiksnių, tokių kaip nukreiptųjų bangų parametrai, keitiklių tipas, sužadinimo dažnis ir pan. Dauguma struktūrinės būklės stebėjimo sistemų yra paremtos išmatuotų signalų palyginimu su atraminiais. Prie konstrukcijos pritivirtinus keitikius, tarp visų keitiklių porų įrašomi pirminiai signalai, kurie laikomi atraminiais. Tuomet kiekvieno tolesnio matavimo duomenys yra lyginami su atraminiais signalais siekiant nustatyti atsiradusių defektų nulemtus pokyčius. Šiam metodui būdingi keli trūkumai, pavyzdžiui, nesuteikiama jokios informacijos apie defektų dydį, vietą ir tipą – suteikiama tik nedaug informacijos apie defektų buvimą tiriamajame objekte. Todėl, siekiant užtikrinti struktūrinės būklės stebėjimo sistemos efektyvumą ir patikimumą, reikalingi nauji matavimų ir signalų apdorojimo metodai, skirti atlikti matavimams realiuoju laiku.

Padidinti tiriamųjų objektų defektų ar pažeidimų aptikimo tikimybę, jų vietos, dydžio ir gylio nustatymo taikant nukreiptąsias ultragarso bangas tikslumą galima šiomis procedūromis:

1. Esant trumpai matavimo bazei tarp ultragarsinio siuntiklio ir ėmiklio, gali būti sukurti kontaktiniai matavimo metodai nedidelių kompozitinių objektų neardomiesiems bandymams atlikti.
2. Didelių objektų neardomiesiems bandymams gali būti kuriami metodai, paremti integruotų keitiklių (siuntiklių) bei skenuojamųjų taškinių ėmiklių naudojimu. Naudojant priklijuotus siuntikius ir siekiant užtikrinti tinkamą sistemos funkcionavimą, turi būti žinomos jų charakteristikos, tokios kaip kryptingumas ir erdvinės 3D poslinkių charakteristikos:
 - Erdvinės ultragarsinio keitiklio poslinkių (3D) charakteristikos suteikia informacijos apie keitiklio vibracijas bei poslinkius tiriamąjo objekto plokštumoje ir statmena plokštumai kryptimi.

Gautos charakteristikos gali būti lyginamos su keitiklio gamintojo pateiktomis charakteristikomis siekiant įsitikinti keitiklio tinkamumu prieš jį integruojant į vidinę tiriamojo objekto konstrukciją.

- Keitiklio kryptingumo charakteristikos svarbios siekiant parinkti reikiamą keitiklio tipą, žadinimo dažnį, sužadinamų nukreiptųjų bangų modą ir keitiklių išdėstymą, užtikrinantį reikiamą tiriamojo objekto paviršiaus aprėptį.
3. Eksperimentinių neapdorotų B tipo skenavimo vaizdų ar A tipo signalų nepakanka norint nustatyti tiriamojo objekto vidinių pažeidimų vietą, dydį ar juos charakterizuoti. Turi būti naudojami specialūs signalų apdorojimo algoritmai siekiant pagerinti defektų aptikimą ir jų parametrų nustatymą matuojant tokius signalų parametrus, kaip amplitudė, sklidimo laikas, dažnis defektų turinčioje ir neturinčioje tiriamojo objekto srityse.

Disertacijoje iškelta **mokslinė hipotezė**, kad gali būti sukurti efektyvūs ultragarsiniai matavimo metodai ir signalų apdorojimo algoritmai, leidžiantys minimizuoti refrakcijos, modų konversijos ir sklaidos įtaką, kurie būtų tinkami įvairių dydžių kompozitinių objektų defektams aptikti ir apibūdinti taikant nukreiptąsias ultragarso bangas.

Tikslas ir uždaviniai

Šios disertacijos **tikslas** yra sukurti du adaptyvius ir efektyvius kontaktinius ultragarsinius matavimo metodus, pagrįstus tiesioginiu nukreiptųjų bangų sklidimu ir pažangiųjų signalų apdorojimo metodų taikymu, skirtus atsiklijavimo defektams aptikti daugiasluoksniuose kompoziciniuose medžiagose. Darbe siūlomi signalų apdorojimo metodai leidžia pagerinti signalo ir triukšmo santykį kompozitiniuose bandiniuose išmatuotiems signalams ir padidinti defektų aptikimo, charakterizavimo galimybes.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti **uždaviniai**:

1. Apžvelgti literatūrą apie nukreiptųjų bangų žadinimą, kompozitinių medžiagų neardomuosius bandymus taikant kontaktinius, nekontaktinius ir ultragarsinių signalų apdorojimo metodus.
2. Sukurti trumpojo nuotolio ultragarsinius nukreiptųjų bangų matavimo metodus ir signalų apdorojimo algoritmus atsiklijavimo defektų dydžiui ir vietai nustatyti daugiasluoksniuose kompozitiniuose bandiniuose naudojant taškinius kontaktinius keitiklius, kai siųstuvai ir imtuvai yra nedideliu atstumu.

3. Ištirti P1 tipo MFC keitiklio erdvines poslinkio charakteristikas ir nustatyti jo tinkamumą defektams aptikti naudojant ilgųjų nuotolių nukreiptąsias bangas.
4. Sukurti ir patvirtinti dvimatį (2D) analitinį modelį siekiant prognozuoti kontaktinio tipo nukreiptųjų bangų keitiklių, kurie gali būti integruojami į struktūrą arba prie jos priklijuojami (pvz., MFC tipo), kryptingumo charakteristikas.
5. Sukurti ilgojo nuotolio ultragarsinius nukreiptųjų bangų matavimo metodus ir signalų apdorojimo algoritmus nesusiklijavimo defektų dydžiui ir vietai nustatyti daugiasluoksniuose kompozitiniuose bandiniuose naudojant priklijuotus P1 tipo MFC keitikius (siuntikius) ir taškinis kontaktinius imtuvus.

Mokslinis naujumas

1. Sukurti efektyvūs kontaktiniai nukreiptųjų bangų matavimo metodai, skirti trumpojo ir ilgojo nuotolio ultragarsiniams neardomiesiems bandymams taikant nukreiptųjų bangų tiesioginį sklidimą:
 - a. Nustatyta, kad naudojant kontaktinius keitikius fiksuotoje bazėje atliekant trumpųjų nuotolių ultragarsinius matavimus sumažinama struktūrinio triukšmo ir dispersijos įtaka matuojamų signalų laikinėms charakteristikoms. Be to, naudojant taškinis keitikius, veikiančius storio modos režimu ir užtikrinančius didesnę jautrumą vertikaliosioms poslinkių komponentėms, defektus galima aptikti matuojant praėjusio signalo amplitudę skenavimo metu. Tyrimų metu nustatyta, kad sumažinus matavimų bazę galima tiksliau aptikti mažus defektus, todėl mažiems defektams aptikti pasiūlyta naudoti siauresnę matavimų bazę.
 - b. Didelių kompozitinių objektų neardomiesiems bandymams pasiūlyta naudoti klijuojamus MFC keitikius ir taškinis storio modos imtuvus. P1 tipo MFC keitiklis (dominuojanti d33 moda) yra kryptingas, todėl supaprastina matavimų sistemos konfigūraciją, o taškiniai storio modos keitikliai efektyviai priima A_0 modą, kuri tinkama atsiklijavimo defektams aptikti.
2. Pasiūlytas MFC keitiklio erdvinį 3D poslinkio charakteristikų matavimo metodas, kuris gali būti taikomas keitiklio veikimo principui analizuoti ir jo funkcionavimo efektyvumui įvertinti. Šios charakteristikos leidžia įvertinti MFC keitiklio žadinamų nukreiptųjų

- bangų modų tinkamumą struktūrinės būklės stebėjimui ir neardomiesiems bandymams.
3. Sukurtas dvimatis analitinis modelis, leidžiantis prognozuoti nukreiptąsias bangas žadinančio kontaktinio ultragarsinio keitiklio kryptingumo charakteristiką, esant bet kokiam žadinimo dažniui ir tiriamojo objekto savybėms. Šis metodas, palyginti su baigtinių elementų metodu bei eksperimentiniais kryptingumo tyrimais, yra greitas ir leidžia padidinti matavimo proceso tikslumą optimizuojant ultragarsinių keitiklių išdėstymą siekiant perdengti kritines tiriamojo objekto sritis.
 4. Taikant bangelių transformacijos metodą ir siekiant parinkti pirminę bangelę pasiūlyta signalų dekompozicijai naudoti kiekvienos šeimos aukščiausios eilės bangelę, nes tai leidžia gerokai sutrumpinti signalų apdorojimo laiką. Žinoma, kad aukščiausios eilės bangelė turi daugiausia signalo informacijos, todėl skaičiuojant išmatuoto signalo ir aukščiausios eilės bangelės koreliaciją galima kur kas greičiau parinkti tinkamą pirminę bangelę ir nereikia signalo skaidyti į daug lygių.
 5. Siekiant nustatyti momentines užregistruotų ultragarsinių signalų charakteristikas taikant Hilberto transformaciją, pasiūlyta taikyti dvimatę Furjė transformaciją ultragarsinių signalų modų dekompozicijai. Šis metodas leidžia nufiltruoti daugkartinius nukreiptųjų bangų atspindžius ir gauti vienkomponenčius signalus, reikalingus Hilberto transformacijai atlikti.

Praktinė darbo vertė

1. Pasiūlyti ultragarsinio keitiklio erdviųjų charakteristikų matavimo metodai gali būti taikomi nustatant keitiklių atitiktį gamintojo deklaruotiems parametrų, taip pat prieš juos integruojant į tiriamuosius objektus ir taikant neardomuosiuose bandymuose bei struktūrinės būklės stebėjimo sistemose. Todėl šie metodai gali gerokai prisidėti kuriant patikimas struktūrinės būklės stebėjimo sistemas.
2. Sukurtas 2D analitinis modelis gali būti naudojamas kontaktinių keitiklių kryptingumo charakteristikoms prognozuoti, esant bet kokiam žadinimo dažniui ir bangų sklidimo atstumui, jei žinomas keitiklio veikimo principas ir tiriamojo objekto medžiagos dispersinės savybės. Be to, turint keitiklio kryptingumo diagramą, galima pasirinkti tinkamas keitiklių išdėstymo ant tiriamojo objekto padėtis, skaičių, tipą ir nukreiptųjų bangų modus, kurios leistų aptikti atitinkamus vidinius defektus.
3. Pasiūlyti matavimo ir signalų apdorojimo metodai palengvina defektų aptikimą ir jų parametrų nustatymą sudėtingos geometrijos bandiniuose,

esant priėjimui tik iš vienos objekto pusės ir turint ribotą matavimo duomenų kiekį (pvz., B tipo vaizdo duomenis).

Ginti pateikiami rezultatai

1. Išmatuotos neapkrauto MFC tipo keitiklio poslinkių charakteristikos, leidžiančios prognozuoti sužadinamų nukreiptųjų bangų modų erdvinius 3D poslinkius.
2. Sukurtas 2D analitinis modelis, pagrįstas Hiuigenso principu, patikrintas baigtinių elementų (BE, angl. *FE*) metodu ir eksperimentais, pagal kurių galima sudaryti kontaktinio tipo nukreiptųjų bangų keitiklių kryptingumo diagramą bet kurioje bangų sklidimo terpėje, žinant jos dispersines charakteristikas.
3. Matavimo metodas atsiklijavimo defektams aptikti daugiasluoksniuose kompozitiniuose bandiniuose esant trumpam ir ilgam nukreiptųjų bangų sklidimo atstumui.
4. Nauji signalų apdorojimo metodai, kurių paskirtis – padėti nustatyti kompozicinių konstrukcijų defektų savybes (dydį ir vietą) pagal vieną B tipo skenavimą.

Tyrimų rezultatų aprobavimas

Mokslinių tyrimų rezultatai disertacijos rengimo laikotarpiu paskelbti 11 publikacijų. 7 iš jų – leidiniuose, įrašytuose į „Clarivate Analytics ISI Web of Science“ leidinių sąrašą ir turinčiuose citavimo indeksą, kitos 4 publikacijos paskelbtos recenzuojamų tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje be citavimo rodiklio. Mokslinių tyrimų rezultatai taip pat pristatyti Vilniuje, Prahoje, Funšalyje ir Belgrade vykusiose 7 tarptautinėse mokslo konferencijose. Doktorantūros stipendiją visam studijų laikotarpiui (2014–2018 m.) skyrė Lietuvos mokslo taryba. 2016 m. mokslinių tyrimų rezultatai įvertinti „Infobalt“ stipendija. 2017 m. Kauno technologijos universitetas skyrė vienkartinę aktyviausio doktoranto stipendiją. 2018 m. gauta stipendija už akademinis pasiekimus, kurią skyrė Lietuvos mokslo taryba. 2018 m. gauta Europos struktūrų vientisumo asociacijos (ESIS) parama, kuri skiriama tyrėjams.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 5 skyriai, darbo išvados, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų sąrašai.

Pirmajame skyriuje apžvelgiama literatūra apie kontaktinius ir nekontaktinius ultragarsinius tyrimų metodus, ultragarsinių matavimų duomenų vizualizaciją, ultragarsinius neardomųjų bandymų metodus, įvardijamos šių

metodų pagrindinės ypatybės ir apribojimai, susiję su ultragarsinių nukreiptųjų bangų taikymu įvairiose kompozicinėse konstrukcijose. Pabrėžiama ultragarsinės bangos generuojančio keitiklio kryptingumo diagramų ir sukeltųjų poslinkių 3D charakteristikų svarba, pateikiami įvairūs signalų apdorojimo būdai, tinkami ultragarsinių nukreiptųjų bangų signalams apdoroti.

Antrajame skyriuje aprašomas matavimo metodas, kuriam naudojami kontaktinio tipo ultragarsiniai keitikliai ir taikomi atitinkami signalų apdorojimo būdai, taip pat naudojamos nukreiptosios bangos tyrimams trumpuoju bangų sklidimo atstumu atlikti. Atlikti tyrimai siekiant aptikti ir įvertinti skirtingo dydžio atsiklijavimo tipo defektus aerodinaminio profilio daugiasluoksniame kompozitiniame bandinyje. Atlikta nukreiptųjų bangų, sklindančių defekta turinčioje bandinio srityje, ir bangų, sklindančių defektų neturinčioje srityje, charakteristikų lyginamoji analizė.

Trečiajame skyriuje pateikiami MFC keitiklio erdviniai poslinkiai ir kryptingumo charakteristikos, analizuojamos galimybės panaudoti keitiklių tiriamojo objekto struktūrinio vientisumo būsenai stebėti ir tyrimams tolimuoju nukreiptųjų bangų sklidimo atstumu atlikti. Taip pat aptariama, kaip keitiklio sukurtųjų erdviųjų 3D poslinkių, kryptingumo diagramos ir ultragarsinių nukreiptųjų bangų sklidimo krypties ar plokštumos tikslus įvertinimas gali prisidėti prie struktūrinės būklės stebėjimo sistemos patikimumo didinimo. Sukurtas naujas 2D analitinis modelis, leidžiantis prognozuoti nukreiptąsias bangas žadinančių kontaktinio tipo ultragarsinių keitiklių kryptingumo diagramas.

Ketvirtajame skyriuje pateikiamas matavimo metodas, kurį taikant prie tiriamojo objekto prikljuojamas MFC keitiklis nukreiptosioms bangoms žadinti, naudojamas kontaktinio tipo priimantysis keitiklis ir atitinkamais būdais apdorjami signalai. Atlikti tyrimai taikant nukreiptąsias bangas siekiant gauti informacijos apie nedidelius vidinius defektus trečiajame skyriuje nagrinėtame bandinyje. Šis metodas yra naudingas tiriamojo objekto struktūrinio vientisumo būsenai stebėti, nes siuntiklis yra nuolat pritvirtintas (prikljuotas) prie tiriamojo objekto.

Penktajame skyriuje apskaičiuota bendra pasiūlytų matavimo metodų neapibrėžtis.

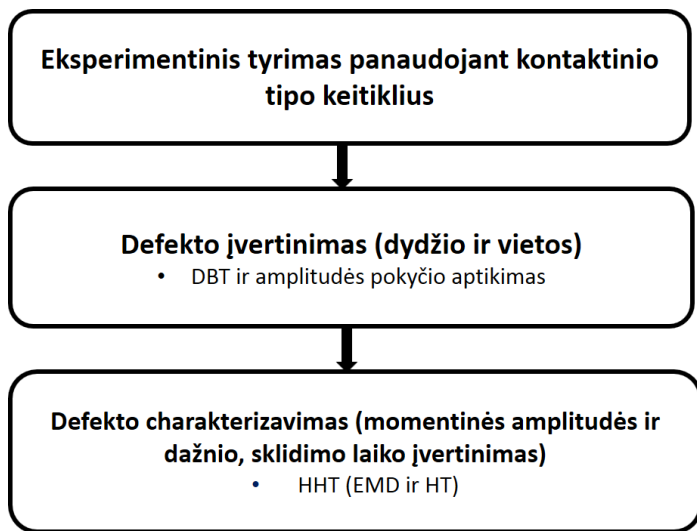
Bendra disertacijos apimtis – 142 puslapiai. Darbe pateikta 50 paveikslėlių, 8 lentelės, 71 formulė ir 207 bibliografinės nuorodos.

1. TRUMPOJO NUOTOLIO NUKREIPTŪJŲ BANGŲ MATAVIMO METODAS

Šiame skyriuje aprašoma, kaip sukurtas matavimo metodas, paremtas trumpojo nuotolio nukreiptųjų bangų analize, ultragarso signalų apdorojimo metodo pritaikymu, kuris leidžia aptikti defektus (pažeidimus) įvairiose sudėtingos geometrijos kompozitinio bandinio struktūros dalyse. Kaip bandinys

buvo pasirinktas vėjo turbinos mentės (VTM, angl. *wind turbine blade*, *WTB*) segmentas. Šis bandinys pagamintas iš daugiasluoksnės stiklo pluoštu sutvirtintos kompozicinės medžiagos (SPSP). VTM yra vienos jautriausių ir pažeidžiamiausių sudedamųjų dalių, nes jos turi atlaikyti nuolatinės ciklines apkrovas. Be to, jos pagamintos iš daugiasluoksnės kompozicinės struktūros, turinčios sudėtingą geometriją. Todėl VTM segmentas buvo pasirinktas kaip tiriamasis objektas. Įvairaus dydžio (15 ir 25 mm) atsiklijavimo tipo dirbtiniai defektai buvo sukurti galiniame (plonajame) tiriamojo bandinio krašte.

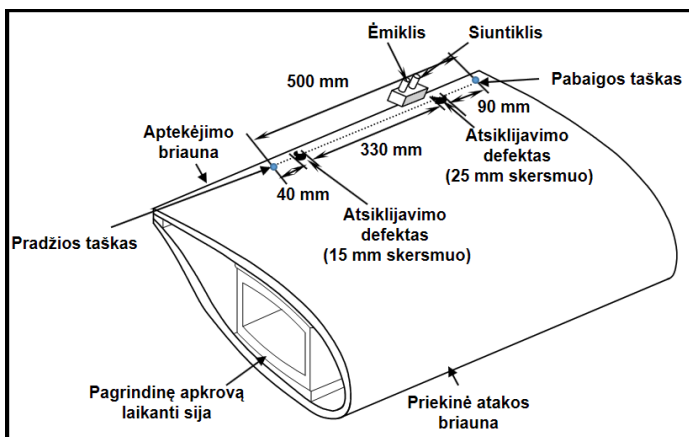
Matavimo schema pateikta 1 pav. Pirmiausia buvo atliktas bandinio eksperimentinis B tipo tyrimas naudojant siuntimo–priėmimo režimu dirbančius kontaktinius ultragarsinius keitiklius. Bangelių transformacija taikyta triukšmams pašalinti ir signalų amplitudžių vertėms patikimiau detektuoti siekiant nustatyti vidinių defektų vietą ir dydį. Vėliau pritaikytas Hilberto ir Huango transformacijos (HHT) metodas nukreiptųjų bangų signalų momentinėms charakteristikoms defektinėje ir defektų neturinėjoje bandinio vietose palyginti.



1 pav. Vidinių defektų kompozicinėje struktūroje įvertinimo ir charakterizavimo trumpuoju nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimo nuotoliu metodo schema

Vėjo turbinos mentės, turinčios atsiskuosiavimo tipo defektų galinėje (aptekėjimo) briaunoje, eksperimentinis tyrimas

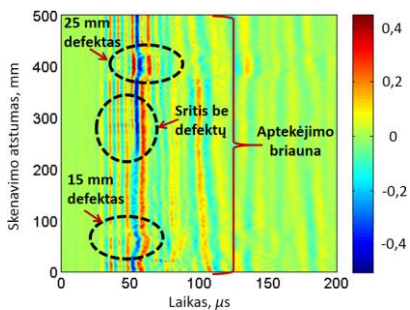
Ant vėjo turbinos mentės segmento vidinės dalies mechaninio apdirbimo (frezavimo) būdu buvo sukurti du 15 ir 25 mm skersmens atsiklijavimo defektai. Atstumas tarp šių dviejų defektų buvo 330 mm. Atliktas eksperimentas ir gauti 15 ir 25 mm skersmens defektų B tipo vaizdai (2 pav.).



(a)



(b)



(c)

2 pav. Eksperimentinis defektų aptikimo tyrimas: vėjo turbinos mentės segmento analizės schema su defektų vieta (a); dviejų ultragarsinių keitiklių, pritvirtintų prie judančio įtvoro, nuotrauka (b), B tipo vaizdas (c)

Visa skenavimo schema ir defektų vietos mentės galinėje (aptekėjimo) briaunoje pavaizduotos 2 pav. a dalyje. Du kontaktinio tipo ultragarsiniai keitikliai, turintys didelį jautrį registruojant A_0 modą, buvo mechaniškai pritvirtinti

prie mechaniškai skenuojamo įtvoro (2 pav., *b*). Šie keitikliai buvo įtvirtinti 50 mm atstumu siekiant išlaikyti tinkamą skiriamąją gebą nukreiptųjų bangų siuntimo ar priėmimo režimu. Siunčiantysis keitiklis sužadintas 150 kHz vienetiniu impulsu, mechaninio skenavimo žingsnis buvo 1 mm, atstumas 500 mm, sukauptas 500 signalų masyvas. Eksperimentiniams tyrimams naudota Kauno technologijos universiteto sukurta žemojo dažnio ultragarsinė matavimo sistema. Kontaktinio tipo keitiklio charakteristikos ir SPSP medžiagos savybės pateiktos atitinkamai 1 ir 2 lent. B tipo vaizdas pateiktas 2 pav. *c* dalyje. Pastebimi ryškūs signalo formos pokyčiai dėl defektnių bandinio vietų (2 pav., *c*). Tačiau šių defektų įvertinti ir aprašyti pagal vieną B tipo vaizdą neįmanoma neapdorojus signalų.

1 lentelė. Kontaktinio tipo priimančiojo keitiklio parametrai

Parametrai	Savybės
Medžiaga	Pjezokeramika PZ 29
Maksimali vertė esant –6 dB juostos pločiui	350 kHz
–10 dB juostos plotis	35–640 kHz
Centrinis dažnis	190 kHz
Apsauginio sluoksnio kontaktinės srities skersmuo keitiklio apačioje	2 mm

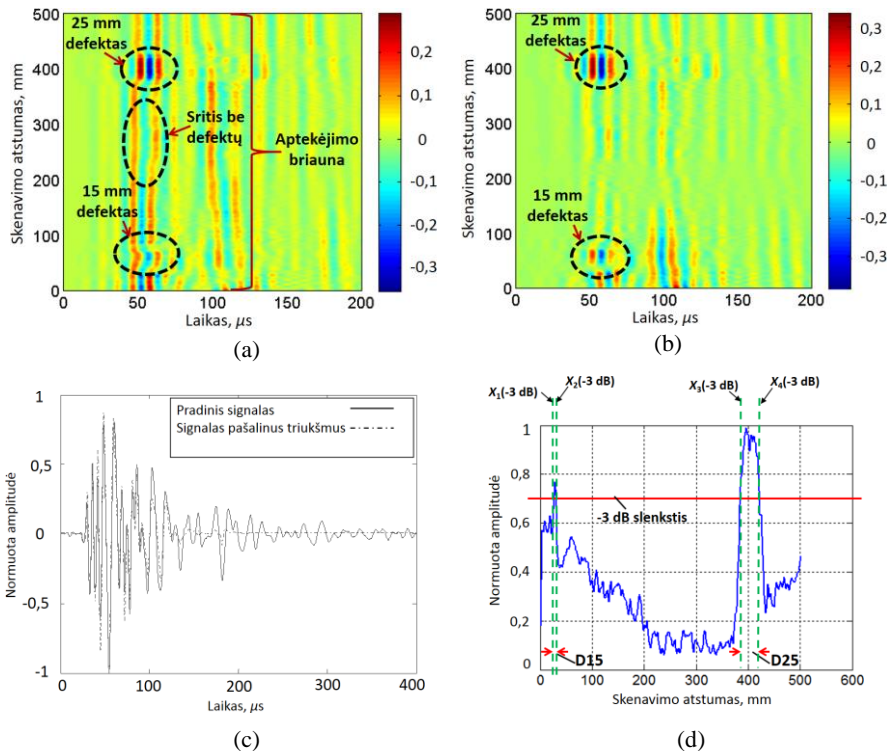
2 lentelė. SPSP medžiagos savybės

Parametrai	Skaitinė vertė
Dažų arba paviršiaus sluoksnis:	
Tankis (ρ)	1270 kg/m ³
Jungo modulis (E)	4,2 GPa
Puasono koeficientas (ν)	0,35
Vienkryptis SPSP sluoksnis:	
Tankis (ρ)	1828 kg/m ³
Jungo modulis (E_1)	42,5 GPa
Jungo modulis (E_2)	10 GPa
Puasono koeficientas (ν_{12})	0,26
Puasono koeficientas (ν_{23})	0,4
Plokštumos šlyties modulis (G_{12})	4,3 GPa
Epoksidiniai klijai:	
Tankis (ρ)	1260 kg/m ³
Jungo modulis (E)	3,6 GPa
Puasono koeficientas (ν)	0,35

Signalų apdorojimo algoritmai

Buvo pasiūlytas hibridinis signalų apdorojimo algoritmas – numatyta taikyti diskrečiąją bangelių transformaciją (DBT, angl. *DWT*), tarpusavio koreliaciją bei

Hilberto ir Huang transformaciją (HHT). Signalų triukšmų pašalinimas ir defektų įvertinimo procesas taikant DBT pavaizduotas 3 pav.



3 pav. Defektų įvertinimas pašalinus signalo triukšmus: B tipo vaizdas po bangelių transformacijos (a); A tipo signalas 50 mm atstumu prieš pašalinant triukšmus ir juos pašalinus (b); modifikuotas B tipo vaizdas atėmus pamatinį signalą iš kiekvieno A tipo signalo B tipo vaizde ir pašalinus triukšmus (c); amplitudės slenkščio nustatymas defektų dydžiui ir vietai nustatyti (d)

Signalų triukšmų pašalinimas ir defektų aptikimo procesas taikant DBT aprašomas taip:

- DBT su db16 Daubechies bangele yra taikoma A tipo ultragarsiniams signalams iš B tipo vaizdo suskaidyti į 8 lygius. Apdoroto signalo aštuntas lygis pasižymi minimaliu triukšmų lygiu. Tokiu būdu apdorotas visas B tipo vaizdas (3 pav., a). Siekiant pavaizduoti triukšmų

sumažinimo efektyvumą, pateikiamas apdorotas ir neapdorotas A tipo signalas 15 mm skersmens defekto srityje (3 pav., *b*).

- Kitame žingsnyje atraminis signalas ($A_{1,ref}$) defektų neturinčioje srityje gaunamas apskaičiuojant bandinio srityje sukauptų signalų (150–300 mm) vidurkį.
- Atraminis signalas ($A_{1,ref}$) atimamas iš kiekvieno A tipo signalo B tipo vaizduose. Apdorotas B tipo vaizdas, pašalinus triukšmą, yra pateikiamas 3 pav. *c* dalyje. Matematinė išraiška:

$$x_N(t, s) = x(t, s) - A_{1,ref}(t); \quad (1)$$

čia $x(t, s)$ – s -axis A tipo signalas B tipo vaizde, $x_N(t, s)$ – A tipo signalas atlikus $A_{1,ref}$ signalo atėmimo operaciją (apdorojus), s – skenavimo atstumas ($500 \leq s \leq 0$).

- Apdorotame B tipo vaizde suskaičiuojamos pikinės A tipo signalų amplitudės (3 pav., *c*) ir pavaizduojamos grafiškai išilgai skenavimo ašies (3 pav., *d*):

$$A_{pp}(s) = \max[x_N(t, s)] - \min[x_N(t, s)], \quad (2)$$

$$A_{npp}(s) = \frac{A_{pp}(s)}{\max[A_{pp}(s)]}; \quad (3)$$

čia $A_{pp}(s)$ ir $A_{npp}(s)$ – pikinės ir normuotos pikinės amplitudžių reikšmės s -ajame A tipo signale iš apdoroto B tipo vaizdo.

- Pritaikius –3 dB amplitudžių detektavimo slenkstį, nustatyta defektų vieta ir dydis. Jeigu x_1, x_2, x_3 ir x_4 yra amplitudžių vertės –3 dB lygyje išilgai skenavimo ašies (3 pav., *d*), defekto padėtis (atstumas nuo pradinės skenavimo padėties) ir 15 mm bei 25 mm skersmens defektų dydžiai apskaičiuojami:

$$\left. \begin{aligned} 15 \text{ mm defekto vieta} &= x_1, \\ 15 \text{ mm defekto dydis} &= x_2 - x_1, \\ 25 \text{ mm defekto vieta} &= x_3, \\ 25 \text{ mm defekto dydis} &= x_4 - x_3. \end{aligned} \right\} (4)$$

- Apskaičiavus 15 mm ir 25 mm skersmens defektų dydį gauta 9 mm ir 34,5 mm (6 mm ir 9,5 mm absoliučiosios paklaidos).

- Apskaičiavus 15 mm ir 25 mm skersmens defektų padėtis nuo pradinės skenavimo padėties gauta 22,5 mm ir 33 mm (13,5 mm ir 8 mm absoliučiosios paklaidos).
- Santykinė paklaida taip pat priklauso nuo optimalaus 50 mm atstumo tarp dviejų keitiklių išlaikymo ir kitų veiksnių įtakos, pvz., aplinkos temperatūros, amplitudės slenksčio lygio parinkimo, sklindančių nukreiptųjų bangų dispersijos ir pan.

Pasiūlytas metodas turi kelis apribojimus. 1) Defektams aptikti ir charakterizuoti naudojamas tik vienas B tipo vaizdas. Todėl tikslumas priklauso nuo keitiklio skenavimo srities atžvilgiu defekto centro. 2) Eksperimentas buvo atliktas naudojant kontaktinių keitiklių porą, pritvirtintą prie mechanškai skenuojamo laikiklio. Kadangi optimalus atstumas tarp keitiklių buvo pasirinktas 50 mm, tai galėjo nulemti mažesnio dydžio defektų (dydis <50 mm) nustatymo tikslumą. Todėl 25 mm defekto dydis (skersmuo) nustatytas tiksliau negu 15 mm defekto. Rezultatas gali būti pagerintas keičiant optimalų atstumą tarp keitiklių. 3) Rezultatų pasikartotinumas priklauso nuo signalų amplitudės pokyčio tarp defektinių ir defektų neturinčių sričių. 4) Tikslumas taip pat priklauso nuo -3 dB slenksčio ribos ir amplitudės pikinės vertės. 5) Eksperimente taikytas linijinis B tipo skenavimas tinkamas stebėti ir analizuoti didesniems nei sklindančios bangos ilgis defektams. Mažesnio dydžio defektus ar mikroįtrūkius aptikti ir įvertinti įmanoma tik netiesiniais ultragarsiniais matavimo metodais. Dėl kintamų geometrinių parametrų ir sudėtingos kompozicinės struktūros iki šiol nėra priimta defektų dydžio ir jų vietos nustatymo standartų testuojant vėjo turbinos mentės bandinius. Tačiau, kaip minėta disertacijos įvade, šių bandinių kontaktinio tipo tyrimai moksliniais ir komerciniais tikslais atliekami taikant impulso-atspindžio bei fazuotųjų gardelių metodus. Todėl šis sukurtas adaptyvus ir efektyvus metodas bus taikomas ir kitų tyrėjų siekiant ištirti daugiasluoksnes, sudėtingos struktūros ir geometrijos medžiagas.

Momentinės nukreiptųjų bangų A tipo signalų charakteristikos defektų turinčioje ir jų neturinčioje srityse apskaičiuotos taikant HHT (empirinių modų dekompoziciją, EMD, angl. *ensemble empirical mode decomposition*, *EEMD*) ir Hilberto transformaciją (HT). Analizei buvo pasirinkti trys A tipo skenavimo signalai: be defektų (vidutinis atstumas erdvėje 150–300 mm), su 15 mm defektu (50–60 mm) ir su 25 mm defektu (400–410 mm). Šie A tipo signalai pažymėti $A_{1,ref}$ (be defektų), A_{15} (esant 15 mm defektui) ir A_{25} (esant 25 mm defektui). Apdoravimo procedūra:

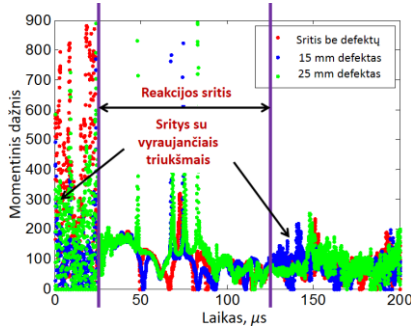
- Pirmajame žingsnyje, atliekant HHT analizę, kiekvienas A tipo signalas ($A_{1,ref}$, A_{15} ir A_{25}) yra išskaidomas į 14 būdingosios modos funkcijų (BMF, angl. *intrinsic mode function*, *IMF*) taikant EMD dekompoziciją. Bendros signalo dydžio ir triukšmų standartinio nuokrypio vertės pasirinktos atitinkamai 500 ir 0,2 EMD.

- Pradinių A tipo signalų galios spektrinis tankis buvo artimas BMF6-9 ir tai leido atkurti naujus signalus. 4 pav. pavaizduotas momentinis atkūrimo dažnis su atitinkamu atkuriamo signalo laiko momentu. Šiame paveikslėlyje gali būti aiškiai išskirta betriukšmė ir informatyvi signalo sritis. Virpesiai atitinka pagrindinį žadinimo dažnį (150 kHz). Tačiau signalai nuo defektinių sričių osciliacijos pasiekia didesnes pikines reikšmes, palyginti su signalais, sukauptais srityse be defektų.
- Iš BMF6-9 gautas A tipo signalo maksimalus galios spektrinis tankis buvo aptiktas ties BMF6, todėl jis panaudotas atkurti momentinėms amplitudžių charakteristikoms ir HHT spektrams signalams, sukauptiems srityse be defektų ir su defektais. Tai galima aiškiai pastebėti 5 pav. *a* dalyje: laiko tarpas signaluose defektinėse srityse yra ilgesnis, palyginti su sritimi be defektų. Be to, triukšmingo periodo trukmė yra mažesnė, palyginti su signalu be defektų (30,65 μ s) ir su signalais, sukauptais 15 mm (33,84 μ s) ir 25 mm (45,30 μ s) skersmens defektų srityse.
- Defektinių ir defektų neturinčių sričių signalų normalizuotų momentinių amplitudžių kitimas laiko atžvilgiu apskaičiuojamas naudojant (2) ir (3) formules ir pateiktas 5 pav. *b* dalyje. Pritaikius -3 dB slenkstį, apskaičiuojami laiko tarpai tarp signalų be defektų ir defektų turinčių sričių. Jei t_1 , t_2 ir t_3 yra -3 dB slenkstis, pavaizduotas 5 pav. *b* dalyje, signalų laiko vėlavimas tarp 15 mm (t_{d1}) ir 25 mm (t_{d2}) defektų sričių gali būti įvertinamas atitinkamai:

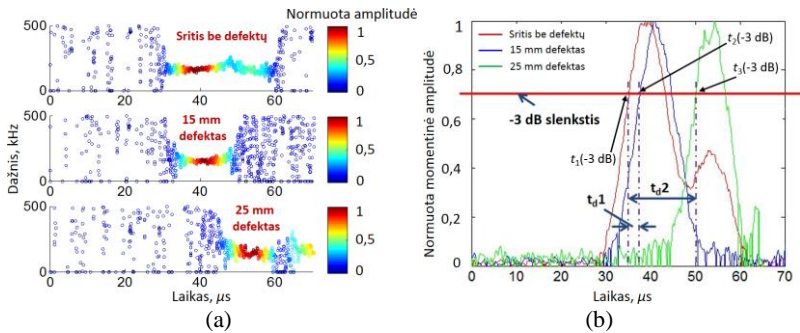
$$t_{d1} = t_2 - t_1, \quad (5)$$

$$t_{d2} = t_3 - t_1. \quad (6)$$

- Apskaičiuotas suvėlinimo laikas esant 15 mm defektui yra trumpesnis (2,5 μ s), palyginti su signalu srityje, turinčioje 25 mm defektą (15 μ s).



4 pav. Rekonstruoto signalo (BMF6-9) laikinė ir dažninė charakteristika po empirinių modų dekompozicijos kiekvienu atveju (srityje be defektu, srityse su 15 mm ir 25 mm skersmens defektais)



5 pav. HHT spektrai (BMF6) (a) ir normuotos amplitudės svyravimai laiko atžvilgiu defektu turinčiose ir neturinčiose srityse (b)

2. P1 TIPO MFC KEITIKLIO TRIMAČIO POSLINKIO IR KRYPTINGUMO CHARAKTERISTIKŲ MATAVIMAS

Ultragarsiniai keitikliai, kurie gali būti įmontuoti (priklijuoti) į dideles sudėtinės struktūras (MFC keitikliai), yra svarbūs atliekant nukreiptųjų bangų ir struktūrinės būklės tyrimus dideliais atstumais. Tačiau tyrimų efektyvumas priklauso nuo keitiklio padėties, kuri leistų priimti sklindančius ultragarso bangas iš tiriamos objekto srities, žinių apie tiriamąjį objektu sklindančių nukreiptųjų bangų savybes ir jų atitiktį keitiklio dažninei charakteristikai. Taigi, yra svarbu:

- nustatyti keitiklio 3D poslinkių charakteristikas. Tai leidžia įvertinti dominuojančias bangų komponentes, kurios gali suteikti papildomos informacijos, padėsiančios padidinti tyrimo metodo tikslumą. Be to, lyginant 3D charakteristikas su gamintojo pateiktomis specifikacijomis, gali būti nustatoma keitiklių gedimų.

Tokie keitikliai nenaudojami tyrimams. Ultragarsiniuose nukreiptųjų bangų tyrimuose žemuju dažniu yra naudojamos trys pagrindinės modos (A_0 , S_0 ir SH_0), turinčios skirtingas poslinkio komponentes. Įvairių objektų tyrimuose atitinkama moda sužadinama priklausomai nuo žadinimui naudojamo keitiklio tipo, žadinimo dažnio ir tiriamo objekto medžiagos savybių. Šiame skyriuje P1 tipo MFC keitiklis naudotas siekiant gauti sklindančios bangos erdvinės 3D poslinkių komponentes;

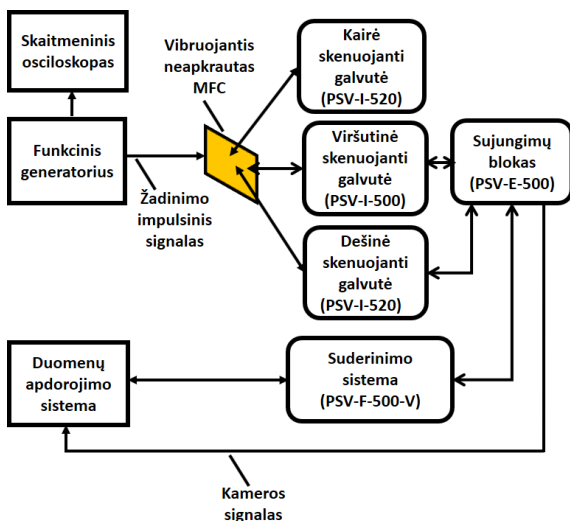
- žinoti keitiklio arba keitiklių gardelės kryptingumo charakteristikas, nes tai daugeliu aspektų gali pagerinti didelių bei kompleksinių struktūrų ištyrimo tikslumą. Tai padeda neardomųjų bandymų metu nustatyti tikslią ultragarsinio keitiklio tvirtinimo prie tiriamojo objekto vietą ir parinkti tinkamą keitiklio žadinimo dažnį norimai bangų modai sugeneruoti (pvz., A_0 , S_0 arba SH_0) arba rasti optimalią keitiklių konfigūraciją. Analitinis modelis yra efektyvus ir leidžia greičiau gauti rezultatus, palyginti su skaitiniu modeliu bei eksperimentiniais tyrimais, kurie gali būti taikomi keitiklio kryptingumui įvertinti bet kokioje bangų sklidimo terpėje.

Šiame skyriuje aprašomų tyrimų tikslas – nustatyti P1 tipo MFC keitiklio, kurio aktyviosios srities matmenys yra 28×14 mm, trimates erdvinės charakteristikas ir išsiaiškinti galimybes jį pritaikyti kompozicinėms konstrukcijoms testuoti ir struktūrinei būklei stebėti naudojant nukreiptąsias ultragarso bangas. Kitas šiame skyriuje pristatomas tikslas – sukurti ir validuoti efektyvų 2D analitinį modelį bet kokios konfigūracijos kontaktinio ultragarsinio keitiklio ar keitiklių grupės kryptingumo diagramoms įvertinti žinant keitiklių parametrus ir tiriamojo objekto dispersines charakteristikas. P1 tipo MFC keitiklis yra naudojamas sukurtam analitiniam 2D modeliui patikrinti.

Eksperimentinis P1 tipo MFC keitiklio tyrimas naudojant 3D lazerinį vibrometrą

43 kHz dažniu vibruojančio neapkrauto MFC-P1-2814 keitiklio 3D erdviųjų poslinkių komponentės buvo matuojamos „Polytec“ PSV-500-3D-HV 3D skenuojamuoju lazeriniu vibrometru. Šis eksperimentas atliktas siekiant patikrinti dominuojančias erdviųjų poslinkių išilgai MFC keitiklio charakteristikas (dirbant d33 arba pailgėjimo-sutrumpėjimo režimu). Laisvai virpančio (neapkrauto) MFC keitiklio eksperimentinės analizės schema yra pateikta 6 pav. Nors iš viso buvo nuskenuoti 289 taškai, MFC keitiklio konstrukcijos simetrija leido supaprastinti analizę vertinant erdviųjų poslinkių vertes, išmatuotas greta dviejų keitiklio kraštų. Taigi, siekiant gauti MFC keitiklio 3D poslinkio komponentes, vertinta 17 erdviųjų matavimo taškų, esančių ant keitiklio kraštų

(pagal ilgį ir plotį). 7 pav. *a–e* dalyse pavaizduoti maksimalūs teigiami ir neigiami erdviniai poslinkiai pagal MFC keitiklio ilgį ir plotį.



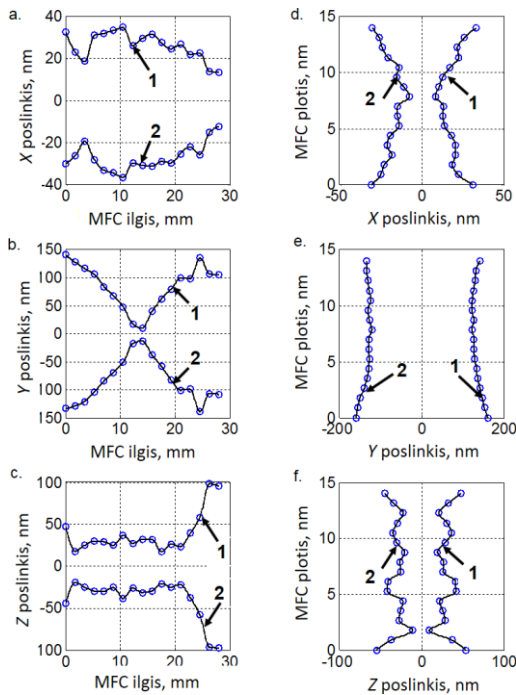
6 pav. Eksperimento, kuriuo siekiama išmatuoti P1 tipo MFC keitiklio 3D poslinkio komponentes naudojant „Polytec“ 3D lazerinį vibrometrą (PSV-500-3D-HV), schema

Rezultatus galima apibendrinti taip:

- Pagal MFC keitiklio ilgį maksimalių X poslinkių (7 pav., *a*) variacijos yra didžiausios. Kita vertus, Y poslinkių (7 pav., *b*) variacijos yra didžiausios pagal plotį tarp visų trijų poslinkių.
- Palyginti su X poslinkio (nuo -35 nm iki $+35$ nm) ir Z poslinkio (nuo -100 nm iki $+100$ nm) intervalais, Y poslinkio intervalas (nuo -167 nm iki $+167$ nm) yra daug didesnis. Taigi, galima patvirtinti, kad P1 tipo MFC keitiklis veikia pailgėjimo arba d_{33} režimu ir pasižymi dominuojančiais išilginiais poslinkiais.
- Z poslinkio (kuris atitinka A_0 modos dominuojančią vertikaliąją komponentę) profilis yra panašus į Y poslinkio profilį, tačiau amplitudės yra kur kas mažesnės nei Y poslinkių (7 pav., *e–f*).

Žadinant žemojo dažnio ultragarsu, MFC keitiklis gali efektyviai generuoti ir priimti pagrindines Lembo bangų modas (S_0 ir A_0). S_0 ir A_0 bangos pasižymi dominuojančių poslinkių komponentėmis atitinkamai horizontalioje plokštumoje išilgine bangos sklidimo kryptimi (išilgai MFC keitiklio) ir vertikaliąja komponente, statmena bangos sklidimo kryptiai. Taigi MFC keitiklio

charakteristikas siekiant sužadinti ir priimti S_0 modą galima apibūdinti pagal Y poslinkius horizontalioje plokštumoje išilgine bangos sklaidimo kryptimi (7 pav., b , e). Panašiai MFC keitiklio charakteristikas siekiant sugeneruoti ir priimti A_0 modą galima apibūdinti pagal Z poslinkius vertikaliąja kryptimi (7 pav., c , f). Yra ir kitas žemojo dažnio ultragarsinių nedispersinių nukreiptųjų bangų modos tipas, vadinamas šlyties-horizontaliąja moda (SH_0). Dominuojantis SH_0 modos poslinkių judėjimas išlieka plokštumoje ir statmenas S_0 bangos atžvilgiu. Tačiau SH_0 modos charakteristikas leidžia apibūdinti ir X bei Y poslinkio komponentės (7 pav., a , b , d , e). Galutiniai rezultatai parodė, kad P1 tipo MFC keitiklio parametrai gerai atitinka nurodytus gamintojo ir kad jis tinka kompozicinės struktūros objektams tikrinti.



7 pav. Teigiami ir neigiami 3D poslinkiai (X , Y ir Z) pagal MFC keitiklio ilgį ir plotį: X poslinkiai pagal ilgį (a) ir pagal plotį (d), Y poslinkiai pagal ilgį (b) ir pagal plotį (e), Z poslinkiai pagal ilgį (c) ir pagal plotį (f) (1 – išmatuoti teigiami poslinkiai, 2 – išmatuoti neigiami poslinkiai)

Dvimatis analitinis modeliavimas

Žinant ultragarsinio keitiklio ar keitiklių gardelės kryptingumo charakteristikas galima įvairiais būdais padidinti didelių kompleksinių konstrukcijų tyrimų nukreiptosiomis bangomis rezultatų tikslumą. Dėl to tokių konstrukcijų neardomųjų bandymų metu galima objektyviai parinkti tikrinamo objekto vietą, kurioje derėtų įmontuoti ar priklijuoti ultragarso bangas žadinantį keitiklį, parinkti keitiklio žadinimo dažnį, tinkamą norimai bangų sklidimo modai sužadinti (pvz., A_0 , S_0 ar SH_0), arba pasirinkti tinkamą keitiklių konfigūraciją. Darbe siekta sukurti ir validuoti efektyvų 2D analitinį modelį, skirtą bet kokios rūšies kontaktinio ultragarsinio keitiklio arba keitiklių gardelės kryptingumo charakteristikoms įvertinti. Įvertinti šias charakteristikas galima esant bet kokiam žadinimo dažniui, žinant keitiklio arba keitiklių gardelės parametrus ir tiriamojo objekto terpės dispersines charakteristikas. Sukurtas modelis yra pagrįstas Huiigenso principu. P1 tipo MFC keitiklis pasirinktas 2D analitinio modelio demonstracijai. 2 mm storio aliuminio (Al) lydinio plokštė pasirinkta kaip sklidimo terpė. A_0 , S_0 ir SH_0 modų kryptingumas įvertintas analitinio modeliavimo būdu ir toliau buvo verifikuojamas eksperimentiniais tyrimais ir atliekant skaitmeninį modeliavimą baigtinių elementų metodu esant dviem žadinimo dažniams (80 kHz, 5 periodai ir 220 kHz, 5 periodai).

2D analitinis modelis sukurtas pagal Huiigenso principą, remiantis teiginiu, kad visi bangos fronto taškai gali būti laikomi bangelių, sklindančių bangų modų sklidimo greičiu, šaltinių taškais. Toliau pateikiamas sukurto 2D modelio aprašymas:

- Modelis tinka bet kokios formos kontaktinio tipo ultragarsiniam keitikliui ir yra pagrįstas 2D paviršiuje pasiskirsčiusiais taškiniais šaltiniais, spinduliuojančiais bangas. Modelyje sukuriama 81 jutiklių elementas, atsižvelgiant į pasirenkamus taškus, vienodai išdėstytus pagal apskritimo puslankį (nuo 0° iki 180°). Atstumą tarp jutiklių elementų ir spinduliuojančio keitiklio centro galima pasirinkti pagal poreikį.
- Kitame etape atliekama visų atstumo vektorių iš visų siunčiantįjį keitiklį sudarančių paskirstytų taškinių šaltinių integracija į kiekvieną jutiklio elementą.
- Padauginant iš komponentų, pagal kuriuos įvertinamas bangų slopinimas ir fazė, apskaičiuojama perdavimo funkcija. Perdavimo funkcija priklauso nuo atstumo, sklindančios bangos fazinio greičio ir sužadavimo dažnio. Fazinio greičio dispersijai apskaičiuoti naudota „Disperse“ programinė įranga.
- Bangų sklidimo modų, tokių kaip S_0 , A_0 ar SH_0 , kryptingumas taip pat priklauso nuo konkrečios sklindančios bangos modos amplitudės ir krypties. Taigi, korekcijos koeficientas, kuris priklauso nuo atitinkamos

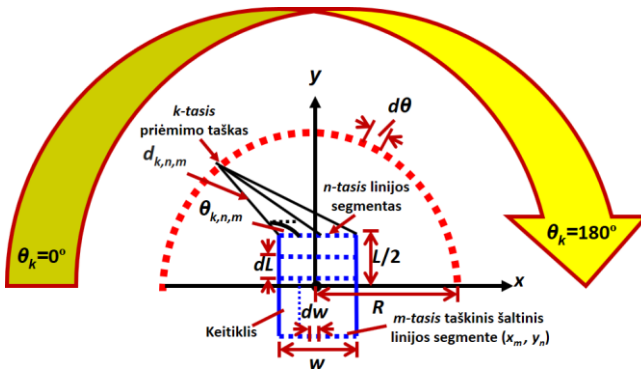
išilgai keitiklio sklindančios modos amplitudės ir krypties, yra padauginamas iš įvesties signalo. Šiam pakoreguotam įvesties signalui skaičiuojamas spektras taikant Furjė transformaciją.

- Sklindančių bangų modų difrakcija yra įvertinama įtraukiant difrakcijos koeficientą.
- Išvesties signalas dažnių srityje apskaičiuojamas padauginant modifikuotą įvesties signalo perdavimo funkciją ir difrakcijos koeficientą.
- Išvesties signalas laiko srityje apskaičiuojamas pagal atvirkštinę Furjė transformaciją (FT^{-1}). Galiausiai išvesties signalo pikinės amplitudės ($p-p$) yra atvaizduojamos polinėje koordinatinių sistemoje siekiant gauti konkrečios sklindančios bangos modos kryptingumo diagramą.

Modelis pateikiamas 8 pav. Stačiakampio formos keitiklis buvo naudojamas sukurtam 2D modeliui matematiškai aprašyti. Vis dėlto pagrindinė šio modelio metodologija visiškai priklauso nuo vektorių integracijos atstumu nuo taškinių šaltinių iki jutiklių taškų. Keitiklio centras yra laikomas 2D koordinatinių sistemos pradžia. Keitiklio stačiakampio formos dalis padalijama į n segmentų, tarp kurių yra dL tarpas pagal keitiklio ilgį (L). Visi linijiniai segmentai toliau dalijami į m skirtingų taškų, esant žingsniui dw , pagal keitiklio plotį. Taškų šaltinių koordinatės galima išreikšti taip:

$$x_m = (m - 1) \cdot dw - \frac{w}{2}; y_n = (n - 1) \cdot dL - \frac{L}{2}; \quad (7)$$

čia n linijų segmentai yra pateikti kaip $n = 1, 2 \dots N$; m taškiniai šaltiniai yra pateikti kaip $m = 1, 2 \dots M$; x_m ir y_n yra taškinių šaltinių x ir y koordinatės.



8 pav. 2D analitinio modelio schema

Modeliavimo laikas priklauso nuo žingsnių dydžių (dL ir dw). Išlaikant ilgesnius žingsnius, modeliavimo laiką galima sutrumpinti, suderinant rezultatų raišką ir tikslumą. Optimalias vertes galima parinkti atsižvelgiant į keitiklio dydį. Yra sukuriama k priimančiųjų elementų, tolygiai išdėstytų nuo 0° iki 180° apskritimo puslankiu R atstumu nuo keitiklio centro (pradžios). Taigi priimančiųjų elementų vietą galima pateikti taip:

$$x_k = R \cdot \cos\theta_k; y_k = R \cdot \sin\theta_k; \quad (8)$$

čia k priimantieji elementai yra pateikti kaip $k = 1, 2 \dots K$; θ_k – kampas tarp k -tojo priimančiojo elemento ir bangų generavimo pradžios taško $\theta_k = [(k-1) \cdot d\theta]$; $d\theta$ – kampinis žingsnis tarp priimančiųjų elementų; x_k ir y_k – priimančiųjų elementų x ir y koordinatės.

Atstumą nuo m -tojo taško šaltinio iki k -tojo priimančiojo elemento galima apskaičiuoti kaip:

$$d_{k,n,m} = \sqrt{(x_k - x_m)^2 + (y_k - y_n)^2}, \quad (9)$$

$$\theta_{k,n,m} = \tan^{-1} \left[\frac{y_k - y_n}{x_k - x_m} \right]; \quad (10)$$

čia $d_{k,n,m}$ – atstumo vektorius, $\theta_{k,n,m}$ – atitinkamas kampas.

Perdavimo funkciją sklindančiai bangai galima apskaičiuoti padauginant slopinimo ir fazės komponentus:

$$H_T(f, d_{k,n,m}, v_{ph}) = e^{-\alpha(f) \cdot d_{k,n,m}} \cdot e^{-j \frac{2\pi f d_{k,n,m}}{v_{ph}(f,h)}}; \quad (11)$$

čia $H(f, d_{k,n,m}, V_{ph})$ – perdavimo funkcija; $\alpha(f)$ – nuo dažnio priklausomas slopinimo koeficientas; V_{ph} fazinis greitis priklauso nuo tiriamojo objekto storio (h) ir žadinimo dažnio.

Korekcijos koeficientas (C_F) priklauso nuo sklindančios nukreiptosios bangos modos (pvz., A_0, S_0 ar SH_0) ir jį galima išreikšti taip:

$$C_F = A_F \cdot D_F(\theta_{k,n,m}); \quad (12)$$

čia A_F ir D_F – konkrečios bangos modos amplitudę ir kryptį išreiškiantys koeficientai.

Korekcijos koeficientas yra dauginamas iš įvesties signalo, priklausomai nuo poreikio įvertinti specifinės nukreiptosios bangos modos kryptingumą. Taigi pakoreguotas (modifikuotas) įvesties signalas laiko srityje apskaičiuojamas taip:

$$u_{EC}(t) = u_E(t) \cdot C_F; \quad (13)$$

čia $u_{EC}(t)$ – pakoreguotas (modifikuotas) įvesties signalas; $u_E(t)$ – pirminis įvesties signalas.

Dažnio srityje išvesties signalas yra apskaičiuojamas taip:

$$U_{R,k}(f, \theta_k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_{EC}(f) \cdot H_T(f, d_{k,n,m}, v_{ph}) \cdot \frac{1}{\sqrt{d_{k,n,m}}}; \quad (14)$$

čia $U_{EC}(f)$ – modifikuoto įvesties signalo $u_{EC}(t)$ Furjė transformacija; $U_{R,k}(f, \theta_k)$ – priimto signalo Furjė transformacija; $1/\sqrt{d_{k,n,m}}$ – su atstumu susijęs difrakcijos koeficientas.

Laiko srityje gautas išvesties signalas yra apskaičiuojamas pagal $U_{R,k}(f, \theta_k)$ atvirkštinę Furjė transformaciją (FT^{-1}):

$$u_{R,k}(t, \theta_k) = FT^{-1}[U_{R,k}(f, \theta_k)]. \quad (15)$$

Pikinės amplitudės (p-p) ir normuotos gautų signalų pikinės (p-p) amplitudės gali būti apskaičiuojamos:

$$A_{pp}(\theta_k) = \max[u_{R,k}(t, \theta_k)] - \min[u_{R,k}(t, \theta_k)], \quad (16)$$

$$A_{npp}(\theta_k) = \left[\frac{A_{pp}(\theta_k)}{\max[A_{pp}(\theta_k)]} \right]; \quad (17)$$

čia $A_{pp}(\theta_k)$ – pikinės amplitudės; $A_{npp}(\theta_k)$ – normuotos pikinės amplitudės.

Todėl kryptingumo diagramoje galima atvaizduoti normuotas gauto signalo amplitudes kampo θ_k atžvilgiu polinėje koordinacių sistemoje.

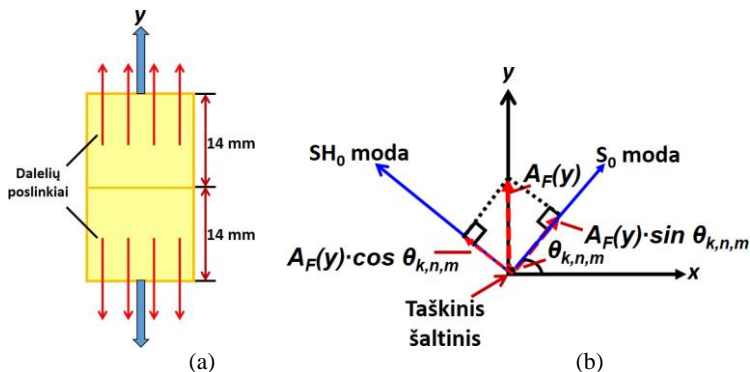
2D analitinio modelio demonstracijai pasirinktas P1 tipo MFC ultragarsinis keitiklis, kurio matmenys yra 28×14 mm. Modeliavimui pasirinkta 2 mm storio begalinio ilgio ir pločio aliuminio lydinio plokštė. Pagrindinių Lembo bangų modų (S_0 , A_0) ir SH_0 modos kryptingumą reikėjo nustatyti 300 mm atstumu nuo MFC keitiklio centro. Pagal MFC keitiklio ilgį (28 mm) buvo tiriami tolygiai (kas 1 mm) išdėstyti 29 segmentai. Kiekvienas segmentas padalytas į 15 paskirstytų taškinių bangų šaltinių. Kryptingumo diagramai atkurti pasirinkta priimančioji zona,

sukurta iš 181 pasirinkto priimančiojo taškinio elemento ribose nuo 0° iki 180° su 1° žingsniu. Atstumas tarp signalų registravimo taškų ir keitiklio centro – 300 mm. Kadangi aliuminis yra izotropinė ir sklindančios bangos neslopinti terpė, slopinimo koeficiento $\alpha(f)$ vertė buvo laikoma lygia *nuliui*. P1 tipo MFC keitiklio sukuriamų poslinkių kryptys parodytos 9 pav. Dėl P1 tipo MFC keitiklio veikimo pailgėjimo-sutrumpėjimo režimu sužadintos bangos priekine MFC keitiklio briauna ir galine briauna (9 pav.) sklido priešinga kryptimi pagal jo ilgį. Korekcijos koeficiento (C_F), kuris priklauso nuo sklindančių bangų modų amplitudės ir krypties, apskaičiavimas yra pateikiamas 9 pav. *b* dalyje. Amplitudės kitimo koeficientas (A_F) išreiškiamas kaip tiesiškai didėjanti vertė nuo 0 (MFC keitiklio centre) iki ± 1 (MFC keitiklio kraštuose) pagal ilgį.

Remiamasi nukreiptųjų bangų teorija, kad S_0 moda pasižymi dominuojančia komponente bangų sklidimo kryptimi. Kita vertus, SH_0 pasižymi dominuojančia komponente, kuri yra statmena bangų sklidimo kryptčiai, o A_0 pasižymi dominuojančia komponente, statmena bangos sklidimo plokštumai. Pasinaudojant šiuo MFC keitiklio teoriniu aprašymu ir funkcionavimo charakteristikomis, krypties faktorių (D_F) galima laikyti pastoviu atitinkamai A_0 , SH_0 ir S_0 modoms $\cos(\theta_{k,n,m})$ ir $\sin(\theta_{k,n,m})$, kaip iliustruojama 9 pav. *b* dalyje.

Korekcijos koeficientą kiekvienai modai galima apskaičiuoti taip:

$$\begin{aligned} C_F(S_0) &= A_F(y) \cdot \sin(\theta_{k,n,m}), \\ C_F(SH_0) &= A_F(y) \cdot \cos(\theta_{k,n,m}), \\ C_F(A_0) &= A_F(y). \end{aligned} \quad (18)$$



9 pav. Schemiškai pavaizduotas P1 tipo MFC keitiklio dalelių poslinkis (a) ir korekcijos koeficientas C_F (amplitudės koeficiento (A_F) ir krypties koeficiento (D_F) sandauga) (b)

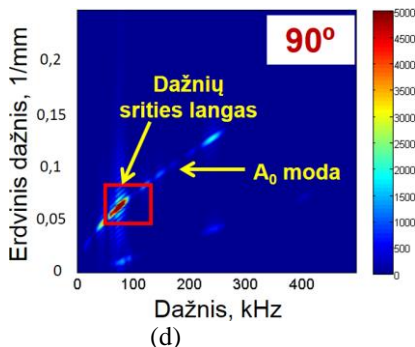
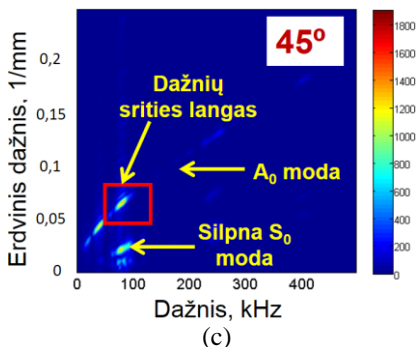
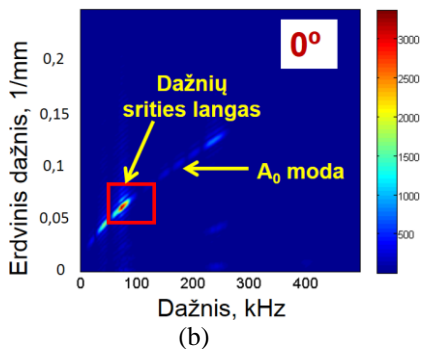
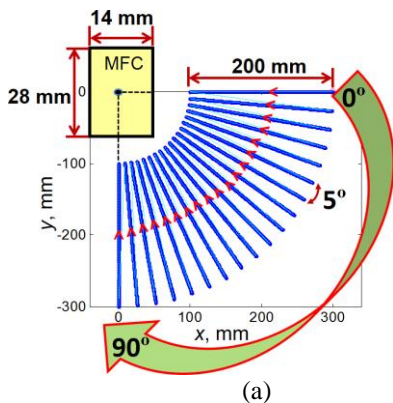
Siekiant verifikuoti sukurtą analitinį modelį, „ANSYS“ programinės įrangos paketu atliktas modeliavimas baigtiniais elementais. Aliuminio lydinio plokštė, kurios matmenys 1000×1000×2 mm, buvo modeliuojama trimatėje koordinacių sistemoje (3D). „SOLID 64“ elementai buvo naudojami siekiant sukurti 3D modelį, dažnai naudojamą kietųjų kūnų konstrukcijoms modeliuoti. Kiekvienas 1 mm dydžio elementas turėjo aštuonis mazgus, turinčius tris laisvės laipsnius arba perėjimą į tris koordinates (x , y ir z kryptys). Aliuminio lydinio plokštės mechaninės savybės pateiktos 3 lent.

3 lentelė. Aliuminio lydinio plokštės mechaninės savybės

Symbolis	Parametras	Skaitinė vertė
E	Tamprumo modulis	71 GPa
ρ	Tankis	2780 kg/m ³
ν	Puasono santykis	0,33

Užuot kūrus sudėtingą P1 tipo MFC keitiklio vidinę konstrukciją išreiškiantį modelį, į analitinį modeliavimą buvo įtrauktas tik keitiklio sukuriamų poslinkių skaičiavimas. Siekiant sukurti nukreiptųjų bangų žadinimo sritį, funkcijomis panašią į P1 tipo MFC keitiklio, kurio matmenys 28×14 mm, apatinę ir viršutinę MFC keitiklio pusių dalys buvo žadinamos priešingos fazės žadinimo signalais. Siekiant sutrumpinti modeliavimo laiką, tirtas tik 300 mm spindulio lankas signalų registravimui ribose nuo 0° iki 90° (ketvirtadalis apskritimo).

Eksperimentas atliktas siekiant validuoti analitinio ir skaitmeninio modeliavimo rezultatus. Bangų sklidimo terpė buvo aliuminio lydinio plokštė, kurios parametrai pateikti 3 lent. Aliuminio lydinio plokštės matmenys buvo 1000×1000×2 mm, o MFC keitiklis buvo priklijuotas jos centre. MFC keitiklis buvo žadinamas 80 kHz ir 5 periodų sinusiniu signalu. Nukreiptųjų bangų signalams registruoti naudotas taškinio tipo kontaktinis ultragarsinis keitiklis, kurio kontaktinio paviršiaus skersmuo mažesnis nei 1 mm, dažnių juostos plotis iki 350 kHz (–6 dB). Diskretizavimo dažnis buvo 100 MHz. Eksperimentui naudota Kauno technologijos universiteto K. Baršausko ultragarso mokslo instituto sukurta žemojo dažnio ultragarso sistema „Ultralab“. Eksperimentas buvo atliekamas impulso atspindžio režimu. MFC keitiklis priklijuotas aliuminio plokštės centre, o kontaktinio tipo imtuvas skenuotas nuotoliu nuo 200 iki 300 mm. Siekiant išvengti interferencijos ir modų sanklotos, skenavimas tik pagal apskritimo lanką siuntiklio kryptingumui įvertinti nebuvo atliekamas. Tam tikslui buvo atliekama specializuota skenavimo ir signalų apdorojimo procedūra, kurios schema pateikta 10 pav. *a–d* dalyse.



10 pav. Eksperimento metu atliktos skenavimo procedūros schema (a); pirmo, dešimto ir devyniolikto B tipo vaizdų analizė parenkant atitinkamas fazinio greičio dispersijos ir dažnių sritis (atitinkamai ties 0° , 45° ir 90°) (b–d)

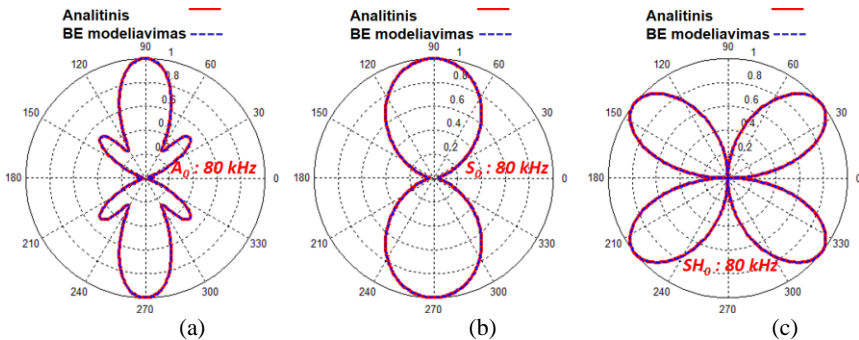
Panašiai kaip skaitmeninio modeliavimo atveju, MFC keitiklio konstrukcijos simetrija palengvino skenavimą: buvo skenuojama tik 300 mm atstumu nuo 0° iki 90° (ketvirtadalis apskritimo) ir taip sutrumpintas eksperimentui skirtas laikas. Iš viso gauta 19 B tipo vaizdų kas 5° , kaip parodyta 10 pav. a dalyje. Skenavimo žingsnis buvo 0,5 mm. Siekiant analizuoti tik dominuojančią A_0 modą, visiems B tipo vaizdams buvo taikoma dvimatė greitoji Furjė transformacija (2D-FFT). Pritaikius 2D-FFT apdorojimą, gautų visų 19 B tipo vaizdų dispersijos kreivėms buvo taikomi stačiakampiai 60–110 kHz dažnio ir 0,04–0,075 1/mm erdvinio dažnio langai. 10 pav. b–d dalyse pavaizduotos trys fazinio greičio dispersijos kreivės, gautos 2D-FFT būdu: pirmo, dešimto ir devyniolikto B tipo vaizdų, gautų atitinkamai ties 0° , 45° ir 90° . Pritaikius dažnių langą, buvo atkurta kryptingumo diagrama, atsižvelgiant į visų 19 signalų

maksimalią energiją. Eksperimentas buvo pakartotas naudojant tokią pačią matavimo sistemą, sužadinant MFC keitiklį 220 kHz dažnio ir 5 periodų signalu.

Kryptingumo charakteristikos, nustatytos analitinio ir skaitmeninio modeliavimo būdais, visiškai sutapo. 11 pav. *a–c* dalyse lyginamos S_0 , A_0 ir SH_0 modų kryptingumo diagramos, gautos analitinio ir skaitmeninio modeliavimo būdu taikant 80 kHz žadinimo dažnį.

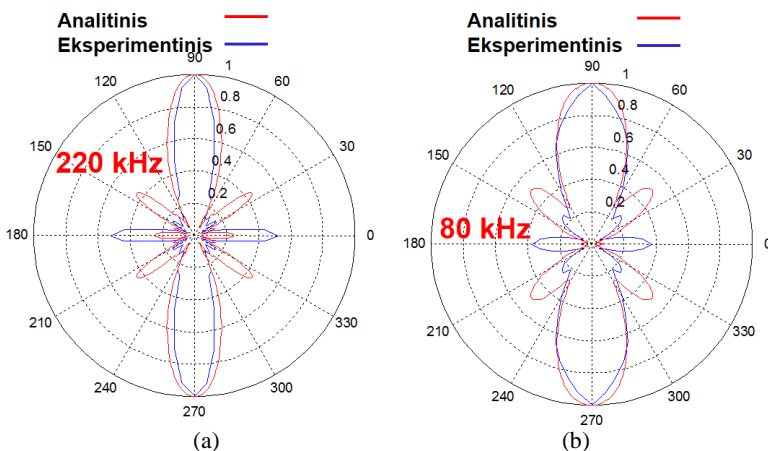
Remiantis 11 pav. pateiktais rezultatais, galima teigti, kad:

- S_0 moda yra kryptingiausia ir labiausiai dominuojanti iš visų trijų nukreiptųjų bangų modų (11 pav., *a*). Tai leidžia patvirtinti, kad P1 tipo MFC keitiklis veikia pailgėjimo-sutrumpėjimo režimu. Be to, S_0 ir A_0 modos perneša didžiausią dalį bangos energijos (pagrindiniai lapeliai) išilgine kryptimi (90° arba 270°). Tačiau pastebėta, kad S_0 modos pagrindinio lapelio plotis yra didesnis, palyginti su A_0 moda;
- A_0 modos kryptingumo diagramoje pastebimi smulkesni lapeliai ties 0° , 40° , 140° , 180° , 220° ir 320° (11 pav., *b*);
- SH_0 modos kryptingumo diagramoje pagrindiniai lapeliai pastebimi ties 40° , 140° , 220° ir 320° kryptimis (11 pav., *c*);
- šios pagrindinių lapelių kryptys galėtų parodyti, kur tvirtinti nukreiptąsias bangas spinduliuojantį keitiklį ar kurią nukreiptųjų bangų modą būtina naudoti atliekant konstrukcijos pažeidimų (defektų) paiešką;
- sužadintos S_0 modos bangos ilgis buvo 67 mm, A_0 modos – 14,83 mm. S_0 ir A_0 modų bangos ilgių skirtumas turi įtakos kryptingumo diagramų formoms.



11 pav. Modų S_0 (*a*), A_0 (*b*) ir SH_0 (*c*) kryptingumo diagramos esant 80 kHz dažniui

A_0 modos kryptingumo diagramos, gautos naudojant pasiūlytą analitinį modelį, yra lyginamos su eksperimentinių tyrimų rezultatais, gautais esant dviem skirtingiems žadinimo dažniams (80 kHz ir 220 kHz) ir pateikiamos 12 pav. (a, b). Jame galima aiškiai matyti, kad eksperimentinių tyrimų metu gautų kryptingumo diagramų pagrindinių lapelių forma beveik sutampa su analitinių tyrimų rezultatais. Šalutinių lapelių forma ir skaičius taip pat sutampa, tačiau smulkesnių šalutinių lapelių dydis reikšmingai skiriasi. Lyginant kryptingumo diagramas esant 220 kHz (12 pav., a) ir 80 kHz (12 pav., b) žadinimo dažniui, pagrindiniai lapeliai yra siauresni esant 220 kHz (12 pav., a).



12 pav. A_0 modos kryptingumo diagramų, gautų pagal sukurtą analitinį modelį ir eksperimento metu esant 220 kHz (a) ir 80 kHz (b) žadinimo dažniams, palyginimas

Skirtumas tarp smulkesnių kryptingumo diagramos šalutinių lapelių dydžių analitinio skaičiavimo ir eksperimento atvejais yra siejamas su signalų amplitudžių pasiskirstymu (amplitudės korekcijos koeficiento (A_F)) pagal MFC keitiklio struktūrą. Analitinio modeliavimo metu apytikslė amplitudės korekcijos koeficiento vertė buvo prilyginama nuliui ties centru ir tiesiškai didėjo išilgai MFC keitiklio ilgio iki ± 1 MFC keitiklio kraštuose. Būsimų tyrimų metu modeliavimo rezultatų tikslumą galima padidinti tiksliau nustatant amplitudės korekcijos koeficiento vertę.

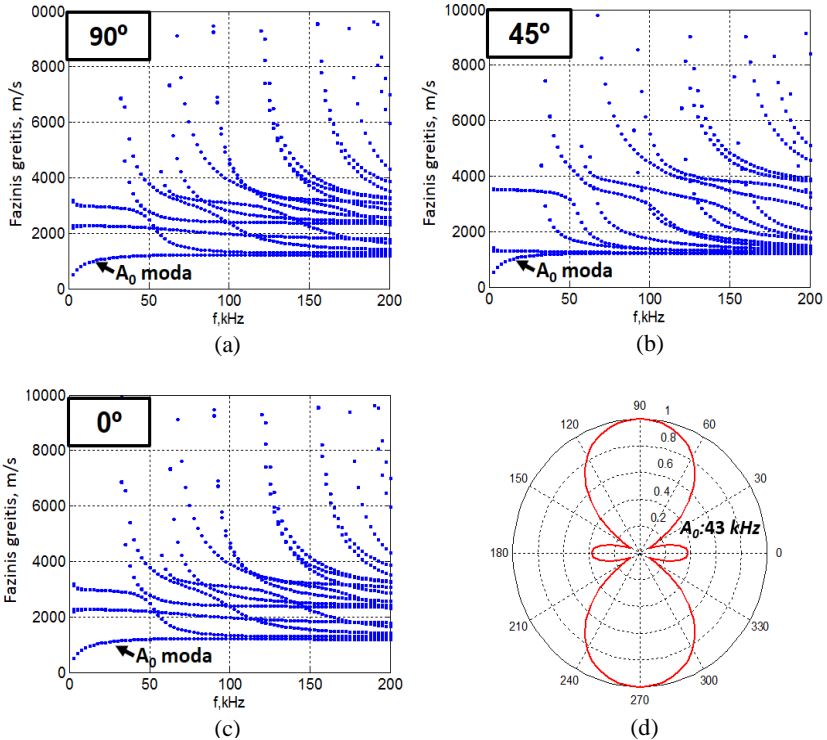
Šios disertacijos tyrimų metu MFC ultragarsinis keitiklis buvo prijungtas prie plokščio SPSP bandinio ir kontaktinio tipo priimantysis keitiklis buvo naudojamas registruoti A_0 modai, nukreiptosioms bangoms sklindant dideliu nuotoliu. MFC keitiklis buvo žadinamas 43 kHz dažniu (žr. kitą skyrių). Taigi, MFC keitiklio kryptingumas šiuo atveju buvo įvertintas SPSP objekte, neturiniame defektų, esant 43 kHz dažniui (A_0 modos atveju). Svarbu tai, kad

esant daugiasluoksnės kompozicinės medžiagos (pvz., SPSP) objektui dispersinės kreivės skirtingomis kryptimis skiriasi, kitaip nei esant izotropinės medžiagos objektui. Dėl šios priežasties pusiau analitinis baigtinių elementų metodas (PABE, angl. *SAFE*) buvo taikomas 19 fazinio greičio dispersinių kreivių suskaičiuoti srityje nuo 0° iki 90° kas 5° (5, 6, 7, 8). Fazinio greičio dispersijos kreivės 90° (pagal išilginę MFC keitiklio kryptį), 45° ir 0° (pagal MFC keitiklio plotį) kryptimis yra parodytos 13 pav. *a–c* dalyse. Tačiau tik A_0 moda yra naudojama faziniam greičiui įvertinti. Vėliau A_0 modos kryptingumo charakteristika yra atkuriamą $0–360^\circ$ srityje, kur MFC keitiklis turi simetrišką struktūrą. Priimta prielaida, kad daugiasluoksnės medžiagos savybės yra vienodos $0–90^\circ$ ir $90–180^\circ$ bei $0–180^\circ$ ir $180–360^\circ$ kampų diapazonuose. SPSP bandinio atskirų sluoksnių storis pateiktas 4 lent. Bendras SPSP bandinio storis yra 22 mm. Skaičiuojant kryptingumo diagramą bangų slopinimas yra nevertinamas.

A_0 modos faziniai greičiai daug nesiskyrė ir pagal 90° , 45° ir 0° kryptis esant 43 kHz rezonansiniam dažniui buvo 1190 m/s, 1196 m/s ir 1183 m/s. A_0 modos kryptingumo diagrama yra pateikta 13 pav. *d* dalyje. Paveikslėlyje aiškiai matoma, kad diagramos pagrindiniai lapeliai yra ties 90° ir 270° (pagal išilginę MFC keitiklio kryptį) ir SPSP bandinio vidiniai defektai gali būti aptinkami sąveikaujant su A_0 moda, jei ji sklinda išilgine MFC keitiklio ašimi.

4 lentelė. Sluoksnių storiai bandinio srityje be defektų ir srityje su defektais

Parametrai	Reikšmė
Sritis be defektų:	
Dažų sluoksnis	0,5 mm
SPSP ($0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ$) sluoksnis	2 mm
Epoksidinių klijų sluoksnis	1 mm
SPSP ($45^\circ/-45^\circ$) sluoksnis	18,5 mm
Sritis su defektais:	
Dažų sluoksnis	0,5 mm
SPSP ($0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ$) sluoksnis	2 mm
Epoksidinių klijų sluoksnis	1 mm

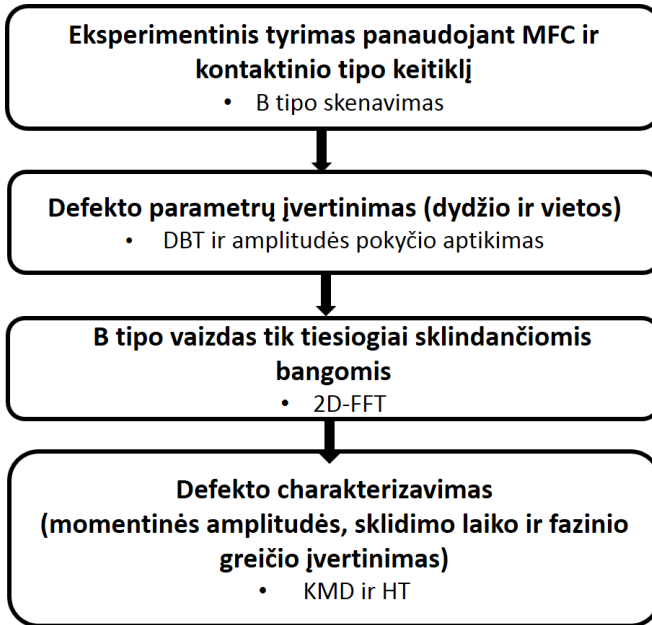


13 pav. Fazinio greičio dispersijos kreivės pagal 90°, 45° ir 0° kryptis SPSP medžiagoje (a–c). P1 tipo MFC keitiklio kryptingumo diagrama (A_0 moda) SPSP medžiagoje esant 43 kHz dažniui (d)

3. ILGOJO NUOTOLIO NUKREIPTŲJŲ BANGŲ MATAVIMO METODAS

Šiame skyriuje pasiūlytas prie tiriamojo objekto klijuojamo MFC ultragarsinio keitiklio (siuntiklio), kontaktinio ėmiklio ir atitinkamo signalų apdorojimo metodo derinys, skirtas aptikti atsiluoksniavimo defektams nukreiptosiomis bangomis esant dideliui nuotoliui. Eksperimentiniams tyrimams pasirinktas tas pats daugiasluoksnis kompozitinis bandinys (SPSP plokštė), kuris naudotas kaip vėjo turbinos mentės dalis antrajame skyriuje aprašytuose tyrimuose. Tačiau 81 mm defektas yra pagrindinėje vėjo turbinos mentės sijoje, o ne krašte. Matavimo metodo algoritmas pateiktas 14 pav. Eksperimento metu prie bandinio priklijuotas MFC keitiklis, o mechaniškai skenuojamu kontaktiniu imtuvu buvo registruojamos bandiniu sklindančios bangos. Taip pat buvo

registruojama nukreiptųjų bangų sąveika su defektu, o gautas B tipo vaizdas papildomai apdorotas siekiant įvertinti ir apibūdinti tiriamą defektą. Skaitmeninės bangelių transformacijos metodu apdoroti gauti signalai leido nustatyti defekto vietą ir dydį. Vėliau taikyta 2D-FFT siekiant nufiltruoti nuo kito bandinio krašto atsispindėjusias bangas. Galiausiai, taikant kintančių modų dekompoziciją (KMD) ir Hilberto transformaciją, gautos momentinės nukreiptųjų bangų amplitudės srityje su defektais ir srityje be defektų charakteristikos. Pagal šiuos rezultatus apskaičiuotas sklindančių nukreiptųjų bangų sklidimo laikas ir fazinis greitis.

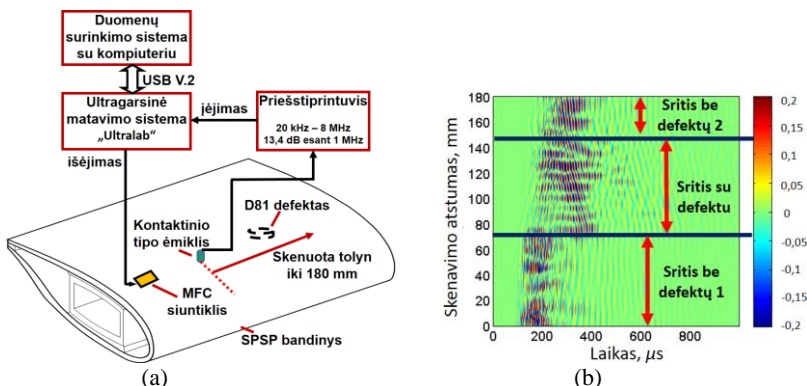


14 pav. Matavimo metodo kompozicinėje struktūroje esantiems defektams įvertinti ir apibūdinti taikant didelio nuotolio nukreiptąsias ultragarso bangas algoritmas

Bandinio pagrindinės sijos, turinčios atsiklijavimo tipo defektą, eksperimentinis tyrimas

Pažymėtina, kad kontaktinio tipo priėmimui naudotas kontaktinis imtuvas jautresnis A_0 modai. Todėl sukurtas defektų atpažinimo metodas, pagrįstas A_0 bangos charakteristikų įvertinimu srityse, kur yra defektas ir kur jo nėra. 43 kHz dažnio ir 3 periodų signalas buvo naudojamas priklijuotam MFC keitikliui sužadinti, o šiems signalams fiksuoti panaudotas mechaniškai skenuojamas kontaktinio tipo ultragarso sijos imtuvas. Eksperimente naudota Kauno technologijos universiteto K. Baršausko ultragarso mokslo institute sukurta žemojo dažnio

ultragarsinė sistema. Skenuota 180 mm atstumu 0,2 mm skenavimo žingsniu. Tokiu būdu priimtas ir užregistruotas 901 signalas, diskretizavimo dažnis 100 MHz. Eksperimentinių tyrimų schema ir įrašyti B tipo vaizdai pateikti atitinkamai 15 pav. *a* ir *b* dalyje.



15 pav. SPSP bandinio eksperimentinių tyrimų schema (*a*) ir užregistruotas B tipo vaizdas (*b*)

Signalų apdorojimo algoritmas

Pasiūlytas signalų apdorojimo algoritmas, pagrįstas diskrečiosios bangelių transformacijos (DBT), dvimatės greitosios Furjė transformacijos (2D-FFT), kintančių modų dekompozicijos (KMD, angl. *VMD*) ir Hilberto transformacijos (HT) teigiamų savybių deriniu.

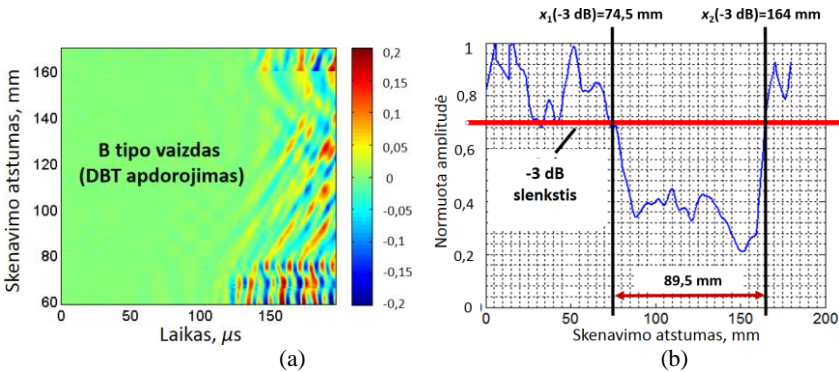
B tipo vaizdo signalų triukšmui sumažinti taikyta diskrečioji bangelių transformacija. Signalams išskaidyti į 8 lygius panaudota Daubechies pirminė bangėlė db8. Gautiems koeficientams filtruoti pasirinktas švelnus slenkstis pagal universalų slenkščio įvertinimo algoritmą. 16 pav. *a* dalyje pavaizduotas B tipo vaizdas su sumažintu triukšmu laiko intervale 0–200 μs ir 0–180 mm skenavimo atstumu. B tipo vaizde (16 pav., *a*), kuriame sumažintas triukšmas, defekto vieta geriau matoma nei originaliame B tipo vaizde (16 pav., *b*).

Siekiant nustatyti 81 mm defekto dydį ir vietą, pritaikytas 0,707 (–3 dB) aptikimo slenkstis (16 pav., *b*). Jeigu x_1 ir x_2 yra amplitudės taškai –3 dB lygyje (16 pav., *b*), defekto vieta (atstumas nuo pirmojo skenavimo taško) ir defekto dydis nustatomi pagal šias išraiškas:

$$81 \text{ mm defekto vieta} = x_2, \quad (19)$$

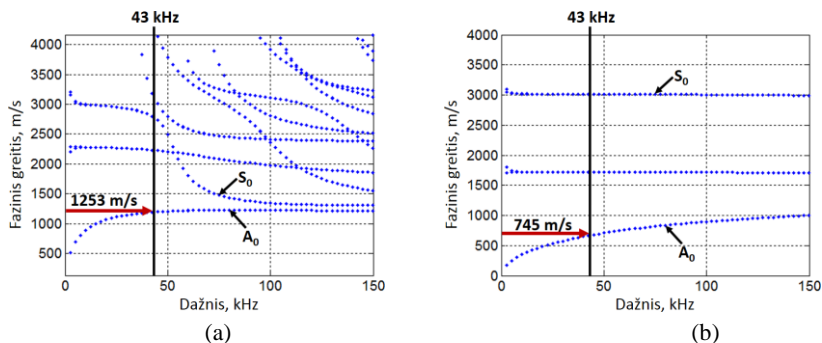
$$81 \text{ mm defekto dydis} = x_2 - x_1. \quad (20)$$

81 mm defekto dydis ir vieta buvo apskaičiuoti iš visų B tipo vaizdo, kuriame sumažintas triukšmas, A tipo signalų amplitudžių, jas matuojant nuo minimalios iki maksimalios (16 pav., *a*). 81 mm defekto apskaičiuota vieta ir dydis buvo atitinkamai 74,55 mm ir 89,5 mm, o absoliučiosios paklaidos buvo atitinkamai 0,95 ir 8,5 mm. Nepriklausomai nuo tokių matavimo paklaidų, ši metodika leidžia efektyviai pritaikyti siuntimo–priėmimo metodą didelių struktūrų neardomiesiems bandymams naudojant P1 tipo MFC keitiklius ir ultragarsinius kontaktinio tipo keitiklius. Be to, paklaidos gali būti sumažintos sukūrus kontaktinio tipo keitiklį, kurio centrinis dažnis būtų artimesnis MFC keitiklio dažniui, arba sukūrus efektyvesnius signalų apdorojimo metodus. Tai galėtų būti pritaikyta tolesniems tyrimams.



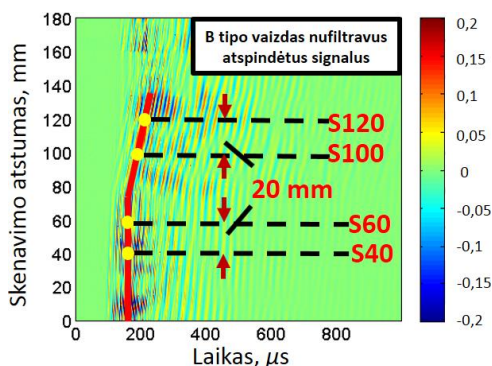
16 pav. B tipo vaizdas, iš kurio pašalintas triukšmas pritaikius DBT (*a*); aptikus maksimalios amplitudės pokyčius -3 dB lygyje atkurti defekto matmenys (*b*)

Sklindančių bangų modos ir jų fazių greičių nebuvo galima išmatuoti taikant vien tik dvimatę Furjė transformaciją dėl priimamo signalo kompleksiško, nulemta daugybinių atspindžių ir sklaidos. Šiuos reiškinius sukelia kintantis struktūros storis tiek srityse su defektais, tiek srityse be jų. Dėl šios priežasties teoriniai sklindančių nukreiptųjų ultragarso bangų modų fazių greičio skaičiavimai buvo atlikti pusiau analitiniu baigtinių elementų metodu. Analizės metu priimta, kad tiriamojo objekto srities, neturinčios defektų, storis 22 mm, o srities, turinčios defektų, storis 3,5 mm. Šios reikšmės atitinka realaus bandinio storio vidutines reikšmes srityje su defektais ir srityje be defektų. Modeliavimo rezultatai pateikiami 17 pav. *a* ir *b* dalyse. Srityje be defektų sklindančios A_0 modos fazinis greitis esant 43 kHz dažniui yra 1253 m/s, o fazinis greitis srityje su defektais – 745 m/s.



17 pav. Fazinio greičio dispersijos kreivės, apskaičiuotos PABE metodu: bandinio sritis be defektų (a) ir bandinio sritis su defektais (b)

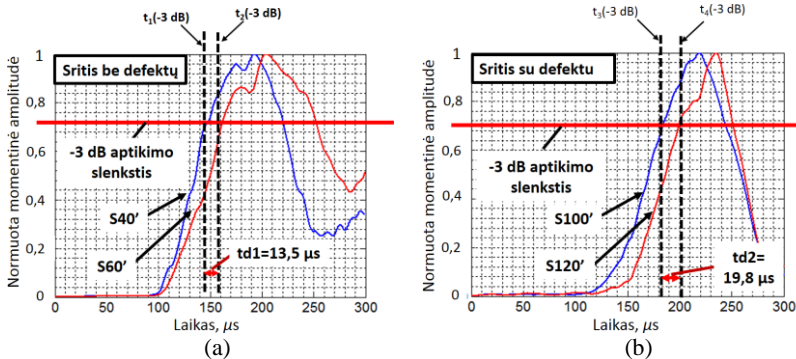
Ekspirimentinis B tipo vaizdas analizuotas taikant dvimatę Furjė transformaciją. Kitame analizės etape buvo nufiltruoti signalai, kurie galėjo atsispindėti nuo priešingo bandinio krašto. Atvirkštinė dvimatė Furjė transformacija buvo pritaikyta siekiant atkurti B tipo vaizdą vien iš tiesiogiai sklindančių bangų. Apdorotas B tipo vaizdas nufiltravus atspindėtas bangas parodytas 18 pav. Siekiant įvertinti atsklidimo laiką ir fazinius greičius, analizuoti du A tipo signalai iš srities su defektais ir iš srities be defektų. Srityje be defektų buvo pasirinkti du signalai (S40 ir S60), kurie buvo užregistruoti 40 ir 60 mm atstumu. Srityje, turinčioje 81 mm skersmens defektą, analogiškai buvo parinkti du signalai (S100 ir S120), kurie buvo užregistruoti 100 ir 120 mm atstumu. Abiem atvejais tarp signalų registravimo taškų parinktas fiksuotas 20 mm nuotolis.



18 pav. B tipo vaizdas, gautas nufiltravus atspindėtas bangas

Kitas žingsnis yra modų dekompozicijos pritaikymas siekiant sumažinti koherentinį triukšmą ir kiekvieno iš keturių A tipo signalų modų sanklotą. Variacinis modų dekompozicijos metodas buvo pritaikytas visų keturių A tipo signalų dekompozicijai į šešias atitinkamas BMF. Pirmiausia nustatyta, jog kiekviena moda turi tolygiai pasiskirsčiusį centrinį dažnį. Procesui iš viso buvo pritaikyta 500 iteracijų su konvergencijos tolerancija ($1 \cdot 10^{-7}$). Buvo aiškiai matoma, kad dauguma triukšmingų ir aukštojo dažnio (HF) komponentų buvo aptinkama BMF3-6 funkcijoje. Taigi po apdorojimo signalai atkuriami sudedant kiekvieno iš keturių atvejų BMF1 ir BMF2. Naujai rekonstruoti signalai buvo pažymėti S40', S60', S100' ir S120'.

Galutinis žingsnis – palyginti momentines signalų porų amplitudes srityse be defektų (S40' ir S60') ir srityse su defektais (S100' ir S120'), pritaikius HT įvertinti šių signalų suvėlinimo laiką. Abiejų atvejų momentinio laiko amplitudžių charakteristikos pateikiamos 19 pav. *a* ir *b* dalyse. Pritaikius –3 dB slenkstinę vertę, buvo įvertinti suvėlinimo laiko tarpai tarp dviejų signalų t_{d1} (S40' ir S60' atveju) ir t_{d2} (S100' ir S120' atveju). Nustatytos t_{d1} ir t_{d2} vertės buvo 13,5 μ s ir 19,8 μ s.



19 pav. Signalų porų momentinių amplitudžių charakteristikos (S40' ir S60') srityje be defektų (*a*) ir srityje su 81 mm skersmens defektu (S100' ir S120') (*b*)

Kadangi tarp dviejų signalų srityje be defektų ir srityje su defektu buvo paliktas fiksuotas 20 mm nuotolis, vidutinė fazinio greičio vertė gali būti apskaičiuojama padalijant nuotolį iš suvėlinimo laiko. Taigi, nukreiptosios ultragarso bangos fazinio greičio reikšmė srityje be defektų buvo 1482 m/s; ši vertė staigiai nukrito iki 1010 m/s srityje su defektu. Lyginant šias vertes su vertėmis, gautomis taikant PABE metodą, matyti, kad skirtingais signalo apdorojimo būdais gauti rezultatai šiek tiek skiriasi (PABE metodu srityje be defektų buvo gautas 1253 m/s, o srityje su defektais – 745 m/s fazinis greitis),

tačiau greičio pakitimo skirtumai panašūs (srityje su defektais ir srityje be defektu). Modeliavimo PABE metodu metu bandinio storis buvo laikomas fiksuotu. Kita vertus, realaus bandinio storis nebuvo pastovus nei srityje su defektais, nei srityje be defektų. Be to, PABE metodas neleido įvertinti galimų nukreiptųjų ultragarso bangų sąveikų su defektais, tokių kaip modų virsmai, sklaida, atspindžiai.

IŠVADOS

1. Šiame darbe sukurti du ultragarsiniai matavimo metodai, paremti dviem principais: nukreiptųjų ultragarso bangų sklidimu trumpuoju atstumu ir bangų sklidimu ilguoju atstumu. Šie metodai yra skirti atsiklijavimo defektams mažų ir didelių gabaritų kompozicinėse konstrukcijose aptikti. Atlikti SPSP bandinio – vėjo turbinos mentės su dirbtiniais 15–81 mm skersmens defektais – eksperimentiniai tyrimai. Tyrimuose taikytas tiesioginio nukreiptųjų bangų sklidimo režimas. Sukurti metodai ir naudojama įranga paprastesni nei šiuo metu praktikoje taikomi impulso atspindžio ir fazuotųjų gardelių metodai. Tiriamojo objekto kompozicinės struktūros nulemtas struktūrinis triukšmas buvo sumažintas taikant bangelių transformaciją, o defektams aptikti buvo pritaikytas -3 dB slenkstis. Trumpojo nuotolio nukreiptųjų bangų matavimo metodu nustatytus 15 mm ir 25 mm skersmens defektų dydį ir vietą gauta $\pm 5,76$ mm neapibrėžtis, o taikant ilgojo nuotolio nukreiptųjų bangų matavimo metodą 81 mm skersmens defekto dydžiai ir vietai nustatyti gauta $\pm 5,82$ mm neapibrėžtis.
2. Trumpojo nuotolio nukreiptųjų bangų sklidimo metodas paremtas dviejų kontaktinių ultragarsinių keitiklių naudojimu. Dirbdami poroje kaip siuntiklis ir ėmiklis jie sužadina ir registruoja tiriamuoju objektu sklindančias nukreiptąsias bangas. Buvo parinktas 50 mm fiksuotas atstumas tarp ultragarsinių keitiklių siekiant sumažinti nepageidaujamas dispersijos, slopinimo ir akustinių bangų sklaidos efektus. Taikant ilgojo nuotolio nukreiptųjų bangų sklidimo metodą, P1 tipo MFC siunčiantysis keitiklis fiksuojamas, o kontaktinio tipo pjezokeraminis imtuvas skenuojamas virš tiriamojo objekto.
3. Nukreiptųjų bangų momentinėms charakteristikoms analizuoti buvo sukurta metodika, kuri paremta signalo dekompozicija į būdingąsias komponentes ir jų spektrinių tankių palyginimu. Atrinkus informatyviausias komponentes, iš jų atkuriamas apdorotas signalas. Tada taikant Hilberto transformaciją nustatomos momentinės amplitudės ir dažnio charakteristikos. Atspindžiams nuo objekto krašto eliminuoti pasiūlyta taikyti 2D-FFT ir tada atlikti dekompoziciją.

4. Kompozicinių struktūrų tyrimams ir stebėsenai atlikti yra perspektyvu naudoti nedidelių gabaritų, ploną ir lankstų MFC tipo keitiklį. Siekiant įvertinti tokio keitiklio 3D poslinkius ir kryptingumą generuojant nukreiptąsias ultragarso bangas, sukurtas 2D analitinis kryptingumo diagramų skaičiavimo modelis. Šis modelis gali padėti prognozuoti kryptingumo diagramas esant bet kokios medžiagos objektui, žinant žadinimo dažnį, bangų sklidimo atstumą ir fazinio greičio dispersiją. Šis modelis suteikia informaciją apie siuntiklio žadinimo dažnį, dominuojančias modas, keitiklių tvirtinimo vietas. Taip pat šiuo modelių rezultatai gaunami kur kas greičiau nei skaitmeninio modeliavimo baigtinių elementų modeliais arba eksperimentiniais tyrimais.

TOLESNIŲ TYRIMŲ GALIMYBĖS

Siūlomus metodus galima pritaikyti realiojo laiko ultragarsiniuose neardomųjų bandymų tyrimuose. Tolesnių tyrimų galimybės:

- 3D poslinkių tyrimas leidžia įvertinti neapkrauto MFC tipo keitiklio funkcionalumą ir aptikti tokių keitiklių gedimus. Taip pat tikslinga atlikti neapkrauto (virpančio ore) ir priklijuoto prie metalinės arba kompozicinės konstrukcijos keitiklio lyginamąjį tyrimą.
- Rezultatai, gauti taikant sukurtą 2D analitinį modelį, ir eksperimento rezultatai parodė reikšmingą kryptingumo diagramų pagrindinių lapelių sutapimą ir jų panašumus. Tačiau buvo pastebėtas reikšmingas kryptingumo diagramos šalutinių lapelių dydžių skirtumas. Šis skirtumas yra siejamas su apytiksliai apskaičiuotu amplitudės korekcijos koeficientu, naudojamu analitiniam modeliui siekiant supaprastinti skaičiavimus. Tolesniuose tyrimuose galima padidinti rezultatų tikslumą įtraukiant tikslesnę amplitudės korekcijos koeficiento vertę.
- Defektų matavimų tikslumui padidinti galima sukurtus metodus praplėsti sujungiant tiek kontaktinius, tiek bekontaktinius ultragarso matavimo metodus.
- Rezultatai, gauti taikant signalų apdorojimo algoritmus, buvo pagrįsti amplitudės pokyčiais laiko ir erdvės atžvilgiu. Galima sukurti signalų apdorojimo algoritmą, pagrįstą ne tik amplitudžių, bet ir kitų parametrų įvertinimais. Be to, defektų įvertinimas ir charakterizavimas priklausė nuo A_0 modos bangų su dominuojančia vertikaliąja komponente, kuriai priimti naudotas itin jautrus kontaktinio tipo imtuvas. Ateityje galima atlikti patobulinimus, kurie leistų įvertinti ir S_0 modą.

PUBLIKACIJŲ SARAŠAS

Straipsniai, paskelbti „Clarivate Analytics / Web of Science“ pagrindinio sąrašo leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Tumsys, Olgirdas; Ostreika, Armantas; Jankauskas, Kestutis; Jakutavicius, Julijus. Defect estimation in non-destructive testing of composites by guided waves and image processing. *Electronics*, 2019, Vol.8, Article No. 315, p. 1–16. ISSN:2079-9292 [I.F. = 2,11 (2017), **Q2**]
2. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Identification and Characterization of Defects in Glass Fiber Reinforced Plastic by Refining the Guided Lamb Waves. *Materials*, 2018, Vol.11, Article No. 1173, p. 1–23. ISSN:1996-1944 [I.F. = 2,467 (2017), **Q2**]
3. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Mazeika, Liudas; Samaitis, Vykintas. 2D analytical model for the directivity prediction of contact type ultrasonic transducers in the generation of guided waves. *Sensors*, 2018, Vol. 18, Article No. 987, p. 1–17. ISSN:1424-8220 [I.F. = 2,475 (2017), **Q1**]
4. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Post-processing of ultrasonic signals for the analysis of defects in wind turbine blade using guided waves. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2018, Article No. 030932471877266, p. 1–10. ISSN:0309-3247 [I.F. = 1,320 (2017), **Q3**]
5. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Investigation of 3D displacement characteristics of Macro Fiber Composite transducer (MFC-P1). *Materiali in Tehnologije (Materials and technology)*, 2018, Vol. 52, Iss. 2, p. 235–239. ISSN:1580-2949 [I.F. = 0,59 (2017), **Q4**]
6. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Samaitis, Vykintas. Hybrid Signal Processing Technique to Improve the Defect Estimation in Ultrasonic Non-Destructive Testing of Composite Structures. *Sensors*, 2017, Vol. 17, Article No. 2858, p. 1–21. ISSN:1424-8220 [I.F. = 2,475 (2017), **Q1**]
7. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Ostreika, Armantas; Platuziene Jurate. Efficient FPGA-based FIR architecture and its significance in ultrasonic signal processing. *Journal of Vibroengineering*, 2017, Vol. 19, Iss. 8, p. 6423–6432. ISSN:2538-8460 [I.F. = 0,398 (2016), **Q3**]

Straipsniai, paskelbti mokslinių konferencijų pranešimų leidiniuose, indeksuoti „Clarivate Analytics / Web of Science“ pagrindiniame sąrašė (neturinčiuose citavimo indekse)

1. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Refinement in the defect detection in the contact and non-contact ultrasonic non-destructive testing of wind turbine blade using guided waves. *Procedia Structural Integrity* (proceedings of 22nd European Conference on Fracture – ECF22, 26–31 August 2018, Belgrade, Serbia), 2018, Elsevier, Vol. 13. p. 1566–1570. ISSN: 2452-3216
2. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Samaitis, Vykintas. Signal processing methods to improve the Signal-to-noise ratio (SNR) in ultrasonic non-destructive testing of wind turbine blade. *Procedia Structural Integrity* (proceedings of 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4–7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal), 2017, Elsevier, Vol. 5, p. 1184–1191. ISSN:2452-3216
3. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Mazeika, Liudas; Samaitis, Vykintas. Development of a 2D analytical model for the prediction of directivity pattern of transducers in the generation of guided wave modes. *Procedia Structural Integrity* (proceedings of 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4–7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal), 2017, Elsevier, Vol. 5, p. 973–980. ISSN: 2452-3216
4. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Comparative analysis of non-contact ultrasonic methods for defect estimation of composites in remote areas. *CBU International conference proceedings* (proceedings of CBU international conference on innovations in science and education 23-25 March 2016, Prague, Czech Republic), 2016, Vol. 4, p. 846–851. ISSN:1805-997X

Tezės recenzuojamuose mokslinių konferencijų pranešimų leidiniuose

1. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Tumsys, Olgirdas; Raisutis, Renaldas. Applicability of wavelet transform for the defect estimations in glass fiber based composite structures by ultrasonic non-destructive. Open Reading-2019-62nd International conference for students of physics and natural sciences, 19–22 March 2019, Vilnius, Lithuania. 2019. p. 65. ISBN: 9786090701379
2. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Refinement in the defect detection in the contact and non-contact ultrasonic non-destructive testing

of wind turbine blade using guided waves. 22nd European Conference on Fracture – ECF22, 26–31 August 2018, Belgrade, Serbia. 2018. p. 431. ISBN: 9788690068609

3. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Samaitis, Vykintas. Signal processing methods to improve the Signal-to-noise ratio (SNR) in ultrasonic non-destructive testing of wind turbine blade. 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4–7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal: Book of abstracts. Porto: INEGI, 2017. p. 182. ISBN: 9789728826338
4. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas; Mazeika, Liudas; Samaitis, Vykintas. Development of a 2D analytical model for the prediction of directivity pattern of transducers in the generation of guided wave modes. 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4–7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal: Book of abstracts. Porto: INEGI, 2017. p. 170. ISBN: 9789728826338
5. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Comparative analysis of non-contact ultrasonic methods for defect estimation of composites in remote areas. CBU international conference on innovations in science and education 23–25 March 2016, Central Bohemia University, Prague, Czech Republic: Book of Abstracts. 2016, p. 146. ISBN: 9788088042037
6. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Signalo apdorėjimo metodai siekiant pagerinti signalo ir triukšmo santykį (STS) vėjo turbino menčių (VTM) ultragarsiniuose neardomuosiuose matavimuose. Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai [elektroninis išteklius]: 7-oji jaunųjų mokslininkų konferencija (Interdisciplinary Studies in Physical and Technological Sciences [Electronic Resources]:7th Young Scientists' Conference), 9 February 2017, Lithuanian academy of sciences, Vilnius, Lithuania: Summary of reports. 2017, p. 58.
7. **Tiwari, Kumar Anubhav**; Raisutis, Renaldas. Comparison of non-contact ultrasonic methods for the defects estimation of composites in remote area. Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai [elektroninis išteklius]: 6-oji jaunųjų mokslininkų konferencija (Interdisciplinary Studies in Physical and Technological Sciences [Electronic Resources]:6th Young Scientists' Conference), 10 February 2016, Lithuanian Academy of sciences, Vilnius, Lithuania: Summary of reports. 2016, p. 50.

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Išsilavinimas

- 2014–2018: Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo instituto doktorantas (matavimų inžinerijos mokslo kryptis, T 010), Lietuva.
- 2011: elektronikos inžinerijos magistro kvalifikacinis laipsnis, Vestminsterio universitetas, Anglija.
- 2004: elektronikos ir komunikacijų inžinerijos bakalauro kvalifikacinis laipsnis, Utar Pradešo technikos universitetas (Dr. A. P. J. Abdulo Kalamo technikos universitetas), Indija.

Tyrimų kryptys

Ultragarsiniai kontaktiniai ir nekontaktiniai metalų ir kompozicinių konstrukcijų neardomieji bandymai; vėjo turbinų ir orlaivių defektų parametrų matavimas; medžiagų charakterizavimas. Signalų ir vaizdų apdorojimo algoritmų, skirtų neardomųjų bandymų metodų tikslumui pagerinti, kūrimas.

Darbo patirtis

- 2015–dabar: lektorius, Kauno technologijos universiteto Multimedijos inžinerijos katedra, Lietuva.
- 2018–dabar: jaunesnysis mokslinis darbuotojas, Kauno technologijos universiteto Prof. K. Baršausko ultragarso mokslo institutas, Lietuva.
- 2012–2014: lektorius / docentas, Ambalikos vadybos ir technologijų institutas, Indija.

Pasiekimai

Kumar Anubhav Tiwari yra 20 mokslinių publikacijų autorius ar bendraautoris, daugybės recenzuojamų mokslinių žurnalų recenzentas. 2009–2011 m. gauta visiško atleidimo nuo įmokos už magistrantūros studijas stipendija Vestminsterio universitete (Londonas). 2014–2018 m. suteikta Lietuvos mokslo tarybos stipendija doktorantūros studijoms. 2016 m. gauta Lietuvos mokslo tarybos ir „Infobalt“ stipendija, kurią įsteigė „Infobalt ICT“. 2017 m. gautas Kauno technologijos universiteto (Lietuva) aktyviausių doktorantų apdovanojimas (stipendija) ir Lietuvos mokslo tarybos apdovanojimas už akademinis pasiekimus. 2018 m. užimta antroji vieta Lietuvos nacionalinėje konkurso „Falling Walls Lab“ atrankoje, organizuotoje Vokietijos akademinės mainų tarnybos (DAAD) kartu su Vokietijos ambasada Vilniuje, Goethe'ės institutu, Europos humanitariniu universitetu (EHU) ir Vokietijos federaline užsienio reikalų ministerija. 2018 m. gauta Europos struktūrinio vientisumo draugijos (ESIS) teikiama parama mokslininkams.

ABSTRACT

INTRODUCTION

Structural integrity assessment is an evaluation into the integrity and conformity of a structure for its reliable performance operation over set duration under varying loading conditions providing the fact that defects/damages or flaws are being detected in the correct manner. In most industrial and household applications, such as nuclear and green energy applications, renewable energy applications (wind and tidal power plants), pipelines and storage tanks, construction industry, structures in the ground, water and aerospace applications are constructed from composite materials. Composite materials are being used quite intensively in various industrial and household applications due to its lightweight, high compressive and tensile strengths, high stiffness and low density, flexibility, lower maintenance and non-corrosive nature. Generally, the composite materials are classified based on their matrix materials. Out of the various composite materials; the fiber-reinforced plastics (FRP) are widely used for providing the lower weight and height strength to the structures. The carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) and glass fiber-reinforced plastic (GFRP) are the most common FRPs to manufacture the components of the structures operating under cyclic loads including the aircraft wings and wind turbine blades. In spite of all the favorable features and a wide range of applications, the composites contain, the failure in the components of composite structures may occur either *in-service* or during the manufacturing procedure (6, 7) which can be described as follows:

- Manufacturing defects: Bonding defects, flaws due to porosity, incorrect fiber volume due to extra/ insufficient resins, misaligned fibers, cracks in ply and delamination.
- In-service defects: Cracks, fracture, buckling of fibers, delamination due to bond failures, failure at the interface between fiber and matrix or moisture damage.

In order to keep the proper functioning and avoiding the failures of infrastructures, regular maintenance and inspection are necessary. Researchers already found that the cost involving in maintenance and inspection of aircraft corresponds to 25 % of its entire life-cycle cost. Thus, structural health monitoring (SHM) systems are implemented on the composite structures for the reduction of maintenance cost and prevention of system failures. The previous works suggested that an optimal SHM system can effectively reduce the maintenance and inspection cost by 30% to 40 %. The transducers/sensors in SHM systems are used for recording the data and extracting the features of defects/damages from the recorded signals. Many non-destructive testing (NDT) methods have been developed for the identification, location and estimation of defects in SHM of

structures such as ultrasonic testing, radiographic testing and electromagnetic testing, etc.

Among all the available NDT techniques, the ultrasonic guided wave (GW) testing has been the most promising due to its high sensitivity to the defects and wide coverage region. Moreover, GW testing is fast, requires minimal training, can cover up the defective regions up to the reasonable distances and have the ability to detect the defects under the ground, water or insulation layer. In comparison to guided wave testing, the bulk wave testing is tedious and time-consuming, requires high-level training, uses a point-by-point scanning method and needs visible area and accessibility of the defective region. Due to the high sensitivity of GWs to the variation in modulus of elasticity (E) of the material under test and minimal amplitude damping of propagating wave modes, only a few measurements are required for the inspection of large infrastructures for the detection of internal and surface defects. The researchers have successfully utilized the GWs for the inspection of defects/damages in metallic structures concrete structures pipes and composite structures.

The ultrasonic GW testing is an effective inspection technique for the estimation of location (distance of the edge of defect from initial/first scanned point) and size of defects/damages in various composite structures. However, high attenuation of guided wave modes may occur due to the multi-layered and non-homogeneous structures associated with the composites. The interaction of ultrasonic guided waves with the composite structures depends on many factors which include excitation frequency, material properties, the geometry of structure and the direction of propagating waves. The possible mechanisms that may occur during the interaction of ultrasonic GW with the layered structure of composites are reflection or refraction of wave modes, scattering and mode conversions. It increases more complexity in the received ultrasonic signals so that the extraction of defects-related information becomes very difficult which can be overcome by applying an appropriate signal processing technique. The conventional C-scan process is not suitable for large-sized composite structures with complex geometries. If the transducers are able to be scanned over the defects, the acquired B-scan or few A-scans are fast and economical approach in the GW testing for large structures. In this work, only B-scan or A-scans are acquired experimentally and used for further processing. However, the accuracy in estimation of size and location of defects depends on various factors such as GW properties, type of transducers and material or excitation frequency etc. Generally, the comparison of the reference and current states of the system has a major role in a successful SHM system. In the case of contact transducers attached to the structure, the reference data in the damage-free region is calculated by estimating the initial time-signals between all possible combinations of transducer-pairs. The algebraic difference between the reference and current time signals provides information about the

damage by eliminating the boundary reflections. This technique has some serious limitations such as complexities associated with calibration and verification of SHM system and provides no information about the size, location and type of defects rather than the little information about the presence of defects. Therefore, more efforts are required to be carried out for the development of effective measurement techniques including the adaptation of post-processing of GW signals are required to increase the efficiency of an NDT and SHM system for real-time applications. The correct combination of experimental analysis and signal processing approaches to process the GW signals leads to obtaining the significant results.

During the investigation of a sample, GW transducers can be utilized in a different manner. The measurement set-up irrespective of other concerned parameters also depends on the size or length of the structure and in accordance, a combination of transducers can be selected. In this thesis the segment of WTB constructed from GFRP has been considered as an object (see Chapter 2 and Chapter 4 for details). Most of the scientific research work and commercial testing of WTB based on contact ultrasound has been performed by utilizing the ultrasonic phased array methods and ultrasonic pulse-echo techniques (44, 45, 46, 47). The inspection time and complexity in the testing of WTB is associated with the layered structure, type of defects and the length of the blade. In comparison to the pulse-echo, the pitch-catch technique is more flexible in terms of placement of transducers. Moreover, it reduces the complexity and cost associated with phased-array technique due to the usage of a lesser number of devices. In another aspect, the measurement techniques can be developed depending on the length of the structure by using the suitable configuration of transducers operating in pitch-catch mode.

Keeping this motivation in the account, two different measurement techniques (*e.g.* for small and large structures) with less complexity and more flexibility can be developed, by using only two contact-type transducers operating in a pitch-catch mode. Subsequently, there can be such a case if two transducers separated by a shorter distance (few wavelengths of propagating wave modes or few tens of mm) and operating in a pitch-catch mode could be used for testing the structure containing defects at shorter distances from the GW transmitter/ receiver. By keeping the fixed shorter distance between both the transducers also reduces the attenuation and dispersion losses due to the distance between transducers.

However, low-frequency (LF) GWs can travel up to long distances and this feature is very useful for NDT and SHM of larger structures. Therefore, in the second case, an ultrasonic GW transducer (transmitter) can be glued/ embedded with a structure at a certain position and a distant receiver can be scanned over the defective regions at longer distances from the ultrasonic transmitter. However, this long-distance measurement set-up using ultrasonic GWs highly depends on the

location, displacement characteristics and region and direction of coverage (directivity pattern) of the embedded/glued transmitting transducers. Therefore, in order to improve the measurement accuracy, the prior information of the displacement characteristics and directivity pattern of a transmitter is as much of importance as the investigation of defects by a fixed transmitter and a scanning receiver especially in the case of glued/embedded transmitter. In both GW measurement techniques (short distance and long distance), the appropriate signal processing methods depending on the parametric characteristics of the receiver signal should be developed for the estimation of defect parameters (size and location) and GW characteristics (time of arrival, instantaneous amplitude/frequency characteristics and phase velocity of propagating wave modes etc.).

Therefore, the detection and estimation of the presented defects or damages on the composite structures and the characteristics of GWs in defective regions can be performed in an effective manner by the following possible procedures:

1. The contact-type measurement technique for short distance (between transmitter and receiver) GW testing of the composite structure can be developed by using a pair of point-type contact ultrasonic transducers.
2. The contact-type measurement technique for longer distance (between transmitter and receiver) GW testing or for the inspection of large composite structures, can be developed by a thin and compact sized embedded/glued transmitter and a scanning receiver. In the case of a glued/embedded transmitter to be used for long-range GW testing, the characteristics of a transmitter such as a directivity and three-dimensional (3D) displacements profile could be analyzed for the assurance of correct placement of transducer and effective generation of GWs on the structure under investigation.
 - The three-dimensional (3D) characteristics of a transducer can provide the behavior of transducer *in-plane* (displacements along the direction of wave propagation and perpendicular direction of wave propagation) and *out-of-plane* directions. Moreover, the obtained characteristics can be compared with the manufacturer data-sheet in order to validate if the transducer itself is a defect-free before embedding/gluing it on the structure (48).
 - The directivity of the sensors/transducers can be calculated of the transducer to be embed or glued for effective coverage of the damaged region of the structure under test. Moreover, the prior knowledge of directivity patterns of the transducers facilitates to choose the appropriate excitation frequency, the propagating wave modes of interest and the suitable configuration of transducers (49, 50).

3. The experimental unprocessed GW signals are not enough to locate, size or characterize the internal defects. Appropriate signal processing techniques should be applied for the post-processing of the received ultrasonic GW signals to improve the estimation and characterization of defects by analyzing the variations in signal parameters such as amplitude, time of flight, frequency etc. in the defect-free and defective regions. The signal processing of ultrasonic GW signals enhances the reliability of the SHM system (15, 51, 52, 53, 54, 55).

It leads to the scientific hypothesis that flexible and cost-effective pitch-catch technique can be utilized in an effective manner to develop the contact-type measurement techniques for the inspection of smaller and larger multi-layered composite structures by ultrasonic guided waves. These techniques can be combined with the signal processing approaches for the estimation and characterization of the defects by dealing with the complexity associated with the GWs (reflection, refraction, mode conversion and scattering of propagating wave modes) during its interaction with multi-layered composite structures.

Objective and tasks

The **primary objective of the thesis** is to propose the two flexible and cost-effective contact-type measurement techniques in pitch-catch mode and based on the short distance and long distance GWs for the detection and estimation of the disbond-type defects in the smaller and larger multi-layered composite structures. The sub-objectives are the utilization of various signal processing techniques to denoise and process the experimental signals to improve the accuracy in defect estimation and analysis of instantaneous characteristics of GWs.

The following **tasks** were formulated in a sequential order to achieve the objective:

1. To perform the literature review of GW generation, NDT of composites using ultrasonic GWs, contact and non-contact ultrasonic NDT methods, signal processing techniques to process the ultrasonic signals.
2. To investigate the composite structures for the identification of disbond-type defects by developing a measurement technique based on pair of point-type contact GW transducers (in the case if the receiver is at a short distance from the transmitter) and appropriate signal processing techniques to locate and size the defect, and analyze the GW characteristics in the defective regions.
3. To explore the feasibility of P1-type macro-fiber composite (MFC) transducer for long range GW testing for defect estimation by investigating its 3D displacement characteristics.
4. To develop and validate the simplified two-dimensional (2D) analytical model to predict the directivity patterns of contact-type GW transducers

which can be glued/ embedded on the surface of the structure (*e.g.* MFC transducer).

5. To investigate the composite structures for the identification of disbond-type defects gluing a P1-MFC transducer (transmitter) and point-type contact ultrasonic receiver (in the case if the receiver is far away from the transmitter) with the application of appropriate signal processing techniques to locate and size the defects, and analyze the GW characteristics.

Scientific novelty of the work

1. Two cost-effective contact-type measurement techniques with more flexibility and less complexity for the inspection of smaller and larger composite structures using GWs are proposed based on the pitch-catch operation.
 - The utilization of two point-type transducers fixed on a moving panel in the case of short-distance GW testing, reduces the attenuation and dispersion losses due to the change in distance between transmitter and receiver. Moreover, the usage of point-type transducers operating in thickness mode (*i.e.* high sensitivity to *out-of-plane* radiations or amplitude variations) leads to apply the simple amplitude detection techniques for the identification of defects in linear scanning. It is also proposed that reducing the fixed distance between the two transducers could increase the accuracy in the defect estimation which in turn provides the motivation to develop the new configuration of pair of transducers to locate and size the smaller defects.
 - It is proposed that frequency dependent glued (MFC) transducer and a contact-type transducer can be used for the inspection of larger structures. The P1-type MFC transducer has a dominant d33 or elongation mode. However, the high directivity of *out-of-plane* radiations of MFC transducer at resonant frequency facilitates to create a simple configuration of MFC and contact-type transducer to acquire the dominant A_0 mode for the analysis of defects on the structure.
2. It is proposed that 3D spatial characteristics of unloaded and vibrating MFC transducer can ensure that the transducer itself is defect-free to be used in the ultrasonic NDT of structures. It is also demonstrated that accurate 3D characteristics can ensure the suitability of typical GW modes to be used in SHM and NDT applications.

3. A novel 2D analytical model is proposed which could predict the directivity or coverage region of any contact-type transducer for different propagating wave modes at any frequency and propagating medium. It could lead to increase the accuracy in the measurement process by knowing the location for placement of transducers. Moreover, it takes a significantly shorter time to estimate the directivity as compared to the numerical modelling and experimental process.
4. In order to select the appropriate mother wavelet in DWT, the correlation of original signal to the detailed signal at the highest level is proposed. Instead of correlating the original signal from the transformed and denoised signal, the consideration of only detailed signal at the highest level (contains most of the signal information) reduces the considerable amount of computation time in processing.
5. In order to estimate the instantaneous characteristics of a signal by Hilbert transform the signal must be monocomponent or close to the monocomponent. That is why we use the mode decomposition technique. However, in multi-layered structures, the reflected signals from opposite edges produce complexity in the mode decomposition process. The application of 2D-FFT in order to remove the reflected signals is proposed which in turn could facilitate the mode decomposition technique for achieving the monocomponent signals.

Practical importance of the work

1. The 3D characteristics of any GW transducer can provide the conformity that a transducer is free from any manufacturing or in-service defects before its application in the field of ultrasonic NDT and SHM. Therefore, it can significantly contribute in order to develop a reliable SHM system.
2. The fast-processing 2D analytical model can be used to predict the directivity patterns of contact type ultrasonic transducers at any distance and excitation frequency by knowing the behavior of the transducer and the dispersive characteristics of the propagating medium. Moreover, the correct position, the number of transducers, a specific transducer and wave modes for the inspection of a particular type of defects using ultrasonic NDT can be selected by knowing the directivity pattern of a transducer.
3. The proposed measurement techniques and signal processing approaches could play a vital role to estimate and characterize the defects especially in the structures with complex geometry where only one side access is possible and only one B-scan at a time can be acquired.

Presented results for the defense of dissertation

1. The estimated three-dimensional characteristics of unloaded and vibrating macro-fiber composite (MFC) transducer and its applicability in order to predict the spatial displacements of GW modes.
2. The developed 2D analytical model based on Huygens's principle and validated by finite element (FE) analysis and experimental investigation, which can calculate the directivity patterns of contact-type GW transducers in any propagation medium with known dispersive characteristics.
3. The development of measurement techniques for the detection of the disbond type defects presented on multi-layered composite material for short and long-range applications.
4. Novel signal processing techniques for the extraction of defect features and GW characteristics in the defect-free and defective region from a single experimental B-scan.

Approbation

The critical evaluation of the research work presented duration the period of dissertation by the scientific community have been certified by 11 publications: 7 articles are published in international journals referred in Clarivate Analytics ISI Web of Science (with impact factor), while the other 4 publications are published to the reviewed proceedings of international conferences indexed in Clarivate Analytics ISI Web of Science (without impact factor). The results were also presented in 7 international scientific conferences held in Vilnius, Prague, Funchal, and Belgrade. The doctoral scholarship was provided by the Research Council of Lithuania for the entire duration (2014-2018) of study. In 2016, part of the research was granted a research scholarship by the INFOBALT Company. In 2017, a one-time scholarship provided by the Kaunas University of Technology, Lithuania for the most active Ph.D. student was received. In 2018, the academic-achievement scholarship provided by the research council of Lithuania was received. In 2018, the European Structural Integrity Society (ESIS) support for researchers was received.

Organization of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, 5 chapters, overall conclusions of the presented work, a list of the references and scientific publications of the author. The organization of the dissertation is as follows:

1. In **Chapter 1**, the literature review of ultrasonic non-destructive testing methods is presented, which reveals the basic features and limitations associated with ultrasonic guided waves, the applicability of ultrasonic guided waves in various composite structures, contact and non-contact ultrasonic testing methods and presentation of ultrasonic data, the overview of the significance of directivity and 3D displacement characteristics of the transducer and various signal processing techniques for the post-processing of ultrasonic GW signals are presented.
2. In **Chapter 2**, the measurement technique using contact-type transducers with appropriate signal processing techniques in the case of short distance GW testing for the detection and estimation of the different sized disbond type defects located on the composite sample possessing the aerodynamic profile has been presented. The characteristics of GWs in the defective regions are also analyzed in comparison to the defect-free region.
3. In **Chapter 3**, the 3D spatial displacements and directivity characteristics of an MFC transducer and its impact on SHM and long distance GW testing have been presented. It is also discussed how the 3D displacements and accurate directivity pattern of a transducer can contribute to increasing the reliability of the SHM system by knowing the directions/plane along which the ultrasonic guide waves would be generated most effectively. A novel 2D analytical model is also developed for the prediction of directivity patterns of contact type ultrasonic transducers in the generation of GWs.
4. In **Chapter 4**, the measurement technique by gluing an MFC transducer and contact-type receiver along with appropriate signal processing techniques in the case of long-distance GW testing to extract the information of disbond-type defects in the same sample as of Chapter 3 has been presented. This technique is rather more useful for structural health monitoring as a transmitter is permanently fixed/glued on the structure.
5. In **Chapter 5**, the overall uncertainty of the proposed measurement techniques has been calculated.

The overall dissertation volume is 122 pages, including 50 figures, 8 tables, 71 formulas and 207 bibliographic references.

CONCLUSIONS

1. In this dissertation, two ultrasonic measurement techniques based on short distance and long distance guided wave propagation are proposed for the detection and estimation of the disbond-type defects in small and large multi-layered composite structures respectively. The segment of wind turbine blade constructed from GFRP material has been considered for the investigation which contained disbond-type defects of 15 to 81 mm diameters at different locations. In comparison to the commercially used pulse-echo and phased-array technique of inspection, the ultrasonic pitch-catch method is used in both proposed measurement techniques which is more flexible in comparison to the pulse-echo method and less complex and more cost-effective than phased-array method. All defects were successfully detected by the developed techniques. The signal processing methods based on discrete wavelet transform is utilized to remove the non-stationary structural noise. Afterward, the amplitude detection technique with a -3 dB threshold is applied to locate and size the defect. The size and location of defects with 15 and 25 mm diameters investigated by short distance GWs are measured with a measurement uncertainty of ± 5.76 mm. On the other hand, the size and location of defects with 81 mm diameter investigated by long distance GWs are measured with a measurement uncertainty of ± 5.82 mm.
2. The measurement technique based on short-distance guided waves was performed by using a special configuration of two contact-type transducers as a transmitter-receiver pair, fixed on a moving panel and operating in a pitch-catch mode. The configuration is well suited for automatic NDT. There was a fixed separation distance of 50 mm between the two transducers. By keeping the fixed distance between the transducers, the dispersion, attenuation and scattering due to variable distance can be reduced. On another hand, the P1-type MFC transducer as a transmitter and a contact-type piezoceramic transducer as a receiver is used to develop the measurement technique based on guided waves propagating up to long distance.
3. In order to estimate the instantaneous characteristics of GWs, we propose to compare the power spectral densities of intrinsic mode functions with the original signal after mode decomposition. In this way, the best intrinsic modes can be selected to regenerate the signals before estimating the instantaneous amplitude and frequency characteristics of guided waves by using the Hilbert transform. We also propose to filter out the reflections from the opposite edge by 2D-FFT in the case of complex

structures (more reflections and noise in ultrasonic B-scan), before applying the mode decomposition techniques.

4. As MFC transducer is a small, thin and flexible transducer, we propose to estimate its 3D displacement characteristics in order to confirm its accuracy and feasibility for the NDT of structures. The novel 2D analytical model for the estimation of directivity patterns of contact-type transducers in the generation of guided waves is also developed. This model can predict the directivity pattern of contact-type ultrasonic transducer or configuration of transducers in any medium, at any excitation frequency, at any distance with known dispersive characteristics. The developed model can provide the information about appropriate excitation frequency for a transmitter, the dominant wave modes, placement of transducers etc. Moreover, this model reduces a significant amount of computation time spent on numerical modelling and experimental analysis for the directivity estimation.

MOTIVATIONS FOR THE FUTURE SCOPE

The proposed methods can be contributed in the real-time applications in the field of ultrasonic non-destructive testing. However, there is a scope for future research in order to improve the practical adaptability of the developed techniques and methodologies:

- The three-dimensional displacement characteristics of the unloaded transducer could provide the information to discard the faulty transducers. However, there is a scope to compare the displacement characteristics of an unloaded transducer to the transducer embedded in the metallic and composite structures.
- The results obtained by the developed 2D analytical model and the experimental results showed a significant coincidence and similarities in results. However, a considerable difference in the size of minor lobes of directivity patterns was observed. The difference in sizes of minor lobes is related to the approximated value of the amplitude correction factor used in the analytical model to decrease the complexity. In future research, the results can be further improved by including the more accurate value of the amplitude correction factor.
- The measurement techniques based on the combination of contact and non-contact ultrasonic methods can be developed to increase the accuracy in defect estimation.
- The results obtained by signal processing algorithms were based on the amplitude variations with time and space. The signal processing algorithm based on other parametric estimations rather than amplitudes can be developed. Moreover, the estimation and characterization of

defects were depended on the A_0 mode waves with dominant *out-of-plane* component, the reception of which was performed by high sensitivity contact-type receiver. In future work, the algorithm can be improved and validated for the S_0 waves.

UDK 616.5-006-073 + 61:004.9] (043.3)

SL344. 2019-05-02, 3,5 leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas