

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Agnė Styraitė

**DŽIOVINIMO DEFEKTŲ POVEIKIS MEDIENOS
MECHANINĖMS SAVYBĖMS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Darius Albrektas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**DŽIOVINIMO DEFEKTŲ POVEIKIS MEDIENOS
MECHANINĖMS SAVYBĖMS**

Baigiamasis magistro projektas
Medienos inžinerija (kodas 621J53001)

Vadovas

Doc. dr. Darius Albrektas

Recenzentas

Lenkt. Darius Minelga

Projektą atliko

Agnė Styraitė

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Agnė Styraitė

(Studento vardas, pavardė)

Medienos inžinerija (621J53001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 24 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Agnės Styraitės**, baigiamasis projektas tema „Džiovinimo defektų poveikis medienos mechaninėms savybėms“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Lapuočių medienos mikrostruktūros schema [2]	11
1.2 pav. Pjautinės medienos plyšiai (išskylimai) (a, b, c, d) ir susiraukšlėjimas (e, f) [6]	15
1.3 pav. Statinio lenkimo bandymo schema: a – trijų taškų, b – keturių taškų [15]	16
1.4 pav. Parametrų nustatymas priverstinių virpesių metodu: a) augančio medžio [18]; b) pjautinės medienos [20]	19
1.5 pav. Ultragarso tyrimo schemas [21]	20
1.6 pav. Medienos matavimai laisvųjų virpesių metodu: a) gembiskai įtvirtintas bandinys [24]; b) bandinys neįtvirtintas [23]	20
1.7 pav. Rezonansinių virpesių matavimo stendas: a) virpesiai sukeliama elektromagnetu [25]	21
2.1 pav. Vieno laisvės laipsnio sistemos modelis, kai slopinami laisvieji virpesiai [32]	24
2.2 pav. Silpnai slopinamos vieno laisvės laipsnio sistemos virpesių kreivė: čia x – virpesių poslinkis, t – laikas [32]	24
2.3 pav. Slopinimo įvertinimo kreivė taikant energijos pusinės dalies pralaidymo metodą vieno laisvės laipsnio sistemos virpesiams [32]	25
2.4 pav. Bandinių pjovimo schema	25
2.5 pav. Bandinių mechaninių savybių nustatymo rezonansinių virpesių metodu stendas [26]	27
2.6 pav. Bandinio schema amplitudinėms – dažninėms charakteristikoms nustatyti (čia 1-11 – jutiklio tvirtinimo vieta; atstumas tarp jutiklių centrų – 35 mm)	28
2.7 pav. Pirmos trys (a, b, c) laisvai virpančio strypo modos [32]	28
2.8 pav. Bandinio moda	29
3.1 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	30
3.2 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	31
3.3 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	31
3.4 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika	33
3.5 pav. P grupės bandinio modos, kai įpjovos ilgis lygus 200 mm	33
3.6 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir modos (b), kai įpjovos ilgis lygus 200 mm	33
3.7 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir modos (b – kai įpjovos ilgis lygus 100 mm; c – kai įpjovos ilgis lygus 200 mm)	34
3.8 pav. P grupės bandinių tampros modulio (a) ir slopinimo koeficiento (b) kitimas (E_0 ir $tg\delta_0$ – kai bandinyje nėra įpjovos; E_1 ir $tg\delta_1$ – kai bandinyje suformuota 200 mm ilgio įpjova)	35
3.9 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	37
3.10 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	38
3.11 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	38
3.12 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	39

3.13 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b).....	40
3.14 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)	40
3.15 pav. Džiovinimo metu, medienos vidinėje struktūroje susiformavę įtrūkimai.....	41
3.16 pav. P grupės bandinių tampros modulio (a) ir slopinimo koeficiento (b) kitimas (E0 ir tgδ0 kontroliniai bandiniai; E1 ir tgδ1 – kai įmirkyti vandenyje ir išdžiovinti 140 °C temperatūroje, E2 ir tgδ2 – kai įmirkyti vandenyje ir išdžiovinti 170 °C temperatūroje).....	41

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Medienos džiovavimo būdai [4]	12
1.2 lentelė. Dinaminių tyrimo metodų klasifikacija [16].....	18
2.1 lentelė. Bandinių parametrai	25
2.2 lentelė. Režimų parametrai	27
3.1 lentelė. P grupės bandinių rezonansiniai parametrai	31
3.2 lentelė. V grupės bandinių rezonansiniai parametrai	32
3.3 lentelė. S grupės bandinių rezonansiniai parametrai	32
3.4 lentelė. P grupės bandinių rezonansiniai parametrai	34
3.5 lentelė. V grupės bandinių rezonansiniai parametrai	34
3.6 lentelė. S grupės bandinių rezonansiniai parametrai	34
3.7 lentelė. V grupės bandinių tampros ir klampos parametrai	36
3.8 lentelė. S grupės bandinių tampros ir klampos parametrai	36
3.9 lentelė. P grupės bandinių rezonansiniai parametrai	38
3.10 lentelė. V grupės bandinių rezonansiniai parametrai	39
3.11 lentelė. S grupės bandinių rezonansiniai parametrai	39
3.12 lentelė. V grupės bandinių tampros ir klampos parametrai	42
3.13 lentelė. S grupės bandinių tampros ir klampos parametrai	42
3.14 lentelė. P grupės bandinių statistinių rodiklių suvestinė	43
3.15 lentelė. V grupės bandinių statistinių rodiklių suvestinė	43
3.16 lentelė. S grupės bandinių statistinių rodiklių suvestinė	44

Styraitė, Agnė. Džiovinimo defektų poveikis medienos mechaninėms savybėms. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Albrektas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, Medienos dirbinių technologijos

Reikšminiai žodžiai: *beržo mediena, džiovinimas, defektai, rezonansiniai virpesiai, tampros modulis, slopinimo koeficientas.*

Kaunas, 2017. 48 p.

SANTRAUKA

Tyrimai atlikti siekiant įvertinti defektų, atsiradusių džiovinimo proceso metu, poveikį medienos tampriai plastiškosioms savybėms. Tyrimų metu panaudota 60 beržo medienos bandinių, kurie pagal storį suskirstyti į tris grupes: ploni (P), vidutiniai (V) ir stori (S). Medienos mechaninės savybės įvertintos taikant skersinių rezonansinių virpesių metodą. Išmatuotas medienos bandinių rezonansinis dažnis ir virpesių amplitudė, pagal kuriuos apskaičiuotas medienos tampros modulis (E) ir slopinimo koeficientas (tgδ). Išanalizavus gautus rezultatus, nustatyta, kaip atsiradus defektams kito medienos tampros ir klampos parametrai.

Gauta, kad pirmu rezonansiniu dažniu virpančio medienos bandinio moda atitinka laisvai virpančio teorinio izotropinio strypo pirmąją modą. Nustatyta, kad dėl suformuotos įpjovos, 30-110 Hz sumažėjo bandinio rezonansinių virpesių dažnis bei pasikeitė moda. Amplitudinėje dažninėje charakteristikoje pastebėti papildomi, iki bandinio suardymo neužfiksuoti, dažniai. Dėl atsiradusio defekto sumažėjo medienos tampros modulis ir padidėjo slopinimo koeficientas. Panašia tendencija kito ir džiovinamos medienos bandinių parametrai. Dėl susiformavusių skirtingų defektų, 5-43 Hz sumažėjo rezonansinis dažnis, 440-3040 MPa sumažėjo tampros modulis ir 0,004-0,015 padidėjo slopinimo koeficientas. Atlikus statistinę parametų analizę, nustatyta, kad dėl skirtingų džiovinimo defektų, medienos mechaninių parametų sklaida padidėjo.

Styraitė, Agnė. *Impact of Drying Defects on Wood Mechanical Properties*: Master's thesis in Wood Engineering / supervisor assoc. prof. Darius Albrektas. Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Sciences, Wood Engineering

Key words: *birch wood, drying, cracks, resonant vibrations, MOE, coefficient of damping.*

Kaunas, 2017. 48 p.

SUMMARY

In this work researches in order to determine, how the drying defects affect the mechanical properties of wood, were performed. 60 birch wood samples of different thickness (thin (P), medium thickness (V) and thick (S)) were used for analysis. Wood mechanical properties were evaluated using transverse resonant vibration method. Resonant frequency and amplitude of wood specimens was measured to calculate modulus of elasticity (E) and damping coefficient ($\text{tg}\delta$) of wood. The analysis of the results showed how the defects have changed wood elastic and viscosity parameters.

It was found that first mode of vibrating wood samples at first resonant frequency complied with first theoretical beam mode. It was determined that resonant frequency decreased by 30-110 Hz, because of the formed cut. Mode and amplitude-frequency characteristic of the samples also changed because of that. Modulus of elasticity decreased and damping coefficient increased because of the defect in wood samples. It was obtained that when modelling wood cracks in the samples their mode and amplitude-frequency characteristic changes are analogous to the specimens with drying defects. Due to different cracks in samples, resonant frequency decreased by 5-43 Hz, modulus of elasticity decreased by 440-3040 MPa and damping coefficient increased by 0,004-0,015. The statistical analysis showed the increase of mechanical parameters dispersion, caused by different drying defects in wood samples.

TURINYS

ĮVADAS.....	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA	11
1.1. Beržo mediena.....	11
1.2. Medienos džiovinimas.....	11
1.2.1. Medienos džiovinimo technologija	12
1.2.2. Konvekcinio kamerinio džiovinimo proceso technologiniai parametrai	13
1.2.3. Džiovinimo proceso metu medienoje atsirandantys defektai.....	15
1.3. Medienos mechaninių savybių tyrimo metodai	16
1.3.1. Statiniai tyrimo metodai	16
1.3.2. Dinaminiai tyrimo metodai	17
1.3.3. Rezultatų, gautų statiniais ir dinaminiais metodais, palyginimas	22
2. DARBO METODIKA.....	24
2.1. Medienos mechaninių savybių tyrimas rezonansinių virpesių metodu.....	24
2.2. Tyrimų objektas.....	25
2.3 Medienos drėgno ir tankio nustatymo metodika ir įranga	25
2.4 Dinaminio tampros modulio ir slopinimo koeficiento tyrimo metodika ir įranga	27
3. TYRIMŲ REZULTATAI	30
3.1. Mechaninis medienos defektų modeliavimas	30
3.1.1. Defekto poveikis medienos rezonansiniams parametrams.....	30
3.1.2. Defekto poveikis medienos mechaniniams parametrams	35
3.2. Džiovinimo defektų poveikis medienos mechaninėms savybėms	36
3.2.1. Džiovinimo defektų poveikis medienos rezonansiniams parametrams	37
3.2.2. Džiovinimo defektų poveikis medienos mechaniniams parametrams	41
3.3. Tyrimų duomenų statistinis apdorojimas	42
Išvados.....	45
Literatūros sąrašas	46

ĮVADAS

Džiovinimas yra vienas sudėtingiausių medienos apdorojimo procesų. Priklausomai nuo džiovinimo proceso parametrų (temperatūros, medienos ir aplinkos drėgno, kaitinimo greičio, išlaikymo laiko) medienos struktūra gali būti pažeista, todėl, siekiant išvengti defektų susidarymo, džiovinimo režimas kiekvienai medienos rūšiai turi būti parenkamas individualiai [8].

Vienas svarbiausių defektų, veikiančių medienos panaudojimo galimybes, yra įtrūkimai [34]. Džiovinimo metu, dėl skirtingo drėgmės ir temperatūros pasiskirstymo, medienoje susidaro įtempiai, kuriems viršijus medienos stiprio ribą, mediena suskyla. Didelė dalis drėgmės iš medienos pašalinama per sortimento galus, todėl tokie įtempiai dažniausiai formuojasi būtent čia. Įtrūkimai pažeidžia vientisą medienos struktūrą, paveikia jos mechanines savybes.

Daugumos bandymų metu siekiama išsiaiškinti defektų poveikį medienos savybėms. Be standartinių destruktinių tyrimų metodų, medienos mechaninių parametrų vertinimui naudojami ir įvairūs nedestrukciniai tyrimų metodai. Mokslininkų teigimu, džiovinamos medienos kokybei įvertinti, destruktiniai metodai gali būti pakeisti nedestrukciniu laisvųjų virpesių metodu, kai medienos mechaninės savybės įvertinamos tiriant laisvai virpančios sortimento amplitudines – dažnines charakteristikas. Tyrimų metu nustatyta, kad dėl įtrūkimų medienoje, pasikeičia medienos savasis rezonansinis dažnis, dėl ko pasikeičia ir medienos tamprumo parametrai [34]. Naudojant šį metodą galima nustatyti tampriąsias medienos savybes esant pakankamai nedidelėms apkrovoms. Be to sortimentas gali būti bet kokios formos [27]. Ši metodika galėtų būti pritaikyta medienos džiovinimo proceso kontrolei.

Šio tyrimo tikslas – įvertinti defektų, atsiradusių džiovinimo proceso metu, poveikį beržo medienos tampriai plastiškosioms savybėms.

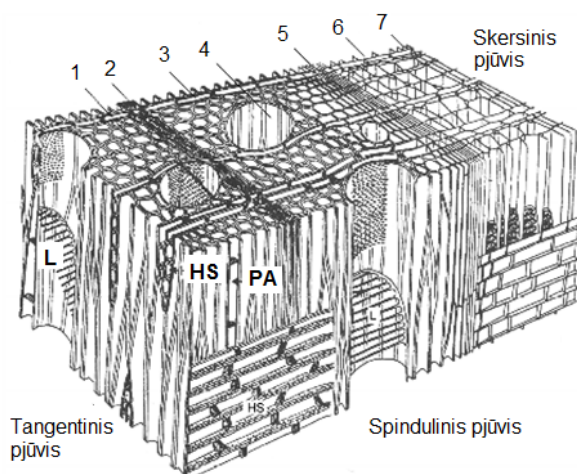
Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

1. Ištirti medienos rezonansinius parametrus;
2. Pagal išmatuotus rezonansinius parametrus apskaičiuoti medienos tampros modulį ir slopinimo koeficientą;
3. Pagal gautas vertes nustatyti, kaip kito tampros ir klampos parametrai medienoje atsiradus defektams;
4. Rezultatus apdoroti statistiškai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Beržo mediena

Beržas priskiriamas padrikai akytų lapuočių medžių grupei. Pasaulyje žinoma virš 40 beržo (*lot. Bertula*) rūšių. Beržo mediena savo struktūroje neturi nei branduolio, nei brandžiosios medienos, todėl yra vadinama balanine. Pagrindiniai šios medienos struktūros elementai yra libriforminis plaušas (apie 75% medienos tūrio), indai (apie 18% medienos tūrio) ir šerdies spinduliai (apie 7% medienos tūrio) (žr. 1.1 pav.). Beržo medienos šerdies spinduliai labai siauri, matomi tik tiksliai spinduliniame medienos pjūvyje, metinės rievės – neryškios. Medienai būdingas dėmėtumas: dėmės yra tamsiai rudos ar pilkos spalvos, ištįsusios pagal šerdies spindulį. Dažnai beržo medienos skersiniame pjūvyje pastebimos gelsvai rudos pauraus audinio juostelės ar dėmės, vadinamos gyslelėmis. Esant stambiam medienos sortimentui į dėmėtumą nekreipiama dėmesio, tačiau lukštas ties dėmėtomis vietomis skykla, todėl šiuo atveju tai yra yda [1,2].



1.1 pav. Lapuočių medienos mikrostruktūros schema: 1 – libriforminis plaušas; 2 – metinės rievės riba; 3 – šerdies spindulys; 4 – indas; 5 – brazdo ląstelės; 6 – ankstyvosios rėtinės ląstelės; 7 – suirusios rėtinės ląstelės; HS – šerdies spindulys; PA – parenchiminė ląstelė; L – laiptuotoji perforacija [2]

Beržo mediena sudaryta iš 50 ± 5 % celiuliozės, 25 ± 2 % hemiceliuliozės, 23 ± 3 % lignino. Medienos cheminė sandara ir struktūra veikia jos mechanines savybes. Vidutinis beržo medienos tankis yra apie 670 kg/m^3 (kai $\omega=8-12$ %). Mediena vidutinio kietumo, stipri, tačiau neatspari puvimui ir vabzdžių poveikiui, todėl retai naudojama eksterjero elementų gamybai. Beržo mediena lengvai klijuojama, todėl naudojama baldų, faneros gamyboje [1,3].

1.2. Medienos džiovinimas

Džiovinimas yra vienas sudėtingiausių medienos apdorojimo procesų. Džiovinant, drėgmė iš medienos gali būti pašalinama šiluminiu (išgarinant arba išvirinant) arba mechaniniu (centrifuguojant arba apspaudžiant) būdu. Išdžiovinta iki reikiamo drėgnio mediena yra stabilesnė

formos, matmenų, stipresnė, mažiau higroskopiška ir atsparesnė biologiniam kenkėjams. Gaminiai, pagaminti iš tinkamai išdžiovintos medienos, eksploatuojami 10 kartų ilgiau, nei pagaminti iš netinkamai išdžiovintos medienos. Tik tinkamai išdžiovinta mediena gali būti tinkamai mechaniškai apdirbama, dažoma ar klijuojama [4,5].

Džiovinimo metu iš medienos pašalinama laisvoji drėgmė ir dalis surištosios drėgmės, kol medienos drėgnis pasiekia apdirbimui ar eksploatavimui tinkamą ribą. Lapuočių medienos struktūra yra sudėtingesnė, nei spygliuočių, todėl džiovinimo procesas taip pat yra sudėtingesnis [5]. Lapuočių medžių šerdies spinduliai, kurie yra sudaryti iš parenchiminių ląstelių eilių, yra platesni ir didesni, nei spygliuočių. Dėl to medienos struktūroje suformuojamos didesnės tuštumos, kurios džiovinimo proceso metu suformuoja mikro įtrūkimus, vėliau jie tampa vizualiai pastebimais įtrūkimais. Lapuočių mediena yra tankesnė, nei spygliuočių, taigi dėl mažesnio pralaidumo, drėgmės išgarinimo procesas yra lėtas, drėgnio gradientų vystymasis – pavojingas [5]. Dėl didelės ekstraktinių medžiagų koncentracijos, temperatūros poveikis džiovinimo proceso metu gali pakeisti medienos spalvą, medienos paviršiuje gali atsirasti spalvinių nelygumų. Kadangi lapuočių medienos džiovinama mažiau, nei spygliuočių, pilnai pakrauti džiovyklą užtrunka ilgiau, taigi mediena turi būti sandėliuojama lauke. Ore laikoma mediena džiūsta, tačiau jos drėgnį sunku kontroliuoti. Drėgmės kiekis į džiovyklą pakrautoje medienoje yra nevienodas, taigi ir džiovinimo procesą kontroliuoti sunkiau [5].

Norint tinkamai išdžiovinti medieną, reikia pasirinkti tinkamą džiovinimo technologiją, nustatyti ir atidžiai kontroliuoti džiovinimo proceso parametrus.

1.2.1. Medienos džiovinimo technologija

Pagal šilumos perdavimo į medieną tipą, džiovinimas gali būti konvekcinis, kontaktinis, spindulinis ir elektrinis (žr. 1 lentelė).

1.1 lentelė. Medienos džiovinimo būdai [4]

Džiovinimo			Džiovinami sortimentai
Būdas	Variantai	Agentas	
Konvekcinis atmosferinis	Atmosferinis	Oras	Rąstai, pjautinė mediena
Konvekcinis dirbtinis šilumini	Dujose, atmosferiniame slėgyje	Oras, kūryklų dujos, perkaitintas garas	Pjautinė, smulkintoji mediana, lukštas
	Vakuuminis	Praretintas oras	Pjautinė mediena
	Išcentrinis (rotacinis)	Oras	Pjautinė mediena
	Skysčiuose	Hidrofobiniai skysčiai, higroskopinių medžiagų tirpalai	Rąstai, pjautinė mediena
Kontaktinis	Kontaktinis	Oras	Pjautinė, smulkintoji mediana, lukštas
Spindulinis	Spindulinis	Oras	Lukštas, apdailinti paviršiai
Elektrinis	Indukecinis	Oras	Pjautinė mediena
	Dielektrinis	Oras	Rąstai, pjautinė mediena

Paprasciausias medienos džiovinimo būdas – konvekcinis atmosferinis medienos džiovinimas, kai mediena džiūva lauko oro sąlygomis, tačiau toks džiovinimo procesas yra nekontroliuojamas, drėgnis medienoje pasiskirsto nevienodai, sortimentas dažnai išsikraipo ar užsikrečia grybais [4]. Dėl šių priežasčių mediena pradėta džiovininti dirbtiniu būdu, kaitinant agentą arba pačią medieną.

Dirbtinai džiovinama mediena patalpinama į specialias kameras, kuriose palaikomos tinkamos klimato sąlygos jai džiūti. Konvekciniu būdu mediena džiovinama keičiant agento parametrus. Kaitinant agentą, šiluma perduodama medienai, jos paviršius kaista ir joje esantis drėgmė pasišalina iš sortimento. Mediena dažniausiai džiovinama taikant konvekcinį kamerinį džiovinimą. Ji taip pat gali būti džiovinama pasitelkiant infraraudonuosius spindulius, todėl, kad tokių džiovyklų naudingumo koeficientas yra didelis, nes šilumos energija pasiskirstoma tolygiau nei konvekciniame džiovyklose. Infraraudonieji spinduliai taip pat dažnai naudojami medienos apdailos medžiagų džiovinimui. Rečiau mediena džiovinama naudojant mikrobangas ar koncentruotą saulės šilumą [4,5].

Siekiant užtikrinti efektyvų ir kokybišką medienos džiovinimą, džiovinimo būdai gali būti kombinuojami: atmosferinis ir dirbtinis kamerinis, kamerinis ir dielektrinis, vakuuminis ir dielektrinis, konvekcinis dujose ir spindulis ir pan. Kombinuoti džiovinimo režimai padeda padidinti džiovinimo proceso efektyvumą, sumažina ar pašalina atskirai taikomų režimų trūkumus.

1.2.2. Konvekcinio kamerinio džiovinimo proceso technologiniai parametrai

Priklausomai nuo džiovinimo proceso parametrų (temperatūros, medienos ir aplinkos drėgnio, kaitinimo greičio, išlaikymo laiko) medienos struktūra gali būti pažeista. Todėl, siekiant išvengti defektų susidarymo, džiovinimo režimas kiekvienai medienos rūšiai turi būti parenkamas individualiai.

Džiovinimo proceso metu taikomos trys pagrindinės technologinės operacijos [6]:

- 1) džiovinimo agento ir medienos pašildymas;
- 2) drėgmės garinimas;
- 3) drėgmės suvienodinimas ir kondicinis apdorojimas;
- 4) medienos ataušinimas

Džiovinimo proceso sparta priklauso nuo agento parametrų kitimo džiovinimo ciklo metu arba kitaip – nuo džiovinimo režimo. Džiovinimo režimai grupuojami pagal tai, kokiose kamerose džiovinama mediena. Orinėse ir orinėse garinėse periodinėse kamerose džiovinimo režimai pagal agento temperatūrą skiriami į žematemperatūrius (agentas yra drėgnas oras, jo temperatūra žemesnė nei 100 °C) ir aukštatemperatūrius (agentas yra karštas oras, jo temperatūra aukštesnė nei 100 °C). Žematemperatūris režimas gali būti švelnus, normalus ir forsutas. Medieną džiovinant švelniu

režimu medienos mechaninės ir fizinės savybės nekinta. Normaliu režimu džiovintos medienos stipris nesikeičia, tačiau pakinta medienos spalva. Forsuotas džiovinimo režimas pakeičia medienos spalvą, 15-20 % sumažina medienos stiprumą skeliant nepakeisdamas kitų medienos mechaninių savybių. Aukštatemperatūriuose režimuose sumažėja džiovintos medienos stipris tempiant, gniuždant, statiškai lenkiant ir skeliant, mediena labai patamsėja [6].

Medienos džiovinimas paveikia medienos mechanines savybes trejopai [7]:

- 1) tiesioginis drėgmės praradimo poveikis;
- 2) deformacijos ir įtempiai dėl vidaus nuodžiūvio;
- 3) tiesioginis temperatūros poveikis medienos struktūros elementams (celiuliozei, hemiceliuliozei, ligninui).

Medienos stiprumas nepakinta ją trumpai kaitinant žemesnėje, nei 100 °C temperatūroje, bet gali būti sumažintas visam laikui ilgai kaitinant didesnėje, nei 65 °C temperatūroje. Toks medienos stiprio sumažėjimas priklauso nuo šildymo terpės tipo, temperatūros, drėgnio, poveikio trukmės, medienos rūšies ir sortimento dydžio, todėl norint turėti mechaniškai stiprią džiovintą medieną reikia parinkti tinkamus džiovinimo proceso parametrus ir juos nuolat kontroliuoti [7].

Medienos džiovinimas aukštoje temperatūroje yra vienas iš būdų sumažinti džiovinimo laiką, todėl sumažinamos gamybos išlaidos ir pagerinamas džiovyklos našumas. Medienos kaitinimas 160-260 °C temperatūroje vadinamas terminiu medienos apdorojimu [7]. Yra žinoma, kad egzoterminės reakcijos beržo medienoje pradeda vykti esant 150-160 °C temperatūrai. Žemiau šios temperatūros išgarinama tik drėgmė ir šiek tiek ekstraktinių medžiagų. Medienos temperatūra pradeda viršyti agento temperatūrą ties 170 °C. Nors egzoterminės reakcijos pradeda vykti jau 150-160 °C temperatūroje, jos žymiai pagreiteja tik pasiekus 200 °C temperatūrą [8].

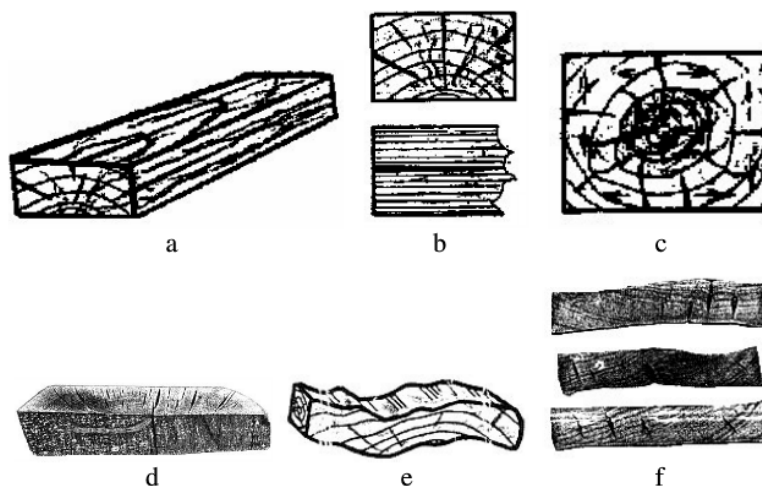
Terminio apdorojimo metu, temperatūrai pakilus virš 200°C, šiek tiek padidėja beržo medienos kietumas [8]. Yra žinoma, kad terminis apdorojimas pagerino beržo medienos matmenų stabilumą, nes sumažėjo pusiausvyros drėgmės kiekis (EMC). Šildomos medienos stipris mažėja, nes aukštoje temperatūroje vyksta hemiceluliozės depolimerizacija ir dėl to mediena pasidaro priverstinai elastinga [4]. Todėl sumažėja medienos šlyties modulis ir stiprumas varžto ištraukimui (RAWS) [8,9]. Temperatūrą padidinus iki 180 °C, vyksta ženklūs morfologiniai pokyčiai: sumažėja indų dydis, sumažėjus medienos ląstelių sienelių storiui, sumažėja spindulių ir rivių plotis [10]. Terminio apdorojimo metu medienos tampros modulis kito skirtingai. Vienu tyrimų duomenimis, terminis apdorojimas nepaveikia medienos tampros modulio, kai kiti tyrėjai teigia priešingai. Pasak jų, lėtai kaitinant medieną, tampros modulis padidėja, o greitai kaitinant – sumažėja. Tampros modulį panašiai veikia ir kaitinimo temperatūra: jeigu beržo mediena kaitinama iki 160 °C temperatūroje, tuomet tampros modulis padidėja, jeigu kaitinama aukščiau šios temperatūros – tampros modulis sumažėja [9,10,11].

Taigi, netinkamai parinkti džiovinimo ar terminio apdorojimo režimo parametrai gali neigiamai paveikti mechaninius medienos parametrus, sukelti struktūros pažeidimus, kurie paveikia tolesnį medienos panaudojimą.

1.2.3. Džiovinimo proceso metu medienoje atsirandantys defektai

Dėl skirtingo drėgmės ir temperatūros pasiskirstymo, džiovinimo metu medienoje susidaro įtempiai, kuriems viršijus medienos stiprio ribą ši suskyla. Pavojaingesni yra tempimo įtempiai skersai pluošto, todėl pirmoje džiovinimo stadijoje reikia atidžiai stebėti, kad įtempiai neviršytų stiprio ribos sortimento paviršiuje, o antroje stadijoje – vidiniuose sortimento sluoksniuose [4]. Medienoje papildomi vidiniai įtempiai atsiranda ir dėl struktūros anizotropiškumo, t. y. skirtingo medienos nuodžiūvio tangentine ir spinduline kryptimis, kuris medienoje suformuoja papildomus vidinius įtempius ir mediena išlinksta [6].

Didėjant džiovinimo temperatūrai, padidėja drėgnio gradientas, dėl to padidėja vidiniai įtempiai ir mediena įtrūksta [7]. Įtrūkimai yra vienas svarbiausių defektų, veikiantis medienos panaudojimo galimybes. Iš pradžių medienoje susidaro smulkūs plyšeliai, kurių gylis gali siekti iki 1/10 sortimento storio. Po to sortimento paviršiuje, šone ar krašte susidaro dideli paviršiniai plyšiai (žr. 1.2 pav.). Toliau džiovinant medieną plyšiai gali pereiti į vidinius plyšius ir visiškai sugadinti vientisą sortimento struktūrą [6].



1.2 pav. Pjautinės medienos plyšiai (įskylimai) (a, b, c, d) ir susiraukšlėjimas (e, f): a – paviršiniai; b – galiniai; c – spinduliniai; d – vidiniai; e ir f – susiraukšlėję sortimentai su vidiniais plyšiais [6]

Didelė dalis drėgmės iš medienos pasišalina per sortimento galus, todėl tokie įtempiai dažniausiai formuojasi būtent čia. Galai suskilinėja, juose besiformuojantys plyšiai džiovinimo metu gali pagilėti [6].

Taigi netinkamai parinktas ir kontroliuojamas džiovinimo proceso režimas daro poveikį įtempių susidarymui medienoje, o jiems viršijus stiprio ribą, medieną suskyla. Nepaisant to, ar medienos paviršiuje pastebėti defektai, rekomenduojama iširti džiovinamos medienos struktūros

vientisumą ir mechanines medienos savybes. Tokiu būdu tolimesniam apdirbimui netinkama mediena iš technologinio srauto bus pašalinama anksčiau.

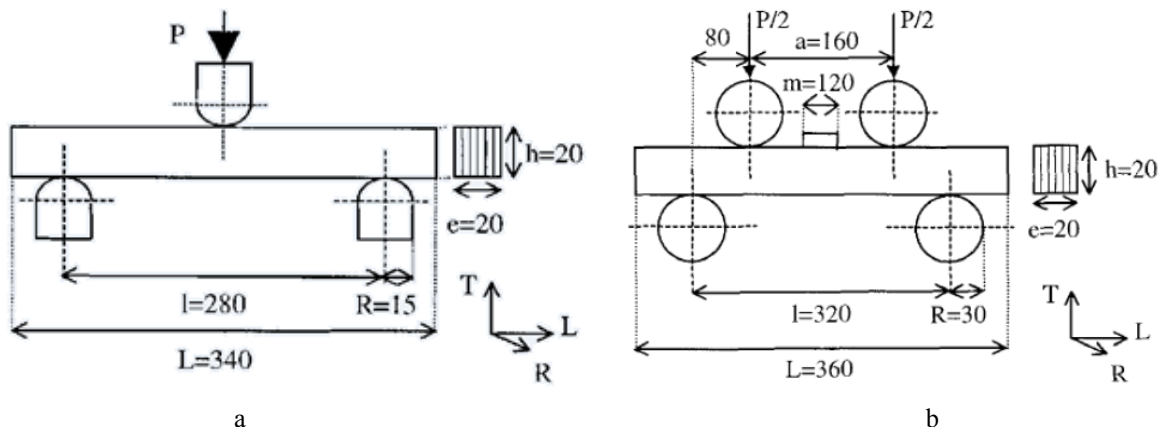
1.3. Medienos mechaninių savybių tyrimo metodai

Įtrūkimai pažeidžia vientisą medienos struktūrą, pakeičia jos mechanines savybes. Priklausomai nuo panaudojimo srities, medienos gaminiai yra veikiami skirtingų mechaninių jėgų, kurių poveikiui mediena turi būti atspari. Šis stiprumas apibūdina medienos mechanines savybes, kurios gali būti nustatomos įvairiais statiniais ir dinaminiais tyrimo metodais.

1.3.1. Statiniai tyrimo metodai

Medienos mechaninės savybės tiriamos taikant specialius mechaninius metodus, kurių metu medienoje sukeliama įtempiai ir deformacijos. Šių bandymų tikslas nustatyti medienos stiprumą ir deformatyvumą (gebėjimą deformuotis) [12]. Jų metu medienos bandinio struktūra yra visiškai suardoma, todėl tokie bandymai vadinami statiniais (destrukciniais) medienos mechaninių savybių nustatymo metodais.

Medienos stipris priklauso nuo medienos rūšies, tankio, drėgno, temperatūros, jėgos veikimo krypties pluošto atžvilgiu. Priklausomai nuo apkrovos tipo medienos stipris gali būti nustatomas gniuždant, tempiant, lenkiant ir skeliant.



1.3 pav. Statinio lenkimo bandymo schema: a – trijų taškų, b – keturių taškų [15]

Mediena yra labai stipri lenkiant, todėl ji dažnai naudojama detalėms, kurias veikia lenkimo jėgos, gaminti. Medienos stiprumas lenkiant gali būti nustatomas dviem būdais: lenkimas per tris taškus (žr. 1.3 a pav.) ir lenkimas per keturis taškus (žr. 1.3 b pav.). Statinis lenkimas per tris taškus atliekamas specialiose mašinose, kur lenkimo jėga bandinį veikia viename taške per vidurį, o didėjanti apkrovos jėga, per $1,5 \pm 0,5$ minutes, jį suardo. Deformacija matuojama įlinkio gyliu, o stiprio riba lenkiant apskaičiuojama pagal suardymo jėgos maksimalią vertę. Bandinio viršutinėje dalyje susidaro gniuždymo įtempiai, o bandinio apatinėje dalyje – tempimo įtempiai. Kadangi mediena stipresnė tempiant, nei gniuždant, bandinys pradeda irti gniuždymo zonoje, o baigia irti

tempimo zonoje. Lapuočių medienos stiprio lenkiant tangentine ir spinduline kryptimi vertės skiriasi tik 2-4 % [12]. Medienos lenkimo bandymais galima įvertinti ne tik medienos stiprumą, bet ir deformatyvumą, t. y medienos formos ir matmenų pokytį veikiant apkrovoms. Jis nusakomas tampros ir šlyties moduliais ir skersinių deformacijų koeficientais. Atlikti statinio lenkimo bandymai parodė, kad džiovintos beržo medienos tampros modulis (MOE) lenkiant kinta 11000-15000 MPa ribose, šlyties modulis (MOR) kinta 85-120 MPa ribose, o vidutinis stipris lenkiant lygus 109,5 MPa [13]. Nustatyta, jog drėgmės kiekio padidėjimas tiesiogiai sumažina medienos šlyties ir tampros modulių vertes (medienos drėgniui padidėjus nuo 12 % iki 20 %, tampros modulio (MOE) ir šlyties modulio (MOR) reikšmės sumažėja apie 34-42 %), todėl reikia atkreipti dėmesį į eksploatuojamų medienos gaminių drėgnį, jei jie yra veikiami lenkimo jėgų [14]. Medienos bandinį lenkiant per keturis taškus, apkrova bandinį veikia dvejuose taškuose (žr. 1.3 b pav.). Tokiu būdu lenkiant medieną, pašalinami bandinio viršutinėje dalyje lenkimo metu susidarantys pernelyg dideli gniuždymo įtempiai ir sumažinama šlyties išilgai pluošto tikimybė. Lyginant šio bandymo metu gaunamas parametrų vertes su lenkimo per tris taškus bandymo parametrų vertėmis, pastebimas tik 2-3 % skirtumas, todėl šis bandymo metodas dabar taip pat naudojamas medienos stiprio lenkiant nustatymui [15].

Taikant statinius tyrimo metodus, bandinys yra suardomas, todėl negalima nustatyti kiekvieno technologiniame sraute esančio gaminio mechaninių parametrų. Dėl šios priežasties pradėta ieškoti alternatyvių dinaminių medienos tyrimo metodų.

1.3.2. Dinaminiai tyrimo metodai

Dėl galimybės tikrinti medienos ar kiekvieno jos gamino kokybę gamybos ar apdailos proceso metu, šiuo metu yra plačiai taikomi dinaminiai (nedestrukciniai) medienos tyrimo metodai. Matuojant kiekvieno gaminio parametrus, padidinama gaminių kontrolė, o kokybės neatitinkantis gaminy s anksčiau pašalinamas iš technologinio srauto.

Dinaminiai tyrimai gali būti atliekami pasitelkiant spinduliavimą, garso sklidimą, magnetinius, elektrinius ir cheminius reiškinius (žr. 1.2 lentelė). Pasitelkiant šiuos metodus atliekami medienos ir jos gaminių tankio, drėgno, spalvos, ydų ir defektų, mechaninių parametrų, cheminės sudėties ir kt. tyrimai [17].

1.2 lentelė. Dinaminių tyrimo metodų klasifikacija [16]

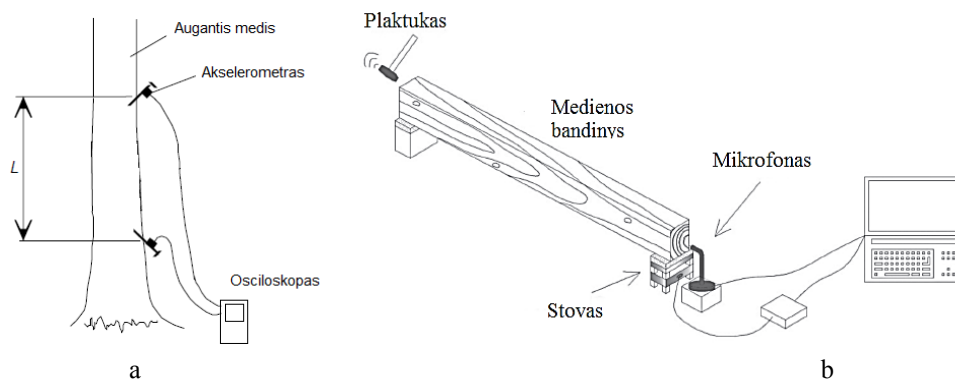
Spinduliniai	Akustiniai/ Ultragaršiniai	Magnetiniai	Elektriniai	Cheminiai
Elektromagnetinis spinduliavimas (regimosios šviesos spinduliavimas, rentgeno spinduliuotė ir pan.)	Bangos: - sklidimo greičio nustatymas;	Magnetinis rezonansas	Elektrinės varžos nustatymas	Medienos sudėties nustatymas
- Atspindys (vizualinis vertinimas, infraraudonųjų spindulių spektroskopija); - Difrakcija (rentgeno spindulių skaida);	- sugerties nustatymas; - slopinimo nustatymas; - savojo virpesių dažnio nustatymas.		Dielektrinių savybių nustatymas	Medienos apdorojimo nustatymas
- Perdavimas (rentgeno tomografija); - Spinduliavimas (infraraudonųjų spindulių termografija).	Akustinė emisija		Pjezoelektrinių savybių nustatymas	

Tiriant medienos kokybę, rentgeno spinduliuotė naudojama tankio, šakų ir puvinų medienoje nustatymui. Rentgeno spinduliuotės principu veikiantys skeneriai (tomografai) gali išmatuoti tiek didelių (skulptūrų, augančių medžių), tiek keleto milimetrų dydžio, medienos objektų struktūrinius parametrus. Medienos pramonėje taikoma spektrometrai padeda įvertinti medienos paviršiaus spalvą, medienos blizgesys vertinamas pasitelkiant krintančio šviesos srauto matavimo techniką, o spektroskopija padeda įvertinti medienos mechaninius parametrus ir cheminę sudėtį. Termografija taikoma paviršinių medienos ydų, klijuotos medienos atsisluoksniavo nustatymui. Elektrinės varžos matavimai padeda nustatyti medienos drėgmės kiekį medienoje, taip pat taikant šį metodą galima identifikuoti medienoje esančius puvinus, išmatuoti apdailai naudojamų medžiagų sluoksnio ant medienos paviršiaus storį. Paviršiaus apdailos kokybei įvertinti, fiziniams parametrams nustatyti naudojami cheminės analizės metodai [16,17].

Labiausiai medienos pramonėje paplitę akustiniai metodai yra ultragarso bangų sklidimo, akustinės emisijos, savojo virpesių dažnio matavimas. Jais galima nustatyti medienos ir jos medžiagų tampriai plastiškąsias savybes, defektus (šakas, įtrūkimus, vabzdžių veiklos rezultatus), atsisluoksniavimą. Naudojant išilgines bangas, nustatomas medienos tampros modulis, o šlyties modulis nustatomas naudojant skersines bangas. Garso bangų slopinimo metodas yra taikomas tiriant medienos medžiagų struktūrą, klijuotų medžiagų atsisluoksniavimą. Impulso – atspindžio metodas taikomas medienos medžiagų vidiniams defektams aptikti. Garso emisijos metodas naudojamas džiovinimo proceso metu medienoje atsiradusių įtrūkimų nustatymui arba vidinius defektų, kuriuos sukėlė medieną ardantys vabzdžiai, aptikimui [17].

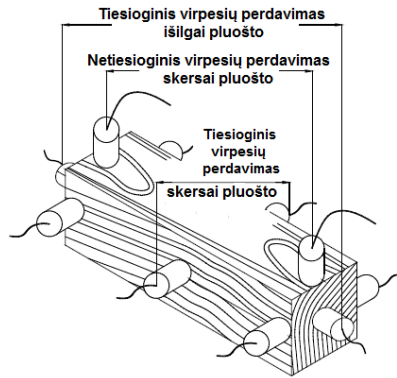
Vienas iš dinaminių matavimo metodų privalumų yra tas, jog matavimams nereikia gaminti specialių matmenų ar formos bandinių. Matavimai gali būti atliekami medžiui augant, taip pat gali būti matuojami įvairus rąstinės ir pjautinės medienos sortimentų, bei skirtingų medienos medžiagų, mechaniniai parametrai. Mokslinių tyrimų metu pastebėta tam tikri dėsningumai, leidžiantys taikyti akustinius tyrimo metodus medienos pramonėje.

Augančios medžio stiprumas ir standumas nustatomas naudojant priverstinius virpesius. Augančio medžio kamiene, tam tikru atstumu vienas nuo kito, 45 laipsnių kampu, įsmeigiami du metaliniai strypai. Plaktuko smūgis į vieną iš strypų sužadina priverstinius virpesius, kurie mediena sklinda ir pasiekia kitą strypą (žr. 1.4 a pav.). Išmatuojamas virpesių sklidimo laikas, apskaičiuojamas virpesių sklidimo greitis, pagal kurį apskaičiuojamas medienos tampros modulis. Siekiant patikrinti, ar parametrai nustatyti teisingai, iš medžių išpjauti bandiniai, kurių mechaniniai parametrai (tampros ir šlyties moduliai) buvo nustatomi statiniais ir dinaminiais metodais (žr. 1.4 b pav.). Atlikti tyrimai parodė priklausomybę tarp priverstinių virpesių sklidimo greičio ir medienos tampros modulio: kuo didesniu greičiu sklinda bangos, tuo didesnis medienos tampros modulis [18,19,20]. Tyrimų metu taip pat pastebėta linijinė priklausomybė tarp bangos sklidimo greičio ir medienos drėgnio: didėjant drėgmės kiekiui medienoje, bangos sklidimo greitis mažėja (su kiekvienu medienos drėgnio procento padidėjimu (11,8-21,4 % ribose), priverstinių virpesių greitis sumažėja 0,5 %) [20].



1.4 pav. Parametrų nustatymas priverstinių virpesių metodu: a) augančio medžio [18]; b) pjautinės medienos [20]

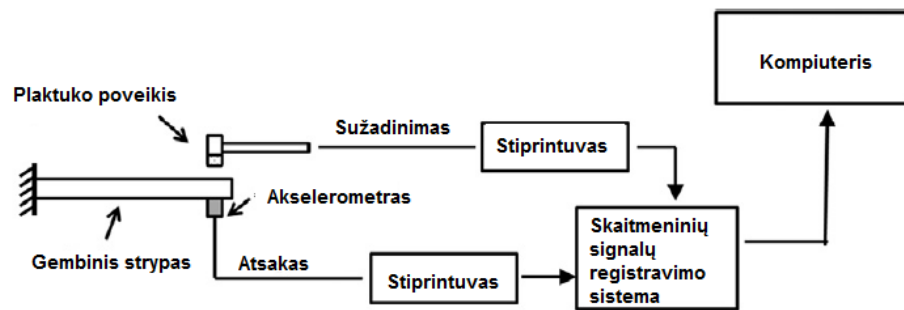
Augančio medžio ir pjautinės medienos mechaninės savybės taip pat gali būti nustatomos ultragarsiniu matavimo metodu. Šis matavimas atliekamas naudojant du jutiklius, kai siūstuvus paleidžia ultragarso bangą, o kitame sortimento gale esantis imtuvas ją užfiksuoja (žr. 1.5 pav.). Matavimai atliekami skersai ir išilgai medienos pluošto, išmatuojamas bangos sklidimo greitis, pagal kurį nustatomas sklidimo laikas ir medienos tampros modulis. Praktiškiausia naudoti netiesioginį virpesių perdavimo metodą, nes šiuo būdu galima išmatuoti skirtingas medienos sortimento sritis [21].



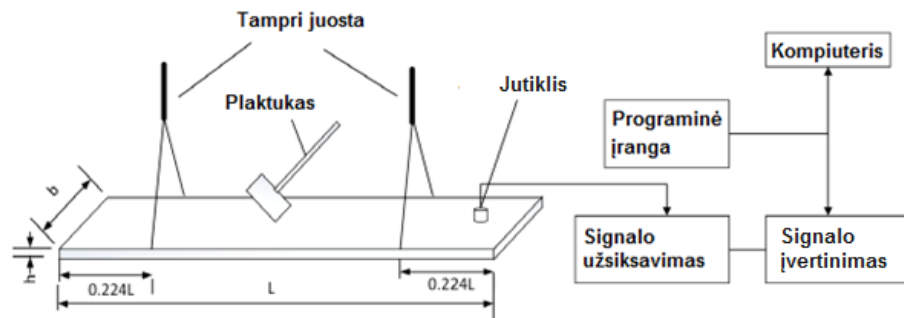
1.5 pav. Ultragarinio tyrimo schemas [21]

Tyrimų metu nustatytos kelios priklausomybės: didėjant drėgmės kiekiui medienoje, ultragarso bangų greitis mažėja [20]. Taip pat nustatyta, kad kuo didesnis medienos tankis, tuo didesnis ultragarso bangų sklidimo greitis, tuo didesnis medienos tampros modulis [21,22].

Medienos tampros parametrai gali būti nustatomi ne tik matuojant virpesių sklidimo greitį, bet ir dažnį. Laisvųjų virpesių tyrimo atveju medienos sortimentas vienu galu nejudamai įtvirtinamas, kitas sortimento galas tuo metu yra veikiamas apkrovos, kuri sukelia skersinius virpesius medienoje (žr. 1.6 a pav.). Laisvieji virpesiai medienoje gali būti matuojami ir medienos bandinio neįtvirtinant (žr. 1.6 b pav.). Bandinys pakabinamas ar pastatomas ant tamprių elementų, kurie leidžia sortimentui laisvai virpėti. Taikant laisvųjų virpesių tyrimo metodą, matuojamas virpesių dažnis ir amplitudė, pagal juos apskaičiuojamas medienos tampros modulis ir slopinimo koeficientas [23,24].



a

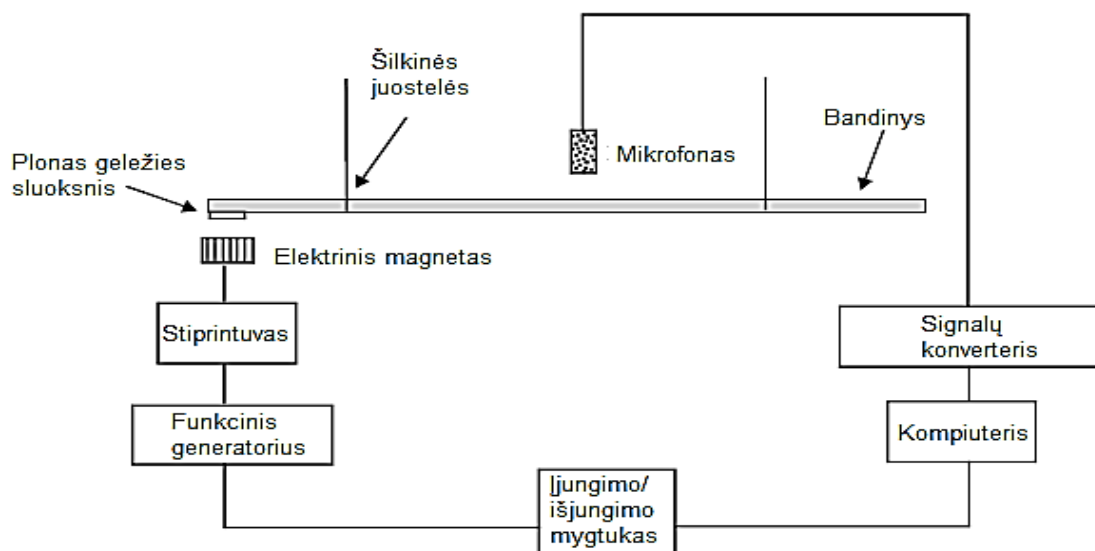


b

1.6 pav. Medienos matavimai laisvųjų virpesių metodu: a) gėmėškai įtvirtintas bandinys [24]; b) bandinys neįtvirtintas [23]

Tyrimų metu nustatyta priklausomybė tarp laisvųjų virpesių dažnio ir medienos tampros modulio: didėjant virpesių dažniui, didėja medienos tampros modulis [23]. Tiriant skirtingas medienos medžiagas buvo nustatyta, kad orientuotų skiedrantų plokštė (OSB) pasižymėjo geriausiomis tamprumo, bet prasčiausiomis klampumo savybėmis. Faneros ir didelio tankio medienos plaušo plokščių (HDF) tampros ir klampos parametrai buvo panašūs: šių medžiagų tampros modulis mažesnis nei OSB plokštės, bet virpesių slopinimo savybės geresnė [24].

Vienas iš dažniausiai naudojamų dinaminio tyrimo metodų yra rezonansinių virpesių metodas. Rezonansiniai virpesiai gali būti sukelti elektromagnetu (žr. 1.7 pav.) ar garsiakalbiu (žr. 2.5 pav.). Šio tyrimo metu išmatuojamas medienos rezonansinių virpesių dažnis ir amplitudė. Šių parametru vertės panaudojamos apskaičiuoti medienos tampros modulį ir virpesių slopinimo koeficientą.



1.7 pav. Rezonansinių virpesių matavimo stendas: a) virpesiai sukeliama elektromagnetu [25]

Rezonansinių virpesių tyrimo metodu nustatytas skirtingų apdailos dangų poveikis medienos tampros moduliui ir slopinimo koeficientui [25]. Taikant šį tyrimo metodą, taip pat nustatytas džiovintos medienos tampros ir klampos parametru kitimas, keičiantis kaitinimo temperatūrai. Gauti rezultatai parodė, jog kylant medienos kaitinimo temperatūrai (120-210 °C), tampros modulis padidėja 12 %, o slopinimo koeficientas sumažėja 40 % [26].

Taigi, rezonansinių virpesių tyrimo metodas tinka tiek apdailintos, tiek neapdailintos medienos mechaninėms savybėms tirti.

Akustiniai tyrimo metodai taikomi ir medienos defektu nustatymui. Skirtingu medienos įtrūkimu įtaka virpesių amplitudinėms dažninėms charakteristikoms buvo tirta taikant rezonansinių virpesių metodą. Įtrūkimui pasiekus bandinio vidurį, pastebimi akivaizdūs virpesių amplitudinių dažninių charakteristikų pokyčiai. Pastebėta, kad virpinant bandinius skirtingomis plokštumomis, nustatomos skirtingos amplitudinės dažninės charakteristikos, kurios leidžia prognozuoti kokia

kryptimi plinta įtrūkimas [27]. Taikant laisvųjų virpesių metodą, nustatytas defektų poveikis medienos slopinimo koeficientui. Džiovinimo metu medienoje atsiradę įtrūkimai padidina vidinę trintį, dėl to padidėja virpesių slopinimo koeficientas [28]. Mokslininkai mažai ištyrę įtrūkimų poveikį medienos rezonansinių virpesių charakteristikoms, nėra sudarytas aiškus modelis, kaip rezonansinių virpesių metodu identifikuoti defektus medienoje.

Šakų įtaka virpesių charakteristikoms ištyrinėta labiau. Irano mokslininkų komanda, taikydama laisvųjų medienos virpesių metodą, tyrė, kaip sortimente atsiradusi kiaurymė veikia medienos tampros ir šlyties modulio vertes, bei virpesių slopinimo koeficiento vertę. Tyrimai patvirtino teoriją, jog tangentiniame paviršiuje atsiradusi kiaurymė paveikia virpesių slopinimo koeficientą. Kitiems tampros ir klampos parametrams, kiaurymės dydis ir padėtis neturėjo įtakos [29,31]. Kitų mokslinių tyrimu metu nustatyta, kad kiaurymės padėtis veikia medienos virpesių dažnį. Medienai virpant rezonansiniu dažniu, bandinys išsilenkia tam tikra forma. Jeigu kiaurymės ašis sutampa su išlinkio plokštuma, tuomet sumažėja medienos virpesių dažnis [30]. Šakos medienoje veikia ir medienos virpesių modas. Nustatyta, kad šakotos medienos bandinys, virpėdamas rezonansiniu dažniu, išlinksta netaisyklingai, t. y. modos forma iškraipoma [31]. Reikalingi papildomi tyrimai, nustatantys keleto šakų padėties ir dydžio įtaką medienos virpesių parametrams.

1.3.3. Rezultatų, gautų statiniais ir dinaminiais metodais, palyginimas

Taikant priverstinių virpesių tyrimo metodiką, pakankamai tiksliai nustatyti augančių medžių ir pjautinės medienos standumo parametrai. Pastebėta priklausomybė tarp dinaminio tampros modulio verčių, apskaičiuotų augančiam medžiui ir pjautinei medienai (koreliacija $R=0,75$). Apskaičiuotos vertės buvo pakankamai tikslios, lyginant su statinių bandymų metu gautomis vertėmis (koreliacija $R=0,91$). Taigi išmatavus priverstinių virpesių sklidimo greitį augančiame medyje, galima pakankamai tiksliai prognozuoti pjautinės medienos mechaninius parametrus [19].

Drėgmės kiekis medienoje tiesiogiai veikia ultragarso bangų sklidimo greitį (koreliacija $R^2=0,98$) [20]. Taip pat nustatyta tiesinė priklausomybė tarp medienos tankio ir ultragarso bangų sklidimo greičio (koreliacija priklausomai nuo medienos rūšies $R^2=0,80-0,88$) [22]. Taigi ultragarso tyrimų metodika taip pat pakankamai tiksli medienos parametrų nustatymui.

Taikant rezonansinių virpesių tyrimo metodiką, pastebima tiesinė priklausomybė tarp dinaminio ir statinių metodais nustatytų tampros modulio verčių (koreliacija $R^2=0,91$). Kai medienoje atsiranda defektas, ši priklausomybė sumažėja (koreliacija $R^2=0,51$). Taip pat pastebėta tiesinė priklausomybė tarp dinaminio metodu nustatyto tampros modulio ir slopinimo koeficiento verčių (koreliacija $R^2=0,69$), kuri atsiradus defektui beveik išnyksta (koreliacija $R^2=0,038$) [31].

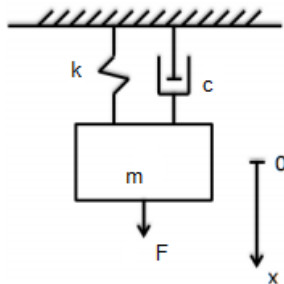
Taigi taikant rezonansinių virpesių tyrimo metodiką, galima nustatyti defektų įtaką medienos tampros ir klampos parametrams.

Pastebimos tiesinės priklausomybės tarp dinaminio ir statinio metodais išmatuotų parametru verčių leidžia teigti, jog dinaminiai tyrimo metodai yra pakankamai tikslūs ir gali būti taikomi medienos savybių vertinimui.

2. DARBO METODIKA

2.1. Medienos mechaninių savybių tyrimas rezonansinių virpesių metodu

Kaip jau buvo minėta, skirtingos formos medienos bandinių mechaninės savybės gali būti įvertintos naudojant rezonansinius virpesius. Tiriami medienos bandiniai gali būti nagrinėjami kaip vieno laisvės laipsnio sistema, kurios dinaminis modelis parodytas 2.1 paveiksle [32].



2.1 pav. Vieno laisvės laipsnio sistemos modelis, kai slopinami laisvieji virpesiai: čia m – masė, c – dydis, įvertinantis medžiagos tampriąsias savybes, k – pasipriešinimo koeficientas [32]

Pagal Niutono dėsnį, sistemos judesio lygtis aprašoma taip [32]:

$$F_r + F_d = m\ddot{x}, \quad (2.1)$$

čia F_r – atstatančioji jėga;

F_d – slopinančioji jėga;

m – sistemos masė;

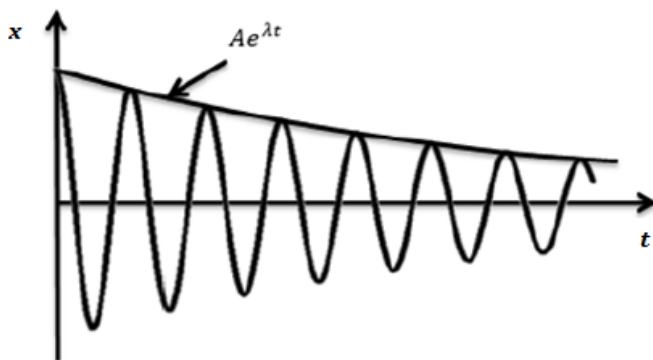
x – poslinkis laiko momentu t .

Darant prielaidą, kad bendrasis standumas yra lygus k , o bendrą klampumą charakterizuoja koeficientas c , judėjimo lygtis aprašoma taip [32]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.2)$$

Gęstant sistemos virpesiams (žr. 2.2 pav.), poslinkis laiko momentu išreiškiamas lygtimi [32]:

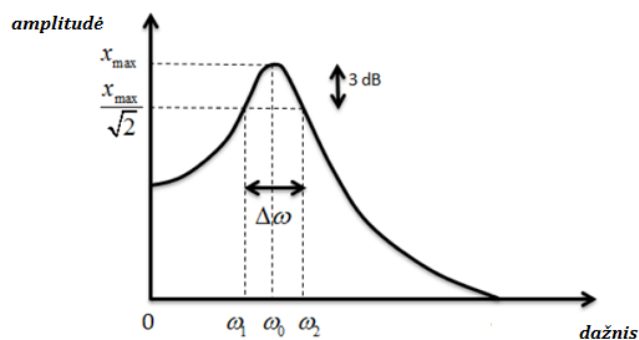
$$x = Ae^{\lambda t} \quad (2.3)$$



2.2 pav. Silpnai slopinamos vieno laisvės laipsnio sistemos virpesių kreivė: čia x – virpesių poslinkis, t – laikas [32]

Tiriant medienos bandinių virpesius, gali būti taikoma keletas slopinimo įvertinimo metodų, kurie yra pagrįsti laiko arba virpesių dažnio analize. Daugelyje tyrimų naudojamas virpesių

energijos pusinės dalies praradimo metodas, kurio metu virpesių slopinimas nustatomas pagal dažnių juostos plotį $\Delta\omega$ (žr. 2.2 pav.) [32]



2.3 pav. Slopinimo įvertinimo kreivė taikant energijos pusinės dalies pralaidymo metodą vieno laisvės laipsnio sistemos virpesiams [32]

Tiriant polimerinių medžiagų mechanines savybes, naudojami priverstiniai rezonansiniai virpesiai, kurių metu, vertinant bandinių amplitudines – dažnines charakteristikas, nustatomos medžiagų tampriosios ir plastiškosios savybės.

2.2. Tyrimų objektas

Medienos tampa plastiškoms savybėms nustatyti naudoti išpjauti iš beržo medienos bandiniai. Tyrimams naudotų bandinių parametrai pateikti 2.1 lentelėje:

2.1 lentelė. Bandinių parametrai

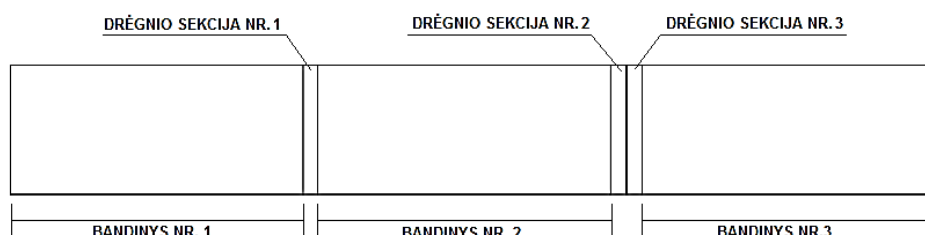
Matmenys ($a \times b \times l$), mm	20x47x400	30x47x400	40x47x400
Grupė	P	V	S
Bandinių skaičius	20	20	20

Defektų poveikio bandinių mechaninių savybėms tyrimui panaudota 60 bandinių. Pusėje iš jų (kiekvienos storio grupės) defektai modeliuoti juos įpjauant, pusėje – defektai sudaryti džiovinant bandinius aukštoje temperatūroje sausoje aplinkoje.

2.3 Medienos drėgnio ir tankio nustatymo metodika ir įranga

Medienos bandiniai ir jų drėgnio sekcijos sveriami svarstyklėmis $\pm 0,01$ g tikslumu, siekiant nustatyti pradinis bandinių drėgnius ω ir mases m_ω .

Medienos bandiniai pjaunami su 20 mm pločio drėgnio sekcija, kuri naudojama pradiniam drėgniui nustatyti (žr. 2.4 pav.)



2.4 pav. Bandinių pjovimo schema

Drėgnio sekcijos džiovinamos džiovinimo kameroje, 103 ± 2 °C temperatūroje, kol įgauna pastovią masę (kai pokytis tarp paskutinių svėrimų ne daugiau nei 1 %), siekiant nustatyti sausos medienos masę m_0 .

$$\omega = \frac{m_\omega - m_0}{m_0}; \quad (2.4)$$

čia ω – pradinis drėgnio sekcijos drėgnis, %;

m_ω – pradinė drėgnio sekcijos masė, g;

m_0 – absoliučiai sausos drėgnio sekcijos masė, g.

Drėgnio sekcijos numeruojamos taip pat, kaip ir bandiniai. Drėgnio sekcijos drėgnis priskirtas tyrimams naudojamų bandinių preliminariam pradiniam drėgniui. Tyrimams naudojami bandiniai pasveriami, apskaičiuojama sausų bandinių preliminari masė, kuri naudojama šių bandinių drėgniui džiovinimo metu apskaičiuoti.

Visiškai sausų medienos bandinių masę M_0 apskaičiuojama pagal formulę:

$$M_0 = \frac{M_\omega \cdot 100}{\omega + 100}; \quad (2.5)$$

čia M_0 – visiškai sausos medienos bandinio masė, g;

M_ω – pradinė medienos bandinio masė, g;

ω – pradinis medienos bandinio drėgnis.

Tam tikru laiko momentu medienos bandinio drėgnis nustatomas pagal formulę:

$$\omega_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \cdot 100; \quad (2.6)$$

čia ω_i – bandinio drėgnis, %;

M_0 – sauso medienos bandinio masė, g;

M_i – bandinio masė tam tikru laiko momentu, g.

Medienos tankis nustatomas panaudojant medienos drėgnio sekcijas. Drėgnio sekcijos pasveriamos svarstyklėmis 0,01g tikslumu. Naudojant slankmatį, 0,01mm tikslumu pamatuojamas drėgnio sekcijos bandinių plotis (b) ir storis (a), ilgis (l) išmatuotas 0,05mm tikslumu. Kiekvienos sekcijos tankis ρ kilogramais į kubinį metrą apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot l} = \frac{m}{V}; \quad (2.6)$$

čia m – sekcijos masė, kg;

a, b, l – sekcijos matmenys, m;

V – sekcijos tūris, m^3 .

Siekiant sukelti pastebimus medienos džiovinimo defektus, bandiniai mirkomi ir džiovinami taikant skirtingus džiovinimo režimus. Šis procesas kartotas du kartus, kol pastebimi džiovinimo defektai atsirado visuose medienos bandiniuose. Tyrimui taikomi režimai aprašyti 2.2 lentelėje:

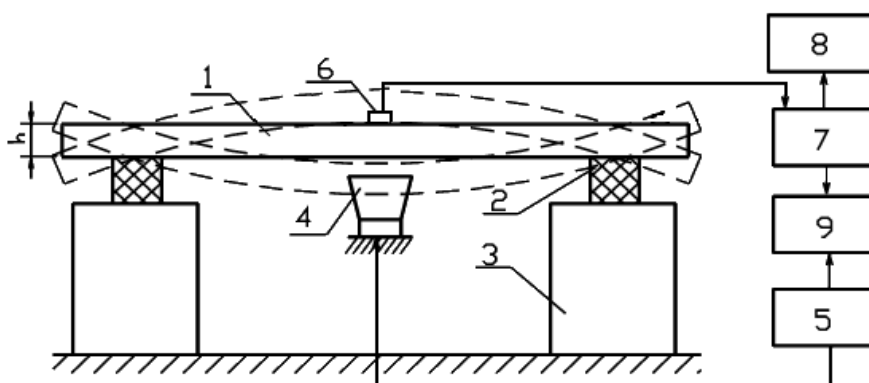
2.2 lentelė. Režimų parametrai

Režimo numeris	Taikomi procesai	Aplinkos parametrai			
		Įmirkymas		Džiovinimas	
		Agento parametrai	Trukmė	Agento parametrai	Trukmė
1	Džiovinimas patalpos klimato sąlygose	-	-	$t=20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\omega=65\pm 5\%$	5 sav.
2	I ciklas (įmirkymas + kamerinis džiovinimas)	$t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; atmosferinis slėgis	1 sav.	$t=140\text{ }^{\circ}\text{C}$	24 val.
3	II ciklas (įmirkymas + kamerinis džiovinimas)	$t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ atmosferinis slėgis	1 sav.	$t=170\text{ }^{\circ}\text{C}$	24 val.

Po kiekvieno įmirkymo – džiovinimo ciklo atliekami medienos bandinių rezonansinių parametų matavimai, kurių metu nustatomas dinaminis tampros modulis ir slopinimo koeficientas.

2.4 Dinaminio tampros modulio ir slopinimo koeficiento tyrimo metodika ir įranga

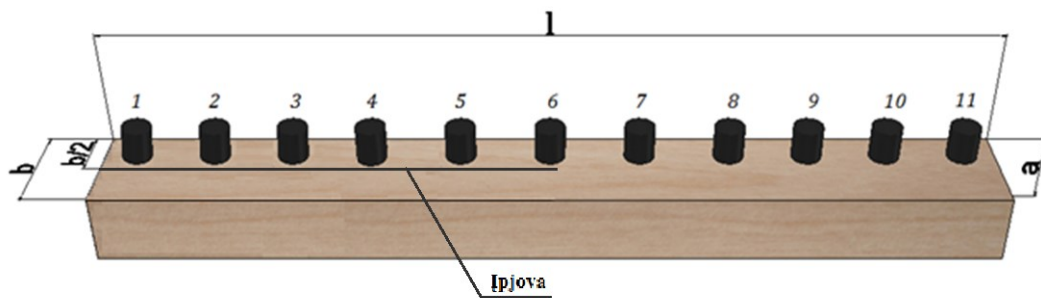
Tyrimams naudojamas specialus stendas, kurio schema pateikta paveiksle:



2.5 pav. Bandinių mechaninių savybių nustatymo rezonansinių virpesių metodu stendas: 1 – bandinys, 2 – slopinantys elementai (porolonas), 3 – stovai, 4 – garsiakalbis, 5 – signalų generatorius, 6 – jutiklis, 7 – virpesių matavimo prietaisas, 8 – oksilografas, 9 – fazometras [26]

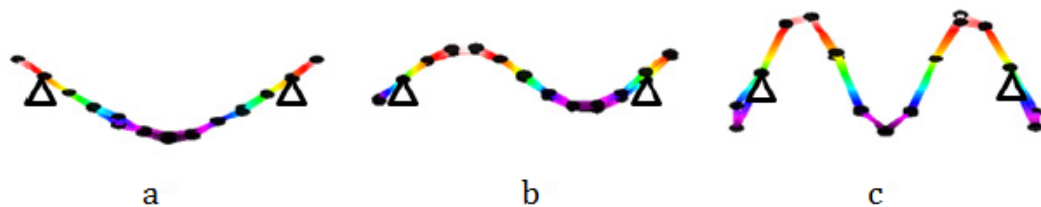
Bandinys 1 laisvai uždedamas ant virpesius slopinančių elementų 2, kurie pagaminti iš porolono ir pritvirtinti prie masyvių stovų 3. Keičiant elektrinių signalų generatoriaus 5 dažnį, sukurti elektriniai impulsai perduodami į virpesių generatorių 4, kuris sužadina bandinio rezonansinius virpesius. Jutiklis 6, nejudamai pritvirtintas prie bandinio, fiksuoja šiuos virpesius, kurie išmatuojami matavimo prietaisu 7. Oksilografo 8 ekrane atvaizduojama virpesių forma. Bandinio virpesių fazė matuojama fazometru 9, į kurį perduodami signalai iš matavimo prietaiso 7 ir elektrinių signalų generatoriaus 5. Kadangi bandinys yra laisvai padėtas ant virpesius slopinančių elementų ir nustatomas jo pirmasis rezonansinis dažnis, tiriamasis atvejis traktuojamas kaip neįtvirtinto strypo pirma virpesių moda.

Naudojant minėtą matavimo stendą, nustatomos medienos bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Tam jutiklis tvirtinamas skirtingose bandinio vietose. Virpesių matavimui naudojama bandinio schema pateikta paveiksle:



2.6 pav. Bandinio schema amplitudinėms – dažninėms charakteristikoms nustatyti (čia 1-11 – jutiklio tvirtinimo vieta; atstumas tarp jutiklių centrų – 35 mm)

Atliekant bandinio mechaninių savybių vertinimą, jutiklis tvirtinamas padėtyje Nr. 6 (per bandinio vidurį). Taip bandiniui virpant kaip vientisam laisvam kūnui, šiame taške bus aptinkama didžiausia rezonansinių virpesių amplitudė, kai bandinys virpės pirma moda. Pirmosios trys laisvai virpančio stygo virpesių modos parodytos 2.7 paveiksle:



2.7 pav. Pirmos trys (a, b, c) laisvai virpančio stygo modos [32]

Tokiu būdu nustatomas pirmas stygo rezonansinių virpesių dažnis, kuris panaudojamas įvertinti medienos tampriai plastiškas savybes. Nustačius stygo rezonansinį dažnį, virpesių amplitudę, apskaičiuojamas medienos tampros modulis, charakterizuojantis medienos tampriasias savybes ir virpesių slopinimo koeficientas, įvertinantis medienos plastiškąsias savybes.

Skaičiavimai atliekami pagal pateiktas formules [33].

$$E = \frac{f_r^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot S \cdot l^2}{I \cdot A^2}; \quad (2.7)$$

čia f_r – rezonansinis dažnis;

l – bandinio ilgis;

ρ – medžiagos tankis;

S – sortimento skerspjūvio plotas;

I – sortimento skerspjūvio inercijos momentas;

A – koeficientas, apibūdinantis sortimento įtvirtinimo pobūdį ir virpesių režimą.

Medžiagos slopinimo koeficientas įvertinamas apskaičiuojant nuostolių kampo tangentą [33]:

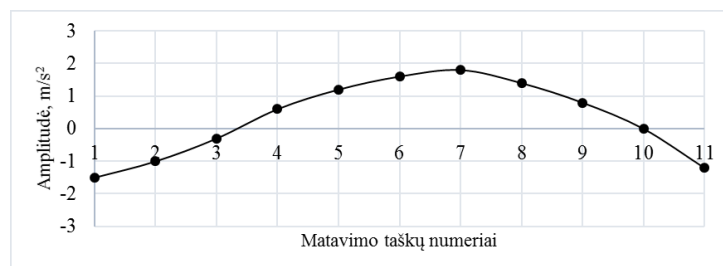
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{f_2 - f_1}{f_r}; \quad (2.8)$$

čia f_r – rezonansinis dažnis;

f_1, f_2 – virpesių dažnis, kai amplitudė sumažėja $\sqrt{2}$ karto.

Norint nustatyti modos formą, rezonansinių virpesių amplitudės pokytis fiksuojamas vienuolikoje taškų, išdėstytų per visą medienos bandinio ilgį, vienodu atstumu vienas nuo kito (žr. 2.6 pav.). Tyrimo pradžioje medienos strypo rezonansiniai dažniai nustatomi, kai jutiklis pritvirtintas padėtyje Nr. 6, užfiksuojami visi rezonansinių virpesių dažniai, kurių diapazonas – 2 kHz. Likusiuose taškuose jutiklis matuoja strypo virpesių amplitudę, kuria strypas virpa esant visiems prieš tai nustatytiems rezonansiniams dažniams. Taip matuojami tiek bandiniai prieš modeliuojant defektą, tiek įpjauti medienos bandiniai.

Pagal gautus duomenis nubrėžiama bandinio moda (žr. 2.8 pav.):



2.8 pav. Bandinio moda

Išanalizavus kreives, nustatoma, kaip įpjova veikė rezonansinių medienos virpesių amplitudę.

Tokiu pat būdu išmatuojamos ir išdžiovintų bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Siekiant nustatyti, kaip medienoje atsiradęs defektas pakeitė bandinio savybes, nubraižomos amplitudines – dažnines charakteristikas rodančios kreivės. Atlikus virpesių analizę, bandiniai perskeliami į kelias dalis, siekiant pamatyti, kaip iš tikrųjų atrodė medienoje atsiradęs įskylinas.

Išmatavus reikiamus medienos bandinių parametrus ir nubraižius amplitudines – dažnines charakteristikas rodančias kreives, atliekama bandinių, su dirbtinai sumodeliuotais ir natūraliai atsiradusiais defektais, savybių analizė.

3. TYRIMŲ REZULTATAI

Šiame skyriuje pateikiami atliktų tyrimų rezultatai. Remiantis skaitinėmis rezultatu išraiškomis sudaromi grafikai, atliekama gautų duomenų analizė.

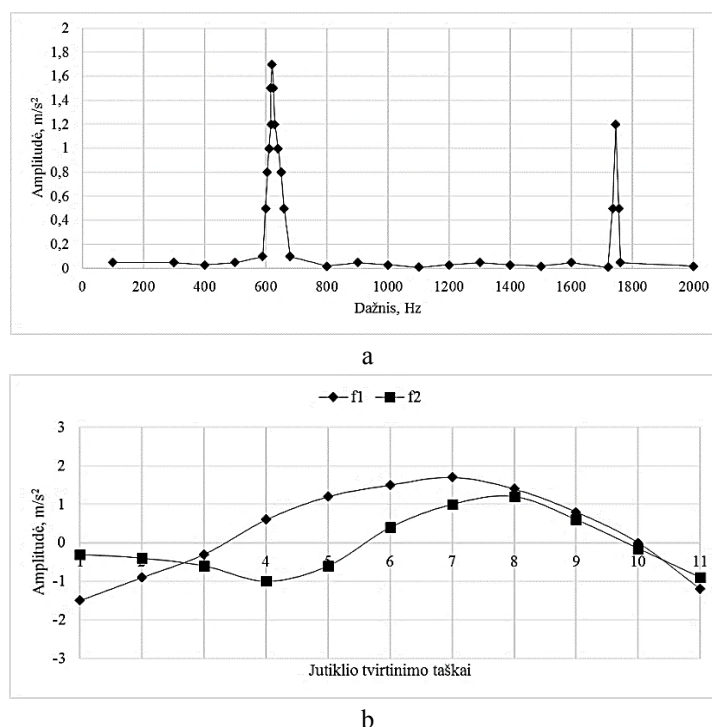
3.1. Mechaninis medienos defektų modeliavimas

Kaip jau buvo minėta anksčiau, džiovinimo metu įtrūkimai dažniausiai susiformuoja gaminio galuose. Vizualiai toks defektas yra pastebimas, tačiau sunku prognozuoti jo gylį ir poveikį medienos sortimentui.

3.1.1. Defekto poveikis medienos rezonansiniams parametrams

Atlikti dirbtinai suformuoto defekto – išilginės įpjovos, poveikio medienos rezonansiniams ir mechaniniams parametrams tyrimai.

Visų pirma, jutikliui esant pozicijoje Nr. 6 (žr. 2.6 pav.), išmatuoti medienos rezonansiniai dažniai ir jų amplitudės. Tuomet, siekiant sužinoti kokią formą įgauna virpantis bandinys, išmatuotos virpesių amplitudės likusiose padėtyse (žr. 2.6 pav.). Vieno iš P grupės bandinių amplitudinė dažninė charakteristika ir virpesių moda pavaizduoti 3.1 paveiksle.



3.1 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)

Pastebėta, kad ploniausią bandinį virpinant dažniu, kurio diapazonas 20-2000 Hz, užfiksuoti du rezonansiniai dažniai $f_1=620$ Hz ir $f_2=1745$ Hz, kurių amplitudės atitinkamai lygios $1,7 \text{ m/s}^2$ ir $1,2 \text{ m/s}^2$. Virpėdamas pirmu rezonansiniu dažniu, bandinys išlinko moda, panašia į teorinio izotropinio strypo pirmąją modą (žr. 2.7 a pav.), o virpėdamas antrą dažniu – panašia į teorinio

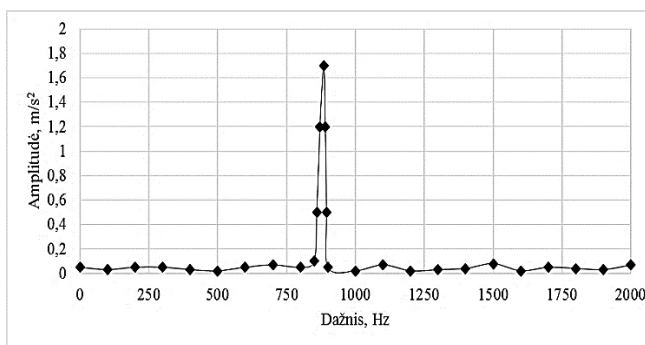
izotropinio strypo antrąją modą (žr. 2.7 b pav.). Kitų P grupės bandinių rezonansiniai parametrai (dažniai f_1 , f_2 ir amplitudės A) pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. P grupės bandinių rezonansiniai parametrai

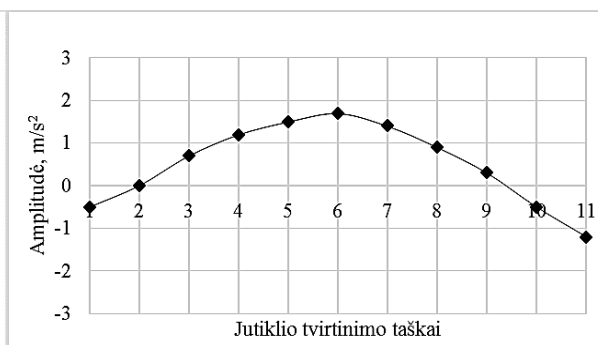
Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rez. parametrai										
f_1 , Hz	612	614	605	613	614	600	615	622	608	620
A_1 , m/s ²	2,8	2,2	1,7	1,9	2,6	2,1	1,9	2,5	1,8	1,7
f_2 , Hz	1678	1682	1660	1680	1687	1702	1694	1705	1661	1745
A_2 , m/s ²	2,1	1,8	1,7	1	1,7	2	1,6	2	0,8	1,2

Nustatyta, kad tos pačios grupės bandinių dažnis skiriasi: mažiausias pirmasis rezonansinis dažnis $f=600$ Hz, didžiausias – $f=620$ Hz, o mažiausias antrasis rezonansinis dažnis $f=1660$ Hz, didžiausias $f=1745$ Hz. Virpesių amplitudės taip pat skyrėsi. Kadangi kiekvieno medienos bandinio struktūra yra skirtinga, galime daryti prielaidą, kad šis skirtumas atsirado dėl struktūros bei tankio skirtumų medienos bandiniuose. Nepaisant to, pastebėta, kad šiame dažnių diapazone, taip pat užfiksuoti du rezonansiniai dažniai, kuriais virpėdami kiti bandiniai išlinko analogiškais modomis.

Taikant tą pačią metodiką, nustatyti V ir S grupių bandinių rezonansiniai parametrai. Bandinių amplitudinės dažninės charakteristikos ir virpesių modos pavaizduotos 3.2 ir 3.3 paveiksluose.

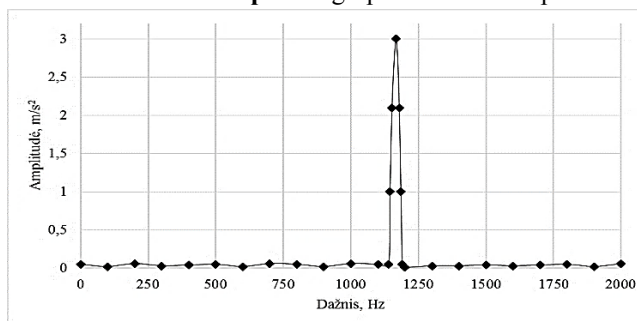


a

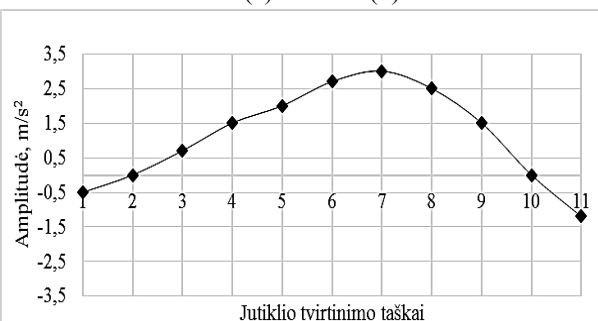


b

3.2 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)



a



b

3.3 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)

Pastebėta, kad V ir S grupės bandiniams virpant dažniu, kurio diapazonas 20-2000 Hz, užfiksuotas tik vienas rezonansinis dažnis, kuriuo virpantys bandiniai išlanko moda, panašia į pirmąją teorinio izotropinio strypo modą (žr. 2.7 a pav.). V grupės bandinys virpa 885 Hz rezonansiniu dažniu, virpesių amplitudė lygi 1,7 m/s², S grupės bandinys virpa 1167 Hz rezonansiniu dažniu, o virpesių amplitudė lygi 3 m/s².

Kiti šių grupių bandinių rezonansiniai parametrai pateikti lentelėse (žr. 3.2 lentelė ir 3.3 lentelė).

3.2 lentelė. V grupės bandinių rezonansiniai parametrai

Rez. parametrai \ Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f ₁ , Hz	870	886	902	916	911	862	916	913	894	885
A ₁ , m/s ²	1,3	2,4	0,8	1,6	1,4	2,2	2,0	1,8	2,5	1,7

3.3 lentelė. S grupės bandinių rezonansiniai parametrai

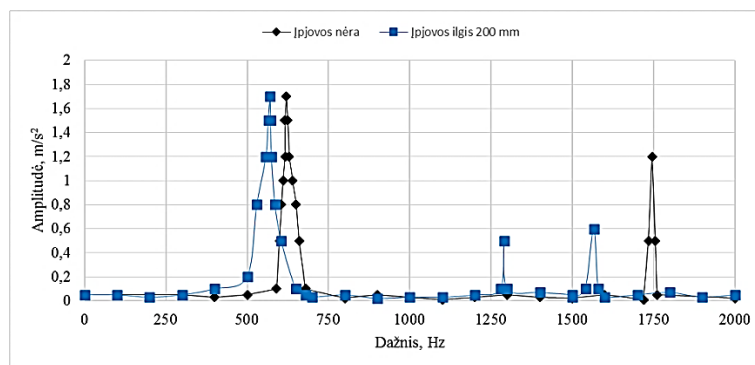
Rez. parametrai \ Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f ₁ , Hz	1171	1197	1136	1161	1175	1182	1124	1206	1151	1167
A ₁ , m/s ²	3,1	2,6	3,2	3,8	3,0	2,8	2,5	3,2	2,0	3,4

Pastebėta, kad tos pačios grupės bandiniai virpa skirtingu rezonansiniu dažniu: mažiausias V grupės bandinių rezonansinis dažnis f=862 Hz, didžiausias – f=916 Hz, o mažiausias S grupės bandinių rezonansinis dažnis f=1124 Hz, didžiausias – f=1206 Hz. Virpesių amplitudės taip pat skyrėsi. Kaip ir minėta anksčiau, daroma prielaida, kad šie skirtumai atsirado dėl skirtingos medienos struktūros. Nepaisant to, nustatyta, kad šiame dažnių diapazone, kiti V ir S grupės bandiniai taip pat virpėjo vienu rezonansiniu dažniu ir išlanko analogiškais modomis.

Visi bandiniai, virpėdami pirmu rezonansiniu dažniu, išlanko moda, artima teorinio izotropinio strypo pirmajai modai, todėl šio metodo formulės gali būti taikomos medienos tampros ir klamos parametrų skaičiavimams.

Išsiaiškinus, kaip virpa bandinys, kuriame nėra įtrūkimų, bandiniuose suformuotas dirbtinis defektas. Bandinys įpjautas nuo galo link vidurio išilgai. Matuojant virpesių dažnį ir amplitudę, nustatytas defekto poveikis medienos rezonansiniams parametrams.

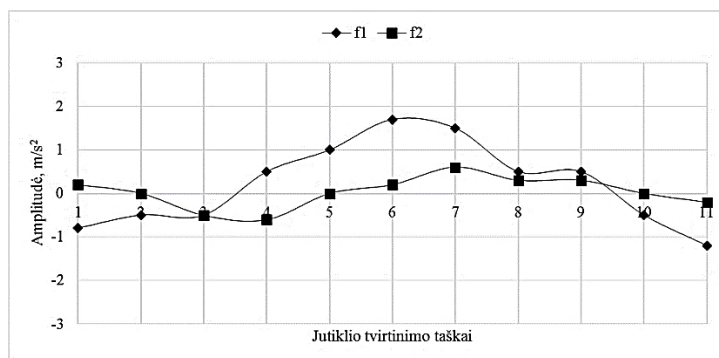
Nustatyta, kad kol įpjova nepasiekia bandinio vidurio (įpjovos ilgis lygus 200 mm), akivaizdžių pokyčių amplitudinėse dažninėse charakteristikose nepastebima. Vieno iš įpjautų P grupės bandinių amplitudinė dažninė charakteristika pavaizduota 3.4 paveiksle.



3.4 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika

Nustatyta, kad bandinyje suformavus įpjovą, sumažėjo pirmas ir antras rezonansiniai dažniai. Įpjovus 200 mm, fiksuojami rezonansiniai dažniai $f_1=571$ Hz ir $f_2=1566$ Hz, o virpesių amplitudės atitinkamai lygios $1,7$ m/s² ir $0,6$ m/s². Taip pat užfiksuoti papildomi virpesiai ties 1290 Hz dažniu. Virpesių amplitudės kito nedėsniai. Padidinus įpjovos gylį, rezonansinis dažnis ir amplitudė beveik nebekito.

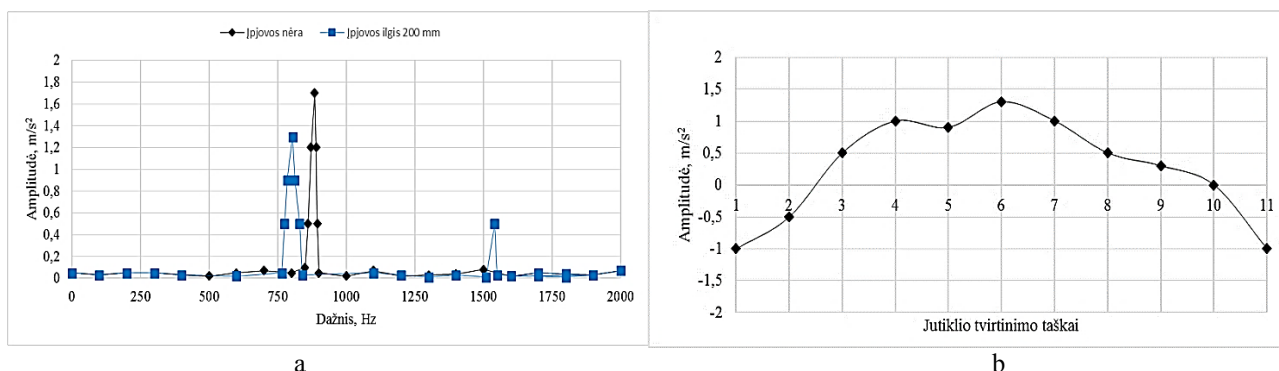
Išsiaiškinus, kad defektas pakeičia bandinių amplitudinę dažninę charakteristiką, nustatytas įpjovos poveikis virpesių modai.



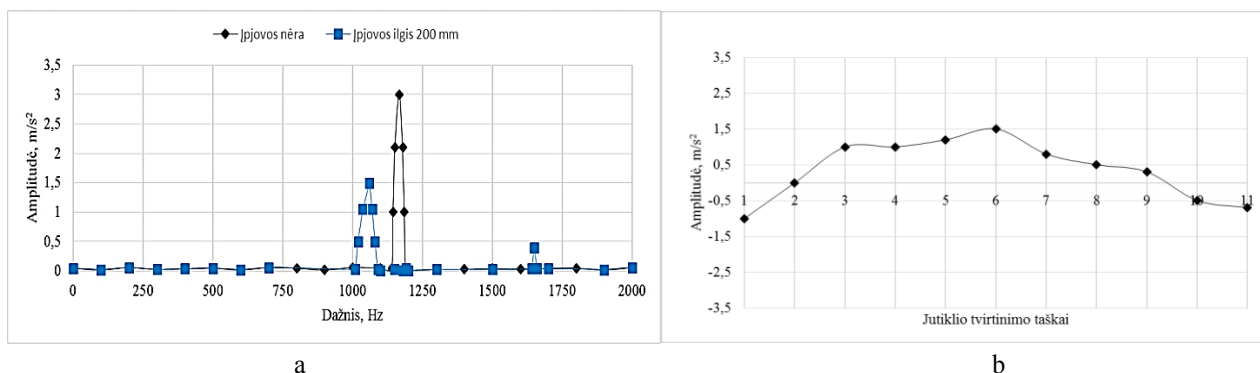
3.5 pav. P grupės bandinio modos, kai įpjovos ilgis lygus 200 mm

Pastebėta, kad medienoje atsiradęs defektas iškraipo virpesių modą taip, kad sunku pastebėti atitikimą su teorinėmis izotropinio styro modomis. Kitų šios grupės bandinių pokyčiai buvo analogiški.

Taikant tą pačią metodiką, išmatuoti V ir S grupės bandiniai. Jų amplitudinės dažninės charakteristikos ir virpesių modos pateiktos 3.6 ir 3.7 paveiksluose.



3.6 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir modos (b), kai įpjovos ilgis lygus 200 mm



3.7 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir modos (b), kai įpjovos ilgis lygus 200 mm

Pastebėta panaši tendencija, kaip ir P grupės bandiniuose. Atsiradus įpjovai, rezonansiniai dažniai sumažėjo, šiuo atveju amplitudės taip pat sumažėjo. Taip pat užfiksuoti papildomi virpesiai (V grupės bandinio ties 1542 Hz, S grupės bandinio ties 1655 Hz), kurie akivaizdžiai pastebimi tik defektui pasiekus bandinio vidurį. Defekto dydis paveikė ir virpesių modas. Modos forma išsikraipė, tapo nebe tokia panaši į teorinio izotropinio strypo pirmąją modą. Kitų šių grupių bandinių parametrai kito analogiškai.

Panaši amplitudinių dažninių charakteristikų pokyčio tendencija buvo pastebėta ir kituose moksliniuose tyrimuose. Jų metu suformavus defektą taip pat pastebimas bandinio rezonansinio dažnio sumažėjimas, pastebimi papildomi dažniai. Įpjova paveikė bandinio amplitudines dažnines charakteristikas tik tuomet, kai jos ilgis peržengė bandinio vidurį [27]. Kadangi didėjant įpjovai, tiek prieš tai atliktuose tyrimuose, tiek dabar, žymių pokyčių nepastebėta, bandinių rezonansinių parametru suvestinė pateikiama esant 200 mm ilgio įpjovai (žr. 3.4 lentelė, 3.5 lentelė, 3.6 lentelė).

3.4 lentelė. P grupės bandinių rezonansiniai parametrai, kai įpjovos ilgis 200 mm

Rez. parametrai \ Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_1 , Hz	582	565	575	568	565	560	566	587	559	571
A_1 , m/s^2	1,6	1,8	1,2	1,1	1,4	1,6	1,6	2	1,1	1,2
f_2 , Hz	1585	1553	1569	1560	1541	1535	1551	1598	1530	1566
A_2 , m/s^2	0,9	0,6	0,6	0,7	1	0,6	0,8	0,9	0,4	0,6

3.5 lentelė. V grupės bandinių rezonansiniai parametrai, kai įpjovos ilgis 200 mm

Rez. parametrai \ Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_1 , Hz	788	823	842	836	829	792	836	848	829	803
A_1 , m/s^2	1,1	2,0	0,5	1,0	0,9	1,6	1,7	1,3	1,7	1,3

3.6 lentelė. S grupės bandinių rezonansiniai parametrai, kai įpjovos ilgis 200 mm

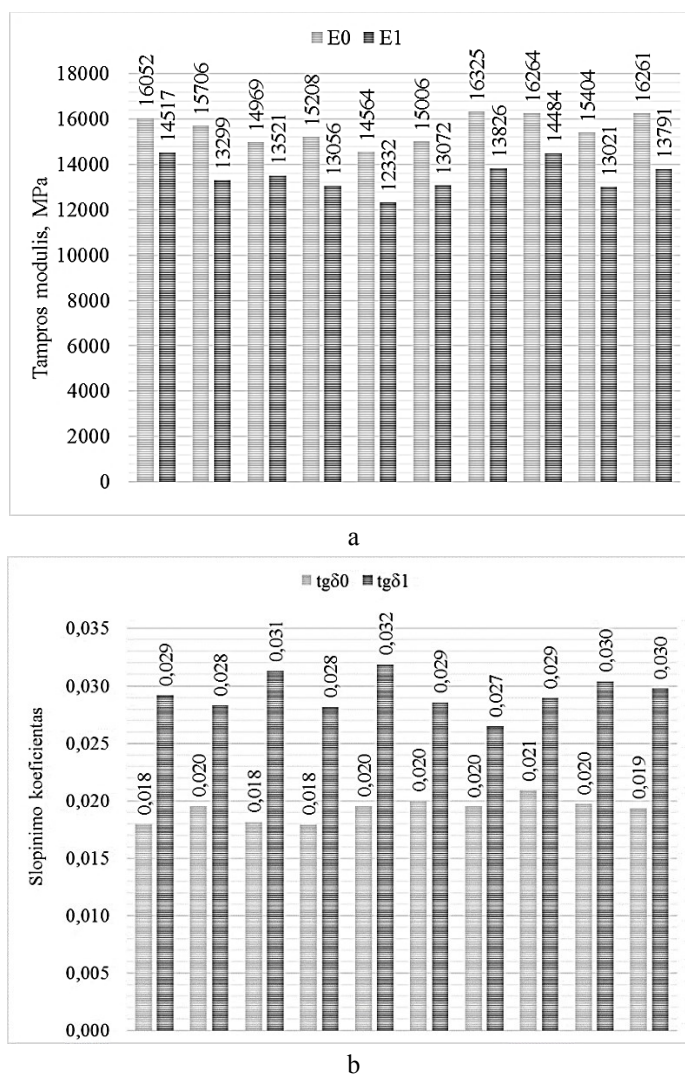
Rez. parametrai \ Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_1 , Hz	1070	1107	1034	1071	1065	1081	1034	1105	1050	1060
A_1 , m/s^2	1,7	2,0	1,4	2,2	1,1	1,4	1,8	1,6	1,4	1,6

Pastebime, kad suformuota įpjova sumažino visų grupių bandinių rezonansinių virpesių dažnį, tačiau virpesių amplitudė kito nedėsnigai.

3.1.2. Defekto poveikis medienos mechaniniams parametrams

Medienos tampriai plastiškąsias savybes apibūdinantys parametrai gali būti apskaičiuojami bandiniui virpant įvairiomis modomis. Šis skirtumas apibūdinamas koeficientu A, kuris nurodo sortimento įtvirtinimo pobūdį ir virpesių modą [33]. Bandinio išlinkio forma (žr. 3.1 b pav.) artima pirmajai laisvai svyruojančio teorinio izotropinio strypo išlinkio modai (žr. 2.7 a pav.), taigi šiuo atveju koeficientas A lygus 22,4 [33]. Kiti bandiniai, virpėdami pirmąja moda, išlinko analogiška forma. Nustatytas bandinių pirmas rezonansinis dažnis ir amplitudė panaudoti medienos tampros modulio ir slopinimo koeficiento apskaičiavimui.

Pagal skaitines tampros ir klamos parametrų vertes sudaryti grafikai, parodantys kaip bandinyje atsiradęs defektas paveikė jo mechanines savybes. P grupės bandinių tampros modulio ir slopinimo koeficiento verčių kitimas pavaizduotas 3.8 paveiksle.



3.8 pav. P grupės bandinių tampros modulio (a) ir slopinimo koeficiento (b) kitimas (E0 ir tgδ0 – kai bandinyje įpjovos nėra; E1 ir tgδ1 – kai bandinyje suformuota 200 mm ilgio įpjova).

Pastebime, kad medienos bandinyje atsiradus defektui, jos tampros modulis sumažėja, o slopinimo koeficientas padidėja. Kitų grupių bandinių parametrai kito analogiškai (žr. 3.7 lentelė. ir 3.8 lentelė).

3.7 lentelė. V grupės bandinių tampros ir klampos parametrai

Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tampros ir klampos parametrai										
E0, MPa	13867	14814	15169	15511	15842	13516	15797	15679	14726	14201
E1, MPa	0,021	0,021	0,018	0,020	0,021	0,020	0,019	0,021	0,020	0,021
tgδ0	11262	12655	13086	12791	12988	11296	13027	13391	12536	11575
tgδ1	0,036	0,036	0,030	0,032	0,037	0,033	0,032	0,032	0,034	0,034

3.8 lentelė. S grupės bandinių tampros ir klampos parametrai

Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tampros ir klampos parametrai										
E0, MPa	13477	14472	12802	13409	13007	13575	12527	14587	12788	13017
E1, MPa	0,024	0,022	0,023	0,021	0,020	0,020	0,023	0,024	0,023	0,023
tgδ0	11140	12254	10500	11297	10579	11241	10495	12123	10536	10632
tgδ1	0,039	0,033	0,039	0,036	0,036	0,033	0,035	0,038	0,035	0,032

Toks kitimas gali būti aiškinamas teigiant, kad suardžius vientisą medienos struktūrą, bandinys virpa nebe kaip vientisas kūnas, todėl sumažėja jo virpesių dažnis, taip pat ir tampros modulis. Sumažėjus medienos tamprumui, ji pasidaro plastiškesnė, padidėja virpesių slopinimo koeficientas.

3.2. Džiovinimo defektų poveikis medienos mechaninėms savybėms

Mediena yra porėta, kapiliarinė medžiaga, kurioje drėgmės judėjimas vyksta lengvai. Šio proceso spartą veikia medienos tankis ir kiti parametrai, todėl jis svarbus siekiant kontroliuoti drėgmės mainų tarp aplinkos ir medienos medienoje. Tyrimo objektų pradinis drėgnis ir tankis nustatytas matuojant medienos drėgnio sekcijos parametrus. Pradiniai drėgnio sekcijos parametrų duomenys priskirti pradiniam tyrimui naudojamų bandinių parametrų.

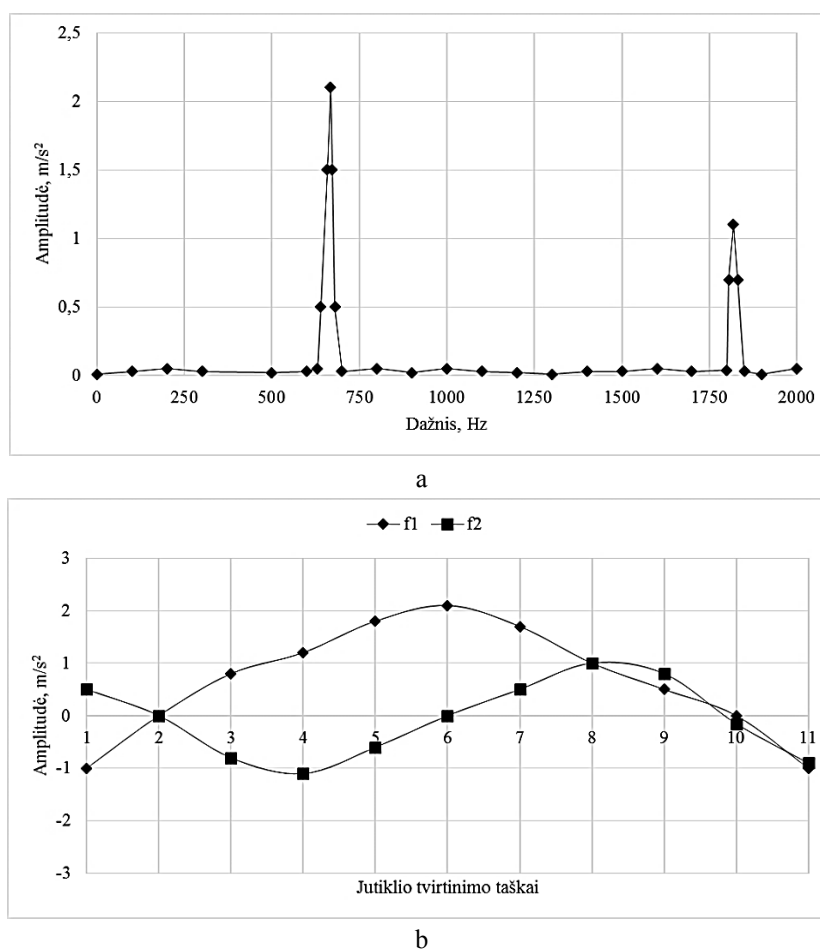
Susisteminius duomenis, nustatytas vidutinis pradinis beržo medienos bandinių drėgnis ir tankis. Nustatyta, kad tyrimams panaudotų bandinių pradinis drėgnis buvo vidutiniškai lygus 68%, tankis - 605 kg/m³.

Siekiant nustatyti, kaip džiovinimo defektai paveikia medienos tampriai plastiškąsias savybes, bandiniai buvo mirkyti 24 val. vandenyje ir vėliau išdžiovinti aukštoje temperatūroje (140 °C). Po to jie dar kartą pamirkyti ir išdžiovinti 170 °C temperatūroje. Vizualiai įvertinus bandinius, pastebėti platesni įtrūkimai, nei prieš taikant antrą apdorojimo režimą. Pažeistas tik skersinis medienos paviršius, todėl defektų gylis nežinomas.

Po kiekvieno iš džiovinimų įvertinti medienos mechaniniai parametrai. Nustačius, kaip dirbtinai sukelti defektai veikia medienos rezonansines charakteristikas, tikėtasi pastebėti panašią tendenciją bandinių, su džiovinimo defektais, charakteristikose.

3.2.1. Džiovinimo defektų poveikis medienos rezonansiniams parametrams

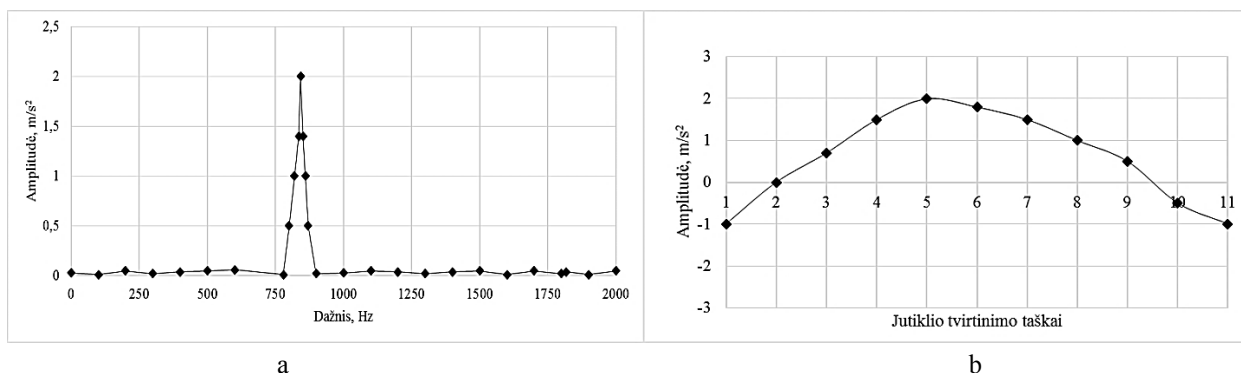
Defektų poveikio medienos rezonansiniams parametrams tyrimas atliktas analogiškai, kaip ir defektų modeliavimo tyrimas. Pirmiausia išmatuoti kontrolinių bandinių rezonansiniai parametrai. Vieno iš P grupės bandinių amplitudinė dažninė charakteristika ir virpesių prieš jį įmirkant moda pavaizduoti 3.9 paveiksle.



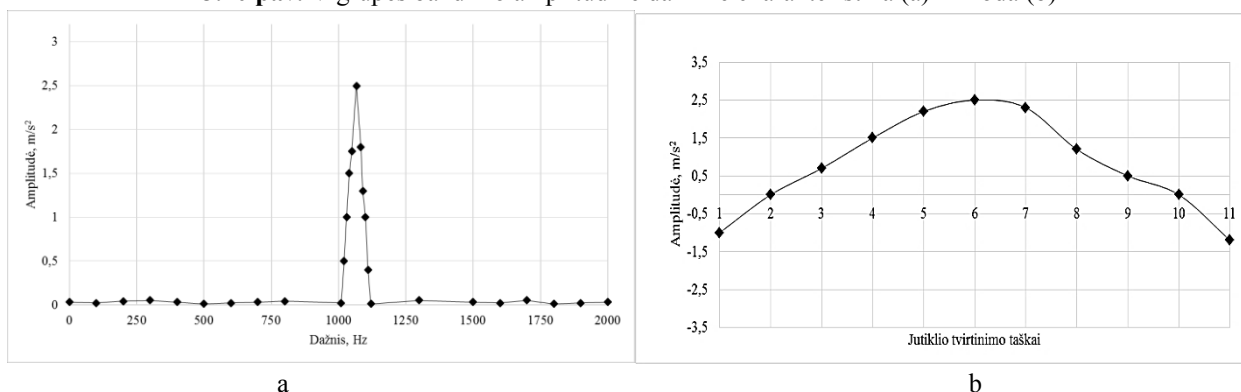
3.9 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)

20-2000 Hz dažnių diapazone bandinys virpėjo dviem rezonansiniais dažniais ($f_1=$, 667 Hz ir $f_2=$ 1818 Hz), kuriais virpėdamas išlanko modomis artimomis teorinio izotropinio strypo pirmajai ir antrajai modoms (žr. 2.7 pav.). Kiti šios grupės bandiniai virpėjo analogiškai.

Taikant tą pačią metodiką, nustatyti V ir S grupių bandinių pradiniai rezonansiniai parametrai. Jų amplitudinės dažninės charakteristikos ir virpesių modos pateiktos 3.10 ir 3.11 paveiksluose.



3.10 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)



3.11 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)

Abiejų grupių bandiniams virpant dažniu, kurio diapazonas 20-2000 Hz, rezonansas užfiksuotas vieną kartą. V grupės bandinio rezonansinis dažnis $f=843$ Hz, amplitudė lygi 2 m/s^2 , kai S grupės bandinys rezonansiniu dažniu virpa 1067 Hz, virpesių amplitudė lygi $2,5 \text{ m/s}^2$. Abiem atvejais bandinių virpesių modos forma artima teorinio izotropinio strypo pirmajai modai (žr. 2.7 a pav.). Kiti bandiniai virpėjo analogiškai.

Išmatavus pradinis bandinių rezonansinius parametrus, atliktas medienos įmirkymas ir kaitinimas skirtingose temperatūrose, siekiant sukelti džiovinimo defektus. Tiek po kaitinimo $140 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje, tiek po kaitinimo $170 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje, išmatuoti medienos rezonansiniais parametrai.

Bandinių parametrų suvestinė pateikta lentelėse (žr. 3.9 lentelė, 3.10 lentelė ir 3.11 lentelė).

3.9 lentelė. P grupės bandinių rezonansiniai parametrai

Rez. parametrai \ Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_0 , Hz	660	646	667	661	653	658	644	636	663	667
f_1 , Hz	639	627	658	640	634	636	627	619	650	657
f_2 , Hz	617	634	631	619	614	621	607	626	630	635
A_0 , m/s^2	2,1	1,8	1,9	1,7	1,6	1,7	1,9	2	1,9	2,1
A_1 , m/s^2	2,1	2,1	2,5	1,8	2,2	2,1	1,9	2,2	2,2	1,8
A_2 , m/s^2	1,8	2,0	2,4	2,1	1,6	1,4	2,2	1,8	2,3	2,3

3.10 lentelė. V grupės bandinių rezonansiniai parametrai

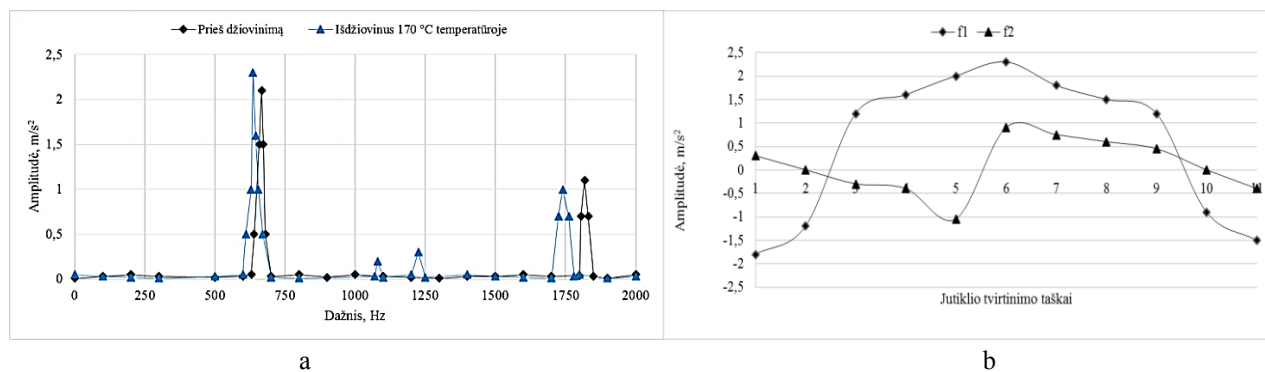
Rez. parametrai	Eil. Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_0 , Hz	892	903	856	828	889	905	898	880	842	843
f_1 , Hz	886	900	853	822	885	905	895	875	834	839
f_2 , Hz	880	882	837	808	868	900	877	863	821	817
A_0 , m/s ²	2,9	2,6	2,6	2,5	3,2	3,2	2,2	3,4	2,1	2
A_1 , m/s ²	2,1	2,7	2	2,7	2,5	2,9	2,2	2,4	1,7	1,5
A_2 , m/s ²	1,5	2,2	2,1	2	1,6	2,9	1,2	2,7	1,5	3

3.11 lentelė. S grupės bandinių rezonansiniai parametrai

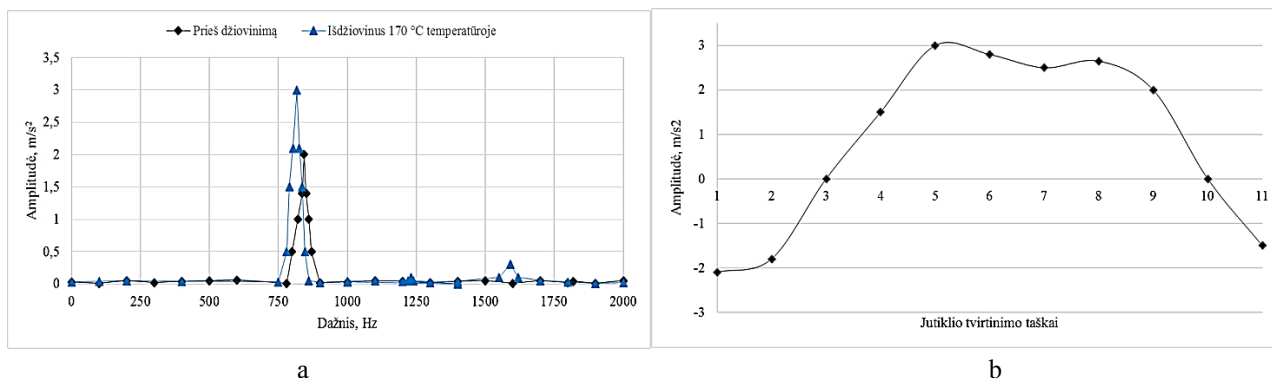
Rez. parametrai	Eil. Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_0 , Hz	1076	1067	1146	1031	1075	1092	1034	1026	1041	1067
f_1 , Hz	1064	1061	1141	1024	1075	1087	1019	1021	1039	1063
f_2 , Hz	1069	1045	1130	1015	1063	1071	1005	1011	1029	1044
A_0 , m/s ²	3,4	2,9	3,8	3,2	3,7	3	2,7	2	3,4	2,5
A_1 , m/s ²	3,2	2,8	3,6	2,5	3,4	2,7	1,9	2,2	2,6	3,4
A_2 , m/s ²	2,9	1,9	2,1	4	2,5	2,5	3	3,2	3	3,3

Pastebėta, kad pritaikius įmirkymas ir džiovinimą 170 °C temperatūroje, medienos bandinių rezonansinis dažnis sumažėjo visų grupių bandiniams. Tokia pati tendencija pastebėta prieš tai atlikto tyrimo metu, kai medienoje dirbtinai suformuotas defektas sumažino bandinių rezonansinį dažnį. Kaip ir mechaninių defektų modeliavimo metu, taip ir džiovinimo metu, medienos virpesių amplitudė kito nedėsniai.

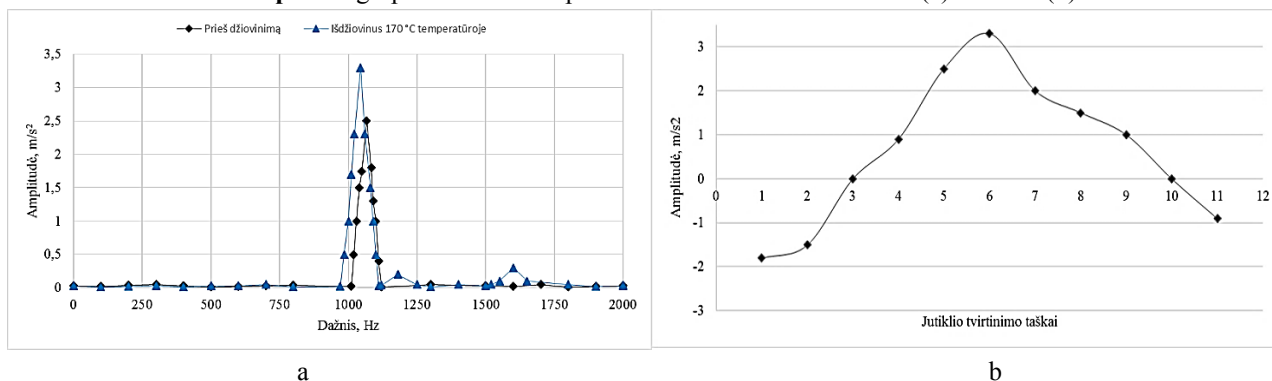
Matuojant bandinio rezonansiniu parametrus nustatytas džiovinimo poveikis medienos amplitudinėms dažninėms charakteristikoms ir virpesių modams. Šie pokyčiai pavaizduoti 3.12, 3.13 ir 3.14 paveiksluose.



3.12 pav. P grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)



3.13 pav. V grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)



3.14 pav. S grupės bandinio amplitudinė dažninė charakteristika (a) ir moda (b)

Pastebėta, išdžiovinus 170 °C temperatūroje, pasikeitė medienos amplitudinės dažinės charakteristikos ir virpesių modos. Nagrinėjant bandinių amplitudines dažnines charakteristikas pastebėta, jog pritaikius hidroterminį apdorojimą rezonansinis virpesių dažnis sumažėja. Taip pat fiksuojami papildomi, kontroliniuose bandiniuose neužfiksuoti dažniai, kurių amplitudė kinta nuo $0,1 \text{ m/s}^2$ iki $0,3 \text{ m/s}^2$.

Nagrinėjant virpesių modų grafikus pastebimas didelis nukrypimas nuo teorinių izotropinio strypo virpesių modos formų. Modos išsikraipė labiau, nei suformavus dirbtinius defektus. Ši modos pokyčio tendencija buvo pastebėta ir kituose moksliniuose tyrimuose. Mokslininkai nustatė, kad medienoje atsiradus defektui, jos modos forma iškrypsta, tampa nebe tokia panaši į teorinio izotropinio strypo modą [29].

Taigi, remiantis defektų modeliavimo ir kitų mokslinių tyrimų duomenimis, pastebėjus tokius medienos amplitudinių dažninių charakteristikų ir virpesių modos pokyčius, galima teigti, jog džiovinimo metu medienoje susiformavo defektai, kurie pažeidė bandinio vientisą struktūrą.

Šis teiginys patikrinamas perskeliant medienos gaminius į kelias dalis ir išnagrinėjus jų vidinės struktūros pokyčius.

Perskėlus bandinius, pastebėti įtrūkimai buvo skirtingo ilgio (žr. 3.15 pav.). Skersiniame paviršiuje vos pastebimas įtrūkimas tęsėsi per visą bandinio ilgį o platūs įtrūkimai skersiniame paviršiuje buvo įvairaus ilgio ir skirtingų krypčių.

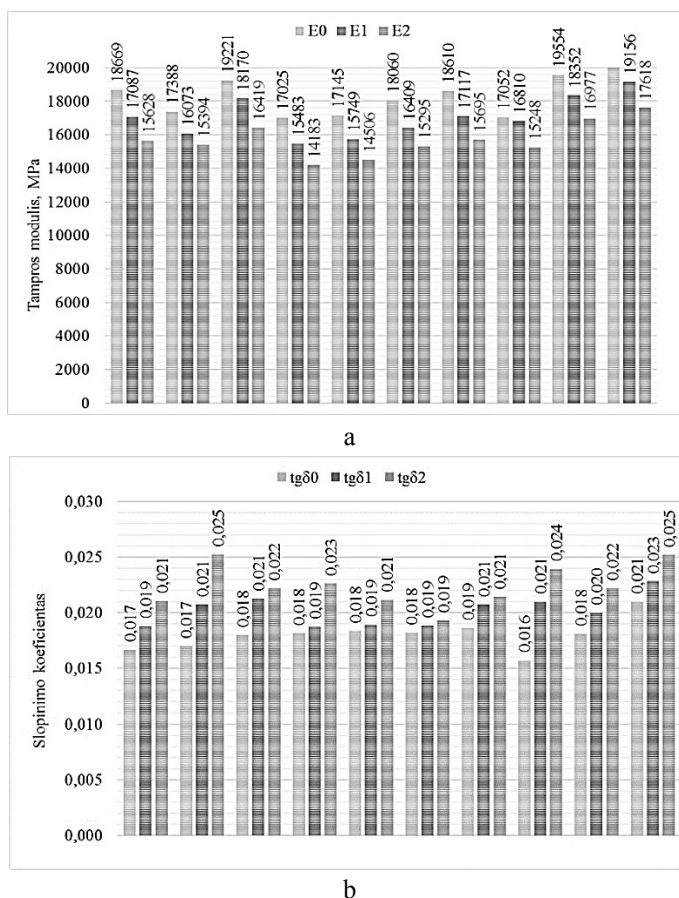


3.15 pav. Džiovinimo metu, medienos vidinėje struktūroje susiformavę įtrūkimai

3.2.2. Džiovinimo defektų poveikis medienos mechaniniams parametrams

Perskėlus bandinius patvirtinta hipotezė, jog pokyčiai medienos amplitudinėse dažninėse charakteristikose ir virpesių modos formose rodė medienoje susidariusius defektus. Defektai buvo skirtingo dydžio, taigi skirtingai paveikė rezonansinius parametrus. Panaudojant matavimų metu gautas rezonansinio dažnių ir amplitudžių vertes ir taikant teorinio izotropinio strypo tyrimo metodiką buvo nustatytas medienos tampros modulio ir slopinimo koeficiento pokytis džiovinimo metu.

P grupės bandinių tampros ir klamos parametrų pokytis parodytas paveiksle (žr. 3.16 pav.).



3.16 pav. P grupės bandinių tampros modulio (a) ir slopinimo koeficiento (b) kitimas (E0 ir tgδ0 kontroliniai bandiniai; E1 ir tgδ1 – kai įmirkyti vandenyje ir išdžiovinti 140 °C temperatūroje, E2 ir tgδ2 – kai įmirkyti vandenyje ir išdžiovinti 170 °C temperatūroje).

Pastebima ta pati parametru kitimo tendencija, kaip ir bandinių, su mechaniniais defektais, atveju. Didėjant defektų dydžiui, medienos tampros modulis sumažėja, o slopinimo koeficientas padidėja. Kitų grupių bandinių parametrai kito analogiškai (žr. 3.12 lentelė ir 3.13 lentelė).

3.12 lentelė. V grupės bandinių tampros ir klamos parametrai

Eil. Nr. Tampros ir klamos parametrai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	E0, MPa	14796	15603	12631	11992	15438	15259	14994	13614	13610
E1, MPa	14699	15309	12225	11693	14978	14976	15043	13230	13151	11813
E2, MPa	13879	14184	11610	11077	14054	14530	13725	12580	12594	11074
tgδ0	0,018	0,018	0,014	0,017	0,018	0,018	0,020	0,017	0,018	0,018
tgδ1	0,024	0,021	0,028	0,023	0,020	0,021	0,026	0,024	0,019	0,023
tgδ2	0,028	0,028	0,029	0,025	0,030	0,023	0,031	0,029	0,023	0,028

3.13 lentelė. S grupės bandinių tampros ir klamos parametrai

Eil. Nr. Tampros ir klamos parametrai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	E0, MPa	10466	9778	12386	9652	10863	11197	9308	9413	9256
E1, MPa	10421	9730	12351	9597	10769	11167	9184	9363	9195	10465
E2, MPa	10023	9136	11778	9100	10317	10556	8786	8863	8728	9759
tgδ0	0,026	0,024	0,023	0,023	0,022	0,021	0,025	0,030	0,029	0,032
tgδ1	0,035	0,032	0,032	0,028	0,030	0,025	0,032	0,032	0,033	0,033
tgδ2	0,036	0,032	0,033	0,030	0,031	0,026	0,034	0,033	0,034	0,036

Remiantis mechaninio defektų modeliavimo tyrimo rezultatais, galime teigti, kad medienoje džiovinimo metu susidarę defektai sumažina medienos tamprumą ir padidina plastiškumą. Sumažėjus medienos tampros moduliui sumažėja medienos elementų atsparumas lenkimo ir kitoms apkrovoms. Taigi tokiems elementams naudojama mediena turi būti be įtrūkimų ar kitų defektų, kurie pablogintų jos eksploatacines savybes.

3.3. Tyrimų duomenų statistinis apdorojimas

Gauti medienos mechaniniai parametrai apdoroti statistiškai. Statistiniai rodikliai apskaičiuoti visų storių bandinių grupėms, įvertinant apskaičiuotų tampros modulio bei slopinimo koeficiento verčių sklaidą. Statistiniams rodikliams apskaičiuoti skirtos formulės pateiktos žemiau.

Variacinės eilutės plotas R :

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (3.1)$$

čia x_{max} – didžiausia variacinės eilutės vertė;

x_{min} – mažiausia variacinės eilutės vertė.

Duomenų aritmetinis vidurkis x :

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.2)$$

čia x_i – rezultato vertė;

n – rezultatų skaičius.

Dispersija S^2 :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1} \quad (3.3)$$

Standartinis nuokrypis S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

Variacijos koeficientas v :

$$v = \frac{S}{x} \cdot 100 \% \quad (3.5)$$

Gautos statistinių parametrų vertės pateiktos lentelėse:

3.14 lentelė. P grupės bandinių statistinių rodiklių suvestinė

Statistiniai rodikliai	R	x	S^2	S	v
Tampros modulis E					
Nepažeisti	1760	15576	362695	602,24	3,87
Įpjauti 200 mm	2185	13492	420820	648,71	4,81
Džiovinti 170 °C temperatūroje	3435	15696	1002233	1001,12	6,38
Slopinimo koeficientas $tg\delta$					
Nepažeisti	0,003	0,019	0,0000008	0,000908	4,71
Įpjauti 200 mm	0,005	0,029	0,0000023	0,001508	5,15
Džiovinti 170 °C temperatūroje	0,006	0,022	0,0000032	0,001792	7,99

3.15 lentelė. V grupės bandinių statistinių rodiklių suvestinė

Statistiniai rodikliai	R	x	S^2	S	v
Tampros modulis E					
Nepažeisti	2326	14912	625226	790,71	5,30
Įpjauti 200 mm	2129	12461	558429	747,28	6,00
Džiovinti 170 °C temperatūroje	3455	12931	1578291	1256,30	9,72
Slopinimo koeficientas $tg\delta$					
Nepažeisti	0,004	0,020	0,0000013	0,001158	5,76
Įpjauti 200 mm	0,008	0,034	0,0000049	0,002206	6,57
Džiovinti 170 °C temperatūroje	0,008	0,027	0,0000066	0,002573	9,37

3.16 lentelė. S grupės bandinių statistinių rodiklių suvestinė

Statistiniai rodikliai	R	x	S^2	S	v
Tampros modulis E					
Nepažeisti	2060	13366	437855	661,71	4,95
Įpjauti 200 mm	1759	11080	440585	663,77	5,99
Džiovininti 170 °C temperatūroje	3050	9705	869860	932,66	9,61
Slopinimo koeficientas $tg\delta$					
Nepažeisti	0,004	0,022	0,0000019	0,001384	6,19
Įpjauti 200 mm	0,007	0,036	0,0000052	0,002290	6,42
Džiovininti 170 °C temperatūroje	0,010	0,031	0,0000080	0,002836	9,15

Įvertinus visų grupių bandinių tampros modulio statistinius rodiklius, mažiausia verčių sklaida pastebėta, kai bandiniai yra nepažeisti ($v_p= 3,87 \%$, $v_v=5,30 \%$, $v_s=4,95 \%$). Bandiniuose suformavus įpjovą, verčių sklaida padidėja. Didžiausia verčių sklaida nustatyta tuomet, kai medienoje susidarė džiovinimo defektai ją pakaitinus 170 °C temperatūroje. Tokį statistinių rodiklių pokytį galime aiškinti teigdami, jog džiovinimo metu medienoje susiformuoja skirtingo dydžio įtrūkimai, kurie kiekvieno bandinio tampros modulį paveikia skirtingai.

Slopinimo koeficiento statistinių rodiklių pokytis analogiškas. Bendrai įvertinus tampros modulio ir slopinimo koeficiento statistinius rodiklius galima teigti, kad verčių sklaida yra nedidelė, nes variacijos koeficientai – $v \leq 10 \%$.

IŠVADOS

1. Nustatyta, kad pirmu rezonansiniu dažniu virpančio medienos bandinio moda atitinka laisvai virpančio izotropinio strypo pirmąją modą. Taigi medienos tampros ir klampos parametrai gali būti nustatomi taikant teorinio izotropinio strypo tyrimo metodiką.
2. Gauta, kad dėl suformuotos įpjovos pasikeičia bandinio amplitudines dažnines charakteristikos ir modą. Suardžius vientisą medienos bandinio struktūrą, 30-110 Hz sumažėjo bandinio rezonansinių virpesių dažnis bei iškrypo modą. Amplitudinėje dažninėje charakteristikoje pastebėti papildomi, iki bandinio suardymo neužfiksuoti, dažniai. Galime daryti prielaidą, kad šiais dažniais virpa atskiros bandinių dalys.
3. Nustatyta, kad dėl medienoje atsiradusio defekto, tampros modulis sumažėjo 1448-2855 MPa, o slopinimo koeficientas padidėjo 0,007-0,017.
4. Gauta, kad po džiovinimo, medienos rezonansiniai parametrai kito panašiai, kaip ir medienoje suformavus įpjovą. Nustatyta, kad džiovinimo metu medienoje susidarė skirtingi defektai. Įtrūkimai buvo skirtingų geometrinių parametų, bandinio struktūroje išsidėstę skirtingai. Dėl džiovinimo metu medienoje susidariusių įtrūkimų, medienos tampros modulis sumažėjo 440-3040 MPa, o slopinimo koeficientas padidėjo 0,004-0,015.
5. Atlikus statistinę tampros modulio ir slopinimo koeficiento duomenų analizę, mažiausia duomenų sklaida pastebėta nepažeistų bandinių mechaninių parametruose (tampros modulio verčių $\nu= 3,87 \%$, slopinimo koeficiento verčių $\nu=4,71 \%$). Džiovintos medienos mechaninių parametų sklaida buvo didžiausia (tampros modulio verčių $\nu= 10,07 \%$, slopinimo koeficiento verčių $\nu=9,37 \%$), dėl džiovinimo metu susiformavusių skirtingų defektų.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. HERÄJÄRVI, Henrik. *Birch -properties and utilisation*. Helsinki: Finnish Forest Research Institute Metla, 2005.
2. JUODEIKIENĖ, Inga. *Medienos sandara*. Kaunas: Technologija, 2011. ISBN 978-9955-25-467-6.
3. JOHANSSON, M., H. SÄLL and S-O. LUNDQVIST. *Properties of materials from Birch – Variations and relationships: Part 2. Mechanical and physical properties*. Växjö: Linnaeus University, 2013. ISBN 978-91-87427-73-2.
4. KAJALAVIČIUS, Antanas ir Darius ALBREKTAS. *Medienos hidroterminio apdorojimo teorija ir įranga: Mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2011. ISBN 978-9955-25-506-2.
5. GORIŠEK, Željko. *Improvement of Wood Drying Quality by Conventional and Advanced Drying Techniques*. Ljubljana: Birografika Bori, 2009. ISBN 978-961-6144-26-1.
6. KAJALAVIČIUS, Antanas ir Darius ALBREKTAS. *Pjautinės medienos kamerinis konvekcinis džiovinimas*. Kaunas: Technologija, 2011. ISBN 978-9955-25-779-0
7. OLTEAN, L., A. TEISHINGER and CH. HANSMANN. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying – review. *Temperature and cracking of wood*. BioRes, 2007, no. 2(4), pp. 789-811. ISSN 1930-2126.
8. PONCSAK, S. ir kt. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Sci Technol*. 2006, 40, 647-663. Prieiga per: DOI 10.1007/s00226-006-0082-9.
9. TORNIAINEN, P., O. DAGBRO and T. MORÉN. Thermal modification of birch using saturated and superheated steam. *Proceedings of the 7th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE)*. Oslo: 2011, pp. 43-48.
10. BIZIKS V. ir kt. Effect of the hydrothermal modification on the anatomical structure of birch wood. *Experimental and Computational Micro-Characterisation Techniques in Wood Mechanics*. Hamburg: 2010.
11. NOURA, O. ir kt. Effect of thermal modification on mechanical properties of Canadian white birch (*Betula papyrifera*). *International Wood Products Journal*. 2011, 2(2), 101-107. Prieiga per: DOI 10.1179/2042645311Y.0000000016.
12. JAKIMAVIČIUS, Č. *Medienotyra : vadovėlis*. Kaunas : Technologija, 2008. ISBN 9986136334.
13. *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material. Chapter 5*. Madison: U.S. Department of Agriculture. 2010.

14. NAYLOR, A., P. HACKNEY and N. PERERA. Determination of wood strength properties through standard test procedures. *Tenth International Conference on Manufacturing Research*. Birmingham: Aston University, 2012, pp.372-377.
15. BRANCHERIAU, L. and H. BAILLERES. Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples. *Wood Science and Technology*. 2002, 36(5), 367-383. Prieiga per: DOI 10.1007/s00226-002-0147-3.
16. *Nondestructive Evaluation of Wood: second edition*. Madison: U.S. Department of Agriculture, 2015.
17. NIEMZ, P. and D. MANNES. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of Cultural Heritage 13S*. Amsterdam: Elsevier, 2012, 26–34. Prieiga per: doi:10.1016/j.culher.2012.04.001
18. Legg, M. and S.Bradley. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Melville: Acoustical Society of America, 2016, 139, 588, 588-604. Prieiga per: DOI: 10.1121/1.4940210.
19. WANG, X. ir kt. *Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique*. Madison: U.S. Department of Agriculture, 2000.
20. MONTERO, M.J., J. DE LA MATA, M. ESTEBAN and E. HERMOSO. Influence of moisture content on the wave velocity to estimate the mechanical properties of large cross-section pieces for structural use of scots pine from spain.. *Maderas: Ciencia y tecnología*. 2015, 17(2), 407-420. Prieiga per: DOI:10.4067/S0718-221X2015005000038.
21. LOURENCO, P.B., A.O. FEIO and J.S. MACHADO. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*. Amsterdam: Elsevier, 2007, 21, 1617-1627. Prieiga per: DOI:10.1016/j.conbuildmat. 2006.07.011
22. OLIVEIRA, F.G.R and A. SALES. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Biosource Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2005, 97, 2443-2446. Prieiga per: DOI:10.1016/j.biortech.2005.04.050.
23. ZHOU, Z. ir kt. Acoustic Testing and Sorting of Chinese Poplar Logs for Structural LVL Products. *Acoustic sorting of poplar*. BioRes., 2013, 8(3), pp. 4101-4116. ISSN:1930-2126.
24. WANGA, Z., L. LI and M. GONG. Measurement of dynamic modulus of elasticity and damping ratio of wood-based composites using the cantilever beam vibration technique. *Construction and Building Materials*. 2012, 28, 831-834. Prieiga per: DOI:10.1016/j.conbuildmat. 2011.09.001.
25. GHAZNAVI, M. ir kt. Traditional Varnishes and Acoustical Properties of Wooden Soundboards. *Science International*. 2013, 401-407. Prieiga per: DOI:10.17311/sciintl.2013.401.407.

26. VOBOLIS, Jonas and Darius ALBREKTAS. Research into sorption and mechanical properties of natural and modified birch wood. *Drewno*. 2014, vol. 57, no. 191, 55-67. DOI:10.12841/wood.1644-3985.064.04.
27. VOBOLIS, Jonas and Darius ALBREKTAS. Resonant vibration-based avaluation of wood drying defects. *Journal of Measurements in Engineering*. Kaunas: JVE International Ltd., 2013, vol. 1, issue 2, pp.113-120. ISSN 2424-4635.
28. KOHANTORABI, M. ir kt. Vibration Based NDT Methods to Verify Wood Drying Efficiency. *DRVNA INDUSTRIJA 66 (3)*. 2015, 66 (3), 221-228. Prieiga per: DOI:10.5552/drind.2015.1352.
29. YAVARI, A., M. ROOHNIA and A. TAJDINI. A few Elastic Properties of Drilled Rectangular Bars of Poplar Wood. *Conference: The Future of Quality Control for Wood & Wood Products*. Edinburgh: 2010. Prieiga per: DOI: 10.13140/2.1.4088.4166.
30. ROOHNIA, M. and L. BRANCHERIAU. Orientation and position effects of a local heterogeneity on flexural vibration frequencies in wooden beams. *Cerne*,. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 339-344. ISSN 0104 7760.
31. HOSSEIN, M.A., M. SHAHVERDI and M. ROOGNA. The Effect of Wood Knot as a Defect on Modulus of Elasticity (MOE) and Damping Correlation. *Notulae Scientia Biologicae*. Cluj-Napoca: AcademicPres, 2011, 3 (3), pp. 145-149. ISSN 2067-3264.
32. LABONNOTE, N. *Damping in Timber Structures*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2012, pp. 61-118.
33. TIMOSHENKO S. *Vibration problems in engineering*. New York: D.Van Nostrand Company, 1937.
34. ROOHNIA M., A. YAVARI and A. TAJDINI. Elastic parameters of poplar wood with end-cracks. *Ann. For. Sci.* 2010, 67, 403-409. Prieiga per: DOI: 10.1051/forest/2009129.

PRIEDAI

Priedas NR.1

1 lentelė. Bandinių parametų suvestinė, kai įpjovos nėra

Grupė	Eil. Nr.	f ₀ , Hz	A ₀ /√2		A ₀ , m/s ²	E ₀	tgδ ₀
			f ₁₁	f ₁₂			
P	1	612	607	618	2,8	16052	0,018
	2	614	607	619	2,2	15706	0,020
	3	605	596	607	1,7	14969	0,018
	4	613	626	637	1,9	15208	0,018
	5	614	609	621	2,6	14564	0,020
	6	600	591	603	2,1	15006	0,020
	7	615	618	630	1,9	16325	0,020
	8	622	618	631	2,5	16264	0,021
	9	608	602	614	1,8	15404	0,020
	10	620	617	629	1,7	16261	0,019
V	1	870	861	879	1,3	13867	0,021
	2	886	874	893	2,4	14814	0,021
	3	902	895	911	0,8	15169	0,018
	4	916	907	925	1,6	15511	0,020
	5	911	914	933	1,4	15842	0,021
	6	862	851	868	2,2	13516	0,020
	7	916	910	927	2,0	15797	0,019
	8	913	902	921	1,8	15679	0,021
	9	894	882	900	2,5	14726	0,020
	10	885	871	890	1,7	14201	0,021
S	1	1171	1153	1181	3,1	13477	0,024
	2	1197	1082	1108	2,6	14472	0,022
	3	1136	1120	1146	3,2	12802	0,023
	4	1161	1144	1168	3,8	13409	0,021
	5	1175	1161	1185	3,0	13007	0,020
	6	1182	1175	1199	2,8	13575	0,020
	7	1124	1115	1141	2,5	12527	0,023
	8	1206	1197	1226	3,2	14587	0,024
	9	1151	1135	1162	2,0	12788	0,023
	10	1167	1152	1179	3,0	13017	0,023

2 lentelė. Bandinių parametrų suvestinė, kai įpjovos ilgis 200 mm

Grupė	Eil. Nr.	f ₁ , Hz	A ₁ /√2		A ₁ , m/s ²	E ₁	tgδ ₁
			f ₁₁	f ₁₂			
P	1	582	576	593	1,6	14517	0,029
	2	565	554	570	2,2	13299	0,028
	3	575	564	582	2,0	13521	0,031
	4	568	556	572	1,1	13057	0,028
	5	565	559	577	2,4	12333	0,032
	6	560	551	567	1,6	13072	0,029
	7	566	557	572	2,1	13827	0,027
	8	587	574	591	2,8	14485	0,029
	9	559	550	567	1,5	13022	0,030
	10	571	558	575	1,7	13792	0,030
V	1	788	766	794	1,5	11262	0,036
	2	823	806	836	1,4	12655	0,036
	3	842	837	862	1,9	13086	0,030
	4	836	832	859	1,9	12791	0,032
	5	829	805	836	1,0	12988	0,037
	6	792	786	812	1,2	11296	0,033
	7	836	812	839	2,0	13027	0,032
	8	848	828	855	1,8	13391	0,032
	9	829	806	834	1,6	12536	0,034
	10	803	785	812	1,3	11575	0,034
S	1	1070	1049	1091	2,4	11140	0,039
	2	1107	1091	1128	2,4	12254	0,033
	3	1034	1016	1056	1,8	10500	0,039
	4	1071	1045	1084	2,0	11297	0,036
	5	1065	1044	1082	3,2	10579	0,036
	6	1081	1066	1102	2,6	11241	0,033
	7	1034	1019	1055	2,2	10495	0,035
	8	1105	1088	1130	2,8	12123	0,038
	9	1050	1031	1068	2,1	10536	0,035
	10	1060	1036	1070	1,6	10632	0,032

3 lentelė. Papildomi virpesiai, užfiksuoti matuojant bandinių su 200 mm ilgio įpjova rezonansinius parametrus

Grupė	Eil. Nr.						
		f, Hz	A, m/s ²	f, Hz	A, m/s ²	f, Hz	A, m/s ²
P	1	1065	0,5	1270	0,3		
	2	992	0,3	1075	0,3	1319	0,2
	3	1170	0,5	1362	0,1		
	4	1224	0,3	1549	0,3		
	5	1098	0,2	1326	0,3		
	6	1115	0,1	1285	0,4		
	7	1375	0,3				
	8	1096	0,3	1228	0,6	1457	0,4
	9	1367	0,8	1491	0,2		
	10	1290	0,5	1566	0,6		
V	1	1146	0,5	1290	0,4		
	2	1353	0,6	1580	0,7	1622	0,2
	3	1245	0,3	1567	0,3		
	4	1154	0,4	1470	0,3	1580	0,2
	5	1297	0,2	1377	0,5	1625	0,3
	6	1306	0,5	1642	0,1		
	7	1580	0,4	1651	0,4		
	8	1266	0,7				
	9	1308	0,4	1544	0,4		
	10	1540	0,5				
S	1	1266	0,3	1398	0,5	1680	0,5
	2	1240	0,2	1602	0,3		
	3	1526	0,3	1696	0,6		
	4	1400	0,5	1522	0,2	1656	0,2
	5	1393	0,3				
	6	1491	0,7	1660	0,3		
	7	1188	0,4	1434	0,5	1720	0,2
	8	1555	0,3				
	9	1240	0,2	1612	0,2		
	10	1650	0,4				

Priedas NR.2

1 lentelė. Bandinių drėgnio sekcijų parametrų suvestinė

Grupė	Eilės Nr.	V, cm ³	m _o , g	m ₀ , g	ω	ρ, kg/m ³	Mω, g	M ₀ , g
P	1	18,49	21,67	12,76	0,70	690	374,73	220,65
	2	18,31	20,33	11,89	0,71	649	396,28	231,76
	3	18,42	19,87	11,64	0,71	632	420,6	246,39
	4	18,77	18,13	11,27	0,61	600	338,41	210,36
	5	18,88	17,99	11,28	0,59	597	356,41	223,47
	6	18,14	17,57	11,12	0,58	613	355,52	225,01
	7	18,09	19,73	12,18	0,62	673	376,35	232,33
	8	18,73	18,6	11,47	0,62	612	400,21	246,80
	9	18,66	21,31	12,62	0,69	676	394,5	233,63
	10	18,23	20,37	11,9	0,71	653	401,42	234,51
V	1	27,68	26,74	17,03	0,57	615	543,76	346,31
	2	27,63	26,73	16,9	0,58	612	573,74	362,75
	3	28,27	25,54	15,45	0,65	546	554,14	335,22
	4	27,49	25,95	15,6	0,66	567	510,05	306,62
	5	27,51	25,72	15,49	0,66	563	575,81	346,78
	6	27,45	30,14	18,33	0,64	668	602,4	366,36
	7	27,89	29,58	18,31	0,62	657	574,45	355,58
	8	27,97	30,3	18,09	0,67	646	549,42	328,02
	9	27,71	28,21	17,98	0,57	649	545,31	347,56
	10	27,37	27,19	16,99	0,60	621	535,85	334,83
S	1	36,92	35,43	20,74	0,71	562	714,42	418,21
	2	36,89	36,52	20,96	0,74	569	671,88	385,61
	3	36,91	36,48	20,87	0,75	566	725,5	415,05
	4	36,95	35,28	20,2	0,75	547	731,26	418,69
	5	37,30	35,89	20,21	0,78	542	750,25	422,47
	6	37,33	37,52	21,07	0,78	564	739,01	415,00
	7	36,76	34,6	19,13	0,81	520	712,16	393,75
	8	37,09	37,79	22,43	0,68	605	682,15	404,89
	9	36,99	35,05	19,28	0,82	521	705,12	387,87
	10	37,09	35,37	21,15	0,67	570	739,3	442,08

2 lentelė. Bandinių parametų suvestinė prieš džiovinimą

Grupė	Eil. Nr.	f ₀ , Hz	A ₀ /√2		A ₀ , m/s ²	E ₀	tgδ ₀
			f ₁₁	f ₁₂			
P	1	660	657	668	2,1	18669	0,017
	2	646	640	651	1,8	17388	0,017
	3	667	662	674	1,9	19221	0,018
	4	661	655	667	1,7	17025	0,018
	5	653	646	658	1,6	17145	0,018
	6	658	652	664	1,7	18060	0,018
	7	644	638	650	1,9	18610	0,019
	8	636	632	642	2,0	17052	0,016
	9	663	656	668	1,9	19554	0,018
	10	667	658	672	2,1	20060	0,021
V	1	892	885	901	2,9	14796	0,018
	2	903	924	940	2,6	15603	0,018
	3	856	848	860	2,6	12631	0,014
	4	828	822	836	2,5	11992	0,017
	5	889	881	897	3,2	15438	0,018
	6	905	893	909	3,2	15259	0,018
	7	898	888	906	2,2	14994	0,020
	8	880	870	885	3,4	13614	0,017
	9	842	836	851	2,1	13610	0,018
	10	843	836	851	2,0	12197	0,018
S	1	1076	1058	1086	3,4	10466	0,026
	2	1067	1052	1078	2,9	9778	0,024
	3	1146	1130	1156	3,8	12386	0,023
	4	1031	1020	1044	3,2	9652	0,023
	5	1075	1061	1085	3,7	10863	0,022
	6	1092	1087	1110	3,0	11197	0,021
	7	1034	1025	1051	2,7	9308	0,025
	8	1026	1011	1042	2,0	9413	0,030
	9	1041	1022	1052	3,4	9256	0,029
	10	1067	1049	1083	2,5	10538	0,032

3 lentelė. Bandinių parametrų suvestinė po įmirkymo ir džiovavimo 140 °C temperatūroje

Grupė	Eil. Nr.	f ₁ , Hz	A ₁ /√2		A ₁ , m/s ²	E ₁	tgδ ₁
			f ₁₁	f ₁₂			
P	1	639	632	644	2,1	17087	0,019
	2	627	621	634	2,1	16073	0,021
	3	658	649	663	2,5	18170	0,021
	4	640	635	647	1,8	15483	0,019
	5	634	628	640	2,2	15749	0,019
	6	636	631	643	2,1	16409	0,019
	7	627	620	633	2,0	17117	0,021
	8	619	613	626	2,2	16810	0,021
	9	650	642	655	2,2	18352	0,020
	10	657	649	664	1,8	19156	0,023
V	1	886	875	896	2,1	14699	0,024
	2	900	904	923	2,7	15309	0,021
	3	853	841	865	2,0	12225	0,028
	4	822	817	836	2,7	11693	0,023
	5	885	880	898	2,5	14978	0,020
	6	905	899	918	2,9	14976	0,021
	7	895	887	910	2,2	15043	0,026
	8	875	867	888	2,4	13230	0,024
	9	834	823	839	1,7	13151	0,019
	10	839	820	839	1,5	11813	0,023
S	1	1064	1055	1092	3,2	10421	0,035
	2	1061	1050	1084	2,8	9730	0,032
	3	1141	1126	1162	3,6	12351	0,032
	4	1024	1020	1049	2,5	9597	0,028
	5	1075	1070	1102	3,4	10769	0,030
	6	1087	1077	1104	2,7	11167	0,025
	7	1019	1007	1040	1,9	9184	0,032
	8	1021	1003	1036	2,2	9363	0,032
	9	1039	1027	1061	2,6	9195	0,033
	10	1063	1049	1084	3,4	10465	0,033

4 lentelė. Bandinių parametrų suvestinė po įmirkymo ir džiovavimo 170 °C temperatūroje

Grupė	Eil. Nr.	f ₂ , Hz	A ₂ /√2		A ₂ , m/s ²	E ₂	tgδ ₂
			f ₁₁	f ₁₂			
P	1	617	610	623	1,8	15628	0,021
	2	634	623	639	2,00	15394	0,025
	3	631	625	639	2,4	16419	0,022
	4	619	614	628	2,1	14183	0,023
	5	614	604	617	1,6	14506	0,021
	6	621	617	629	1,4	15295	0,019
	7	607	600	613	2,2	15695	0,021
	8	626	618	633	1,8	15248	0,024
	9	630	624	638	2,3	16977	0,022
	10	635	629	645	2,3	17618	0,025
V	1	880	869	894	1,5	13879	0,028
	2	882	872	897	2,2	14184	0,028
	3	837	819	843	2,1	11610	0,029
	4	808	801	821	2	11077	0,025
	5	868	852	878	1,6	14054	0,030
	6	900	892	913	2,9	14530	0,023
	7	877	859	886	1,2	13725	0,031
	8	863	852	877	2,7	12580	0,029
	9	821	812	831	1,5	12594	0,023
	10	817	803	826	3	11074	0,028
S	1	1069	1050	1088	2,9	10023	0,036
	2	1045	1021	1054	1,9	9136	0,032
	3	1130	1119	1156	2,1	11778	0,033
	4	1015	1102	1132	4	9100	0,030
	5	1063	1045	1078	2,5	10317	0,031
	6	1071	1059	1087	2,5	10556	0,026
	7	1005	982	1016	3	8786	0,034
	8	1011	1000	1033	3,2	8863	0,033
	9	1029	1109	1144	3	8728	0,034
	10	1044	1022	1060	3,3	9759	0,036

5 lentelė. Papildomi virpesiai, užfiksuoti matuojant bandinių po įmirkymo ir džiovavimo 170 °C temperatūroje rezonansinius parametrus

Grupė	Eil. Nr.						
		f, Hz	A, m/s ²	f, Hz	A, m/s ²	f, Hz	A, m/s ²
P	1	924	0,3	1330	0,2	1412	0,3
	2	1063	0,6	1365	0,2		
	3	1155	0,4				
	4	1121	0,5	1384	0,3		
	5	1016	0,4	1248	0,2	1397	0,2
	6	1153	0,3	1295	0,3	1424	0,5
	7	1027	0,2	1315	0,2		
	8	1031	0,3	1180	0,2	1405	0,3
	9	996	0,2	1205	0,5	1333	0,3
	10	1080	0,2	1225	0,3		
V	1	1340	0,2	1612	0,1		
	2	1232	0,3	1390	0,3		
	3	1308	0,6	1477	0,2	1603	0,2
	4	1264	0,1	1565	0,2		
	5	1243	0,4	1637	0,2	1721	0,4
	6	1385	0,3	1521	0,3	1692	0,3
	7	1420	0,3	1616	0,1	1677	0,3
	8	1310	0,1	1452	0,2	1600	0,2
	9	1222	0,2	1406	0,7	1669	0,2
	10	1230	0,3	1590	0,3		
S	1	1589	0,2				
	2	1310	0,3	1560	0,3		
	3	1221	0,1	1455	0,4	1782	0,1
	4	1576	0,4	1613	0,2		
	5	1430	0,2				
	6	1265	0,4	1717	0,1		
	7	1191	0,3	1620	0,2		
	8	1421	0,5	1578	0,2	1910	0,5
	9	1464	0,3	1688	0,1		
	10	1180	0,2	1605	0,3		