

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius RAGAUSKAS

SLUOKSNIUOTŲ KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ TAMPRUMO RODIKLIŲ IDENTIFIKAVIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2005–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Rimantas BELEVICĖIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1789–M mokslo literatūros knyga

ISBN 978–9955–28–635–6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2010

© Paulius, Ragauskas, 2010

paulius.ragauskas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Paulius RAGAUSKAS

IDENTIFICATION OF ELASTIC PROPERTIES OF LAYERED COMPOSITE MATERIALS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2010.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Rimantas BELEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo tikslumo problemos. Pagrindinis tyrimo objektas yra įvairių medžiagų bandiniai, jų tamprumo rodikliai. Šis objektas yra svarbus įvairių medžiagų teoriniams tyrimams. Pagrindinis disertacijos tikslas yra sukurti efektyvią technologiją, leidžiančią pakankamu tikslumu surasti visus bandinio tamprumo rodiklius. Sukurtų algoritmų taikymo sritis yra medžiagų gamybos pramonė. Disertacijoje tiriamas siūlomos technologijos tikslumas ieškant įvairių medžiagų tamprumo rodiklių.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: optimizuojami bandinio geometriniai parametrai siekiant tikslesnių tamprumo rodiklių identifikavimo rezultatų; atpažįstamos bandinio modų formos ir reguliuojama jų vieta tikrinių reikšmių spektre siekiant sumažinti tikslo funkcijos iškraipymus; sukuriama pasiūlytų technologijų įgyvendinimo algoritmai ir bandymais patikrinamos jų galimybės. Pirmasis uždavinys suformuluotas atsižvelgiant į palyginti didelę kompozitinių medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo paklaidą. Antrasis siejasi su tikslo funkcijos iškraipymu atnaujinant matematinį medžiagos modelį spėjama tamprumo rodikliais.

Disertaciją sudaro keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariamas problemos aktualumas, tyrimo objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė ir ginamieji teiginiai, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo srities mokslinių darbų, globaliosios optimizacijos algoritmų, genetinių algoritmų taikymo tamprumo rodiklių identifikavimui apžvalga ir analizė. Skyriaus pabaigoje suformuluojamos išvados, konkretizuojančios disertacijos uždavinius.

Antrajame skyriuje pateikta: medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo technologijos aprašymas, bandymuose naudotų medžiagų matematiniai modeliai ir atliktų bandymų aprašymai.

Trečiajame skyriuje teikiami siūlomos technologijos patobulinimai ir aprašomi atlikti bandymai, kurie parodo siūlymų efektyvumą.

Ketvirtajame skyriuje išdėstomas sukurto technologijos taikymas, pateikiama vartotojo sąsajos koncepcija.

Disertacijos tema perskaityti penki pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose ir paskelbti keturi straipsniai: mokslo žurnale, įtraukta į ISI Web of Science sąrašą; mokslo žurnale, referuojamame kitose duomenų bazėse; recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje; respublikinės konferencijos medžiagoje.

Abstract

In this thesis the problems of identification accuracy of elastic properties of materials are examined. The main object of study is samples of various materials and their elastic properties. This is an important subject of theoretical studies of various materials. The main thesis objective is to create an effective technology for precise identification of all the elastic characteristics of the sample. The developed algorithms are to be applied in the material manufacturing industry. Thesis also aims at exploring accuracy and sensitivity of the identification of elastic properties of materials.

The paper deals with a number of objectives: 1) to optimize the geometric parameters of the sample striving for more accurate identification results of elastic properties; 2) to identify mode shapes of sample and regulate their place in spectrum of eigenvalues in order to minimize the distortion of the objective function; 3) to create the implementation algorithms of proposed technologies and verify their capabilities experimentally. The first task is formulated taking into account the relatively high level of identification error of elastic properties of composite materials. The second objective relates to distortion of the objective function in the process of updating the mathematical model with the presumed elastic characteristics of material.

The thesis is composed of four chapters, the summary of results, the list of literature and the list of author's publications on the topic of dissertation.

In the introductory chapter the relevance of the problem as well as its scientific novelty and practical significance are presented and the research object, goals and objectives are described. The chapter also sets the research methodology and defended prepositions, presents reports and publications on the topic dissertation and the structure of the thesis.

The first chapter is for the review of the literature. It includes review and analysis of the literature on the identification of material elastic properties, the algorithms of global optimization and the genetic algorithms in the relevance area of identification of elastic properties. At the end of the chapter the conclusions fleshing out objectives are formulated.

The second chapter provides description of identification technology of elastic properties, and mathematical models of materials used in tests.

The third chapter provides the improvements of technology and describes tests, which demonstrate the effectiveness of the proposals.

The fourth chapter presents an application of the developed technology and concept of user interface.

Five reports on the topic of dissertation were presented in scientific conferences in Lithuania and abroad, and four articles were published: in scientific journal included in ISI Web of Science list; in scientific journal, indexed in other databases; in international conference material; in local conference material.

Padėka

Dėkoju moksliniam konsultantui prof. habil. dr. Rimantui Belevičiui už vertingus dalykinius patarimus, už diskusijas ir humaniškumo pamokas, kurios turi ir turės neįkainojamą vertę ne tik moksliniame, bet ir kasdieniniame gyvenime.

Dėkoju recenzentams, tarybos nariams ir oponentams už sugaištą laiką, pateiktas nuoširdžias ir vertingas pastabas, kurios naudingos ne tik disertaciniam darbui, bet pravers ir tolimesnėje veikloje. Už nuolatinį padrąšinimą ir paramą esu dėkingas doc. dr. Dainiui Rusakevičiui, doc. dr. Dmitrij Šešok, visiems bendradarbiams, kurių patarimai ir domėjimasis mano darbu turėjo įtakos jam vystytis.

Už mano mąstymo stiliaus susiformavimą esu dėkingas pirmiesiems vadovams doc. dr. Mindaugui Jurevičiui ir doc. dr. Lionginui Čiupailai.

Dėkoju savo šeimai ir draugams už nuolatinį moralinį palaikymą ir supratimą.

Dėkoju Lietuvos bei Latvijos Švietimo ir mokslo ministerijoms, Nacionaliniam Taivano mokslo fondui už finansinę paramą.

Paulius Ragauskas

Žymėjimai

Simboliai

E_i – Jungo modulis

G_{ij} – šlyties modulis

ν_{ij} – Puasono koeficientas

$[C]$ – tamprumo matrica

$[D]$ – paslankumo matrica

$[K]$ – standumo matrica

ε_{ij} – deformacijos

σ_{ij} – įtempimai

a – bandinio ilgoji kraštinė

b – bandinio trumpoji kraštinė

h – bandinio storis

γ – ortotropijos kampas

f_i^{BEM} – apskaičiuotas bandinio tikrinis dažnis

f_i^{NB} – eksperimentiškai gautas tikrinis dažnis

Santrumpos

APDL – ANSYS parametrinė projektavimo kalba (angl. Ansys Parametric Design Language)

BEM – baigtinių elementų metodas

EP – eksperimento planas (angl. Plan of Experiment)

EA – evoliuciniai algoritmai

GA – genetiniai algoritmai

GPI – grūdinimo proceso imitavimas (angl. Simulated Annealing)

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
 1. MEDŽIAGŲ TAMPRUMO RODIKLIŲ IDENTIFIKAVIMO TECHNOLOGIJŲ IR OPTIMIZAVIMO ALGORITMŲ APŽVALGA.....	 7
1.1. Medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo srities darbų apžvalga	8
1.2. Globaliosios optimizacijos algoritmai	15
1.2.1. Deterministiniai algoritmai.....	16
1.2.2. Stochastiniai algoritmai	18
1.3. Genetinių algoritmų apžvalga.....	24
1.4. Genetinių algoritmų taikymo medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimui darbų apžvalga	33

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir apibendrinimai	36
2. MEDŽIAGŲ TAMPRUMO RODIKLIŲ IDENTIFIKAVIMO TECHNOLOGIJA.....	39
2.1. Medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo procedūra.....	40
2.2. Kai kurių medžiagų matematiniai modeliai.....	47
2.2.1. Vienasluoksnės medžiagos.....	51
2.2.2. Sluoksniuotos medžiagos	53
2.3. Skaitiniai medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo pavyzdžiai.....	56
2.3.1. Vienasluoksnių medžiagų pavyzdžiai.....	57
2.3.2. Sluoksniuotų medžiagų pavyzdžiai	63
2.4. Antrojo skyriaus išvados	67
3. MEDŽIAGŲ TAMPRUMO RODIKLIŲ IDENTIFIKAVIMO REZULTATŲ GERINIMAS	69
3.1. Modų formos atpažinimas	70
3.2. Bandinio geometrinų parametrų optimizavimas.....	77
3.2.1. Vienasluoksnės medžiagos.....	84
3.2.2. Sluoksniuotos medžiagos	88
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	93
4. PROGRAMINĖS ĮRANGOS APRAŠYMAS	95
4.1. Genetinio algoritmo „GAlib“ trumpas aprašas.....	95
4.2. Sukurtos programinės įrangos aprašymas	100
4.3. Vartotojo sąsaja.....	105
BENDROSIOS IŠVADOS.....	109
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	111
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	121

Contents

INTRODUCTION	1
Topicality of the problem	1
Importance of the thesis	2
The object of investigation	3
The goal of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty	4
Practical value	4
Defended propositions	4
Approval of the results	4
The sturcture of the research paper	5
 1. OVERVIEW OF THE IDENTIFICATION TECHNOLOGY OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF MATERIALS AND OPTIMIZATION ALGORITHMS.....	 7
1.1. Overview of work of identification of elastic characteristics of materials	8
1.2. Algoritms of global optimization	15
1.2.1. Deterministic algorithms	16
1.2.2. Stochastic algorithms	18
1.3. Overview of genetic algorithms	24

1.4. Overview of the work of application of genetic algorithms for identification of elastic characteristics of materials.....	33
1.5. Conclusions and generalizations of first chapter	36
2. IDENTIFICATION TECHNOLOGY OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF MATERIALS.....	39
2.1. Procedure of identification of elastic characteristics of material.....	40
2.2. Mathematical models of some materials	47
2.2.1. Single-layer materials.....	51
2.2.2. Layered materials	53
2.3. Numerical examples of identification of elastic characteristics of materials.....	56
2.3.1. Examples of single-layer materials.....	57
2.3.2. Examples of layered materials.....	63
2.4. Conclusions of second chapter	67
3. IMPROVING THE IDENTIFICATION RESULTS OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF MATERIALS.....	69
3.1. Recognition of mode shapes.....	70
3.2. Optimization of geometrical parameters of specimen	77
3.2.1. Single-layer materials.....	84
3.2.2. Layered materials	88
3.3. Conclusions of third chapter.....	93
4. DESCRIPTION OF THE SOFTWARE.....	95
4.1. Short description of genetic algorithm „GAlib“	95
4.2. Description of created software.....	100
4.3. User interface	105
GENERAL CONCLUSIONS.....	109
REFERENCES	111
LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	121

Įvadas

Problemos formulavimas

Sluoksniuotos kompozitinės medžiagos šiuo metu vis plačiau taikomos įvairiose pramonės šakose, pavyzdžiui, aviacijoje, automobilių gamyboje ir kt. Projektuojant ar analizuojant kompozitinių medžiagų konstrukcijas būtina pakankamai tiksliai žinoti šių medžiagų tamprumo rodiklius.

Sluoksniuotų kompozitinių medžiagų tamprumo rodiklius surasti yra žymiai sudėtingiau nei izotropinių, nes šios medžiagos yra nevienalytės. Tokių medžiagų tamprumo rodikliai gali būti nustatomi įprastiniais statiniais arba ultragarsinio tyrimo metodais.

Statiniai tyrimai remiasi deformacijų lauko matavimais. Pagrindiniai tokiuose bandymuose kylantys keblumai – sunku garantuoti tinkamas kraštines sąlygas bandiniams, gauti vienalyčius deformacijų/įtempimų laukus. Dažniausiai būtina atlikti kelis statinius bandymus. Pavyzdžiui, norint nustatyti keturis vienaakryptės sluoksniuotos medžiagos tamprumo rodiklius reikia trijų statinių bandymų. Be to, dažnoje sluoksniuotoje medžiagoje užpildas yra polimerinė medžiaga, įprastai pasižyminti valkšnumu – tai taip pat kelia problemų nustatant medžiagos tamprumo rodiklius.

Pagrindinė problema ultragarsiniuose tyrimuose – sluoksniuotos kompozitinės medžiagos dažnai pasižymi aukštomis slopinimo savybėmis, todėl ultragarso bangų difrakcija ir slopinimas lemia netikslius rezultatus.

Dėl šių priežasčių netiesioginiai medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo metodai pastaruoju metu sulaukia ypatingo dėmesio. Vienas iš netiesioginių tamprumo rodiklių identifikavimo metodų yra struktūros reakcijų į vibracinį sužadinimą matavimas ir vėliau, modeliuojant tą pačią struktūrą skaitmeniniais metodais ir spėjant medžiagos tamprumo rodiklius, bandymas gauti tą pačią struktūros elgseną. Medžiagos rodiklių spėjimas – bandymas formuluojamas kaip globaliojo optimizavimo uždavinys, kurio tikslo funkcija yra nesąryšis tarp bandymais gautų ir skaitmeniniais metodais suskaičiuotų tam tikrų tikrinių dažnių.

Sukurta technologija pagrįsta vykdant dvigubą skaitmeninį eksperimentą: parenkami artimi kuriai nors realiai medžiagai tamprumo rodikliai, artimi praktiniams bandiniams geometriniai jų parametrai, ir baigtinių elementų metodu gaunamas konvergavęs tikrinių reikšmių uždavinio sprendinys. Vėliau sukurtąja technologija bandoma gauti tuos pačius medžiagos tamprumo rodiklius. Vykdamas šiuos eksperimentus pasitelkta tam tikra informacija iš natūrinių bandymų: juose pavyksta nuskaityti ne visus tikrinius dažnius/modas, todėl į skaitmeninius eksperimentus įtraukiami tik tiek žemesniųjų dažnių, kiek jų paprastai įmanoma nuskaityti natūriniais bandymais.

Taip patikrinta technologija vėliau gali būti taikoma realių medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimui.

Darbo aktualumas

Šiuo metu siūlomos skaitmeninių-fizinių bei optimizavimo derinio medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo technologijos yra ne pramoninės paskirties, nuolat tobulinamos. Pagrindinis esamų technologijų trūkumas – sluoksniuotų kompozitinių medžiagų tamprumo rodikliai joms surandami nepakankamu tikslumu. Prasčiausiai iš tamprumo rodiklių surandami Puasono koeficientai.

Minėta technologija yra neardanti, todėl gali būti taikoma tiesiogiai gamyboje. Nepaisant minėtų trūkumų technologija intensyviai vystoma siekiant sukurti inžinerinį įrankį, leidžiantį tiksliai ir greitai surasti norimos medžiagos visus tamprumo rodiklius pakankamu tikslumu.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – izotropinių, kompozitinių vienasluoksnių ir sluoksniuotų, vienkrypčių ir statmenai armuotų medžiagų bandiniai, jų tamprumo rodikliai. Bandiniai priverstinai žadinami siekiant gauti jų tikrinius dažnius, iš kurių randami medžiagos tamprumo rodikliai.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – panaudojant globalaus optimizavimo algoritmus sukurti efektyvią technologiją, leidžiančią vienodu tikslumu surasti visus bandinio tamprumo rodiklius bei ištirti bandinio geometrinių parametrų įtaką medžiagos tamprumo rodiklių identifikavimo tikslumui.

Darbo uždaviniai

Pagrindinis darbo uždavinys yra sukurti ir išbandyti technologiją, kuri leistų vienodu tikslumu rasti visus bandinio tamprumo rodiklius. Tam reikia:

1. Optimizuoti bandinio geometrinius parametrus siekiant tikslesnių tamprumo rodiklių identifikavimo rezultatų.
2. Atpažinti bandinio modų formas ir reguliuoti jų vietą tikslo funkcijoje siekiant sumažinti tikslo funkcijos iškraipymus.
3. Sukurti pasiūlytų technologijų įgyvendinimo algoritmus ir bandymais patikrinti jų galimybes.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi skaitiniai tyrimo metodai. Tikslo funkcija yra skaitinio ir natūrinio bandymų dažnių skirtumas, kurį siekiama minimizuoti. Duomenys tikslo funkcijai skaičiuoti gaunami natūriniu bandymu ir baigtinių elementų metodu. Optimizuojama genetiniais algoritmais.

Darbo mokslinis naujumas

Pasiūlyta ir programiškai realizuota dviejų žingsnių technologija, kuria efektyviai pakankamu tikslumu randami bandinių tamprumo rodikliai. Technologija apima anksčiau viename algoritme nenaudotus bandinio kraštinių ilgio santykio ir ortotropijos kampo optimizavimo, modų formos atpažinimo ir jų vietos reguliavimo tikslo funkcijoje įrankius, kurie leidžia padidinti tamprumo rodiklių identifikavimo tikslumą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurti programiniai įrankiai, skirti įvairių medžiagų tamprumo rodiklių radimui pakankamu tikslumu. Ši technologija gali būti panaudota mokslinių tyrimų laboratorijose, kompozitinių medžiagų gamyboje, kuri šiandien yra viena iš sparčiausiai besivystančių pramonės šakų pasaulyje. Jos gaminiai plačiai naudojami aviacijoje, sausumos, jūrų ir kelių transporto, statybos pramonės šakose.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlytas bandinio geometrijos optimizavimas ir bandinio modų formos atpažinimas leidžia efektyviau ir tiksliau rasti medžiagų tamprumo rodiklius.
2. Keletas vienos medžiagos bandinių, kurių geometrija optimizuota tam tikro tamprumo rodiklio jautrumui leidžia surasti tikslesnį sprendinį (tamprumo rodiklius).

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti keturi moksliniai straipsniai: mokslo žurnale, įtraukta į ISI Web of Science sąrašą (Ragauskas *et. al.* (2007)); mokslo žurnale, referuojamame kitose duomenų bazėse (Ragauskas *et. al.* (2009)); recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Šešok *et. al.* (2007)); respublikinės konferencijos medžiagoje (Belevičius *et. al.* (2005)).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Konferencijoje „Informacinės technologijos“, 2006 m., Kaune;
- Tarptautiniame seminare NYUST 2007, Taivanyje (LTLC projektas);

- Tarptautinėje konferencijoje „8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8), 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008)“, 2008 m., Venecijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechanics of Composite Materials“, 2008 m., Rygoje;
- Respublikinėje konferencijoje „Respublikinis XVII-asis Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos seminaras“, 2009 m., Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai: įvadas, literatūros apžvalga, medžiagų tamprumo rodiklių technologijos aprašymas ir praktiniai pavyzdžiai, gautų rezultatų gerinimas ir programinės įrangos aprašymas.

Darbo apimtis yra 110 puslapių, tekste panaudotos 32 numeruotos formulės, 54 paveikslai ir 23 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 116 literatūros šaltinių.

Šiame darbe skaičiavimams atlikti naudojama genetinių algoritimų biblioteka „GAlib“, parašyta Matthew Wall (Masačiusetso technologijos institutas).

Copyright (c) 1995–1996 Massachusetts Institute of Technology.

Medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo technologijų ir optimizavimo algoritmų apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiami ir analizuojami medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo srities moksliniai darbai. Pateikiamos kelios skirtingų metodų trumpos apžvalgos ir motyvas, kodėl uždavinio sprendimui pasirinkti globaliosios optimizacijos algoritmai. Apžvelgiami minėti optimizacijos algoritmai ir medžiagų tamprumo rodiklių radimo uždaviniui tinkamiausi GA. Tam, kad juos būtų galima tinkamai pritaikyti darbe, atsižvelgta į GA taikymo medžiagų tamprumo rodiklių radimui pasaulinių darbų praktiką. Atlikta darbų apžvalga, kurioje išryškėja poreikis papildomais įrankiais tobulinti medžiagų tamprumo rodiklių radimo GA metodus. Skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados ir apibendrinimai.

Eksperimento planavimo metodas yra plačiai taikoma medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologija, todėl apžvalgoje jai skiriamas didesnis dėmesys. Šiuo metodu tikrinama, ar disertacijoje siūloma technologija gauti medžiagų tamprumo rodiklių radimo rezultatai yra korektiški.

1.1. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo srities darbų apžvalga

Kompozitinės medžiagos sudarytos iš dviejų arba daugiau skirtingų medžiagų. Jos nekoroduoja, o savybių/svorio ir tvirtumo/svorio santykis, palyginus su izotropinėmis medžiagomis, rodo aiškų pranašumą. Šie privalumai skatina platų kompozitinių medžiagų taikymą sporte, orlaivių pramonėje, automobilių, laivų statybos ir kitose inžinerijos srityse. Siekiant sumažinti gamybos išlaidas pramonėje ir pagerinti produktų kokybę, šių medžiagų poreikis artimoje ateityje tik augs. Norint tinkamai naudoti kompozitines medžiagas, dar gaminio projektavimo stadijoje būtina žinoti jų tamprumo rodiklius.

Labiausiai žinomas ir bendriausias medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo metodas yra statiniai bandymai. Egzistuoja keltas standartų, reglamentuojančių šiuos bandymus (ISO, GOST ir t.t.). Nepaisant šių standartų griežto laikymosi, praktika rodo, kad net ir menkiausias netikslumas gali ženkliai įtakoti rezultatų tikslumą (Levesque 2003). Tokiais atvejais standartas nenumato kaip reikia paruošti bandinį, kad rezultatai būtų gaunami tikslūs. Praktikoje kompozitinių medžiagų tempimo bandymai atliekami naudojant pailgą plokštelę su praplatintais („kaulo“ formos) arba pastorintais („svarmens“ formos) galais. Įprastai bandiniai įtvirtinami galuose kaiščiais arba spaustuvuose. Bandinį įtvirtinant kaiščiais atsiranda tikimybė, kad bandinio galai gali būti nukirpti esant net ir nedidelei apkrovai. Skerspjuvio pasikeitimo vieta atlieka įtempimų koncentratoriaus vaidmenį. Bandinį įtvirtinant spaustuvuose, ties užspaudimo vieta taip pat susidaro įtempimų koncentracija, kuri iškreipia kompozitinių medžiagų bandymų rezultatus. Be to, bandinio galuose sukuriama šalutiniai įtempimai, kurie nėra išsidėstę išilgai vienos kurios nors ašies atžvilgiu, todėl neigiamai įtakoja bandymo rezultatus (Berthelot 1999).

Statinių bandymų metu matuojama apkrova, įtempimai ir deformacijos. Išilginių tempimo bandymų metu svarbu sekti, kad apkrovos ir bandinio armatūros kryptys sutaptų. Jei kryptys prasilenktų net ir nedideliu kampu, tempimo bandymo metu gauti rezultatai būtų akivaizdžiai iškreipiami, t. y. išilginio Jungo modulio reikšmė būtų gaunama mažesnė.

Statinius bandymus atlikti kompozitinėms medžiagoms yra sudėtinga ir dėl kraštinių sąlygų įvedimo matematiniam modelyje, todėl ieškomi ir taikomi alternatyvūs, tarp jų ir tikrinių dažnių, metodai.

Dažnai taikoma medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologija – bandinio tikrinių dažnių, gautų iš natūrinio ir skaitinio bandymų, rezultatų palyginimas (Edwins 1986, De Visser 1997, De Visser 1998, Araujo 2000, Hwang 2006, Hwang (spaudoje)). Šis alternatyvus medžiagų tamprumo rodiklių radimo metodas apjungia vibracinius bandymus su skaitiniais metodais. Tikriniai dažniai ir modų formos, gaunami iš vibracinių bandymų, turi sutapti su skaitmeninio mo-

delio dažniais ir modų formomis. Skaitmeniniame modelyje tamprumo rodikliai yra atnaujinami tol, kol prognozuojamos dinaminės savybės sutampa su vibracinio bandymo rezultatais su tam tikra paklaida. Šis metodas yra neardantis, todėl tinkamas kokybės kontrolei.

Pasaulinėje praktikoje tyrinėtojai bando įvairias medžiagų tamprumo rodiklių radimo procedūras arba gerina esamas, pridėdami kai kuriuos patobulinimus. Pavyzdžiui, metodas su GA nėra pakankamai tikslus, nes yra jautrus pradinėms medžiagos tamprumo rodiklių paieškos erdvės riboms ir sąlygoms, todėl stengiamasi sukurti tinkamus GA ir kitų stochastinių paieškos algoritmų derinius, kurių tikslumas būtų bent jau patenkinamas (Deobald 1988, Hwang 2006, Hwang (spaudoje)).

Medžiagų tamprumo rodiklių paieškai naudojami įvairūs paieškos metodai. Viename iš ankstesnių Deobald ir Gibson (Deobald 1988) darbų aprašomas plonų ortotropinių plokštelių su įvairiomis kraštinėmis sąlygomis tyrimas, kurio metu nustatyta, kad su plokšte, kurios visos kraštinės yra laisvos, galima gauti geresnius rezultatus, nei esant vienai ar daugiau kraštinių sąlygų. Ayorinde ir Gibson (Ayorinde 1993) identifikavo plonos ortotropinės plokštelės be kraštinių sąlygų keturis tamprumo rodiklius, keisdami bandinių ortotropijos kampą nuo vieno iki trylikos laipsnių. McIntyre ir Woodhouse (McIntyre 1988) surado plonos ortotropinės plokštės tamprumo ir slopinimo rodiklius, atlikdami pirmųjų modų matavimą ir analizę. De Visser ir kiti (De Visser 1997) nustatė ortotropinių medžiagų tamprumo ir slopinimo savybes, lygindami bandymo metu gautas modas ir atitinkamus rezultatus iš skaitmeninio modelio, taip pat atliko bandymus lygindami bandinių deformacijos energiją.

Norint surasti penkis nepriklausomus skersai izotropinės medžiagos (dar vadinamos ortotropine) tamprumo rodiklius (išilginius ir skersinius Jungo ir šlyties modulius bei Puasono koeficientą), reikalinga nuosaikiai stora plokštelė, nes neplokštuminio šlyties modulio ir Puasono koeficiento poveikis pasireiškia tik nuosaikiai storiems bandiniams. Frederiksen (Frederiksen 1997) aprašo savo bandymus surasti nuosaikiai storos ortotropinės plokštelės tamprumo rodiklius pagal aukštesnės eilės tikrinius dažnius. Kitame straipsnyje Frederiksen (Frederiksen 1999) pasitelkė vienasluoksnės plokštelės teoriją, įskaitant skersinės šlyties efektus, ir tyrė simetriškai laminuotą stačiakampę plokštelę (be kraštinių sąlygų). Ayorinde (Ayorinde 1995) savo metode panaudojo vibracinius bandymus ir surado ortotropinės plokštelės neplokštuminį šlyties modulį – bandymuose naudojo plokštelę be kraštinių sąlygų. Apibendrinant galima teigti, kad vibraciniuose bandymuose susiformavusi praktika bandinius įtvirtinti be kraštinių sąlygų.

Daugumos aukščiau išvardintų autorių tamprumo rodiklių paieškos metodai yra paprasti, tokie kaip, pavyzdžiui, mažiausių kvadratų metodas. Norint tiksliau surasti tamprumo rodiklius, reikia naudoti sudėtingesnius paieškos metodus.

Hwang ir Chang (Hwang 2000) tamprumo rodiklių radimui pasirinko uždavinio skaidymo metodą (angl. subproblem approximation method (SAM)). Ma ir Lin (Ma 1999) pasirinko lokaliąją funkcijos optimizaciją Simplex'o būdu siekdami efektyviai gauti tamprumo rodiklius. Šis paieškos metodas, kuriame derinami bandymo planavimas, skaitmeninis funkcijos paviršius ir baigtiniai elementai, buvo panaudotas kompozitinių laminatų tamprumo rodiklių gavimui ir kitų autorių darbuose (Bledzki 1999, Rikards 1999). GA tamprumo rodiklių radimui vieni iš pirmųjų pritaikė Cunha ir kt. (Cunha 1999). Lee ir Kim (Lee 2006) laminuotos kompozitinės plokštelės tamprumo rodiklių nustatymui taikė globalios optimizacijos algoritmus kartu su Rayleigh-Ritz technologija.

Vietoj mažiausių kvadratų nuokrypio metodo arba tradicinių paieškos algoritmų taip pat naudojami ir hibridiniai GA. Toks patobulintas GA naudojamas medžiagų tamprumo rodiklių radimo metode, aprašytame Hwang ir He straipsnyje (Hwang 2006). Be to, šis metodas taikomas norint efektyviai gauti specialiųjų kompozitinių medžiagų, tokių kaip austi kompozitiniai laminatai, tamprumo rodiklius. Šios medžiagos ypatingos tuo, kad jų tamprumo rodikliai turi mažai įtakos bandinio tikriniams dažniams.

Han ir kt. (Han 2008) ir Liu ir kt. (Liu 2002) pasiūlė naują optimizavimo metodą, paremtą GA ir netiesiniu mažiausių kvadratų nuokrypiu, naudojamą kompozitinių laminatų tamprumo rodiklių radimui. Šie autoriai yra aprašę daugiau medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo būdų. Štai keletas jų.

Vienoje iš metodikų naudojami pažangūs neuroniniai tinklai, kuriais sprendžiamas atvirkštinis medžiagų tamprumo rodiklių paieškos uždavinys (Liu 2002). Kitame darbe (Liu 2002) kaip atvirkštinį operatorių kompozitinių sluoksniuotų medžiagų tamprumo rodiklių radimui naudojamas mikro-genetinis algoritmas (μ GA). Liu ir kt. (Liu 2002) GA panaudojo kompozitinių laminatų sluoksnių krypties suradimui. Han ir kt. (Han 2002) laminuotų cilindrinį kevalų tamprumo rodiklių paieškai naudoja grįžtamosios analizės metodus.

Roseiro ir kt. (Roseiro 2004) darbe aprašyta metodika, pagal kurią iš informacijos, gautos iš ant kompozitinio laminuoto bandinio paviršiaus pritvirtintų pjezoelektrinių daviklių, randami medžiagos tamprumo rodikliai. Atvirkštinis uždavinys sprendžiamas dviem skirtingais metodais: GA ir neuroniniais tinklais. Soares ir kt. (Soares 1993) pateikia metodiką, skirtą kompozitinių laminuotų plokštelių mechaninių savybių radimui naudojant natūrinio bandinio tikrinius dažnius. Bandinių tamprumo rodikliai gauti mažinant nesąryšius tarp pamatuotų ir skaitinio bandymo tikrinių dažnių GA minimizuojant tikslo funkciją. Pagal šį darbą buvo pasiūlyta technologija su aukštesnio lygio baigtinių elementų modeliu (Araujo 2000). Frederiksen (Frederiksen 1997) pasiūlė nuosaikiai storų ortotropinės medžiagos bandinių tamprumo rodiklių radimo metodą, kuriame panaudoti vibraciniai bandymai ir skaitiniai metodai.

Pagal Mota Soares darbus Bledzki ir kt. (Bledzki 1999) ir Rikards ir kt. (Rikards 2001) pasiūlė metodiką, kurioje naudojami metodai, paremti funkcijos skaitmeninio paviršiaus modeliu, gaunamu pagal bandinio elgesį tam tikruose pasirinktuose paieškos erdvės taškuose. Minimizuojama funkcija aprašo skirtumą tarp išmatuotų ir skaitiniu bandymu apskaičiuojamų parametrų. Prie šio metodo bus grįžta vėliau, nes jis pasirinktas kaip praktikoje aprobuotas, naudojamas patikrinti disertacijoje siūlomąją technologiją gautų rezultatų korektiškumą.

Laminuotų kompozitų tamprumo rodiklių radimui kito tipo metodas apjungia ultragarsinį matavimą ir optimizavimo metodus (Balasubramaniam 1998). Šiame darbe autoriai taip pat panaudojo GA tamprumo rodiklių radimui. Aprašyme pateikiamas išsamus privalumų ir trūkumų aptarimas, palyginama su tradiciniais metodais. Technologijų apžvalga, paremtų tikriniais dažniais ir optimizavimu įvertinant kompozitinių laminuotų bandinių mechanines savybes pateikta Pederson darbe (Pederson 1999). Reikėtų paminėti, kad šio tipo darbuose siūlomi panašūs atvirkštinio uždavinio sprendimo būdai, besiskiriantys neesminiais metodo patobulinimais.

Liu ir kt. (Liu 2002) pasiūlė procedūrą, kurioje, siekiant surasti pažangių kompozitinių laminatų tamprumo rodiklius pagal paviršiaus poslinkius, buvo naudojami GA. Pagal šį darbą Han ir Liu (Liu 2002) pasiūlė technologiją, kurioje pradiniai duomenys yra bandinio dinaminis paviršius, tačiau uždavinys sprendžiamas neuroniniais tinklais.

Roseiro ir kt. darbe (Roseiro 2004) GA individas koduojamas realiais skaičiais, be to, naudojami neuroniniai tinklai kompozitinių sluoksniuotų medžiagų tamprumo rodiklių radimui. Bandinio tikriniai dažniai gaunami iš ant paviršiaus pritvirtintų pjezoelektrinių jutiklių. Laminuota plokštelė modeliuojama baigtiniais elementais. Šiame darbe sujungiami vienas kitą papildantys algoritmai – taip siekiama didesnio tamprumo rodiklių radimo tikslumo ir greičio.

Kompozitinės medžiagos ir jų mechaninių rodiklių nustatymo technologijos tiriamos ir kuriamos ir Lietuvoje. Kompozitinių medžiagų stiprumines charakteristikas ir irimo sąlygas tiria prof. A. Žiliukas (Žiliukas 2006, Keršienė 2006). Kompozitinių medžiagų konstrukcijų bei statinių analizės ir projektavimo tyrimai atliekami VGTU Metalinių konstrukcijų katedroje, vadovaujant prof. A. Kvedarui (Kuranovas 2007). Disertacijoje nagrinėjamai problemai artimiausi lietuvių mokslininkų darbai yra šie.

Lietuvių mokslininkai Vobolis ir Albrechtas (Vobolis 2008) nagrinėja klijuotų medienos plokščių iš medžio drožlių ir stačiakampių tašų tamprumo rodiklių radimo technologiją, apimančią vibracinius bandymus ir skaitmeninį modeliavimą. Bandymuose naudojami kvadratiniai bandiniai, pakabinti ant stygų, taip imituojant laisvas kraštines sąlygas. Bandiniai sužadinami smūgiuojant, virpesiai matuojami skirtinguose taškuose ekselerometru. Jungo modulis suskaičiuojamas pagal išvestą formulę, kurioje viena iš dedamųjų yra rezonansinis bandinio daž-

nis. Naudodami strypo baigtinį elementą autoriai sudaro matematinius bandinių modelius, iš kurių suskaičiuoja modas. Jas naudoja slopinimo koeficientui skaičiuoti. Darbe optimizacija netaikoma, kiti tamprumo rodikliai neaptariami.

Bareišo (Bareišis 2006) straipsnyje aprašoma originali daugiasluoksnių simetrinių ir asimetrinių sijų elastingumo ribų apskaičiavimo metodika. Siūlomas metodas naudingas inžineriniams skaičiavimams ir moksliniams tyrimams. Pateiktos lygtys leidžia rasti vidurinius sijų sluoksnius ir apskaičiuoti lenkimo standumą ir normalinius bei šlyties įtempimus norimame skerspjuvyje.

Partauko ir Bareišo (Partaukas 2009) darbe nagrinėjamas dvisluoksnių, tuščiavidurių strypų, veikiamų ašinės apkrovos, įtempimų būvis. Sluoksnių medžiaga yra izotropinė, homogeninė, tiesiškai tampri, o sluoksniai – koncentriniai cilindrai. Pateiktas matematinis modelis skirtas dvisluoksniu tempiamo ir gniuždomo cilindrinio strypo ašiniams, radialiniams ir žiediniams įtempimams bei jų ribinėms vertėms sluoksniuose nustatyti. Įtempimų būviui sluoksniuose įvertinti gautos santykinių įtempimų kontakto zonoje išraiškos, kurios leidžia nustatyti nagrinėjamos konstrukcijos įtempimų būvį: erdvinis, plokščias ar vienašis. Santykinių įtempimų režiams nustatyti pasiūlytos ribinių verčių kreivės ir pateiktos jų lygtys. Nustatyta, kad santykiniai įtempimai priklauso nuo Puasono koeficientų verčių, tamprumo modulių bei strypo radialinių matmenų ir sluoksnių skerspjuvio plotų santykių, taip pat ir medžiagų išdėstymo konstrukcijoje. Gautų lygčių analizė parodė, kad tam tikrais atvejais radialiniai ir žiediniai įtempimai gali sudaryti nemažą ašinių įtempimų vertės dalį. Maksimalioms santykinių įtempimų vertėms nustatyti pasiūlytos ribinių kreivių lygtys. Bareišo darbuose taip pat neoptimizuojama.

Nepaisant pasaulinėje mokslinėje bendruomenėje vykdomų darbų gausos, nepavyksta sukurti įrankio, kuriuo vienodai tiksliai būtų surandami visi norimi kompozitinių medžiagų tamprumo rodikliai. Skirtingų metodų ir darbų gausybė medžiagų tamprumo rodiklių paieškos srityje leidžia daryti išvadą, kad kol kas nėra sukurtas patikimas ir universalus identifikavimo įrankis. Pastebima tendencija, kad pažangus įrankis vystosi į kelių metodikų derinį, kuriame panaudotos stipriausios skirtingų metodų savybės. Tarptautinė patirtis rodo, kad medžiagų tamprumo rodiklių radimo uždaviniai yra neiškilieji (angl. non-convex). Siūlomi įrankiai apimantys skirtingus globaliosios optimizacijos algoritmus, kurių atskiri etapai papildomi paprastesniais lokalsiosios optimizacijos algoritmais. Kaip pavyzdį būtų galima pateikti Hwang ir He (Hwang 2006) darbą. Čia tyrėjai apjungia GA ir grūdinimo proceso imitavimą¹, skirtą mutacijos proceso reguliavimui. Algoritmas papildomas prisitaikančiais prie uždavinio sąlygų mechanizmais ir realių skaičių GA.

¹ Apie minimus metodus skaityti 1.2 poskyryje.

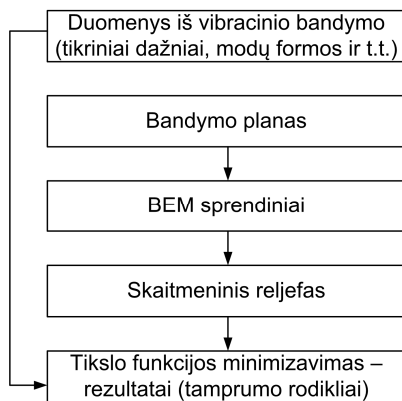
Sekant tarptautine praktika, disertacijoje aprašomas medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo įrankis taip pat yra kelių metodikų derinys, kuriame derinami GA ir bandinių formos optimizavimo technologija. Šis algoritmas ir metodas pasiūlyti išanalizavus pasaulinę mokslinę literatūrą ir atitinkamai atsižvelgus į mokslininkų vertinimus bei jų darbų rezultatus. Manoma, kad anksčiau kartu nenaudotas metodikų derinys gali būti pažangaus medžiagų tamprumo rodiklių radimo įrankio prototipas.

Toliau pateikiamas vienos praktikoje aprobuotos technologijos trumpas aprašymas. Ši technologija gauta iš autorių (Bledzki 1999, Rikards 2001) programinio kodo pavidalu, tad ja buvo tikrinama, ar disertacijoje siūloma technologija gaunami rezultatai yra korektiški.

Eksperimento planavimas

Eksperimento planavimo metodas grindžiamas aproksimuojančios funkcijos parinkimu, kuri išvedama per pasirinktuose paieškos erdvės taškuose suskaičiuotas tikslo funkcijos vertes. Minimizuojama tikslo funkcija aprašo skirtumą tarp išmatuotų ir suskaičiuotų paviršiaus taškų. Minimizuojant funkciją gaunami ieškomi parametrai (medžiagos tamprumo rodikliai). Mažesnis šio metodo iteracijų skaičius rodo tam tikrą pranašumą prieš kitus populiarius tamprumo rodiklių paieškos algoritmus.

Šią procedūrą sudaro penki pagrindiniai etapai, pavaizduoti 1.1 pav.



1.1 pav. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo EP metodu principinė schema

Fig. 1.1. Principal scheme of identification of elastic characteristics of materials using PoE method

Pirmajame etape natūriniu arba skaitmeniniu bandymu surandamos bandinio dinaminės charakteristikos (tikriniai dažniai). Antrajame – sukuriamas eksperimento planas, priklausantis nuo ieškomų parametrų kiekio ir numatomo eks-

perimentų skaičiaus. Tuomet atliekama BEM analizė pasirinktuose taškuose, gaunami sprendiniai ir suskaičiuojami skaitmeninio modelio tikriniai dažniai. Ketvirtajame etape pagal BEM modelio skaičiavimo rezultatą išvedama aproksimuojanti funkcija. Medžiagos tamprumo rodikliai surandami paskutiniajame, penktajame, etape minimizuojant nesąryšius tarp natūrinio ir skaitmeninio modelių dinaminių charakteristikų.

Tam, kad būtų įmanoma sugeneruoti EP, reikia žinoti ieškomų dydžių ir numatomų atlikti eksperimentų skaičių. Eksperimento taškai erdvėje paskirstomi kaip įmanoma tolygiau pagal formulę:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \frac{1}{l_{ij}^2} \Rightarrow \min, \quad (1.1)$$

čia l_{ij} – atstumas tarp i -ojo ir j -ojo taškų ($i \neq j$), k – norimas taškų skaičius.

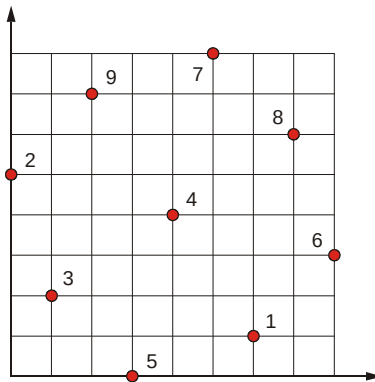
Štai taip (1.2 pav.) atrodo paieškos erdvėje paskirstyti EP taškai. Atstumas tarp jų suskaičiuotas taip, kad taškai būtų kuo tolygiau pasiskirstę erdvėje.

EP galima sukurti bet kokiam kintamųjų n ir eksperimentų k kiekiui, tačiau tai reikalauja pakankamai daug kompiuterinių resursų, todėl tam tikrai šių kintamųjų kombinacijai sukuriamas universalus planas. Jis aprašomas matrica B_{ij} .

Kadangi dydžių sritis aprašoma $x_j \in [x_j^{\min}, x_j^{\max}]$, EP taškai skaičiuojami pagal formulę:

$$x_j^{(i)} = x_j^{\min} + \frac{1}{k-1} (x_j^{\max} - x_j^{\min}) (B_{ij} - 1), \quad (1.2)$$

$i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, n$



1.2 pav. Bandymo plano poerdvis

Fig. 1.2. Plan of experiment

Šiuose taškuose BEM suskaičiuojamos dinaminės bandinio charakteristikos, jos toliau naudojamos pasitelkiant skaitmeninio reljefo² sudarymo metodą, kuriuo nustatomos funkcijos, susiejančios medžiagos tamprumo rodiklius su tikriniais dažniais. Smulkiau procedūra aprašyta (Rikards 1993).

Poskyrio reziumė

Atlikus pasaulinės mokslinės literatūros apžvalgą, galima įžvelgti keletą esminių sunkumų, kylančių kompozitinių medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo srityje.

Pramonėje naudojami medžiagų tamprumo rodiklių paieškos algoritmai yra nepakankamai tikslūs ir greiti, todėl bandoma surasti geriausią metodikų derinį, užtikrinantį tikslų ir greitą medžiagų tamprumo rodiklių radimą.

Remiantis tarptautine praktika pasirinkti globaliosios optimizacijos algoritmai, nes, kaip jau minėta, jie yra labiausiai tinkami tokio sudėtingumo uždaviniams spręsti. Kitame poskyryje trumpai aprašomi populiariausi globaliosios optimizacijos algoritmai, nurodomas labiausiai tinkantis disertacijoje iškelto uždavinio sprendimui.

1.2. Globaliosios optimizacijos algoritmai

Medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimas suvokiamas kaip optimizavimo uždavinys, kuriame minimizuojami nesąryšiai tarp bandinių tikrinių dažnių, gautų natūriniu bandymu ir skaitmeniniu būdu. Skaitmeniniam virpesių radimui dažniausiai pasirenkamas galingas BEM komercinis paketas. Tokie uždaviniai yra pakankamai sudėtingi, nes tikslo funkcijos skaitmeninis paviršius iš anksto nežinomas, todėl jiems spręsti dažnai naudojami labiausiai tinkantys globaliosios optimizacijos algoritmai.

Algoritmų yra daugybė skirtingų rūšių ir paskirčių, skirtingos sandaros ir prigimtys. Gana daug optimizavimo algoritmų yra pagrįsti gamtoje vykstančiais dėsniais ir procesais. Dauguma algoritmų negali būti priskirti kuriai nors vienai sričiai dėl jų sudėtingos sandaros, tačiau egzistuoja dvi pagrindinės grupės, į kurias paprastai skirstomi optimizavimo metodai – deterministiniai ir stochastiniai.

² *Skaitmeninis reljefas* (angl. response surface). Informacija apie objekto reakciją į sužadinimą gali būti gauta iš natūrinio bandymo arba kompiuterinio skaitmeninio modelio. Ši informacija gali būti pavaizduota kaip duomenų lentelė, kurioje skaitmeninis funkcijos paviršius $y(x)$ yra susietas su kintamaisiais. Pagal bandymo duomenis randama funkcijos $y(x)$ matematinė priklausomybė, vadinama regresijos lygtimi.

1.2.1. Deterministiniai algoritmai

Deterministinis algoritmas, esant apibrėžtomis pradinėmis sąlygoms, elgiasi pagal žinomą modelį. Esant tam tikriems pradiniais duomenims, juo visada gaunami tie patys rezultatai ir sprendimo kelias visuomet bus toks pats. Deterministiniai algoritmai yra plačiai žinomi ir labiausiai ištirti algoritmai.

Vienas paprastesnių deterministinių algoritmų yra matematinės funkcijos, todėl, kad funkcija visada pateikia tokį pat rezultatą, jei pradiniai duomenys nekeitami. Skirtumas tik tas, kad algoritme galima tiksliai aprašyti kaip gaunamas rezultatas, o abstrakčiomis matematinėmis funkcijomis nusakoma netiesiogiai.

Kai kuriuos uždavinius deterministiniais algoritmais išspręsti, deja, sudėtinga, o dažnai ir neįmanoma. Nepolinominio sudėtingumo uždaviniai, kurie apima daugelį praktinių uždavinių, teoriškai gali būti išspręsti taip vadinama nedeterministine Turingo mašina, tačiau nei vienu deterministiniu algoritmu šie uždaviniai nebuvo išspręsti. Geriausiu atveju galime rasti artimą sprendinį.

Toliau pateikiama keletas populiariausių deterministinių algoritmų aprašymų, kurie patvirtina teiginį, kad disertacijoje pasirinkto uždavinio sprendimui šie algoritmai yra netinkami.

Niutono metodas

Tai vienas iš labiausiai paplitusių algoritmų (dar žinomas liestinių metodo vardu), skirtų mažiausios funkcijos išvestinės reikšmės radimui priartėjimo būdu. Niutono metodas gali greitai sukonverguoti į sprendinį, ypač jei paieška pradedama arti būsimo sprendinio. Kitu atveju, jei pradinis spėjinytis yra gana toli nuo tikėtino sprendinio, atsiranda tikimybė, kad sprendinys sukonverguos į lokalųjį minimumą. Norint to išvengti pridedama procedūra leidžianti išvengti lokalaus minimumo. Paprasčiausias būdas yra tiesiog paleisti algoritmą skaičiuoti iš naujo su kitu pradiniu spėjiniu. Sudėtingesnis yra Niutono-Rafson (angl. Newton-Raphson) metodas, kurio esmė yra kurioje nors iteracijoje parinkti optimalų žingsnį.

NEWUOA algoritmas

Newuoa algoritmu ieškoma funkcijos $F(x)$ mažiausios reikšmės su sąlyga, kad duotoji funkcija gali būti suskaičiuota su bet kokia x reikšme. Algoritmas yra iteracinis, kuriam kiekvienos iteracijos pradžioje reikalingas kvadrinis modelis³. Šis modelis naudojamas uždavinio kintamųjų patikrinimui ir suderinimui pagal paieškos erdvę. Kvadrinis modelis funkciją interpoliuoja pakeičiant tik vieną tašką. Skaičiuoti pradedama nuo geriausiojo sprendinio, gauto per mažiau-

³ *Kvadrinis modelis* (angl. Quadric model) – II-osios eilės paviršius, kurio taškų homogeninės koordinatės tenkina II-osios eilės homogeninę lygtį.

siai reikalingą iteracijų skaičių. Algoritmas gali būti sustabdytas pasiekus tam tikrą iteracijų skaičių arba po tam tikro laiko.

Pasitikėjimo srities algoritmas

Pasitikėjimo srities algoritmas (angl. trust region) yra matematinis optimizavimas, kuris, skirtingai nuo Niutono-Rafson metodo, tikslo funkciją optimizuoja tik žinomoje srityje, vadinamoje pasitikėjimo sritimi. Kuomet yra surandamas tikėtinas tikslo funkcijos sprendinys, siaurinamos pasitikėjimo srities ribos, ir priešingai, jei sprendinys yra netinkamas – pasitikėjimo sritis išplečiama. Sprendžiama apžvelgiant į tikėtiną tikslo funkcijos gradientą.

Pasitikėjimo srities algoritmas yra panašus į tiesinės paieškos metodus, nes jame pirmiausia pasirenkamas iteracijos žingsnis (pasitikėjimo srities dydis), o tuomet paieškos kryptis. Tiesiniuose paieškos metoduose atvirkščiai – pirma pasirenkama paieškos kryptis, o tik paskui iteracijos žingsnis.

Aukso pjūvio paieškos algoritmas

Aukso pjūvio paieškos algoritmas (angl. golden section search) skirtas vienmodalinės (angl. unimodal) funkcijos ribinių verčių paieškai siaurinant paieškos ribas, tarp kurių yra tikėtinas sprendinys. Algoritmo pavadinimas kilo nuo jo veikimo principo, kurio metu paieška atliekama trijuose taškuose, tarp kurių atstumas yra lygus aukso pjūviui⁴. Aukso pjūvio paieškos algoritmas yra panašus į Fibonacci ir dvejetainės paieškos algoritmus.

Fibonacci paieška

Fibonacci paieška (angl. Fibonacci search) skirta surasti surūšiuoto masyvo ribines vertes ir yra panaši į prieš tai aprašytą algoritmą. Skirtumas tarp minėtų algoritmų yra tas, kad Fibonacci paieškos algoritme vietoj aukso pjūvio paieškos intervalų naudojamas Fibonacci skaičius⁵, t. y. aktyviau ieškoma tose srityse, kur masyvo nariai turi mažesnę dispersiją.

Apibendrinimas

Deterministiniai algoritmai paremti tikslo funkcijos gradientų skaičiavimu, todėl tai lemia, kad šie metodai nėra tinkami medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo uždaviniams, nes:

- tikslo funkcijos skaičiavimui diferencijavimu reikalingas pradinis programos kodas, kurį gauti iš komercinių paketų neįmanoma;
- skaitmeninis diferencijavimas gali būti netikslus ir neefektyvus.

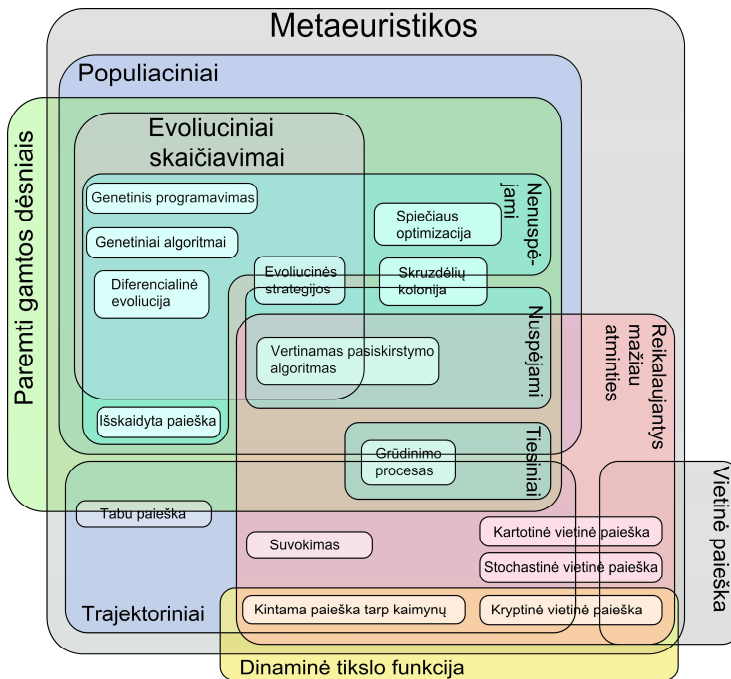
⁴ Aukso pjūvis arba dieviškoji proporcija – skaičius, kurio reikšmė apytiksliai lygi 1,618.

⁵ Fibonacci skaičius – skaičių eilutė, kurios kiekvienas sekantis narys yra prieš tai buvusių dviejų narių suma.

1.2.2. Stochastiniai algoritmai

Stochastiniai algoritmai (graikiškai "Στόχος" – "tikslas" arba "spėjimas") kitaip dar vadinami atsitiktiniais. Stochastinis procesas yra toks, kuriame kokio nors objekto ar algoritmo elgesys yra neprognozuojamas. Kaip pavyzdį galima būtų pateikti karą, meteorologiją, kur sėkmės/nesėkmės atvejus sudėtinga nuspėti.

Didžioji dalis stochastinių algoritmų paremti gamtos dėsniais (1.3 pav.). Kai kuriuose algoritmuose imituojami natūralios atrankos procesai, kituose – gyvūnų elgesio modeliai tam tikroje situacijoje.



1.3 pav. Algoritmų klasifikavimas
Fig. 1.3. Classification of algorithms

Stochastiniai algoritmai labiau tinkami spręsti darbe keliamus uždavinius, nes:

- uždavinio konvergavimas priklauso tik nuo tikslo funkcijos rezultatų;
- teorinė analizė rodo, kad uždaviniai sprendžiami globaliosios optimizacijos metodais gali būti išspręsti per polinominį laiką, o taikant deterministinius metodus visada prireikia eksponentiškai priklausomo tikslo funkcijų skaičiavimo kiekio (Dyer 1991). Nepaisant to, kad deterministiniai algoritmai garantuoja sprendinį, jie atmetami dėl skaitmeninio diferencijavimo ir ilgo vykdymo laiko;

- stochastiniai algoritmai inžinerijoje yra populiarnesni, kuomet kalbama apie optimizavimo uždavinių sprendimą.

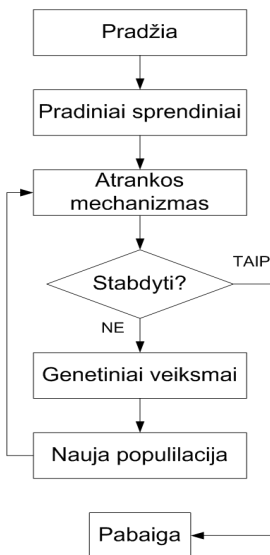
Pagrindinis stochastinių algoritmų trūkumas – visuomet išlieka tikimybė nesusirasti geriausio sprendinio per protingą laiką ar iteracijų kiekį. Sprendžiant uždavinius šiais algoritmais, dažnai gaunamas ne visai tikslus rezultatas, bet realiame gyvenime teorinis absoliučiai tikslus optimalus sprendinys ne visada būtinas.

Stochastiniai algoritmai negarantuoja optimalaus uždavinio sprendinio, todėl tas pats uždavinys turi būti sprendžiamas keletą kartų. Iš gautų kelių sprendimų rezultatų galima daryti išvadą arba surasti jų vidurkį.

Evoliuciniai algoritmai

Labiausiai išskirtini iš stochastinių algoritmų yra evoliuciniai algoritmai (EA), sprendime imituojantys natūralios evoliucijos procesus (Back 1996, Back 1997, Back 1997, Goldberg 1989). Evoliuciniai algoritmai sieja biologinius procesus ir informacines technologijas, todėl juose taikomos tokios sąvokos:

- chromosoma arba individas atvaizduoja galimą uždavinio sprendinį (chromosomą sudaro genai);
- tikslo funkcija susieta su kiekviena chromosoma ir rodo jos tinkamumą;
- individai, kurių reikšmės apima visą paieškos sritį, vadinami populiacija;
- siekiant nuosekliai ištirti paieškos erdvę individams pritaikomi genetiniai operatoriai;
- individų populiacija yra karta kuriame nors paieškos etape;
- atranka į naują populiaciją perkeliama tinkami evoliucijai individai.



1.4 pav. Evoliucinio algoritmo etapai

Fig. 1.4. Stages of evolutionary algorithms

žės“ algoritmais, kuriuose tikslo funkcija suskaičiuojama atskira programa, apie kurią tereikia žinoti tik keletą prielaidų. Be to, apibrėžiant tikslo funkciją papras-

Evoliucinių algoritmų (1.4 pav.) pagrindinis privalumas prieš kitus – tikslo funkcijos vertę jiems galima teikti vadinamaisiais „juodosios dė-

tai reikia mažiau gilintis į uždavinį, o labiau į naudotinas euristicas⁶. Dėl šios priežasties EA tenkina daugelio uždavinių sprendimo sričių.

Evoliucinė strategija

Evoliucinės strategijos algoritmą (angl. Evolution Strategies) pasiūlė Rechenberg (Rechenberg 1965, Rechenberg 1970, Rechenberg 1994). Tai euristinis optimizavimo metodas, tam tikra evoliucinių algoritmų forma (Heitkotter 1998, Back 1991, Beyer 2001, Beyer 2002, Schwefel 1993), paremta adaptacijos ir evoliucijos idėjomis. Evoliucinės strategijos algoritmas turi tokius bruožus:

- Jame paprastai naudojami realiųjų skaičių vektoriai, kaip galimi sprendiniai. Kitaip tariant, paieškos ir uždavinio erdvės yra tam tikro ilgio realiųjų skaičių eilutės, kaip ir realių skaičių GA.
- Mutacija ir atrankos mechanizmas yra pagrindiniai operatoriai, kryžminimas mažiau svarbus.
- Mutacija dažniausiai keičia būsimo sprendinio vektoriaus x elementus x_i į skaičių, gautą iš normalinio skirstinio $N(x_i | \mu_i, \sigma_i^2)$.

Visais kitais požūriais evoliucinės strategijos algoritmas nesiskiria nuo pagrindinio evoliucinio algoritmo.

Genetiniai algoritmai

Stambi evoliucinių algoritmų šaka yra GA, kuriuose yra akivaizdus skirtumas tarp paieškos ir sprendinio erdvių: sprendinio erdvė (dažniausiai realių skaičių) atvaizduojama dvejetainėje paieškos erdvėje.

GA dažnai naudojamos euristicos, tokios kaip elitizmas, vieno arba keleto taškų ir/arba imunitetu apsaugota mutacija (Tazawa 1996, Yeh 1999, Agarwal 2006). Šios euristicos leidžia geriau pritaikyti algoritmą konkrečių uždavinių sprendimui.

GA yra evoliucinių algoritmų poklasis, kuomet paieškos erdvės elementai yra dvejetainės eilutės arba kitų pagrindinių tipų masyvai. Genotipai yra naudojami reprodukcijos operacijose, kur tikslo funkcija $f \in F$ apskaičiuojama remiantis fenotipais uždavinio erdvėje X (Goldberg 1989, Heitkotter 1998, Holland 1975, Whitley 1994). Genotipas – tai bendros specifinės genetinės informacijos organizmų grupė. Fenotipas – tai organizmo būseną, kuomet žinoma jo genetinės informacijos ir aplinkos sąveika.

Sąveikaujantys genetiniai algoritmai

Sąveikaujantys genetiniai algoritmai (angl. Interactive genetic algorithms) – tokie GA, kuriuose geriausio sprendinio radimui reikalingas žmogaus įsikišimas. Jie naudojami srityse, kur sunku aprašyti tikslo funkciją, pavyzdžiui, evoliucio-

⁶ *Euristika* – paieškos loginių būdų ir metodinių taisyklių visuma.

nuojantys vaizdai, muzika, kitos meninės formos, priklausomos nuo naudotojų estetinio pasirinkimo.

Memetinis (hibridinis) algoritmas

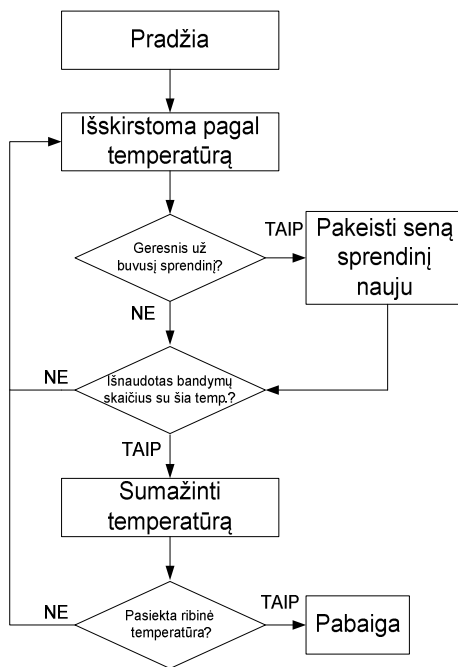
Memetinis algoritmas (angl. Memetic algorithm) – terminas, kurį naudoja mokslininkai, įvardindami GA, kombinuotus su kitomis paieškų formomis, pavyzdžiui GPI. Kai kurie mokslininkai juos įvardija kaip GA ir lygiagrečiųjų GA hibridus. Memetiniai algoritmai yra efektyvesni už GA tam tikrų sričių uždavinių sprendimui.

Grūdinimo proceso imitavimas

GPI paremtas fizinio proceso imitavimu (1.5 pav.), kurio metu medžiagos kristalizuojasi. Pavadinimas kilo iš metalurgijos, kur metalai kaitinami ir tam tikru režimu vėsunami, siekiant padidinti jų stiprumą, atsparumą aplinkos poveikiams bei sumažinti gardelės defektus. Karštis priverčia atomus pajudėti iš savo pirminės vietos gardelėje (lokalus vidinės energijos minimumas) ir keisti savo padėtį į didesnės energijos būsenas. Lėtas kontroliuojamas aušinimas leidžia atomams „susirasti“ žemesnės už pirminę vidinės energijos vietas.

Analogiškai šiam fiziniam procesui, kiekvienoje GPI iteracijoje esantis sprendinys keičiamas atsitiktiniu „greta“ esančiu sprendiniu, kurio pasirinkimo tikimybė priklauso nuo skirtumo tarp atitinkamos funkcijos reikšmės ir globalaus palaipsniui mažinamo parametro T (vadinamo temperatūra).

Sprendinys keičiasi beveik atsitiktinai, kuomet parametras T yra didelis, tačiau sparčiai konverguoja T sumažėjus iki labai mažų reikšmių. Algoritme numatyta apsauga nuo lokalaus sprendinio – leidžiama retkarčiais „išlipti iš duobės“, tuo tarpu kiti gradientų skirtumu paremti metodai dažnai konverguoja į lokalių mi-



1.5 pav. Bendri grūdinimo proceso imitavimo algoritmo etapai

Fig. 1.5. Common stages of imitation of simulated annealing

nimumą. GPI gali būti naudojamas GA viduje reguliuoti mutacijai. Pradėjus dirbti GA naudojamas didesnis mutacijų dažnis, kuris palaipsniui mažinamas.

Lipimas į kalną

Lipimas į kalną (angl. Hill Climbing) (Russell 2002) yra senas ir paprastas paieškos ir optimizavimo algoritmas, kuriame naudojama viena tikslo funkcija. Lipimo į kalną algoritmas veikia uždame cikle, kuriame žinomas geriausias praeitos iteracijos sprendinys, naudojamas sukurti naują palikuonį. Jei šis naujas individas yra geresnis nei jo pirmtakas, senasis keičiamas nauju. Tada ciklas pradedamas iš naujo. Šia prasme algoritmas panašus į evoliucinį algoritmą su vieno individo populiacija. Nors lipimo į kalną algoritmo paieškos ir uždavinio erdvės dažniausiai sutampa, tačiau kai kuriais atvejais jos atskiriamos. Šiame algoritme paprastai naudojamas beparametrinis paieškos būdas, kad būtų sukurtas pirmasis sprendinys, iš kurio gimtų sekantys palikuonys.

Pagrindiniai lipimo į kalną algoritmu sprendžiami uždaviniai yra vieno sprendinio, todėl ypatingai greitai konverguojantys, t. y. juo lengvai randamas lokalusis minimumas, nes visuomet naudojamas geriausias sprendinys naujų uždavinio erdvės sprendinių paieškai.

Lipimo į kalną algoritme naudojama vienetinės reprodukcijos operacija, panaši į evoliucinių algoritmų mutacijos operaciją. Reikėtų pažymėti, kad lipimo į kalną algoritmas gali būti įgyvendintas deterministiniu būdu, jei gretimi paieškos rinkiniai paieškos erdvėje (dažnai sutampa su uždavinio erdve) yra baigtiniai.

Spiečiaus optimizavimas

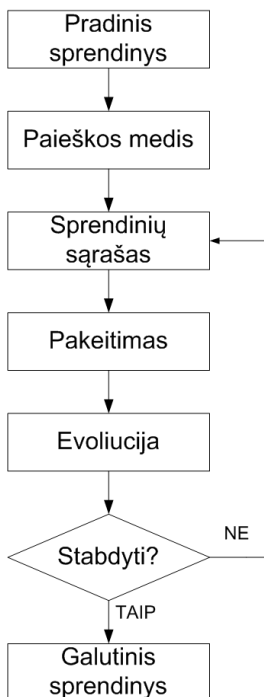
Spiečiaus optimizavimas (angl. Particle Swarm optimization) buvo sukurtas Eberthart ir Kennedy (Russell 1995, Kenedy 1995) 1995 m. Šis metodas paremtas bendru bandos intelekto lygiu, kuriuo imituojama paukščių arba žuvų biologinė socialinės sistemos maisto paieška (Parrish 1997). Šiame algoritme galima naudoti geriausią kaimyną iš populiacijos arba geriausią populiaciją, joje keičiant dalelių (spiečiaus narių) greitį. Algoritmas konverguoja greitai jei remiamasi geriausiu sprendiniu, bet rasti optimalų mažiau tikėtina. Jei remiamasi kaimyninėmis populiacijomis, konvergavimo greitis sumažėja, tačiau tikimybė surasti globalų sprendinį didėja.

Atsitiktinis optimizavimas

Atsitiktinio optimizavimo metodas pirmą kartą buvo pasiūlytas Rastrigin (Rastrigin 1963) 1960-ųjų pradžioje. Šį metodą išsamiai tyrė Gurin ir Rastrigin (Gurin 1965), Schumer (Schumer 1967) ir patobulino Schumer ir Steiglitz (Schumer 1968, Tanenbaum 2003). Maždaug tuo pačiu metu Matyas (Matyas 1965, Matyas 1968) pasiūlė kitokį atsitiktinio optimizavimo metodą, t. y. jam pritaikė savo konvergavimo savybių teoriją. Baba (Baba 1981) tada teoriškai įrodė, kad

optimizacijos uždavinio globalus sprendinys gali būti surandamas tik tuo atveju, jei tikslo funkcija multimodalinė.

Atsitiktinio optimizavimo privalumas prieš tradicinį lipimo į kalną algoritmą toks, kad naujas sprendinys visada sukuriamas iš aukštesnės tinkamumo funkcijos vertę turinčio individo ir yra labai artimas gretimam sprendiniui, kas atsitiktiniame optimizavime yra nebūtina sąlyga. Algoritmo vienanarėje paieškos operacijoje naudojami atsitiktiniai skaičiai, o lipimo į kalną paieškos algoritme vienanarės paieškos operacijos gali būti deterministinės arba atsitiktinės. Patogu, kuomet atsitiktiniame optimizavime paieškos erdvė visada yra n -mačių realių vektorių erdvė ir yra aiškus skirtumas tarp tikslo funkcijos ir projektavimo kintamųjų apribojimų. Atsitiktinio optimizavimo algoritme yra nauja paieškos operacija, panaši į mutaciją evoliucinėje strategijoje, skirta paieškai skaitmeninėje erdvėje. Ši operacija sukurta taip, kad visi paieškos erdvės taškai galėtų būti pasiekti vienu žingsniu iš greta esančio taško.



1.6 pav. Tabu paieškos algoritmas

Fig. 1.6. Taboo search algorithm

Tabu paieška

Tabu paieška panaši į GPI ir lipimo į kalną metodus, kuomet ieškoma sprendinio, keliaujant paieškos erdve ir bandant įvairias mutacijas. Šiuo algoritmu (1.6 pav.) surandami galimi sprendiniai ir, jei jau buvo pripažinti kaip tabu, jie neturi būti dar kartą peržiūrėti, todėl optimizacijos procese lieka mažesnė tikimybė pakliūti į lokalųjį minimumą. Paprasčiausias būdas šį metodą įgyvendinti, tai naudoti tabu sąrašą, kuriame saugomi visi išbandyti galimi sprendiniai. Jei naujai sukurtas fenotipas jau yra šiame sąrašė, jis iš karto yra atmetamas. Žinoma, sąrašas negali būti begalinis, todėl yra užduodamas tam tikras jo ilgis. Jei pridedamas kitas sprendinys, pirmasis turi būti pašalintas. Be to, šis sąrašas gali būti suskaidytas į grupes. Jei galimas koks nors ilgio matmuo uždavinio paieškos erdvėje, tuomet galima nurodyti galimų tabu sprendinių kiekį. Sudėtingesni metodai saugotų tam tikras individų savybes vietoj jų sąrašo. Tai ne tik lemia sudėtingesnį algoritmą, bet ir atsiranda rizika atmesti naujus sprendinius, kurie gali būti geri. Dėl šios priežasties pasirinktinai nurodomi kriterijai, kurie tabu sąrašė leistų egzistuoti nestandartiniais individams.

Poskyrio reziumė

Optimizavimo algoritmų apžvalgoje parodyti įvairūs algoritmai (evoliuciniai, grūdinimo proceso imitavimas, lipimas į kalną, atsitiktinis optimizavimas ir kt.). Matyti, kad dauguma jų yra paremti gamtoje vykstančiais procesais. Disertacijoje iškeltam medžiagų tamprumo rodiklių paieškos uždavinių sprendimui iš apžvelgtų stochastinių algoritmų gausos pasirenkami GA, nes mokslinėje bendruomenėje medžiagų tamprumo rodiklių paieškos uždavinių sprendimui jie yra plačiausiai naudojami, taip pat sąlyginai paprastai valdomi ir universalūs, tinkami įvairių optimizacijos uždavinių sprendimui. Deterministiniai algoritmai atmetami dėl nežinomų tikslo funkcijos gradientų, kitaip tariant, skaitmeniškai skaičiuoti išvestines pernelyg brangus procesas.

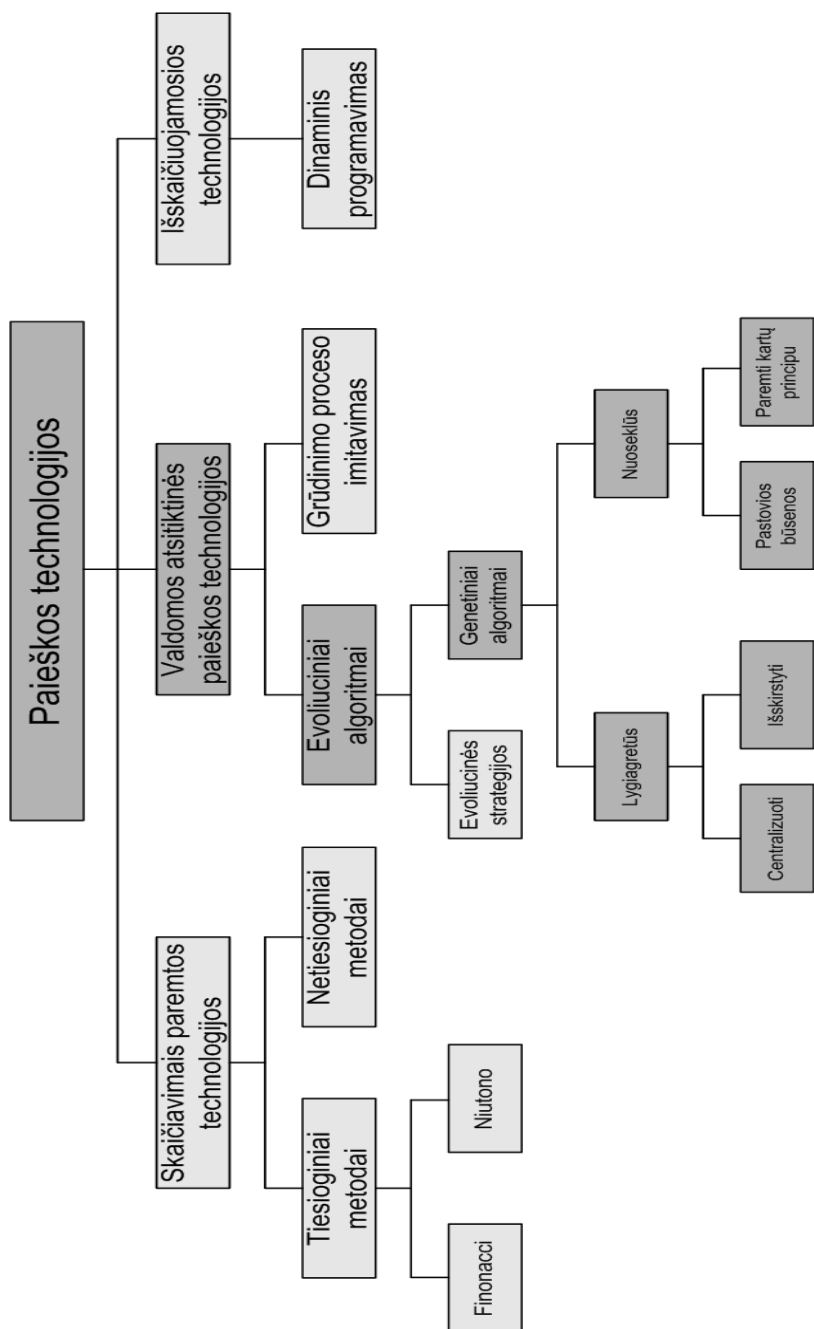
Tolesniame poskyryje aprašomi GA, jų sandara ir veikimo mechanizmas.

1.3. Genetinių algoritmų apžvalga

Evoliuciniai algoritmai pradėjo vystytis kartu su ankstyvaisiais mokslininkų kompiuteriniais darbais 1950-aisiais su mintim, kad evoliucijos procesai galėtų būti taikomi inžinerinių uždavinių sprendimui, optimizavimui. Tai galų gale atvedė į tris nepriklausomas evoliucinių algoritmų pagrindines realizavimo šakas, iš kurių dvi yra evoliucinės strategijos ir GA.

GA buvo sukurti Bremermann (Bremermann 1958) 1958-aisiais, tačiau juos išpopuliarino Holland, atlikęs tyrimus kaip pritaikyti natūralios gamtos procesus informatikoje (Holland 1962). Šis darbas paskatino Schema 1968-aisiais sukurti technologiją (Holland 1968, Holland 1975), kuri paryškino Holland bandymus GA pagrįsti teoriškai. Pirmąją Schema teorijos patobulinimą atliko Goldberg, sukūręs populiarų metodą, paremtą genetika. Goldberg metode nemenkas dėmesys skiriamas kryžminimo procesui GA (Goldberg 1989). Tai prieštarauja Schema teorijai, kurioje pagrindinis dėmesys kreipiamas destruktiviam kryžminimo ir mutacijos operatorių elgesiui. Esant tokiam genetinių operatorių charakteriui, sprendinys dažniausiai konverguoja link lokaliajo minimumo arba gali konverguoti į globalųjį optimumą, tačiau ypatingai lėtai dėl didelio individų skirtumo tarp gretimų kartų.

1990-aisiais Schema teorija buvo sukritikuota. Grefenstette teigė (Grefenstette 1993), kad pagal Schema teoriją sudarytas GA konverguos taip, kad geriausias sprendinys bus išrenkamas iš geriausių vienos populiacijos individų, o ne apskritai geriausias sprendinys iš visos sprendimo istorijos. Fogel ir Ghozeil (Fogel 1997) aptarė Schema teoriją pabrėždami, kad neįmanoma sukurti populiacijos individų proporcijos pagal Schema, nors atrankos kriterijai ir paremti jo teorija, siekiant išvengti duomenų triukšmo ar kitų stochastinių efektų. Poli (Poli



1.7 pav. Paieškos algoritmų medis

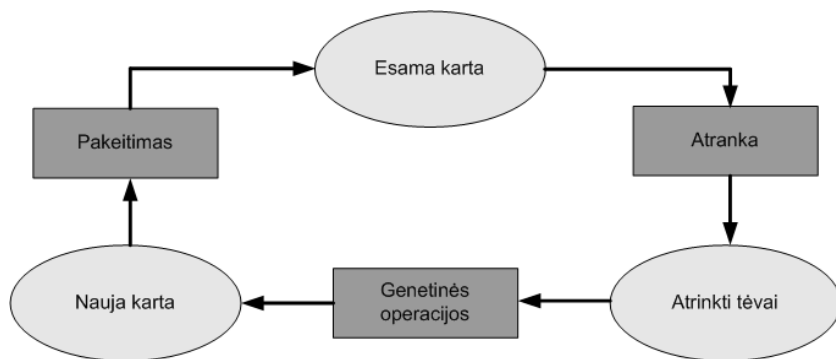
Fig. 1.7. Tree of search algorithms

2000) teigė, kad Fogel ir Ghozeil teiginiai nebuvo paremti pirmąja Holland teorija, nors ji ir tinkama modeliuoti uždavinius pagal Schema, kuomet duomenys užteršti triukšmu. Radcliffe (Radcliffe 1997) taip pat gynė Schema teoriją paaiškindamas, kad daugumos kritika nėra paremta Holland teiginiais, o interpretuota savaip.

Kotani ir kt. (Kotani 2001) 2001-aisiais naujesniuose pažangiuose GA pradėjo taikyti kintamo ilgio chromosomas. Autorių naudojamas GA nustato skirtumą tarp dviejų duomenų rinkinių. Jie nustatė, kad naudojant fiksuoto ilgio chromosomas galutinis GA efektyvumas padidėjo. Po to, kai jie sukūrė kintamo ilgio chromosomą, nustatė, kad būtina laikytis viršutinės chromosomos ilgio ribos, virš kurios GA efektyvumas nebedidėja.

Kaip jau buvo minėta, GA yra stochastinių algoritmų šeimos paieškos metodas, imituojantis gamtos evoliuciją pagal Charles Darwin 1858-aisiais pasiūlytą teoriją. 1.7 pav. iliustruoja GA vietą visame paieškos algoritmų medyje.

Evoliucinių algoritmų veikimo schema vaizduojama 1.8 pav., kur matyti būdingi evoliucijos etapai, tokie kaip genetinės operacijos, atranka ir populiacijos pakeitimas, po kurių populiacija atitinkamai kinta.



1.8 pav. Pagrindinis evoliucijos ciklas

Fig. 1.8. The main evolutionary cycle

Kadangi GA glaudžiai susiję su evoliucine biologija ir informatika, jie paveldėjo toliau išvardintus specifinius terminus.

Chromosoma

Chromosoma yra galimas optimizavimo uždavinio sprendinys. Ji sudaryta iš genų, kurie yra arba baigtinės eilutės (Goldberg 1989) arba struktūros, turinčios savo hierarchiją (Peter 1999). GA genai yra dvejetainės eilutės, sudarytos iš 0 ir 1. Evoliuciniame programavime arba evoliucinėse strategijose genai dažniausiai yra realūs skaičiai, todėl čia chromosoma gali būti n-matė, sudaryta iš n genų.

Tinkamumo funkcija

Tinkamumo funkcija susieta su kiekviena chromosoma ir rodo jos tinkamumą, kuomet optimalus uždavinio sprendinys ieškomas ją maksimizuojant arba minimizuojant. Pažymėtina, kad tinkamumo funkcija nėra tikslo funkcijos analogas, nes esti sudėtingesnė. Tinkamumo funkcija yra tam tikros rūšies tikslo funkcija, kuri kiekybiškai įvertina, ar sprendinys yra optimalus. Pagal tinkamumo funkciją atrinktos chromosomos toliau kryžminamos, tarpusavyje mutuoja ir iš jų generuojama nauja palikuonių karta.

Populiacija

Populiacija – tai individų rinkinys, paskirstytas paieškos erdvėje. Kartais GA vadinami kopuliaciniais algoritmais, nes ieško optimalaus sprendinio pradedant keliuose pradinuose taškuose.

Genetiniai operatoriai

Genetiniai operatoriai skirti individams keisti taip, kad būtų peržiūrėta visa įmanoma paieškos erdvė. Mutacijos operatorius yra dvejetainis genetinis operatorius, skirtas perkelti chromosomą į naują paieškos erdvės vietą. Kryžminimo arba rekombinacijos operatorius yra dvejetainis (dažniausiai) genetinis operatorius, skirtas sukurti du naujus individus iš dviejų jau esančių (tėvų). Nauji individai paveldi kai kurias tėvų savybes.

Karta

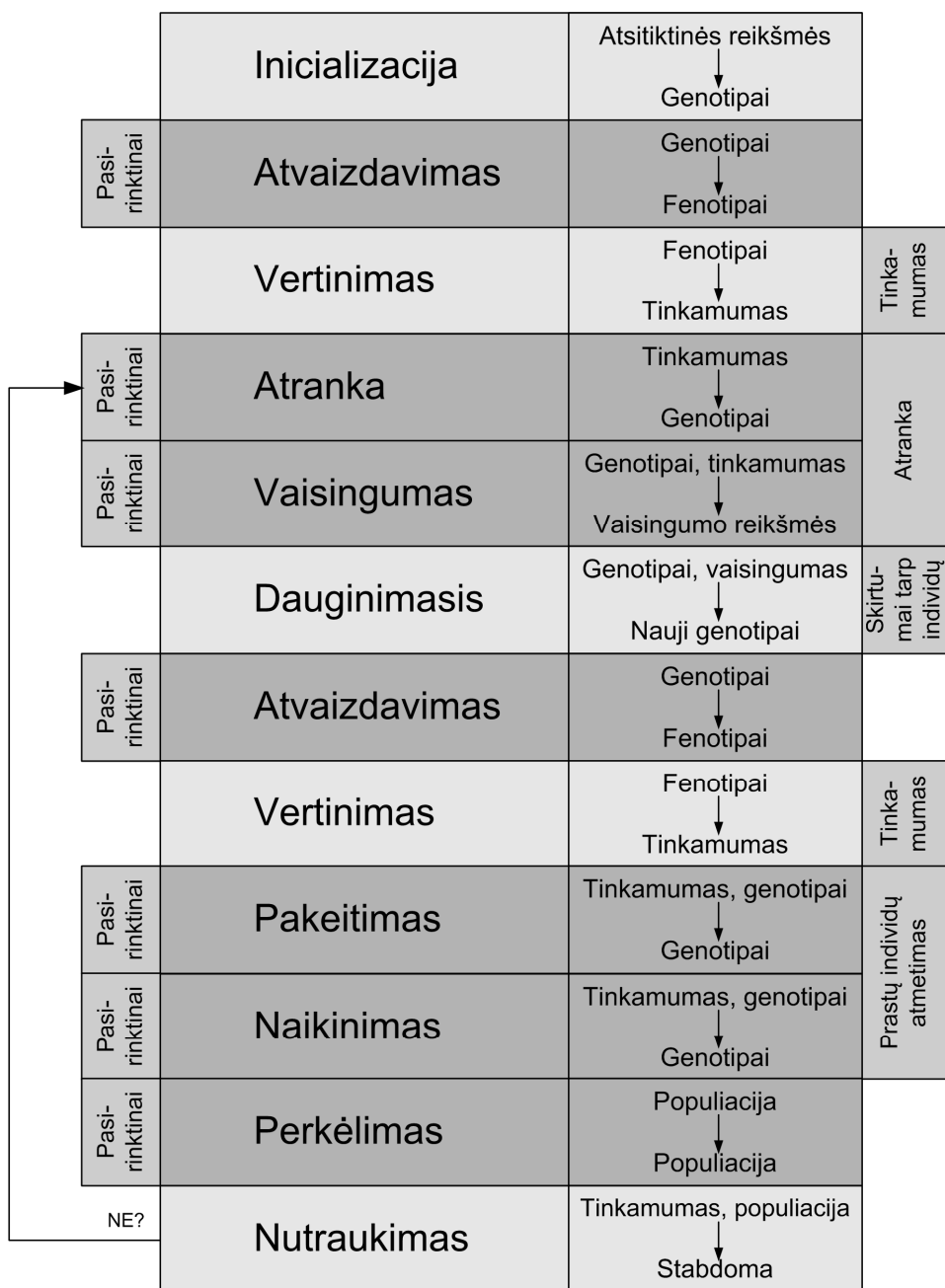
Karta yra individų populiacija viename konkrečiame žingsnyje (iteracijoje). Optimizuojant GA kartos atnaujinamos tol, kol randamas optimalus sprendinys arba iki užduotos kartų kiekio ribos.

Toliau trumpai aprašomi pagrindiniai GA etapai (1.9 pav.) ir juose vykstantys procesai. Ties kiekvienu GA etapu kairėje pažymėta ar etapas būtinas normaliam evoliucijos vykimui, dešinėje nurodyta kokį rezultatą duoda etapas.

Inicializacija

Šiame etape sukuriami pradinė individų populiacija. Jeigu individas yra taške $x \in R^n$, jis sugeneruojamas pagal tolydinį pasiskirstymą, kurio ribos atitinka kraštines taškų koordinatas, dėl to pradinė populiacija vienodai pasiskirsto paieškos erdvėje.

Populiacijos sudarymui galima naudoti ir kitus metodus, pavyzdžiui, normalinį skirstinį, turint omeny žinomą sprendinį, kuris turi būti pagerintas. Toks atsitiktinio populiacijos taškų sudarymo n -matėje erdvėje metodas vadinamas Monte Carlo. Čia, skirtingai nei evoliuciniuose algoritmuose, genai sukuriami „metant monetą“, todėl gaunama geno vertė gali būti 1 arba 0.



1.9 pav. GA pagrindiniai bendri etapai (pagal (Peter 1999))

Fig. 1.9. GA basic common steps (Peter 1999)

Atvaizdavimas

Atvaizdavimo (angl. mapping) koncepcija pasiskolinta iš evoliucinės biologijos, kur evoliucija vyksta genetiniame lygmenyje, kitaip tariant genotipe, o atranka vyksta fiziniame-biologiniame lygmenyje – fenotipe. Evoliucijos metu randama optimali organizmo struktūra keičiant jo genotipą, tuomet genetinė medžiaga koduojama į baltymus reiškiantį fenotipą. Tai rodo, kad atvaizdavimu siekiama paieškos erdvės struktūrą susieti su sprendinio erdve, ir atvirkščiai.

Taigi, jei GA yra skirtumas tarp paieškos (dvejjetainis B) ir sprendinio erdvės (realus skaičius R), tai tam skirtumui apibrėžti reikalinga atvaizdavimo procedūra. Pavyzdžiui, jei chromosoma, kurios tam tikras bitų kiekis b_i yra dvejjetainė realaus skaičiaus $x \in R$ išraiška intervale $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, tuomet naudojama atitinkama atvaizdavimo funkcija $M : B^l \rightarrow [x_{\min}, x_{\max}]$ (De Jong 1975):

$$M(b_1 \dots b_l) = x_{\min} + \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^l + 1} \left(\sum_{j=0}^{l-1} b_{l-j} \cdot 2^j \right). \quad (1.3)$$

Kituose algoritmuose, tokiuose kaip evoliucinės strategijos ir evoliucinio programavimo, nėra jokio skirtumo tarp paieškos ir sprendinio erdvių.

Egzistuoja daug svarių priežasčių naudoti atvaizdavimo etapą GA, pavyzdžiui (Goldberg 1989): paieškos erdvė ribojama tam, kad būtų patogiau ją suskaitmeninti, taip siekiant didesnio genetinių operatorių lankstumo. Nepaisant to, egzistuoja keletas esminių skirtumų tarp evoliucinių algoritmų, kurie naudoja atvaizdavimo operacijas ir tų, kurie dirba tiesiogiai su fenotipu. Pavyzdžiui, GA, kurie operuoja realiaisiais skaičiais, genotipe nenaudojamas atvaizdavimas, nes fenotipas ir taip jau yra realus skaičius. Palyginimui, tarp realiais skaičiais koduojamų GA ir klasikinių dvejjetainių, įrodyta, kad pirmieji yra greitesni. Skirtumas didėja eksponentiškai, priklausomai nuo uždavinio sudėtingumo. Pavyzdžiui, Michalewicz (Michalewicz 1996) pastebėjo greičio skirtumą iki 90%, kuomet uždavinio nežinomųjų skaičius $n = 24$. Be to, realiaisiais skaičiais koduojami GA yra žymiai spartesni sprendžiant optimizavimo uždavinius su apribojimais (Michalewicz 1996).

Vertinimas

Vertinimo (angl. evaluation) etape individų populiacija yra vertinama skaičiuojant kiekvieno individo tinkamumo vertes. Jei individai yra taškai, pasiskirstę n -matėje paieškos erdvėje, tuomet jiems priskirtos tinkamumo vertės būtų paviršiaus, išvedamo $n+1$ -matėje erdvėje, aukščiai. Šis paviršius vadinamas skaitmeniniu tinkamumo paviršiumi, kuris yra susijęs su tikslo funkcijos paviršiumi.

Vienoje GA iteracijoje atliekami tūkstančiai vertinimų, o tai reiškia, kad beveik visas skaičiavimo laikas skiriamas vertinimo procesui. Vertinimas dažnai

atliekamas naudojant specialią analizinę programinę įrangą, kurios skaičiavimo laikas gali trukti kelias minutes ar net valandas vien tik tam, kad įvertintų individą arba visą sprendinį. Dėl šios priežasties skiriama daug dėmesio vertinimų kiekio sumažinimui optimizavimo metu.

Vertinimas atliekamas ne visada aiškiomis tinkamumo funkcijomis. Kai kuriems EA reikia žmogaus vertintojo, kuris įvertintų jų sprendinius (pavyzdžiui evoliucinis menas (Bentley 2002)). Tinkamumas taip pat gali būti įvertintas esant konkurencijai tarp sprendinių, kuomet individas vertinamas palyginant jo tinkamumą kitų individų atžvilgiu.

Atrankos mechanizmas

Atrankos mechanizmas yra būtinas GA, be jo nebūtų sukuriami naujų palikuonių. Nors ir paprasčiausiame GA atliekama tėvų atranka, tačiau evoliucija skatinama ir kitais genetiniais operatoriais: vaisingumo, pakeitimo ir naikinimo.

Iš populiacijos atrenkama dalis tinkamiausių sprendinių (sėkmingiausių „palikuonių“), iš kurių kuriama naujoji populiacija. Atrankai atlikti paprastai egzistuoja trys pagrindiniai atrankos metodai: tiesiogiai pagal tinkamumą, turnyro atranka ir pasirenkant proporcingai pagal tinkamumą. Pirmuoju būdu populiacija surūšiuojama tiesiogiai pagal tinkamumo funkcijos vertes, tad būti kitos kartos tėvu individas gauna galimybę pagal reitingavimą. Turnyro atrankos metodo esmė – tikimybė būti atrinktam susijusi su tuo, ar pasirinktas individas yra tinkamesnis iš keleto atsitiktinai atrinktų individų. Paskutiniame metode kiekvienas iš tėvų turi tam tikrą tikimybę būti atrinktas palyginus santykinę jo ir likusių individų tinkamumo funkcijos vertes (Goldberg 1989).

Dauguma atrankos funkcijų yra tikimybinės ir sukurtos taip, kad atrinktų ir keletą mažiau tinkamų sprendinių. Tokiu būdu užtikrinama, kad populiacijoje išliktų įvairovė ir išvengiama pirmalaikio konvergavimo bei nukrypimo į netinkamus sprendinius. Kaip atskiras atvejis turi būti paminėta taip vadinama elito atranka. Čia ignoruojama atrankos įprasta eiga, kuomet konstruojant naują populiaciją leidžiama keliems sėkmingiausiems individams (sprendiniams) visai nepakitus pereiti į naują populiaciją.

Vaisingumas

Tėvų vaisingumas apibūdinamas skaičiumi, kiek kiekvienas iš tėvų gali turėti palikuonių. Šis mechanizmas dažnai painiojamas su tėvų atrankos procesu. Pavyzdžiui, pasirenkant tėvus proporcingai pagal tinkamumą išrenkami tėvai ne tik pagal santykinę tinkamumo funkcijos reikšmę, bet taip pat padidinamas tėvų su geresne tinkamumo funkcijos reikšme vaisingumas. Toks skirstymas yra svarbus, nes keičiant tėvų vaisingumo rodiklius daroma nepriklausoma įtaka atrankos procesui.

Vienas iš galimų būdų realizuoti vaisingumo procedūras yra registruoti individų amžių. Pasenusioje populiacijoje gerokai sumažėja vaisingumas, kol galų gale tampa nuliniu. Kitas būdas, kaip naudoti vaisingumo mechanizmą individų atrankos įtakai – vaisingumo apribojimas. Yu ir Bentley (Yu 1998) parodė, kad renkantis tėvus pagal tinkamumą ir nustatant jų vaisingumo vertes pagal tai, kiek sąlygų jie tenkina, gali būti efektyvus būdas lygiagrečiai vykdyti dviejų tikslo funkcijų optimizavimą.

Dauginimasis

Dauginimasis yra GA pagrindas: proceso metu iš tėvų sukuriama palikuonys. Labai svarbu, kad palikuonys paveldėtų tėvų savybes, tačiau turi išlikti kai kurie skirtumai tarp palikuonių ir tėvų. Iš tikrųjų paveldėjimas ir išskiria GA iš kitų stochastinių algoritmų, nes GA optimalus sprendinys „išsvystomas“. Paveldėjimas realizuojamas naudojant genetinius operatorius.

Rekombinacijai (arba dauginimuisi) atlikti reikia bent dviejų pradinių sprendinių. Sprendiniai (arba genotipai, jei algoritme yra skirtumas tarp paieškos ir sprendinio erdvių) sujungiami kartu palikuonių sukūrimui. Kryžminimo operatoriai aprašyti (Back 1997, Goldberg 1989, Michalewicz 2000) šaltiniuose. Trumpai apibendrinant: kryžminimo operacija sukeičia dalį genų tarp porų, pasirinktų pagal kryžminimo tinkamumą. Tai leidžia perteikti vienos ar kelių chromosomų sandarą į kitą kartą. Kryžminimas gali būti atliekamas viename, dviejuose ar daugiau taškų. Pasirinktuose taškuose „tėvai“ dalinami ir poroje sukeičiamos padalintos dalys.

Mutacijos operatorius vienu metu keičia vieną sprendinį, kad būtų padidinta populiacijos įvairovė. Kai kuriuose evoliuciniuose algoritmuose, kuriant palikuonis, mutacijai naudojama tėvų kopija, kituose mutacija vykdoma rekombinacijos metu, trečiuose – pirma atliekama rekombinacija, tuomet sukurti palikuonys mutuoja. Šiandien yra sukurta begalė skirtingų mutacijos operatorių (Back 1996, Back 1993, Bentley 2001), kuriuos visus apžvelgti neįmanoma ir nėra būtina. Mutacijos operacija leidžia tirti kitas sritis tyrimo objekto ribose remiantis genų pakeitimu, kitaip tariant, išlaikyti genetinę įvairovę (išvengti individų supanašėjimo, kas stipriai sulėtintų evoliuciją ar net visai ją sustabdytų). Mutacijos tikimybė naudojama apibrėžti mutavusių individų kiekį, kurie įtraukiami į sekančią populiaciją.

Pakeitimas

Pakeitimo proceso metu pasirenkami tie individai, kurie bus naujoje populiacijoje. Daugelyje GA išlaikomas vienodas populiacijos dydis, todėl vietoj kiekvieno naujo pasirinkto individo turi būti pašalintas senasis. Paprasčiausias būdas yra tiesiog ištrinti visus senus individus ir užpildyti populiaciją naujais. Pažangesni GA naudoja sudėtingesnę pakeitimo operatorių, kuriuo nustato, kurį

individą naujoje kartoje reikėtų pakeisti. Pakeitimas dažnai atliekamas pagal tinkamumo funkcijos vertę, o tai reiškia, kad mažiausiai tinkantis individas bus keičiamas labiau tinkamu. Kartais naudojamos tam tikros elitizmo schemos, kad naujojoje populiacijoje išliktų geriausi individai. Elitizmas ignoruoja įprastą atrankos mechanizmą, tačiau tai efektyvus papildomas procesas. Konstruojant naują populiaciją iš senosios leidžiama pereiti iš anksto nustatytam individų kiekiui visiškai nepakitus.

Naikinimas

Individų naikinimas grindžiamas keletu kriterijų ir yra dar viena sąlyga vykti evoliucijai. Nors pakeitimas yra palikuonio palyginimas su keistinu individu, naikinimo mechanizmas veikia vieninteliu keliu. Jei individas netenkina tam tikrų reikalavimų, jis tiesiog pašalinamas iš populiacijos, todėl šis operatorius naudojamas siekiant panaikinti tuos individus, kurie netenkina minimalių pradininių sąlygų. Jei kiekvienas individas, kuris netenkina pradininių sąlygų ištrinamas, pasiekiamas aukštas neigiamas atrankos lygis, gaunama tokia populiacija, kur kiekvienas individas tenkina reikalaujamus kriterijus. Šio metodo taikymas gan sudėtingas geriausio sprendinio paieškai dėl ypatingai sumažėjusios individų įvairovės, tad naudojamas ne visose GA atmainose.

Nutraukimas

GA evoliucija įprastai nutraukiama pasiekus tam tikrus kriterijus, kurie grindžiami sprendinio kokybe ir laiku. Pats paprasčiausias požiūris į kokybės kriterijų yra individo tinkamumo įvertinimas. Kiti nutraukimo kriterijai remiasi konvergavimo greičiu, pavyzdžiui, vertinamos visų individų genotipo, fenotipo, ar tinkamumo reikšmės ir, jei jos nebekinta keletą kartų, evoliucijos procesas nutraukiamas. Tuose algoritmuose, kuriuose naudojamos sudėtingos, ilgai skaičiuojamos tikslo funkcijos, pagrindinis nutraukimo kriterijus yra laikas. Evoliucijos procesas nutraukiamas po tam tikro populiacijų, individų skaičiaus arba praėjus nustatytam laikui.

Siekiant labiau įsigilinti į GA panaudojimo specifiką medžiagų tamprumo rodiklių identifikavime, toliau pateikiama GA naudojimo šioje srityje mokslinių darbų apžvalga. Joje aprašytos pagrindinės kliūtys, su kuriomis susiduriama norint tiksliai surasti medžiagų tamprumo rodiklius. Pateikiami siūlymai, kaip kylančias kliūtis apeiti.

1.4. Genetinių algoritmų taikymo medžiagų tamprumo rodiklių radimui darbų apžvalga

Disertacijoje siūlomas medžiagų tamprumo rodiklių radimo metodas apjungia vibracinius bandymus su skaitiniais metodais. Tikriniai dažniai ir atitinkamos modų formos gaunamos iš vibracinių bandymų, tamprumo rodikliai skaitmeniniame modelyje atnaujinami tol, kol spėjamos dinaminės savybės atitinka vibracinio bandymo rezultatus. Šiuo metodu gauti tamprumo rodikliai yra globalios struktūros savybės.

Kaip parodė ankstesnių tyrimų praktika pasaulyje, medžiagų tamprumo rodiklių paieškai buvo naudojami paprasti paieškos metodai, tokie kaip mažiausių kvadratų arba gradiento metodas, kuriais nebuvo pasiekiamas norimas medžiagų tamprumo rodiklių radimo tikslumas. Norint gauti tikslesnius ir patikimesnius rezultatus, būtina naudoti efektyvesnius paieškos metodus. Taigi, toks identifikavimo metodas, kuriame derinami eksperimento planavimo, funkcijos paviršiaus ir baigtinių elementų analizė, buvo panaudotas kompozitinių laminatų tamprumo rodiklių radimui (Ma 1999, Hwang 2006).

Maletta ir kt. (Maletta 2004) straipsnyje teigiama, kad GA neseniai sulaukė dėmesio optimizacijos problemų sprendimui (Mitchell 1999, Chambers 2000). Kiekvienas individas (chromosoma) populiacijoje yra vienas uždavinio sprendinys (konkrečiu atveju tamprumo rodikliai). Evoliucijos metu kuriant naują populiaciją atliekamos kryžminimo, mutacijos, atrankos ir elitizmo genetinės operacijos, individų atranka vykdoma naudojant stochastinės likutinės atrankos (angl. stochastic remainder sampling – SRS) tipo strategiją, kuri senojoje kartoje pakeičia tik tam tikrą individų skaičių naujais palikuonimis.

Skirtingai nuo gradientų metodo, GA nereikia užduoti tikslų pradinių paieškos srities ribų, o skaičiavimo metu paieška atliekama visoje paieškos erdvėje. Dėl šių priežasčių GA naudojami daugelio tyrinėtojų, aprašančių savo siūlomus tamprumo rodiklių radimo metodus (Balasubramaniam 1998, Cunha 1999, Liu 2002, Liu 2002). Cunha, Maletta, Hwang, Lee darbai aiškiai rodo GA potencialą medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimui (Cunha 1997, Lee 2006, Hwang 2006). Be to, tam tikri metodai gali padidinti GA efektyvumą – pavyzdžiui, Hwang naudoja hibridinių realių parametrų GA (RGA) optimizacijos uždavinių sprendimui. Autoriaus siūlomoje technologijoje mutacijos operacija papildoma savarankišku optimizacijos varikliu, parenkančiu tinkamiausią mutacijos tikimybę. RGA išvengiama parametrų kodavimo ir dekodavimo, taip sutaupoma skaičiavimo laiko (Hwang 2000, Hwang (spaudoje), Hwang 2006).

Cunha ir kt. (Cunha 1999), Liu ir kt. (Liu 2002) GA pasiūlytas kaip papildomas būdas, skirtas apytiksliam tamprumo rodiklių apskaičiavimui. Balasubramaniam ir kt. (Balasubramaniam 1998), Liu ir kt. (Liu 2002) savo straipsniuose aprašo panašias procedūras, leidžiančias laminuotų bandinių tamprumo

rodiklius surasti iš bandinių tikrinių dažnių. Šių autorių metodai skiriasi tuo, kad pirmasis naudoja tradicinius, o antrasis – kombinuotus GA.

Silva ir kt. (Silva 2004) darbe, kaip ir daugelyje panašių darbų, lyginami bandinio tikriniai dažniai ir jų analitinės išraiškos. Eksperimente naudojamos kompozitinės plokštelės, jų tikriniai ir analitiniai dažniai (analitiniai dažniai yra baigtinių elementų metodu gauti tikriniai dažniai). Straipsnyje aprašomoje technologijoje akcentuojamas GA pasirinkimas, norint išvengti „brangaus“ tikslo funkcijos gradientų skaičiavimo metodų.

Chakraborty ir kt. (Chakraborty 2002) ir Pagnotta ir kt. (Pagnotta 2006) straipsniuose aprašoma panaši metodika, kurioje kompozitinių plokštelių tamprumo rodikliai randami dviem pagrindiniais etapais: 1) sprendžiamas tiesioginis uždavinys, kurio metu atliekamas natūrinis arba BEM bandymas ir 2) atvirkštinis uždavinys – formuojama tikslo funkcija ir ji minimizuojama GA. Metodika nuo jau aprašytųjų skiriasi tik naudojamais bandiniais ir medžiagomis.

Straipsnio autoriai (Chakraborty 2002) tyrė izotropines ir kompozitines plokšteles (su standumo briaunomis), iš natūrinio bandymo gautų tikrinių dažnių surado šių medžiagų tamprumo rodiklius. Uždavinys suformuluotas kaip globalus tikslo funkcijos minimizavimas, kurioje yra apibrėžtas skirtumas tarp neslopinamų tikrinių dažnių ir skaitmeninio bandymo reikšmių.

Maletta ir kt. (Maletta 2004) straipsnyje pateikiamas metodas, kuriuo medžiagos tamprumo rodikliai surandami optimizuojant. Čia tikslo funkcijoje taip pat minimizuojamas skirtumas tarp natūriniu bandymu ir BEM gautų bandinio tikrinių dažnių. Šiame metode nekreipiamas dėmesys į modų formas ir jų vietą spektre, o dažniai imami tiesiog iš eilės. Šį darbą apžvelgsime plačiau.

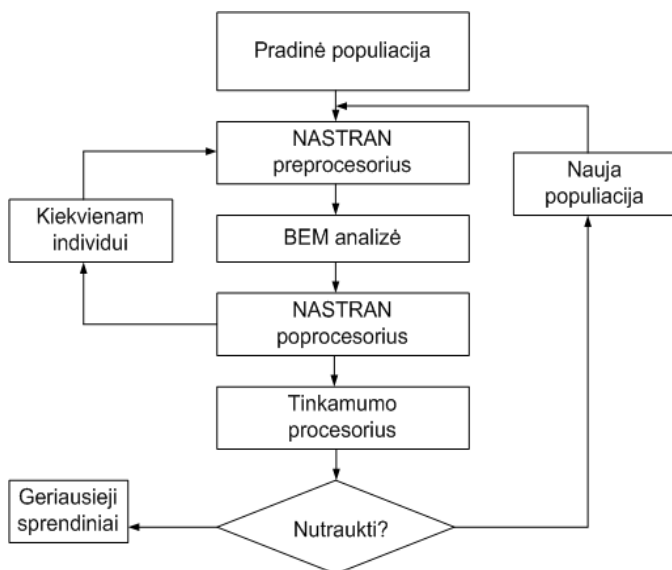
Maletta ir kt. darbe GA realizuotas MATLAB aplinkoje (1.10 pav.). Modaliųjų skaičiavimų atlikimui jame naudojamas bendros paskirties baigtinių elementų kodas MSC-NASTRAN. Šio darbo medžiagų tamprumo rodiklių radimo procedūra gauti rezultatai lyginami su žinomų medžiagų tamprumo rodikliais.

Maletta ir kt. darbe kryžminimo operacijos atlikimui naudojami du būdai. Pirmajame naudojamas aritmetinis kryžminimo operatoriaus tipas. Du tėvai pasirenkami praktiškai atsitiktinai (su labai maža tinkamumo funkcijos įtaka) ir iš jų sukuriama du nauji palikuonys. Antruoju būdu kryžminama atsitiktinai pasirenkant vieną ar daugiau pozicijų sprendinių vektoriuje ir juos sudalinus sukeičiamos dalys tarpusavyje ir taip toliau.

Optimizacijos pagreitinimui naudojama evoliucinė mutacija: šiuo atveju sukuriamas palikuonis ir vienas jo komponentas keičiamas pridėdant dydį $r\Delta i$ (kur $-1 < r < 1$ bet koks skaičius iš intervalo, o Δi yra pradinis fiksuotas skaičius). Kiekvieno mutacinio komponento pasirinkimas vykdomas atsitiktinai.

Straipsnyje aprašomo GA, kaip ir bet kurio kito, efektyvumas priklauso nuo šių parametrų: populiacijos dydžio, kartų skaičiaus, kryžminimo ir mutacijos

tikimybių. Šių parametrų reikšmės iš anksto yra nežinomos, kiekvienam uždaviniui yra skirtingos, todėl parenkamos remiantis algoritmo bandymais.



1.10 pav. Tamprumo rodiklių radimo technologija su GA (Maletta 2004)

Fig. 1.10. Identification technology of elastic characteristics using GA (Maletta 2004)

Maletta ir kt. teigia, kad didelė populiacija užtikrina didesnę variantiškumą, taigi, paieška yra globalesnė. Optimizuojant GA galimos mažos populiacijos, tačiau jos sąlygoja pirmalaikį arba pernelyg lėtą konvergavimą dėl didelės tikimybės sukonverguoti į lokalią minimumą. Kita vertus, jei populiacija per didelė, atlikti skaičiavimus su visais jos individais reikia gerokai daugiau laiko, o tai mažina skaičiavimo spartą. Remiantis šiais teiginiais autoriai daro išvadą, kad geriausias populiacijos dydis yra tarp 60 ir 92 individų, jei turimi atitinkamai keturi arba penki nežinomieji (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Maletta ir kt. pasiūlytos GA parametrų reikšmės

Table 1.1. Maletta et. al. proposed values of GA parameters

Populiacijos dydis	60–92
Chromosomos ilgis	4–5
Atrankos strategija	Nuoseklus (angl. steady state)
Kryžminimo tikimybė	0,7
Mutacijos tikimybė	0,17–0,24

Poskyrio reziumė

Atlikus GA taikymo medžiagų tamprumo rodiklių radimui darbų apžvalgą galima teigti, kad bandiniai tiriami neardančiais bandymais, vienu ar kitu būdu gaunami tikriniai dažniai, tikslo funkcijoje minimizuojami skirtumai tarp fizinio ir skaitmeninio bandymų.

Skirtingi autoriai naudoja vienokius ar kitokius genetinius įrankius ar jų kombinacijas, tačiau geriausią derinį išskirti būtų sudėtinga. Kiekvienam medžiagų tamprumo rodiklių radimo uždaviniui genetiniai įrankiai turėtų būti parenkami individualiai, atsižvelgiant į uždavinio ypatumus.

Genetiniai parametrai, tokie kaip populiacijos dydis, kartų skaičius, kryžminimo ir mutacijos tikimybių reikšmės, kiekvienam uždaviniui skiriasi, todėl dažnai parenkami remiantis algoritmo veikimo bandymais. Kol kas nėra apibrėžta palankiausių genetinių operatorių reikšmių, todėl kiekvienam medžiagų tamprumo rodiklių radimo uždaviniui jos turi būti randamos bandymų keliu. Tarpautinėje praktikoje yra nusistovėjusios rekomenduojamos reikšmės⁷.

Pasiūlytai technologijai patikrinti bus atliekami bandymai su izotropinėmis medžiagomis, o gautieji rezultatai lyginami su publikuotais mokslinėje spaudoje ir su praktikoje apčiuoto EP metodo skaičiavimų duomenimis.

Įsitikinus, kad sukurtą technologiją gaunami korektiški rezultatai, toliau bandymai bus atliekami su vienasluksnėmis (izotropinėmis ir vienakryptėmis) ir daugiasluksnėmis (vienakryptėmis ir skersai armuotomis) medžiagomis, o rezultatai lyginami su pasaulinėje praktikoje gautaisiais.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir apibendrinimai

1. Pagrindinis neišspręstas medžiagų tamprumo rodiklių paieškos uždavinys – nesurastas universalus metodas, be esminių pakeitimų tinkantis daugelio medžiagų tamprumo rodiklių paieškai. Jungo moduliai randami pakankamai tiksliai, tačiau likę tamprumo rodikliai randami nepakankamu tikslumu. Tai lemia procese naudojami bandiniai, tiksliau jų dydis, forma ir kitos geometrinės charakteristikos. Pasaulyje atliekami tyrimai siekiant surasti optimalius bandinius. Remiantis pasauline praktika, disertacijoje pateikiami optimalių bandinių bendri bruožai ir jų radimo technologija.

2. Iškeltam medžiagų tamprumo rodiklių paieškos uždaviniui spręsti iš apžvelgtų stochastinių algoritmų gausos pasirenkami GA, nes:

- nebūtinės griežtos pradinės paieškos ribos;
- sprendinys ieškomas iškart visoje paieškos erdvėje;
- nesunkiai pritaikomas konkrečių uždavinių sprendimui;

⁷ Žr. Bandymų aprašymus.

- galima papildyti kitais optimizavimo algoritmais.

Deterministiniai algoritmai atmetami dėl nežinomų tikslo funkcijos gradientų, kitaip tariant, skaitmeniškai skaičiuoti išvestines pernelyg brangus procesas.

3. Sprendžiant optimizavimo uždavinius GA iškyla svarbus klausimas, kaip tinkamai nustatyti genetinius parametrus – kartų skaičių, kryžminimo ir mutacijos tikimybių reikšmes, todėl šie parametrai parenkami remiantis algoritmo veikimo bandymais. Disertacijoje iškeltam uždaviniui spręsti genetiniai parametrai parenkami bandymų keliu ir atsižvelgiant į pasaulinę praktiką.

Medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo technologija

Pirmojoje skyriaus dalyje pateikiama bandinių tikrinių dažnių gavimo procedūra. Turint fizinio ir skaitmeninio bandinių tikrinius dažnius, randami medžiagų tamprumo rodikliai. Jiems identifikuoti suformuluojamas uždavinys, pasiūloma medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologija.

Antroje skyriaus dalyje trumpai supažindinama su technologijos bandymui naudotų bandinių matematiniais modeliais, nurodoma keliais nepriklausomais tamprumo rodikliais apibūdinama medžiaga, pateikiamos jų tamprumo matricos.

Trečiojoje skyriaus dalyje pateikiami skaitiniai pavyzdžiai, kuriais buvo išbandyta sukurtoji technologija. Bandymai atlikti su vienasluoksnėmis (izotropinėmis ir vienakryptėmis) ir sluoksniuotomis (vienakryptėmis ir statmenai armuotomis) medžiagomis.

Skyriaus tematika paskelbtos trys autoriaus publikacijos (Belevičius ir kt. (2005), Ragauskas ir kt. (2007), Šešok ir kt. (2007)) ir perskaityti du pranešimai konferencijose.

2.1. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo procedūra

Medžiagų tamprumo rodikliai randami dviem pagrindiniais etapais. Pirmasis etapas yra natūrinis bandymas, kurio metu surandami medžiagos bandinio tikriniai dažniai. Antrajame etape sugretinami skaitinio bandinio tikriniai dažniai, gauti su rastaisiais tamprumo rodikliais, ir natūrinio bandymo rezultatai. Minimizuojami nesąryšiai tikslo funkcijoje. Pirmasis etapas, yra vienodas visų medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologijoje. Antrajame etape nuo sprendžiamo uždavinio priklauso ieškomų dydžių ir naudojamų tikrinių dažnių kiekis. Optimizavimo procedūroje kintamieji yra tik genetiniai parametrai – algoritmas nuo uždavinio nepriklauso.

Sukurtas medžiagų tamprumo rodiklių radimo programinis įrankis skirtas stačiakampių plokštelių bandinių tyrimui. Jo pagalba įmanoma surasti izotropinės, vienakryptės, ir kompozitinės sluoksniuotos medžiagos tamprumo rodiklius. Vartotojui tereikia atlikti natūrinį bandymą, kurio rezultatai (bandinio tikriniai dažniai) pateikiami programai tekstinėje rinkmenoje. Programa, valdoma atskiru pultu, suskaičiuoja tiriamos medžiagos tamprumo rodiklius naudodama ANSYS baigtinių elementų programą ir GA.

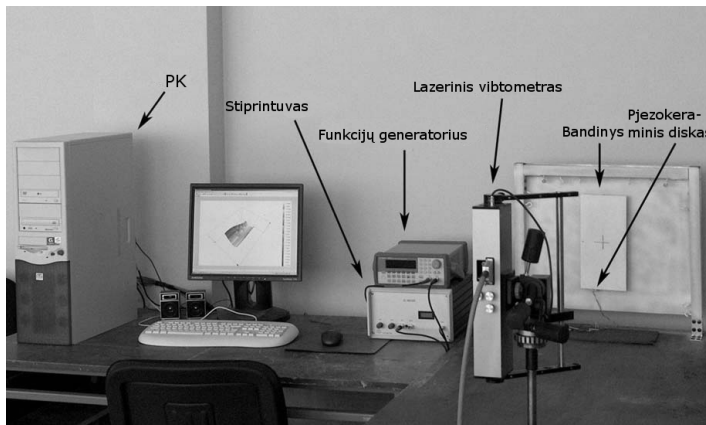
ANSYS paketas turi vidinę kalbą APDL, skirtą automatizuoti užduotis programiniam paketui arba sukurti tam tikrą matematinį modelį su reikiama tamprumo rodikliais. Tam, kad kiekviename GA veikimo žingsnyje nereikėtų rankiniu būdu keisti matematinio modelio, šia kalba patogiau automatizuoti BEM modelio sudarymą. APDL kalba taip pat galima sudaryti ciklus, makro funkcijas, atlikti logines ir skaliarines bei vektorines operacijas.

Bandymo įranga

Priverstinai mechaniškai žadinamų bandinių (plokštelių) tikriniams dažniams matuoti disertacijoje atliktų tyrimų metu buvo naudojami du įrenginiai: „ISI SYS“ lazerinis vibrometras (2.1 pav.) ir „Polytec“ (2.2 pav.) įranga. Skirtingi įrenginiai naudoti siekiant užtikrinti gautų rezultatų patikimumą.

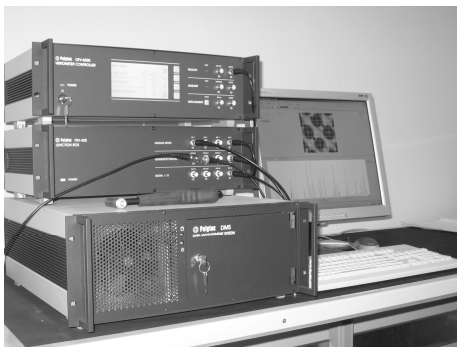
„ISI SYS“ lazerinio vibrometro (2.1 pav.) veikimo principas paremtas poslinkių plokštumoje skaičiavimu. Vienas stambus lazerio spindulys atsispindi nuo bandinio į CCD kamerą (angl. charge-coupled device), kurioje sugretinami du atskiri bandinio paviršiaus taškų atvaizdai. Taip gaunamas paviršiaus formos taškinis atvaizdas. Deformuojant bandinį taškinis atvaizdas keičiasi. Kuomet sugretinami du taškiniai atvaizdai (paveiktas įtempimų ir ne), gaunamas atvaizdas, kuriame aiškiai matyti dviejų gretimų taškų poslinkiai. Kadangi pasiekiamos deformacijos pakankamai mažos, taškinis atvaizdas rodo pirmąją poslinkio išvestinę, atitinkamai pagal šlyties kryptį, kuri gali būti plokštumoje arba statmena jai. Taip gaunamas pakankamai aiškus, ryškus bandinio deformacijų atvaizdas. Bandymai atliekami bandiniams taikant kiek įmanoma laisvesnes kraš-

tines sąlygas, t. y. laisvai pakabinant ant dviejų stygų; taip išvengiama kraštinių sąlygų įtakos medžiagų tamprumo rodiklių radimui.



2.1 pav. „ISI SYS“ įranga
Fig. 2.1. „ISI SYS“ equipment

„Polytec“ lazerinis Doplerio vibrometras (2.2 pav.) naudojamas tiksliai matuoti mechaninius virpesius.



a)



b)

2.2 pav. „Polytec“ įranga: a – įrangos moduliai,
b – skenuojanti galvutė ir bandinys
Fig. 2.2. "Polytec" equipment: a – hardware modules,
b – scanning head and the sample

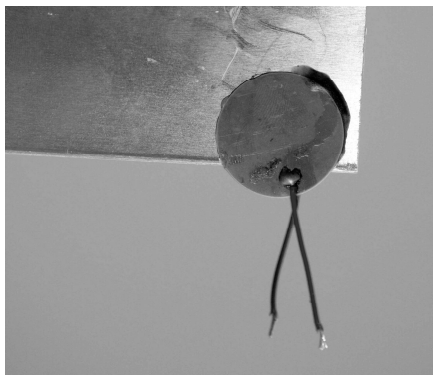
Šio vibrometro veikimas pagrįstas Doplerio efektu⁸, t. y. nustatomas bandinio taško momentinis greitis ir poslinkis matuojant dažnio pokytį pagal atsispindėjusį nuo vibruojančio paviršiaus lazerio spindulį.

Lazerinis Doplerio vibrometras dirba kaip lazerinis interferometras. Tam tikro dažnio lazerio spindulių pluoštas atsispindi nuo vibruojančio objekto ir keliauja atgal į jutiklį. Atsispindėjusi šviesa išskaidoma ir transformuojama į dažnį. Šis dažnių pokytis proporcingas vibruojančio objekto vibracijos dažniui.

Tam, kad būtų įmanoma atskirti judėjimą link ir nuo jutiklio, papildomai pridedamas dažnis f_b , todėl detektoriaus užfiksuojamas dažnis yra $f = f_b + f_D$, kur ženklas priklauso nuo objekto judėjimo krypties (čia f_D yra bangos dažnio ir ilgio kitimas). Dažnis f tiesiogiai susijęs su vibracijos greičiu $f = f_b + 2v/\lambda$, kur λ yra helio-neono (HeNe) lazerio bangos ilgis. Skirtingai nuo kitų lazerių, kurie yra jautrūs aplinkos sąlygoms, HeNe lazerio bangos ilgis yra stabili fizikinė konstanta (0,6328 mkm), todėl lazerinio interferometro nereikia kalibruoti.

Bandymo eiga

Bandiniai pakabinami laikant už dviejų kampų ant plonų stygų, imituojančių laisvas kraštines sąlygas visose bandinio kraštinėse. Bandinys sužadinamas pjezokeraminiu disku (2.3 pav.), pritvirtintu prie bandinio krašto. Jis veikia keisdamas savo storį, tokiu būdu sukurdamas lenkimo momentą bandinio paviršiuje. Diskas sujungtas su stiprintuvu ir dažnių generatoriumi.

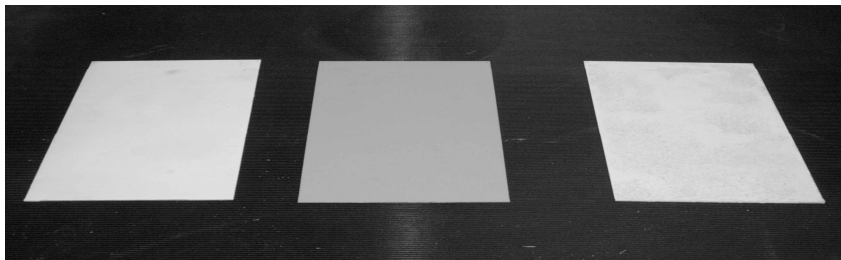


2.3 pav. Prie bandinio priklijuotas pjezokeraminis sužadinimo diskas

Fig. 2.3. Piezoceramic disc, bonded to specimen

⁸ *Doplerio efektas* – bangos dažnio ir ilgio kitimas, pasireiškia imtuvui arba šaltiniui judant vienas kito atžvilgiu.

Siekiant tikslesnių rezultatų, bandiniai nudažomi balta ar kita šviesia spalva (2.4 pav.).



2.4 pav. Nudažyti bandiniai

Fig. 2.4. Painted specimens

Bandinys nuolat žadinamas ir lazeriu matuojama jo paviršiaus reakcija, tuomet bandymo rezultatai lyginami su tikrinių dažnių reikšmėmis, kurios su-
skaičiuojamos BEM naudojant apytikslius medžiagos tamprumo rodiklius.

Išankstiniu palyginimu užtikrinama, kad bandymo metu gautieji dažniai tei-
singai surasti. Ne visus dažnius įmanoma gauti vieno bandymo metu, todėl daž-
niai surikiuojami tokia tvarka, kaip gautieji skaitmeniniu būdu. Kaip pavyzdį
galima pateikti trijų skirtingų medžiagų tikrinių dažnių lentelę, kurioje matyti,
kad dažniai, surasti natūriniu bandymu (NB) ne visiškai sutampa su skaitmeni-
nio bandymo rezultatais (2.1 lentelė). Tolesniems darbams imami tik pilkai pa-
žymėti dažniai. Pastebėtina, kad kuo sudėtingesnė medžiaga, tuo labiau pasireiš-
kia tikrinių dažnių neatitikimai. Lentelėje pateikti duomenys iš Baltijos-Taivaniai
partnerystės programos projekto LTLC.

2.1 lentelė. Tikrinių dažnių patikrinimas pagal skaitmeninį modelį

Table 2.1. Verified eigenfrequencies with numerical model data

Moda	Izotropinis bandinys			Vienakryptis daugia- sluoksnis bandinys			Statmenai armuotas bandinys		
	NB	BEM	Δ , %	NB	BEM	Δ , %	NB	BEM	Δ , %
1	97	97,14	-0,144	98	98	0,000	164	164	0,0
2	123,8	124,2	-0,323	127	126,9	0,079	257	268,5	4,5
3	237,4	234,4	1,264	238	236,9	0,462	326	322,4	1,1
4	341	342,2	-0,352	350	349,5	0,143	421	433,4	2,9
5	458	454	0,873	458	460	-0,437	453	449,6	0,8
6	502,6	502,6	0,000	496	496,1	-0,020		786,1	
7	541,2	539,4	0,333	533	533,3	-0,056	797	791,7	0,7

2.1 lentelės tęsinys

8	653	650	0,459	649	648,4	0,092	848	847,4	0,1
9							904	899,4	0,5
10							1021	1003	1,8
11				858	857,2	0,093	1325	1309	1,2
12								1343	
13	1168	1167	0,086				1530	1529	0,1
14								1661	
15	1381	1377	0,290	1355	1359	-0,295	1692	1668	1,4
16	1413	1408	0,354	1391	1390	0,072	1810	1777	1,8
17	1512	1503	0,595	1487	1487	0,000	1878	1906	1,5
18								2040	
19							2175	2162	0,6
20							2534	2529	0,2
21								2636	
22							2652	2658	0,2
23							2726	2718	0,3
24							2758	2744	0,7
25							2892	2851	1,4
26								3041	
27								3198	
28							3482	3506	0,7
29								3647	
30								3763	
31							3782	3799	0,4
32								3881	
33								4054	
34								4154	
35							4320	4259	1,4

Medžiagų tamprumo rodiklių radimo modelis

Medžiagos baigtinių elementų modelis keičiamas įstatant spėjamas tamprumo rodiklių reikšmes tol, kol reikiamu tikslumu sutampa jo ir natūrinio bandinio tikriniai dažniai. Jei dažnių skirtumas tenkina užsibrėžtus reikalavimus, laikoma, kad skaitmeninio bandinio medžiagos tamprumo rodikliai atitinka fizinio bandinio rodiklius. Čia reikia paminėti, kad, jei medžiaga sluoksniuota, surandami apibendrinti medžiagos tamprumo rodikliai, o ne kiekvieno sluoksnio atskirai. Bandinio sluoksniai aprašomi matematiniam medžiagos modelyje.

Klasikinė baigtinių elementų metodų lygtis tikrinėms reikšmėms skaičiuoti:

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0, \quad (2.1)$$

čia $[K]$ yra struktūros standumo matrica, $[M]$ – masių matrica, o ω – tikriniai dažniai.

Bandyme naudojamo bandinio duomenys skirstomi į išmatuojamas ir su-
skaiciuojamas savybes, t. y. tamprumo rodiklius. Identifikavimo uždavinio
sprendinys gaunamas iš pamatuotų modelio nepriklausomų parametrų. Šie pa-
rametrai yra bandinio ilgis, plotis, storis, ortotropijos kampas ir dažniai. Kinta-
mieji surašomi į vektorių x :

$$x = \{a, b, h, \gamma, f_i\}^T, \quad (2.2)$$

čia: a – bandinio ilgis, b – plotis, h – storis. Medžiagos tankis ρ apibrėžiamas ne
kaip kintamasis, bet kaip skaitmeninė konstanta.

Standumo matrica yra tamprumo modulių E , šlyties modulių G ir Puasono
koeficientų ν funkcija (tamprumo rodiklių skaičius priklauso nuo medžiagos).
Pavyzdžiui, jeigu tiriama izotropinė medžiaga, tuomet medžiagą aprašyti pakan-
ka tik E ir ν tamprumo rodikliais; ortotropinė medžiaga aprašoma devyniais
nepriklausomais tamprumo rodikliais:

$$[K] = f(E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, E_3, G_{13}, G_{23}). \quad (2.3)$$

Atliekant bandymą (natūrinį arba skaitmeninį) gaunamas visas tikrinių
reikšmių spektras arba pakankama jo dalis. Kokia spektro dalis pakankama ti-
riant medžiagos savybes – nustatoma skaitmeniniais eksperimentais. Bandinio
tikrinių dažnių lygtis užrašoma taip:

$$f_i(x, [K]), i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.4)$$

čia n – tikrinių reikšmių spektro dalis, surasta skaitiniais eksperimentais.

Toliau minimizuojami nesąryšiai tarp natūrinio bandinio ir skaitmeninio
modelio tikrinių dažnių:

$$\min F = F(x, [K]). \quad (2.5)$$

Siekiant efektyvesnio uždavinio sprendimo jam taikomi apribojimai – k :

$$k_i^{\min} \leq k_i \leq k_i^{\max}, \text{ kur } i = 1, 2, \dots, 9. \quad (2.6)$$

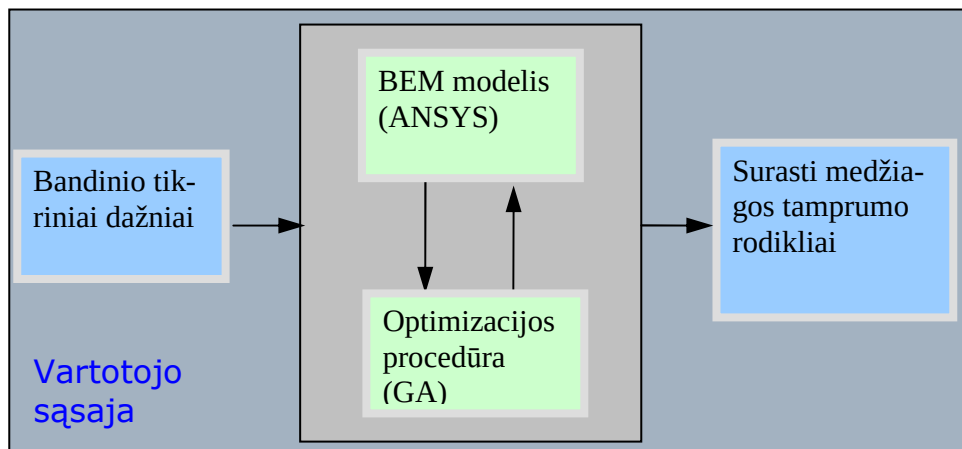
Medžiagų tamprumo rodiklių radimo uždavinio tikslo funkcija:

$$F(K) = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^{BEM} - f_i^{NB})^2}{(f_i^{NB})^2}. \quad (2.7)$$

Nuokrypių kvadratai tikslo funkcijoje imami tam, kad reikšmė visada būtų
teigiama. Uždavinio būvio kintamaisiais pasirenkami tikriniai dažniai, o projek-
tavimo kintamieji yra medžiagos tamprumo rodikliai.

Medžiagų tamprumo rodiklių radimo procedūra

Medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologija sudaryta iš trijų pagrindinių dalių. Pagrindinė dalis yra siūloma technologija (2.5 pav.), kuri sudaryta iš BEM bloko ir optimizacijos procedūros. Šie elementai dalyvauja bandinio geometrijos optimizavimo ir medžiagų tamprumo rodiklių radimo procesuose. Vartotojo sąsaja⁹ leidžia šią technologiją patogiai valdyti. Bandinio tikriniai dažniai yra pradiniai duomenys, o surasti medžiagos tamprumo rodikliai, t. y. sprendžiamo uždavinio rezultatas – galutiniai, pateikiami per vartotojo sąsają. Pasiūnaujant šia technologija iš bandinio tikrinių dažnių spektro surandamos medžiagos apibendrintos savybės, t. y. tamprumo moduliai E_i , šlyties moduliai G_{ij} ir Puasono koeficientai ν_{ij} .



2.5 pav. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologija

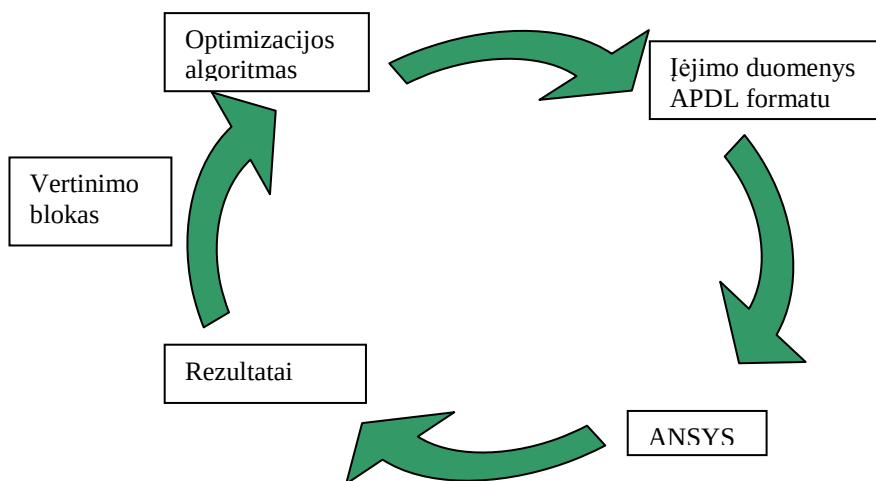
Fig. 2.5. Identification technology of elastic characteristics of materials

Optimizavimo ciklą sudaro penkios dalys (2.6 pav.): optimizavimo algoritmas, modeliavimas BEM (ANSYS paketu), nesąryšių vertinimas, tikrinimas, ar baigtų ciklą, ir rezultatų išvedimas.

Ciklas pradedamas optimizavimo algoritmu, teikiančiu pradinį medžiagos savybių spėjimą. Optimizavimo uždavinys sprendžiamas globalaus optimizavimo algoritmu – GA¹⁰. Toliau ANSYS paketu skaičiuojamas tikrinių reikšmių uždavinys, o gautas tikrinių dažnių spektras išsaugomas tekstinėje rinkmenoje.

⁹ Apie vartotojo sąsają žr. 5-ajame skyriuje.

¹⁰ Apie GA ir jų pasirinkimo motyvą žr. 1.2 poskyryje.



2.6 pav. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo ciklo schema

Fig. 2.6. Cycle of identification of elastic characteristics of materials

Nesąryšių vertinimo blokas įvertina, kiek skiriasi eksperimentiniai ir apskaičiuoti dažniai (sukaupiant visus nesąryšius į tikslo funkciją). Toliau, jei nesąryšiai netenkina užduoto tikslumo (kitais tarant, tikslo funkcijos vertė yra per didelė), ciklas kartojamas iš naujo.

2.2. Kai kurių medžiagų matematiniai modeliai

Kūne, veikiant išoriniam poveikiui (apkrovai), atsiranda vidinių jėgų – įtempimų. Įtempimai yra atskirų pjūviais padalintų kūno dalių tarpusavio sąveikos rezultatas ir dažniausiai siejami su medžiagų elgesio dėsniu, apibrėžiančiu jos mechanines savybes. Šie dėsniai išvesti atliekant praktinius stebėjimus bandymų metu. Deformuojamo kūno geometrinius pokyčius apibūdina poslinkiai ir deformacijos. Veikiamas išorinių jėgų, kūnas deformuojasi ir jo taškai pasislenka vienas kito atžvilgiu. Poslinkiai ir deformacijos surašomi į tamprumo matricą.

Tamprumo matrica

Fiziškai tiesiško kūno įtempimų ir deformacijų ryšys, kitaip – Huko dėsnis, išreiškiamas taip:

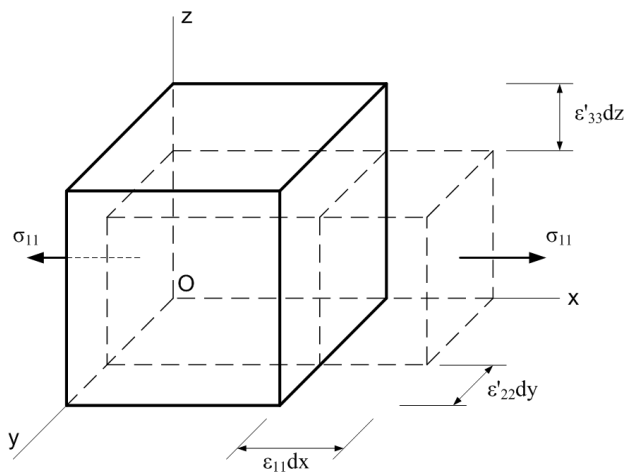
$$\{\varepsilon\} = [C]\{\sigma\}, \quad (2.8)$$

arba detalizuota forma:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Šis deformacijų ryšys tenkinamas tokiu atveju, jei nepasireiškia plastinės deformacijos, deformacijos be galo mažos ir deformavimo procesas yra izotermis. Šios sąlygos leidžia taikyti nepriklausomų jėgų veikimo principą – tiesinio įtempimo būvio bei grynosios šlyties sampratą, kuomet nustatoma trimačio kūno deformacija pasirinktąja kryptimi.

Kaip pavyzdį imkime idealiai tamprų izotropinį kūną, kurio tamprumo savybės apibūdinamos tik dviem nepriklausomomis konstantomis: arba E ir G , arba G ir ν , arba E ir ν . Jos nepriklauso nuo kūno taško koordinatinių ir nuo pasirinktos koordinatinių sistemos. Tokiu atveju 2.8 lygtis tampa gana paprasta. Tarkime, kad veikia tik vienas normalinis įtempimas σ_{11} ir koeficientai $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{i6}$ yra žinomi, o visi kiti įtempimai lygūs nuliui (2.7 pav.). Jei idealus stačiakampis gretasienis tempiamas X ašies kryptimi, jo deformacija būtų: $\varepsilon_{11} = \sigma_{11}/E$.



2.7 pav. Idealiai tampraus kūno deformacijos

Fig. 2.7. Deformations of perfectly elastic body

Skersinė deformacija pasireiškia tempiamo strypo skersinių matmenų santykinu pokyčiu. Jo kryptis yra priešinga nei dx :

$$\varepsilon'_{22} = \varepsilon'_{33} = -\nu \varepsilon_{11} = -\frac{\nu}{E} \sigma_{11}.$$

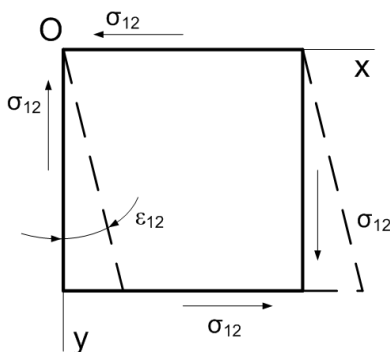
Puasono koeficientas – bematis mechaninis medžiagos rodiklis, konstrukcinio elemento tempiamų arba gniuždomų sluoksnių skersinės deformacijos santykio su išilgine deformacija modulis. Medžiagai Puasono koeficientas išlieka pastovus, kol deformacijos yra proporcingos įtempimams. Veikiant tik vienam įtempimui σ_{11} , vienalytės izotropinės medžiagos elementariojo gretasienio pradiniai statieji kampai tarp sienų briaunų nesikeičia, todėl deformacijos ε_{12} , ε_{13} ir ε_{23} yra lygios nuliui. Tokiu atveju tamprumo matricos koeficientai yra tokie:

$$C_{11} = \frac{1}{E}, C_{21} = C_{31} = -\frac{\nu}{E}, C_{41} = C_{51} = C_{61} = 0.$$

Analogiškai, veikiant tik σ_{22} arba σ_{33} įtempimams gaunama:

$$C_{22} = C_{33} = \frac{1}{E}, C_{12} = C_{13} = -\frac{\nu}{E}, C_{42} = C_{52} = C_{62} = C_{43} = C_{53} = C_{63} = 0.$$

Jei elementarusis gretasienis būtų veikiamas tik tangentinėmis įtempimėmis σ_{12} , veiktų grynoji šlytis plokštumoje Oxy (2.8 pav.).



2.8 pav. Idealiai tampraus kūno šlytis
Fig. 2.8. Shear of perfectly elastic body

Kampinė deformacija Oxy plokštumoje yra $\varepsilon_{12} = \sigma_{12}/G$. Veikiant σ_{12} įtempimui, kitose koordinačių plokštumose kampai nepasikeis, t. y. $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{23} = 0$, o linijinės deformacijos lygios nuliui:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_{12} = \varepsilon_{23} = 0.$$

Kuomet veikia tik vienas tangentinis įtempimas σ_{12} , o kiti lygūs nuliui, tamprumo matricos koeficientai yra:

$$C_{44} = \frac{1}{G}, \quad C_{14} = C_{24} = C_{34} = C_{54} = C_{64} = 0.$$

Kartu veikiant visiems įtempimams $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ gaunama:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] & \varepsilon_{12} = \frac{1}{G} \sigma_{12} \\ \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] & \varepsilon_{13} = \frac{1}{G} \sigma_{13} \\ \varepsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})] & \varepsilon_{23} = \frac{1}{G} \sigma_{23} \end{cases} \quad (2.10)$$

Medžiagos mechaninės savybės (tamprumo rodikliai) G , E ir ν yra susieti iš medžiagų mechanikos žinoma priklausomybe:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (2.11)$$

Atvirkštinis Huko dėsnis

Atvirkštinis Huko dėsnis gaunamas išreiškus įtempimus deformacijomis. Panaudojant pasiduodamumo matricą $[D]$, atvirkštinis Huko dėsnis matricine forma užrašoma taip:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Arba sutrumpinta forma:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}. \quad (2.13)$$

Grįžtant prie anksčiau minėto pavyzdžio su izotropine medžiaga, jos pasiduodamumo matrica būtų užrašoma taip:

$$D = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Toliau aprašomi darbe tirtų medžiagų matematiniai modeliai, pateikiami jų įtempimų ir deformacijų ryšiai.

2.2.1. Vienasluoksnės medžiagos

Izotropinės

Medžiaga laikoma izotropine, kuomet nepriklausomai nuo pasirinktos koordinatinių sistemos, jos savybės išlieka vienodos visomis kryptimis (tai inžinerinėje praktikoje plačiausiai taikomos medžiagos, tenkinančios šį apibrėžimą, išskyrus medieną). Dažniausiai tokia medžiaga aprašoma dviem tamprumo rodikliais: E ir G arba E ir ν . Dėl tokių izotropinės medžiagos savybių tamprumo matrica visomis kryptimis vienoda, nepriklausomai nuo pagrindinių ašių krypčių:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

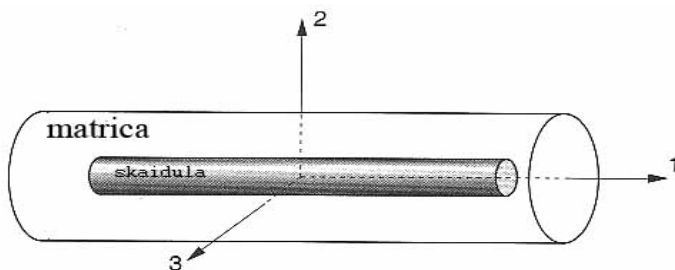
Izotropinės medžiagos savybės yprastai nusakomos dviem nepriklausomais tamprumo rodikliais: E, ν_{12} , jos tamprumo matrica yra tokia:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Siūloma technologija patikrinta su izotropine medžiaga, aliuminio lydinio, mechaninėmis savybėmis artimu AL9B (žiūrėti skaitinį pavyzdį Nr. 1).

Vienakryptės

Vienakryptė medžiaga – tai kompozitinė medžiaga sudaryta iš ne mažiau kaip dviejų skirtingų medžiagų, kurių tam tikros savybės yra geresnės nei kiekvienos medžiagos paėmus atskirai. Kompozitinės medžiagos gaunamos armuojant izotropinę medžiagą. Elementari vienakrypčio kompozito dalelė gali būti laikoma, kad yra sudaryta iš vienos skaidulos ir cilindrinio užpildo (2.9 pav.). Armuojanti medžiaga vadinama skaidula, o užpildas matrica (rišančioji medžiaga), užpildanti tūrį tarp armatūros – sustiprinančio komponento.



2.9 pav. Elementari vienakrypčio kompozito dalelė

Fig. 2.9. Particle of unidirectional composite material

Vienakryptės medžiagos savybės yra tokios pat, kaip ortotropinės medžiagos, turinčios vieną išilginę simetrijos ašį (sukinys). Tokiu atveju medžiaga vadinama skersai izotropine. Tai reiškia, kad jei pasikeičia pagrindinių ašių kryptis medžiagoje, skaidulų kryptimi tamprumo (arba pasiduodamumo) matrica turi nekisti, dėl to galioja tokios priklausomybės:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

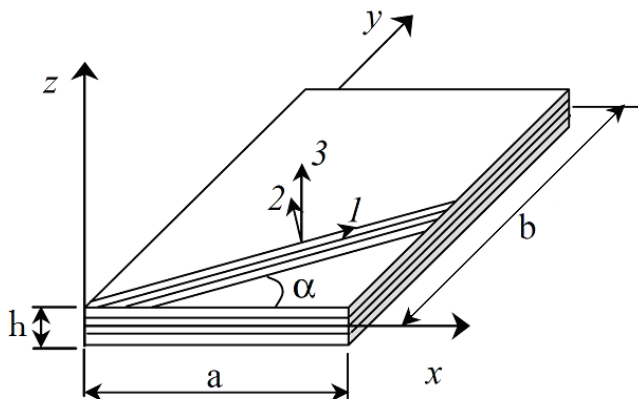
Vienakryptės medžiagos savybės nusakomos šešiais nepriklausomais tamprumo rodikliais ($E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12} = G_{13}, G_{23}$), jos tamprumo matrica:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Siūloma technologija patikrinta su vienakrypte medžiaga. Pasirinktos dvi panašios medžiagos – stiklo ir anglies pluoštai (žiūrėti skaitinį pavyzdį Nr. 2).

2.2.2. Sluoksniuotos medžiagos

Sluoksniuotos kompozitinės medžiagos sudarytos iš ne mažiau dviejų greta esančių armuojančių sluoksnių, suklijuotų tarpusavyje. Skersai armuotos medžiagos, kurių visi sluoksniai vienodo storio, vadinamos taisyklingomis skersai armuotomis medžiagomis. Medžiaga aprašoma sluoksnių skaičiumi, jų pasukimo kampu θ ir sluoksnio storiu (arba bandinio storiu). Tokiose medžiagose nėra ryšio tarp tempimo ir lenkimo, taip pat šie dydžiai nepriklauso ir nuo sluoksnių skaičiaus.



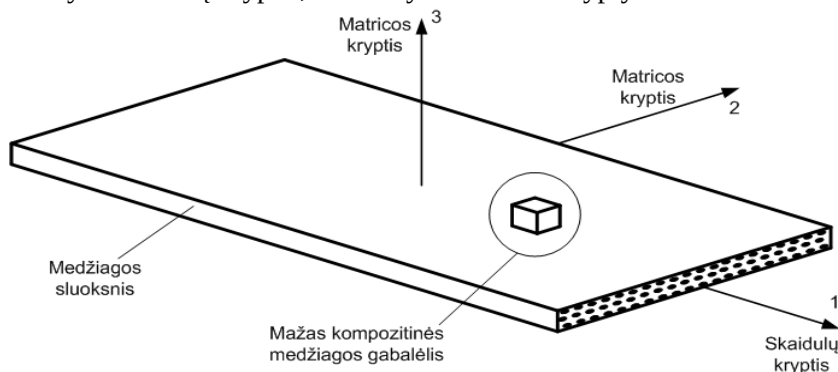
2.10 pav. Medžiagos sluoksniai

Fig. 2.10. Layers of material

Matematiškai aprašant sluoksniuotas medžiagas patogiu naudoti stačiakampę koordinačių sistemą $[xyz]$ (2.10 pav.), kurios x ašis nukreipiama išilgai bandinio kraštinės, y – bandinio plokštumoje statmenai x ašiai, o z ašis – statmenai bandi-

nio plokštumai. Sluoksnių koordinačių sistema sutapdinta su sluoksnių kryptimi [123].

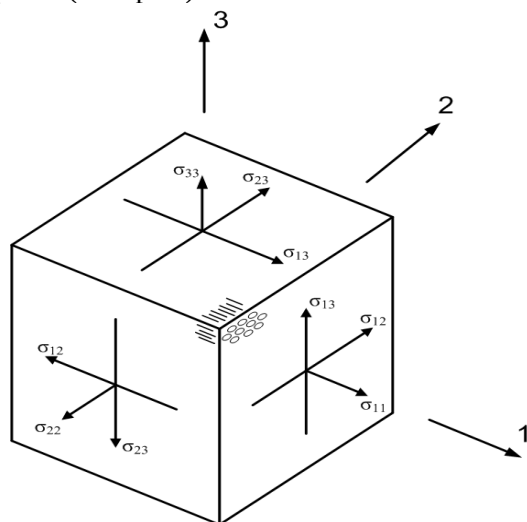
Pavaizduotas medžiagos modelis ir jo pagrindinė bei sluoksnių koordinačių sistemos (2.11 pav.). Pirmoji ašis sutapatinta su sluoksnių (skaidulų) kryptimi, antroji yra sluoksniu plokštumoje, statmenai skaiduloms, o trečioji – statmena sluoksnių plokštumai ir nukreipiama taip, kad koordinačių sistema būtų dešini-nė. 1 ašis yra skaidulų kryptis, o 2 ir 3 yra matricos kryptys.



2.11 pav. Medžiagos pagrindinė koordinačių sistema

Fig. 2.11. Main coordinate system of material

Mažame, skaidulomis sustiprintame medžiagos elemente šešiomis kryptimis veikia tokie įtempimai (2.12 pav.).



2.12 pav. Įtempimai mažame skaidulomis sustiprintame elemente

Fig. 2.12. Stresses in fiber reinforced small cell

Šis mažas medžiagos gabalėlis yra paimtas iš 2.11 paveikslėlio plokštelės. Normaliniai įtempimai, veikiantys 1 ašies kryptimi žymimi σ_{11} . Šlyties įtempimai veikiantys 1–2 plokštumoje žymimi σ_{12} , o šlyties įtempimai 1–3 plokštumoje – σ_{13} . Atitinkamai žymimi ir kitose dviejose plokštumose veikiantys normaliniai ir šlyties įtempimai.

Visi ryšiai tarp įtempimų ir deformacijų aprašomi taip:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Sluoksniuotos medžiagos mechaninės savybės nusakomos devyniais nepriklausomais tamprumo rodikliais: $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$. Tamprumo matrica per tamprumo rodiklius išreiškiama 2.20 priklausomybe.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{-\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Vienakryptės

Jei medžiagos sluoksnių pagrindinės ortotropijos kryptys sutampa, tokia medžiaga vadinama vienakrypte. Bendru atveju sluoksniuotos, iš vienakrypčių sluoksnių sudarytos medžiagos savybės nusakomos devyniais nepriklausomais tamprumo rodikliais (žr. 2.20 formulę). Kadangi siūlomos technologijos tyrimuose sluoksniuotos vienakryptės medžiagos tamprumo rodikliai apibrėžiami visam bandiniui, o ne kiekvienam sluoksniui atskirai, matematinis medžiagos modelis supaprastinamas iki vienasluoksnės medžiagos, t. y. medžiagos savybės nusakomos šešiais nepriklausomais tamprumo rodikliais.

Siūloma technologija patikrinta su sluoksniuota vienakrypte medžiaga. Pasirinkti du tos pačios medžiagos bandiniai (žiūrėti skaitinį pavyzdį Nr. 3).

Statmenai armuotos

Statmenai armuotos medžiagos sudarytos iš taip orientuotų vienakrypčių sluoksnių, kad jų pagrindinės ašys būtų pasuktos 90° kampu viena kitos atžvilgiu.

Ryšiai tarp įtempimų ir deformacijų aprašomi taip:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Šios medžiagos tamprumo rodikliai apibrėžiami visam bandiniui, o ne kiekvienam sluoksniui atskirai, tad savybės nusakomos šešiais nepriklausomais tamprumo rodikliais: ($E_1 = E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13} = G_{23}$). Tamprumo matrica per tamprumo rodiklius išreiškiama taip:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Siūloma technologija patikrinta su skersai armuota medžiaga (žiūrėti skaitinį pavyzdį Nr. 4).

2.3. Skaitiniai medžiagų tamprumo rodiklių radimo pavyzdžiai

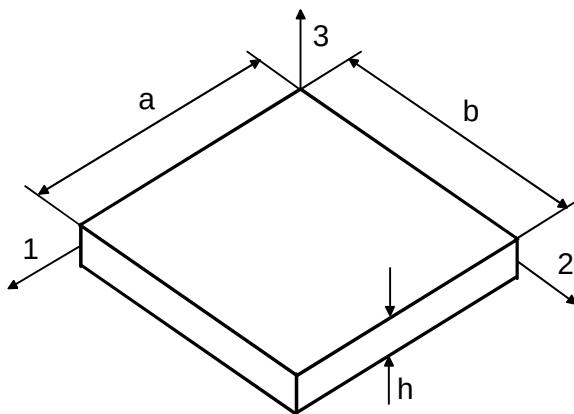
Medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologija patikrinta su keturiomis skirtingomis medžiagomis. Pirmiausia pasirinkta paprasčiausia izotropinė medžiaga – aliuminio lydinys, toliau nuosekliai bandoma sudėtingesnėmis medžiagomis, tokiomis kaip: stiklo ir anglies pluoštai, vienakrypčiai ir statmenai armuoti daugiasluoksniai laminatai.

Pirmosios medžiagos tamprumo rodiklius siūlomąja technologija pavyko surasti pakankamai tiksliai. Bandymai su sudėtingesnėmis medžiagomis atskleidė technologijos trūkumus, kurie paskatino ieškoti sprendimų jų pašalinimui.

2.3.1. Vienasluoksnių medžiagų pavyzdžiai

Skaitinis pavyzdys Nr. 1

Siekiant patikrinti sukurta technologiją, pirmiausia buvo atlikti bandymai su izotropine vienalyte medžiaga (2.13 pav.), dėl tokių medžiagų visų tamprumo rodiklių ryškios įtakos bandinio tikriniams dažniams. Bandymams pasirinktas aliuminio lydinys, nes šios medžiagos tamprumo rodiklius paprasta rasti statiniais bandymais, todėl dauguma metalo gamintojų pateikia savo produkcijos duomenis. Technologijai patikrinti naudoti trys aliuminio lydinio bandiniai, kurių tikriniai dažniai gauti iš natūrinio bandymo.



2.13 pav. Izotropinės medžiagos modelis

Fig. 2.13. Model of isotropic material

Bandyme naudotų aliuminio lydinio plokštelių, sąlyginai vadinamų sutartiniais kodais SP1, SP2 ir SP3, geometrinės savybės pateikiamos 2.2 lentelėje. Turimas medžiagos kiekis lėmė, kad pirmasis bandinys pasirinktas kvadrato formos, kiti du – stačiakampio.

Aliuminio lydinio (mechaninėmis savybėmis artimo AL9B) tamprumo rodikliai pateikiami 2.3 lentelėje. Siekiant supaprastinti siūlomo algoritmo pirmąjį bandymą, aliuminio lydinio tamprumo rodiklių paieškos ribos buvo nustatytos atsižvelgiant į iš anksto žinomus tamprumo rodiklius.

2.2 lentelė. Aliuminio lydinų bandinių geometriniai dydžiai**Table 2.2.** Geometrical characteristics of specimens of aluminum

Bandinių duomenys	SP1	SP2, SP3
a, mm	300	300
b, mm	300	200
h, mm	2,3	2,0

Bandinių tikriniai dažniai buvo matuojami „Polytec“ lazeriniu vibrometru ir „ISI SYS“ technika. Naudoti du skirtingi matavimo metodai siekiant užtikrinti, kad gauti bandinių tikriniai dažniai būtų teisingai surasti.

2.3 lentelė. Aliuminio lydinio bandinių geometriniai dydžiai**Table 2.3.** Geometrical characteristics of specimens of aluminium

Medžiagos savybės	Aliuminio lydinys		
	min	max	Gamintojo duomenys ¹¹
E_1 , GPa	60	80	68,9
G_{12} , GPa	22	30	26
ν_{12}	0,25	0,4	0,33
ρ , kg/m ³	–	–	2700

Aliuminio lydinio bandinio SP1 natūrinio bandymo rezultatai pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Bandinio SP1 tikriniai dažniai (Hz)**Table 2.4.** Eigenfrequencies of specimen SP1 (Hz)

Moda	POLYTEC			ISI SYS		
	f^{NB}	f^{BEM}	Δ , %	f^{NB}	f^{BEM}	Δ , %
1	83	82	1,20	83	83	0
2	118	120	1,69	120	120	0
3	154	153	0,65	154	153	0,65
4	212	214	0,94	214	215	0,47
5	215	214	0,47	216	215	0,46
6	379	382	0,79	381	382	0,26
7	384	382	0,52	383	382	0,26
8	390	392	0,51	394	394	0
9	428	426	0,47	428	428	0

¹¹ AB "Severstal" - Rusijos metalo kompanija, kuriai priklauso Čerepoveco metalurgijos gamykla.

2.4 lentelės tęsinys

10	486	482	0,82	485	482	0,62
11	636	652	2,52	649	654	0,77
12	655	652	0,46	657	654	0,46
13	734	729	0,68	721	730	1,25
14	761	768	0,92	764	767	0,39
15	818	819	0,12	808	820	1,49
16	825	819	0,73	821	820	0,12
17	948	946	0,21	953	949	0,42

Lentelėje matyti, kad tikriniai dažniai, apskaičiuoti BEM taikant žinomus medžiagų tamprumo rodiklius (f^{BEM}), pakankamai tiksliai sutampa su natūrinio bandymo rezultatais (f^{NB}) – daugeliu atveju skirtumas yra mažesnis nei 1%. Šis skirtumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta = \frac{f^{NB} - f^{BEM}}{f^{BEM}} \times 100. \quad (2.23)$$

SP1 bandinio tikrinių dažnių palyginimas parodytas 2.4 lentelėje, tačiau pati procedūra buvo atlikta su SP2 ir SP3 bandiniais. Skaitmeniniuose bandymuose naudojamas SHELL63 BEM ir 5x5 BEM tinklelio tankis, kuriam gaunamas konvergavęs sprendinys. Tamprumo rodiklių paieškai buvo naudojami tik tie tikriniai dažniai, kurie pažymėti pilka spalva.

Atliekant aliuminio lydinio tamprumo rodiklių paiešką buvo pastebėta, kad esant tam tikram E_1 ir G_{12} deriniui, pagal formulės 2.11 priklausomybę gaunami nefiziniai sprendiniai, nes ν_{12} reikšmė gaunama pernelyg didelė (daugiau kaip 0.6), dėl to ieškomų tamprumo rodiklių komplektas buvo pakeistas į E_1 ir ν_{12} (2.5 lentelė). Siekiant spartesnio skaičiavimo susiaurintos paieškos ribos.

2.5 lentelė. Ieškomų dydžių paieškos ribos

Table 2.5. Search bounds of identified parameters

Tamprumo rodikliai	Aliuminio lydinys		
	min	max	Gamintojo duomenys
E_1 , GPa	65	75	68,9
ν_{12}	0,25	0,35	0,33

Surasti aliuminio lydinio tamprumo rodikliai pateikti 2.6 lentelėje. Siūloma technologija surasti E_1 ir ν_{12} tamprumo rodikliai, o G_{12} suskaičiuotas pagal formulės 2.11 priklausomybę. Stulpelyje Δ pateiktas skirtumas procentais nuo gamintojo duomenų. Radimo paklaidos neviršija 0,2%, tad galima teigti, kad

siūlomos technologijos pagalba izotropinių medžiagų tamprumo rodiklius galima surasti pakankamu tikslumu.

2.6 lentelė. Surasti aliuminio lydinio tamprumo rodikliai

Table 2.6. Identified elastic characteristics of aluminum

Tamprumo rodikliai	Gamintojo duomenys	SP1	$\Delta, \%$	SP2	$\Delta, \%$	SP3	$\Delta, \%$
E_1 , GPa	68,9	70,04	0,016	68,71	0,003	68,24	0,01
G_{12} , GPa	26	25,89	0,004	24,85	0,046	26,49	0,018
ν_{12}	0,33	0,3526	0,064	0,3825	0,137	0,288	0,146

Kadangi GA yra stochastinis algoritmas, kiekvienam bandiniui buvo atlikta po 5 nepriklausomus bandymus, tačiau pateikiamoje lentelėje rodomas jų vidurkis. Genetiniai parametrai atsižvelgiant į tarptautinę praktiką bandymų keliu parinkti tokie: kryžminimo tikimybė – 0,9, mutacijos tikimybė – 0,1, populiacijos dydis – 10, o populiacijų skaičius – 250.

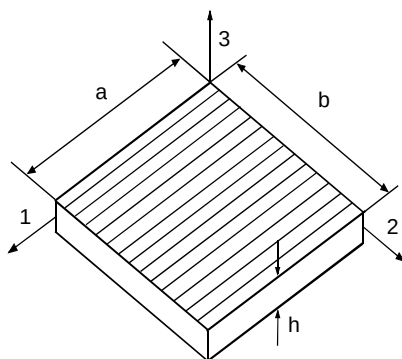
Identifikavus aliuminio lydinio tamprumo rodiklius ir išanalizavus rezultatus galima teigti, kad sukurtą technologiją įmanoma surasti bet kokios izotropinės medžiagos tamprumo rodiklius, kadangi visi dydžiai surasti pakankamu tikslumu, t. y. esant apie 0,1% paklaidai.

Natūraliai kyla klausimas, kaip technologija veiktų pakeitus kai kurias pradinės sąlygas – praplėtus paieškos ribas ir pasirinkus kitą tikrinių dažnių komplektą. Atsakymas į pirmąją klausimo dalį gana paprastas: algoritmas surastų sprendinį taip pat sėkmingai, tik tam gali prireikti daugiau laiko skaičiavimams. Žinoma, kuo medžiaga sudėtingesnė, t. y. kuo daugiau nežinomųjų uždavinyje, tuo daugiau užtruktų jį suskaičiuoti, jei būtų parinktos pernelyg plačios paieškos ribos. Pasirinkus kitą tikrinių dažnių komplektą sprendinys gali būti gautas su sąlyga, kad pasirinktų dažnių kiekis yra pakankamas.

Šiame uždavinyje imtas dažnių kiekis atitinka rekomendacijas mokslinėje literatūroje. Taip pat vengta į uždavinio skaičiavimus įtraukti modas, kurios turi porą, t. y. panašios formos, tik kitaip orientuotą modą, kadangi jos papildomos informacijos nebeduotų, tik bereikalingai apkrautų kompiuterį.

Skaitinis pavyzdys Nr. 2

Toliau siūloma technologija bandoma pasitelkiant sudėtingesnes medžiagas – ieškomos vienasluoksnių vienakrypčių kompozitų (2.14 pav.) savybės: stiklo ir anglies pluoštų.



2.14 pav. Vienasluksnės vienakryptės medžiagos modelis
Fig. 2.14. Model of unidirectional single-layered material

Šios medžiagos buvo pasirinktos atsižvelgiant į jų platų panaudojimą orlaivių pramonėje ir dėl žinomų jų fizinių savybių, pateiktų literatūroje (Edwins 1968, Bledzki 1999). Kadangi nebuvo galimybės gauti tokių medžiagų bandinių, nuspręsta natūrinį bandymą pakeisti skaitmeniniu. Sudaryti medžiagų matematiniai modeliai ir į juos įstačius žinomus tamprumo rodiklius gauti bandinių tikriniai dažniai. Tie patys matematiniai modeliai naudojami ieškant medžiagų tamprumo rodiklių.

Bandyme naudotų skaitmeninių bandinių geometriniai dydžiai pateikti 2.7 lentelėje. Siekiant paprastumo pasirinkta stačiakampė abiejų medžiagų skaitmeninių bandinių forma.

2.7 lentelė. Vienakrypčių bandinių geometriniai dydžiai

Table 2.7. Geometrical characteristics of unidirectional specimens

Bandinių duomenys	Vertė
a, mm	250
b, mm	250
h, mm	2,0

Stiklo ir anglies pluošto medžiagos aprašomos šešiais nepriklausomais tamprumo rodikliais:

$$\begin{aligned} E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23}, \\ G_{12} = G_{13}, G_{23} = E_2/2(1 + \nu_{23}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Turint omenyje nepakankamą Puasono koeficiento radimo tikslumą ir siekiant supaprastinti trimatį tamprumo rodiklių radimo uždavinį, dažnai tyrėjai daro prielaidas (Hwang (spaudoje), Frederiksen 1999, Frederiksen 1998):

$$E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}, G_{12} = G_{13} = G_{23}. \quad (2.25)$$

Siekiant parodyti galimus neatitikimus visoms nepriklausomoms savybėms, medžiagų tamprumo rodiklių radimo procese naudojami šeši nepriklausomi tamprumo rodikliai (žr. 2.8 lentelę). Čia taip pat parodytos ir rodiklių paieškos ribos, parinktos nustatant maždaug vienodą intervalą į abi puses pagal iš anksto žinomas jų vertes. Pagal kompozitinių medžiagų gamintojų skelbiamą informaciją apie šių dviejų medžiagų tankį, jis abiem medžiagoms parinktas vienodas. Šiame siūlomos technologijos bandymo etape yra naudojami skaitmeniniai bandiniai, todėl medžiagos tankis galutinių rezultatų tikslumui įtakos neturi.

Ieškant pasirinktų medžiagų tamprumo rodiklių naudojamas SHELL63 BE ir 5x5 BE tinklelio tankis, kuriam gaunamas konvergavęs sprendinys. Genetiniai parametrai, atsižvelgiant į tarptautinę praktiką, bandymų keliu parinkti tokie: kryžminimo tikimybė – 0,9, mutacijos tikimybė – 0,1, populiacijos dydis – 10, populiacijų skaičius – 250.

2.8 lentelė. Vienakrypčių bandinių tamprumo rodikliai

Table 2.8. Elastic characteristics of unidirectional specimens

Medžiagos savybės	Stiklo pluoštas			Anglies pluoštas		
	min	max	Lit. ¹²	min	max	Lit. ¹²
E_1 , GPa	20	60	45,2	100	300	229,4
$E_2 = E_3$, GPa	5	14	10,8	7	14	10,8
$G_{12} = G_{13}$, GPa	1	10	4,57	1	10	4,57
G_{23} , GPa	1	10	3,96	1	10	3,96
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,1	0,5	0,31	0,1	0,5	0,32
ν_{23}	0,1	0,5	0,36	0,1	0,5	0,39
ρ , kg/m ³			1375			1375

Stiklo ir anglies pluošto medžiagų surasti tamprumo rodikliai pateikti 2.9 lentelėje. GA yra stochastinis algoritmas, todėl kiekvienai medžiagai buvo atlikta po 20 nepriklausomų bandymų, tačiau lentelėse pateikiamas rezultatų vidurkis. Stulpelyje Δ pateiktas skirtumas procentais nuo literatūroje randamų duomenų.

Identifikavus stiklo ir anglies pluoštų tamprumo rodiklius matyti, kad išilginis Jungo modulis (E_1) randamas ypač tiksliai, tačiau šlyties modulis G_{23} , surandamas netiksliai, kadangi bandinys yra pakankamai plonas – 2mm. Esant ma-

¹² Pagal (Edwins 1986, Berthelot 1999)

žam bandinio storiui, šie tamprumo rodikliai turi menką įtaką bandinio tikrinams dažniams, tad jie randami ypač mažu tikslumu.

2.9 lentelė. Vienakrypčių bandinių tamprumo rodikliai

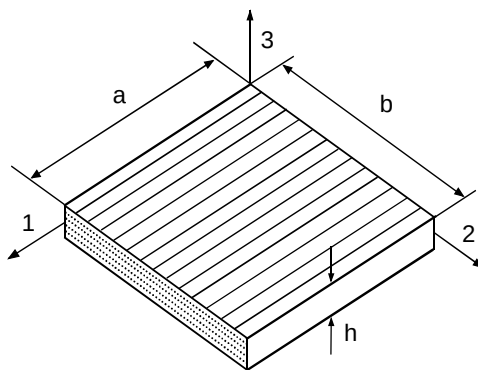
Table 2.9. Elastic characteristics of unidirectional specimens

Tamprumo rodikliai	Stiklo pluoštas			Anglies pluoštas		
	Lit. ¹²	Rez.	Δ , %	Lit. ¹²	Rez.	Δ , %
E_1 , GPa	45,2	45,3	0,22	229,4	228	0,61
$E_2 = E_3$, GPa	10,8	10,8	0,00	10,8	12	10,00
$G_{12} = G_{13}$, GPa	4,57	4,54	0,66	4,57	5,16	11,43
G_{23} , GPa	3,96	6,21	36,23	3,96	6,72	41,07
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,31	0,321	3,39	0,32	0,348	8,01
ν_{23}	0,36	0,384	6,42	0,39	0,351	11,02

2.3.2. Sluoksniuotų medžiagų pavyzdžiai

Skaitinis pavyzdys Nr. 3

Siūloma technologija toliau tikrinama atliekant bandymus su sluoksniuotomis vienakryptėmis kompozitinėmis anglies pluošto medžiagomis (2.15 pav.), kadangi pasitaikė galimybė atlikti natūrinius bandymus su šiomis medžiagomis.



2.15 pav. Sluoksniuotos vienakryptės kompozitinės medžiagos modelis

Fig. 2.15. Model of material with unidirectional layers

Technologijai patikrinti naudoti du vienakrypčio anglies pluošto sluoksniuoti bandiniai, kurių tikriniai dažniai gauti iš natūrinio bandymo. Šios medžiagos

lygiagrečiai buvo tiriamos dar dviejose laboratorijose Latvijoje ir Taivanyje¹³. Naudotų bandinių geometriniai dydžiai pateikti 2.10 lentelėje.

2.10 lentelė. Vienakrypčių sluoksniuotų bandinių geometrinės ir fizinės savybės

Table 2.10. Geometrical characteristics of unidirectional layered specimens

Bandinių duomenys	LA-UD-SP1	LA-UD-SP2
a=b, mm	207,5	205
h, mm	2,0	2,0
Sluoksniai	(0)16	(0)16

Bandiniai pavadinti sąlyginiais pavadinimais LA-UD-SP, reiškiančiais vienkryptę sluoksniuotą medžiagą anglų kalba (angl. LAminated-UniDirectional-Specimen).

Vienakryptės sluoksniuotos medžiagos aprašomos ne atskirai kiekvieno sluoksnio tamprumo rodikliais, bet viso bandinio, todėl uždavinys supaprastinamas nuo devynių nepriklausomų tamprumo rodiklių iki šešių (žr. 2.24 formulę). Siekiant uždavinį dar labiau supaprastinti iš trimačio į dvimatį, medžiaga aprašyta keturiais nepriklausomais tamprumo rodikliais (žr. 2.25 formulę) neįvertinant neplokštuminių tamprumo rodiklių. Siekiant parodyti galimus neatitikimus nepriklausomiems tamprumo rodikliams, paieškos procese naudoti penki rodikliai (2.11 lentelė). Uždavinio sprendinio tikslumui tai įtakos neturi, nes bandiniai yra pernelyg ploni, kad neplokštuminiai tamprumo rodikliai įtakotų bandinio tikrinius dažnius. Lentelėje taip pat parodytos ir tamprumo rodiklių paieškos ribos.

2.11 lentelė. Vienakrypčių sluoksniuotų bandinių tamprumo rodikliai

Table 2.11. Elastic characteristics of unidirectional layered specimens

Medžiagos savybės	min	max	LTLC ¹⁴	
			LA-UD-SP1	LA-UD-SP2
E_1 , GPa	100	200	171,05	171,37
$E_2 = E_3$, GPa	7	15	10,44	11,20
$G_{12} = G_{13}$, GPa	1	10	6,07	6,35
G_{23} , GPa	1	10	7,71	4,57
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,1	0,5	0,48	0,23
ρ , kg/m ³	–	–	1535	1589

¹³ „Pažangių kompozitinių medžiagų savybių identifikavimas“ (Identification of material properties of advanced composite materials) Taivania – Baltijos šalių projektas LTLC (2005-2008)

¹⁴ Taivania – Baltijos šalių projekto LTLC (2005-2008) partnerių gauti rezultatai.

Siūlomąja technologija surasti vienakrypčio kompozito tamprumo rodikliai pateikti 2.12 lentelėje, stulpelyje „LT“, o Δ stulpelyje pateiktas skirtumas procentais tarp kitų laboratorijų ir siūlomąja technologija gautų duomenų.

GA yra stochastinis algoritmas, todėl kiekvienam bandiniui buvo atlikta po 20 nepriklausomų bandymų, toliau pateikiamoje lentelėje rodomas jų vidurkis. Genetiniai parametrai pagal kitose minėtame projekte dalyvavusiose laboratorijose atliktus bandymus parinkti tokie: kryžminimo tikimybė – 0,9, mutacijos tikimybė – 0,1. Uždavinys yra sudėtingesnis nei prieš tai buvęs, todėl populiacijos dydis imamas didesnis – 30, o populiacijų skaičius – 500.

Kaip ir vienasluoksnio vienakrypčio kompozito, daugiasluoksnės medžiagos išilginis Jungo modulis surandamas ypač tiksliai. Tamprumo rodikliai, kurie yra nukreipti statmena plokštumai ašies kryptimi, surandami ypač netiksliai, nes bandinio storis neužtikrina šių rodiklių pakankamos įtakos tikriniam dažniams. Kaip matyti lentelėje, pirmojo bandinio tamprumo rodikliai surasti pakankamai tiksliai, o antrojo – ne. Taip galėjo atsitikti dėl antrojo bandinio fizinių defektų. Esant tokiam rezultatų skirtumui, jį reikėtų atmesti kaip netinkamą.

2.12 lentelė. Surasti vienakrypčių sluoksniuotų bandinių tamprumo rodikliai

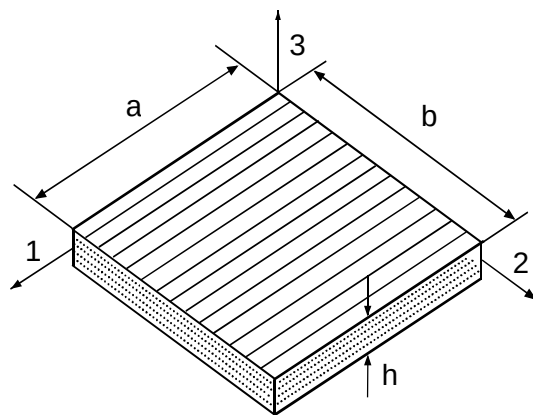
Table 2.12. Identified elastic characteristics of unidirectional layered specimens

Tamprumo rodikliai	LA-UD-SP1			LA-UD-SP2		
	LTLC ¹³	LT	Δ , %	LTLC ¹³	LT	Δ , %
E_1 , GPa	171,05	169,63	-0,837	171,37	170	-0,806
$E_2 = E_3$, GPa	10,44	10,24	-1,953	11,20	10,6	-5,660
$G_{12} = G_{13}$, GPa	6,07	6,19	1,939	6,35	6,15	-3,252
G_{23} , GPa	7,71	7,22	-6,787	4,57	4,00	-14,250
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,48	0,47	-2,128	0,23	0,34	32,353

Išanalizavus vienakrypčių sluoksniuotų medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo rezultatus, galima teigti, kad sukurta technologija įmanoma surasti tik kai kuriuos (ryškiausią įtaką bandinio tikriniam dažniams turinčius) vienakrypčių sluoksniuotų medžiagų tamprumo rodiklius.

Skaitinis pavyzdys Nr.4

Siūlomos technologijos tikrinimui pasirinkta dar sudėtingesnė medžiaga – statmenai orientuotų 16 sluoksnių anglies pluošto kompozitas (2.17 pav.).



2.16 pav. Statmenai armuotos kompozitinės medžiagos modelis
Fig. 2.16. Model of composite material with perpendicularly oriented layers

Kiekvienas kompozito sluoksnis greta esančių sluoksnių orientuotas 90° kampu. Technologijos tikrinimui naudoto kompozito bandinio tikriniai dažniai gauti iš natūrinio bandymo Taivano laboratorijoje. Bandinio duomenys pateikiami 2.13 lentelėje.

2.13 lentelė. Statmenai armuoto bandinio geometriniai dydžiai

Table 2.13. Geometrical characteristics of perpendicularly layered specimen

Bandinio duomenys	Vertė
a, mm	191
b, mm	282
h, mm	2,87
Sluoksniai	$[0_2^\circ/90_2^\circ/0_2^\circ/90^\circ]_s2$

Statmenai armuotos medžiagos matematinio modelio sudarymui naudojami keturi nepriklausomi tamprumo rodikliai. Kaip ir ankstesniuose pavyzdžiuose, tai daroma siekiant supaprastinti uždavinį iš trimatį į dvimatį. Medžiagos duomenys žinomi iš literatūros (Hwang (spaudoje)), pateikti 2.14 lentelėje. Čia taip pat parodytos ir rodiklių paieškos ribos.

2.14 lentelė. Statmenai armuoto bandinio tamprumo rodikliai**Table 2.14.** Elastic characteristics of perpendicularly layered specimen

Medžiagos savybės	min	max	Lit. ¹⁵
E_1 , GPa	10	30	23,30
$E_2 = E_3$, GPa	7	15	13,80
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$, GPa	1	5	2,70
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0,1	0,5	0,217
ρ , kg/m ³	–	–	1624

Siūlomąja technologija surasti statmenai orientuotų 16 sluoksnių kompozito tamprumo rodikliai pateikti 2.15 lentelėje. Buvo atlikta 20 nepriklausomų bandymų, lentelėje pateikiamas jų vidurkis. Stulpelyje Δ pateiktas skirtumas procentais nuo literatūroje esančių duomenų. Kaip ir daugiasluoksnio vienakrypčio kompozito, daugiasluoksnės statmenai armuotos medžiagos išilginis Jungo modulis E_1 surandamas ypač tiksliai, tačiau Puasono koeficiento tikslumas yra aiškiai per menkas. Nepaisant to, kad vienu bandymu Puasono koeficientas surastas pakankamai tiksliai, imant kelių bandymų vidurkį rezultatas yra nepatenkinamas.

2.15 lentelė. Surasti statmenai armuoto bandinio tamprumo rodikliai**Table 2.15.** Identified elastic characteristics of perpendicularly layered specimen

Tamprumo rodikliai	Lit. ¹⁴	Rez.	Δ , %
E_1 , GPa	23,30	23,362	0,2654
$E_2 = E_3$, GPa	13,80	14,23	3,0218
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$, GPa	2,70	2,71	0,3690
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0,217	0,2566	15,4326

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Siūloma technologija galima surasti visus medžiagos tamprumo rodiklius pakankamu tikslumu, jei medžiagos matematinis modelis yra nesudėtingas (pvz.: izotropinė medžiaga). Medžiagos, kurių matematiniam modeliui sudaryti reikia daugiau nei dviejų tamprumo rodiklių, identifikuojamos su paklaida.

2. Bandymai parodė, kad Puasono koeficientas ir šlyties moduliai neturi tokios ryšios įtakos bandinio tikriniam dažniams kaip Jungo modulis. Disertaci-

¹⁵ Pagal (Berthelot 1999).

joje aprašomoje technologijoje siūloma įprastą medžiagų tamprumo rodiklių radimo algoritmą papildyti bandinio geometrijos optimizavimo įrankiais. Norint tiksliau rasti tamprumo rodiklius siūloma keisti bandinio kraštinių ilgių santykį, storį, ortotropijos kampus, tokiu būdu paryškinant šių dydžių įtaką tikriniams dažniams (Frederiksen 1998).

3. Ieškant sluoksniuotų medžiagų apibendrintų tamprumo rodiklių, matematiniai medžiagų modeliai buvo supaprastinti iš trimačių į dvimačius, nevertinant neplokštuminių tamprumo rodiklių. Tai leido paspartinti skaičiavimus ir gauti tikslesnius rezultatus, nes optimizavimo uždavinyje buvo naudojama mažiau projektavimo kintamųjų.

4. Kvadratinės formos bandiniai, kaip išaiškėjo atliekant bandymus, yra netinkami medžiagų tamprumo rodiklių radimui, nes juose pastebimas reiškinys, kuomet dvi greta esančios modos yra viena kitos veidrodinis atspindys, o jų tikriniai dažniai vienodi arba labai artimi, todėl jos tikslo funkciją užpildo bereikalinga informacija, apkraunamas procesorius, dėl to pailgėja skaičiavimų laikas. Siekiant to išvengti, medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo procese tokios modos praleidžiamos.

Medžiagų tamprumo rodiklių radimo rezultatų gerinimas

Atlikti bandymai su įvairiomis medžiagomis parodė įprastos medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo technologijos trūkumus. Tyrimuose plačiai naudoti kvadratinės formos bandiniai, kaip paaiškėjo, yra netinkami, nes juose dažnai pasireiškia porinės modos (vienodo dažnio). Tai reiškia, kad jos bereikalingai prideda skaičiavimų, tačiau nesuteikia naujos informacijos. Ieškant kompozitinių medžiagų tamprumo rodiklių nemenkas keblumas yra tas, kad Puasono koeficientai ir šlyties moduliai randami gerokai mažesniu tikslumu nei Jungo moduliai.

Šiame skyriuje siūlomi metodai, kuriais įmanoma pagerinti medžiagų tamprumo rodiklių radimo tikslumą.

Iškeliamą hipotezę, kad įmanoma bandinio geometrinius parametrus optimizuoti tam tikrų medžiagos tamprumo rodiklių radimui. Siekiant didesniu tikslumu surasti bandinio tamprumo rodiklius, atliekama bandinio geometrinių parametrų optimizacija, padidinanti norimo tamprumo rodiklio įtaką bandinio tikriniam dažniams. Nors kompozitinių medžiagų tamprumo rodiklių radimui naudojami įvairių formų bandiniai, pasaulinė praktika ir mūsų atlikti bandymai rodo, kad, norint pakankamu tikslumu rasti visus medžiagos tamprumo rodiklius, reikia kiekvienam tamprumo rodikliui optimizuoto bandinio, kurio forma

geriausiai išryškina norimo tamprumo rodiklio įtaką bandinio tikriniam dažniams (Carlsson 1987).

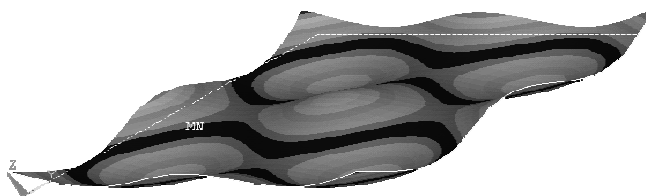
Siūlomas programinis įrankis papildytas modų formos atpažinimo algoritmu, nes medžiagų tamprumo rodiklių radimo proceso metu bandinio tikriniai dažniai gali susikeisti vietomis, taip būtų iškraipoma tikslo funkcijos reikšmė ir nukentėtų galutinio rezultato tikslumas. Siekiant to išvengti sukurta procedūra, atpažįstanti modų formas ir nustatanti, ar jos yra tinkamai išsidėsčiusios lyginant su natūrinio bandymo rezultatais.

Skyriaus tematika paskelbta viena autoriaus publikacija (Ragauskas ir kt. (2009)) ir perskaityti trys pranešimai konferencijose ir seminare.

3.1. Modų formos atpažinimas

Skaičiavimų eigoje keičiant medžiagos parametrus, tam tikros, paprastai aukštesnės eilės, modos gali keisti savo vietas tikrinių dažnių spektre. To neįvertinus, skaičiavimo metu tikslo funkcijoje būtų sugretinami skirtingų modų dažniai. Jeigu bandinio forma yra tokia, kad jai esant egzistuoja didesnė tikimybė pasireikšti porinėms modoms, taip pat labai tikėtina, kad jos gali ir susikeisti vietomis. Taip atsitikus iškreipiama tikslo funkcijos vertė, todėl nukenčia bendras sprendinio tikslumas. Siekiant to išvengti, prieš skaičiuojant tikslo funkciją ir BEM gavus skaitmeninio bandinio tikrinius dažnius reikia patikrinti, ar modos lieka „savo“ vietose.

Tokiam reiškiniui pailiustruoti pasirinkta apibendrinta vienakryptė vienašluoksnė medžiaga, kurios tamprumo rodikliai yra bedimensiniai. Sudarytas matematinis medžiagos modelis ir BEM paketu suskaičiuoti tikriniai dažniai. Gaunama penkioliktosios modos forma parodyta 3.1 pav.

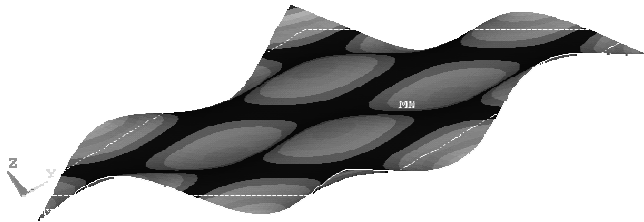


3.1 pav. Penkioliktoji bandinio moda $f_{15} = 0,505\text{Hz}$

Fig. 3.1. 15th mode of specimen $f_{15} = 0,505\text{Hz}$

Medžiagos tamprumo rodiklių paieškos procese įstačius vieno iš galimų spėjinių reikšmes į matematinį modelį matyti, kad penkioliktoji moda gaunama kitos formos (3.2 pav.).

Tokiu atveju, tikslo funkcijoje atsiranda netikslumas dėl susikeitusių vietomis modų dažnių.



3.2 pav. Penkioliktoji bandinio moda $f_{15} = 0,507 \text{ Hz}$

Fig. 3.2. 15th mode of specimen $f_{15} = 0,507 \text{ Hz}$

Su žinomais tamprumo rodikliais gauti skaitmeninio bandinio tikriniai dažniai f_i^{NB} pateikti 3.1 lentelėje. Gretimame stulpelyje pateikiami su n-ojo individualo spėjamais tamprumo rodikliais gauti bandinio tikriniai dažniai f_i^{BEM} . Suskaičiavus medžiagos matematinį modelį paaiškėjo, kad susikeitė vietomis 14-oji ir 15-oji modos, tačiau jų dažniai išdėstomi didėjimo tvarka, todėl tikslo funkcijoje nesąryšiai bus įvertinti netinkamai (pažymėta pilkai).

3.1 lentelė. Surasti statmenai armuoto bandinio tamprumo rodikliai

Table 3.1. Identified elastic characteristics of perpendicularly layered specimen

Moda	f_i^{NB}	f_i^{BEM}	Tikslo f-jos i-asis narys	
			Be modų vietos suradimo	Su modų vietos suradimu
1	0,03845	0,03848	0,0000007368	0,0000007368
2	0,09225	0,09131	0,0001040511	0,0001040511
...	...	...	...	...
13	0,50313	0,50264	0,0000009640	0,0000009640
14	0,50435	0,50711	0,0000297949	0,0000397792
15	0,50549	0,50754	0,0000163989	0,0000102582
Tikslo f-jos suma			0,0004448056	0,0004486493

Be modų formos atpažinimo ir teisingo surikiavimo tikslo funkcijos 14-asis ir 15-asis nariai skaičiuojami imant gretimas natūrinio (skaitmeninio) bandinio ir BEM sprendinio reikšmes:

$$F_{14} = \frac{(f_{14} - f_{14}^e)^2}{f_{14}^2} = \frac{(0,50435 - 0,50711)^2}{0,50435^2} = 0,0000297949$$

$$F_{15} = \frac{(f_{15} - f_{15}^e)^2}{f_{15}^2} = \frac{(0,50549 - 0,50754)^2}{0,50549^2} = 0,0000163989$$

Jeigu modų formos surikiuojamos pagal natūrinio (skaitmeninio) bandinio modų eilės tvarką, minėti tikslo funkcijos nariai skaičiuojami taip:

$$F_{14} = \frac{(f_{14} - f_{15}^e)^2}{f_{14}^2} = \frac{(0,50435 - 0,50754)^2}{0,50435^2} = 0,0000397792$$

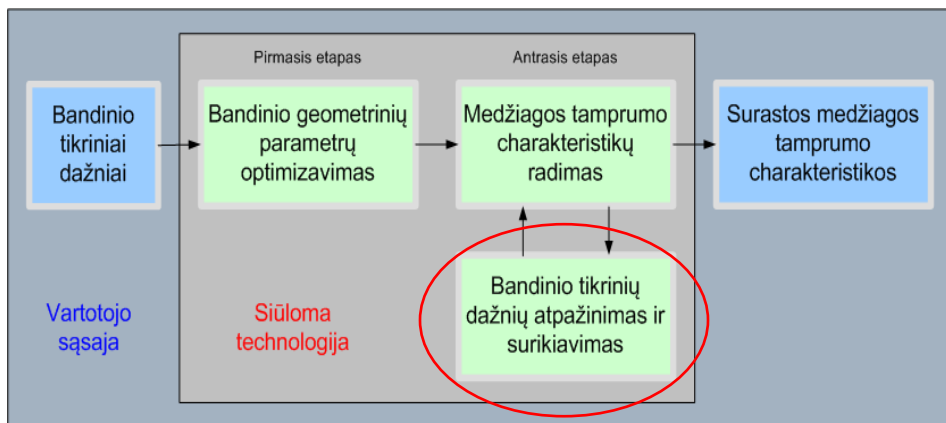
$$F_{15} = \frac{(f_{15} - f_{14}^e)^2}{f_{15}^2} = \frac{(0,50549 - 0,50711)^2}{0,50549^2} = 0,0000102582$$

Skirtumas tarp skaičiavimų, surikiavus modas pagal eilės tvarką ir nesurikiavus, yra 0,000003844 arba 0,85%. Jeigu susikeistų vietomis kelios modų poros, sprendinys būtų dar labiau iškreipiamas. Jei modų formos nerikiuojamos pagal eilės tvarką gali būti surastas neteisingas tamprumo rodiklių sprendinys. Panašus tikrinių dažnių spektras skaitmeniniam bandiniui gali pasireikšti su tolimomis norimam sprendiniui tamprumo rodiklių reikšmėmis, tačiau modų eilės tvarka gali būti kita. Taigi, tamprumo rodiklių (pavyzdžiui Puasono koeficiento) paieškai tikslo funkcijos tikslumo pagerinimas turi tiesioginę įtaką bendram medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo uždavinio tikslumui.

Modų formos atpažinimo algoritmas

Bandinio modų formas siūloma atpažinti ir vietą sąrašė nustatyti pagal sudaryto BEM tinklėlio taškų poslinkius Z ašies kryptimi. Medžiagų tamprumo rodiklių paieškai naudojami bandiniai, kurių kraštinių ilgis dešimtis kartų viršija storį, todėl bandinių modos visuomet bus išsidėsčiusios XY plokštumoje. Sudarius natūrinio bandinio plokštumos baigtinio taškų kiekio poslinkių Z ašies kryptimi normalizuotų reikšmių sąrašą (etaloninis) ir jį palyginus su skaitmeninio bandinio analogišku sąrašu (lygintinas), įmanoma nustatyti jų neatitikimą arba panašumą. Čia reikėtų paminėti, kad sąrašai suformuojami dvimatės matricos pavidalu. Sąrašų reikšmių neatitikimas įvertinamas bandymų keliu surastu sutampančių taškų kiekiu ir vadinamas sutapimo koeficientu, išreiškiamu procentais. Modų skaičius medžiagų tamprumo rodiklių paieškos procese retai viršija 15–20, todėl modos surikiuojamos paprasčiausiu tiesinės paieškos algoritmu.

Siekiant vaizdumo, 3.3 pav. pateikta bandinio modų formos atpažinimo ir vietos sąrašė nustatymo dalies vieta siūlomoje technologijoje. Kaip matyti iliustracijoje, ši dalis nuolat dalyvauja ieškant medžiagų tamprumo rodiklių, t. y. suskaičiavus bandinio tikrinius dažnius su populiacijoje esančiais ieškomois tamprumo rodikliais, algoritmas prieš skaičiuojant tikslo funkciją patikrina ir sutvarko tikrinių dažnių sąrašą.



3.3 pav. Bandinio modų formos atpažinimo vieta siūlomoje technologijoje

Fig. 3.3. Sample mode shape recognition in the proposed technology

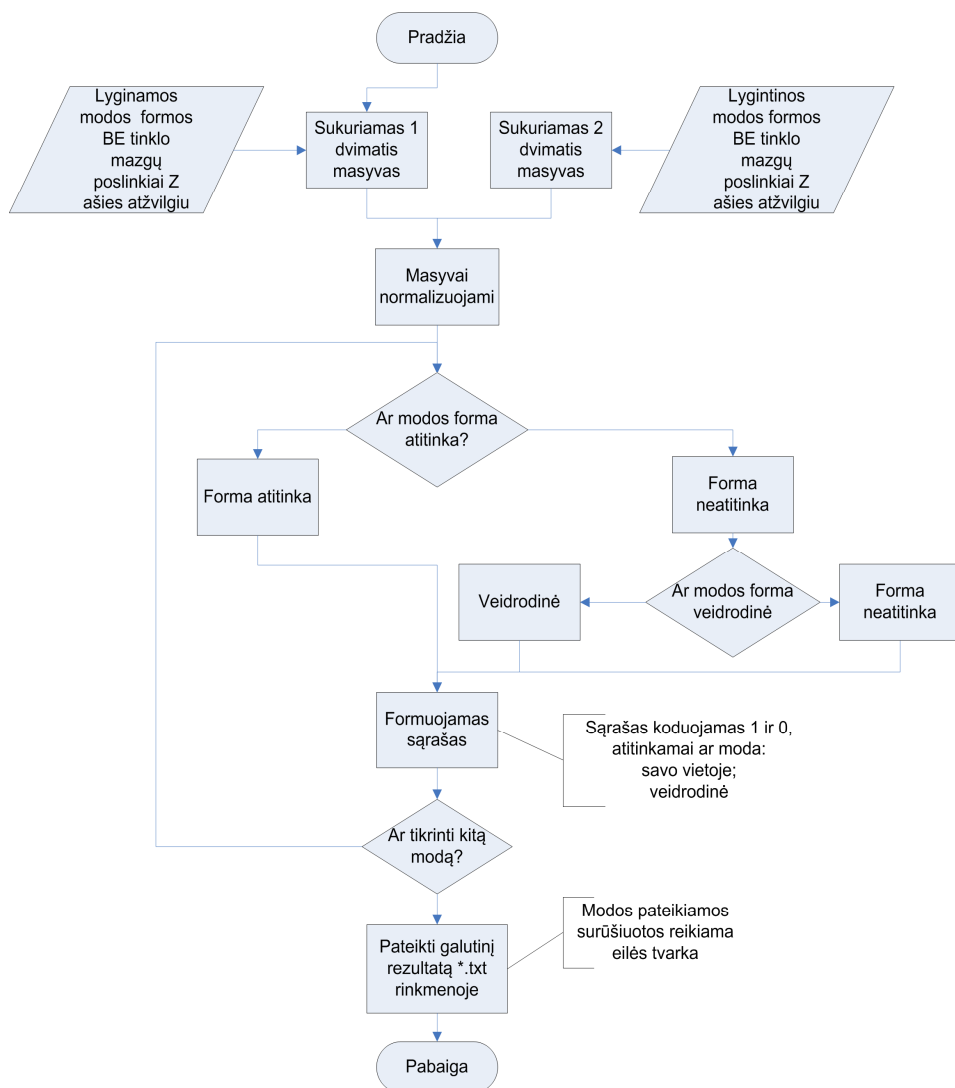
Algoritmo pateikiamame sąrašė yra informacija apie modos vietos tinkamumą, modos teisingą vietą, ar moda tiriamoje spektro dalyje turi veidrodinę porą, parodoma su kuria moda susikeitė vietomis, jei susikeitė (3.2 lentelė). Čia pateikiamas poskyrio pradžioje aprašytas pavyzdys, kuriame 14-oji ir 15-oji modos susikeitė vietomis. Pagal šį sąrašą modas surūšiuoja reikiama tvarka ir pateikia GA tikslo funkcijos skaičiavimui.

3.2 lentelė. Modų formos atpažinimo algoritmo pateikiamo sąrašo pavyzdys

Table 3.2. List of identification algorithm of sample mode shape

Eil. Nr.	Ar modos vieta tinkama	Modos teisinga vieta	Ar moda veidrodinė	Su kuria moda susikeitė
1	1	10...000	0	00...000
2	1	01...000	0	00...000
...	...	...	...	...
n-2	0	00...010	0	00...100
n-1	0	00...100	0	00...010
n	1	00...001	0	00...000

Modų formos atpažinimo ir vietos sąrašė nustatymo algoritmo blokinė schema pateikta 3.4 pav. Etaloninės ir lygintinos modos z koordinacių sąrašai surašomi į atskirus dvimačius masyvus. Toliau masyvai normalizuojami, kad būtų pašalinta poslinkių verčių įtaka. Tuomet lyginamas kiekvieno BE tinklėlio taškas etaloniniame masyve ir lygintinoje modoje. Schemos loginiame elemente „Ar modos forma atitinka?“ užkoduotas modos formą atpažįstantis algoritmas – jei tam tikros modos nustatytas kiekis reikšmių masyvuose sutampa, laikoma, kad modų



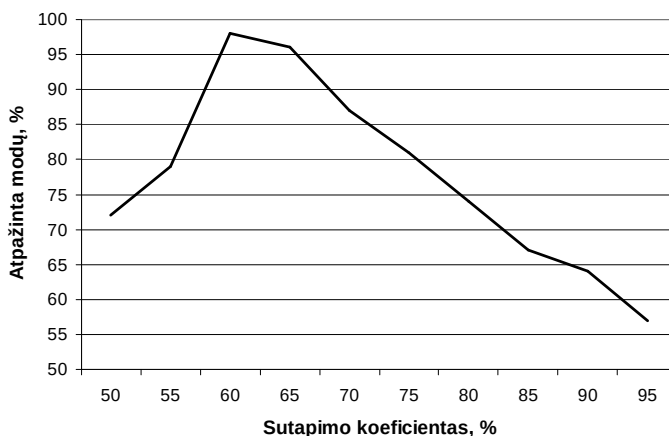
3.4 pav. Modų vietos nustatymo algoritmo blokinė schema

Fig. 3.4. Block diagram of algorithm of mode positioning

formos yra vienodos, o jei sutampančių reikšmių reikiamas kiekis nepasiekiamas, ieškoma atitikimų su kita moda iš eilės ir t.t. Suradus tinkamą modą, jos faktinė vieta eilėje ir vieta, kurioje ji turėtų būti, užrašoma į sąrašą. Tuomet pereinama prie kitos etaloninio sąrašo modos iki patikrinamos ir surikiuojamos visos medžiagų tamprumo rodiklių radimo procese reikalingos modos. Galutinis rezultatas įrašomas į rinkmeną.

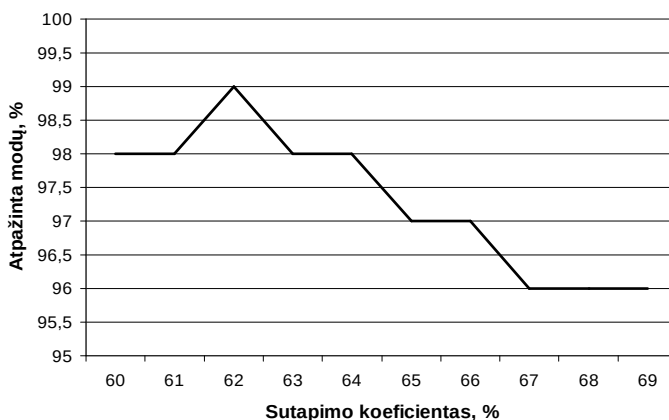
Algoritmo derinimas

Siekiant tiksliai suderinti modų formos atpažinimo algoritmą, buvo atlikta keletas bandymų ir eksperimentiškai nustatytos sutapimo koeficientų, reguliuojančių nustatymo tikslumą, vertės. 3.5 pav. pateikta sutapimo koeficiento vertė ir teisingai surastų modų kiekis iš pasirinktos spektro dalies. Kaip matyti grafike, daugiausiai modų atpažinta esant sutapimo koeficientui ties 60%.



3.5 pav. Sutapimo koeficiento tyrimo grafikas

Fig. 3.5. Exploration of overlap factor

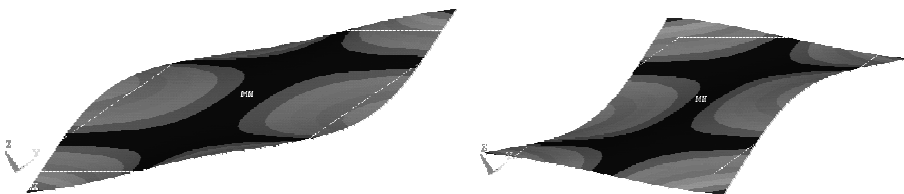


3.6 pav. Sutapimo koeficiento tyrimo siauresnėse ribose grafikas

Fig. 3.6. Exploration of overlap factor within the restricted bounds

Išanalizavus pirmojo priartėjimo rezultatus matyti, kad didžiausias tikslumas pasiekiamas sutapimo koeficiento reikšmei esant 60–70% intervale. Siekiant tikslesnių rezultatų, algoritmo derinimui pasirinktas smulkesnis sutapimo koeficiento žingsnis. 3.6 pav. pateikti bandymo rezultatai. Kaip matyti grafike, daugiausiai modų atpažinta sutapimo koeficientui esant ties 62%.

Dažnai nutinka taip, kad modos forma nesutampa su etalonine, o nustatoma, kad tai yra identiška forma, tačiau pasukta 90° arba 180° kampu. Tokios modos vadinamos veidrodinėmis (3.7 pav.). Veidrodinės modos yra vienodo dažnio, tačiau jų formos yra priešingos. Tikslų funkcijai tai įtakos neturi, bet jas nustatyti būtina, kad jos nebūtų eliminuotos iš tikslo funkcijos, kaip netinkamos.



3.7 pav. Veidrodinės bandinio modos

Fig. 3.7. Mirrored modes of sample

Veidrodines modas atpažinti galima jas sukant apie Z ašį kas 90° ir aukščiau aprašytu būdu lyginant su etalonine moda. Lygintos modos taškų poslinkių sąrašas transformuojamas pasukant ją 90° kampu ir atliekamas modų formos palyginimas su etalonine moda. Modų formai nesutapus, sąrašas dar pasukamas 90° kampu. Jei po antros transformacijos formos nesutampa, konstatuojama, kad modos yra skirtingos.

Poskyrio reziumė

Nemenką reikšmę medžiagų tamprumo rodiklių radimo procese turi susikeitusių vietomis modų atpažinimas ir jų sugrąžinimas į vietas, lyginant su natūrinio bandymo duomenimis. Pateiktame pavyzdyje sukeičiant vietomis tik dvi modas tikslo funkcijos vertė iškreipiama 0,85%. Jei tamprumo rodiklių radimo procese būtų imamas platesnis dažnių spektras arba ieškomi daugiau nei du tamprumo rodikliai, susikeitusių vietomis modų gali būti keletas porų, o tai ženkliai sumažintų galutinio rezultato tikslumą.

Modų formos atpažinimui naudojamas sutapimo koeficientas, kuris parodo, kiek bandinio BEM tinklelio taškų poslinkių Z ašies kryptimi sutampa su natūrinio eksperimento atitinkamais taškais. Šio koeficiento vertė nustatyta eksperimentiškai. Keičiant atpažinimo koeficientą nuo 50% iki 95% surasta, kad tiksliausiai modos formos randamos atpažinimo koeficientą nustačius ties 62% verte.

Modų formos algoritmas papildytas veidrodinių modų atpažinimo funkcija, transformuojančia lygintinos modos BEM tinklelio taškų poslinkių Z ašies kryptimi sąrašą. Po transformacijos modos forma lyginama su etaloniniu sąrašu ir daroma išvada, kad tai yra nauja moda, arba veidrodinis jau esančios modos atspindys.

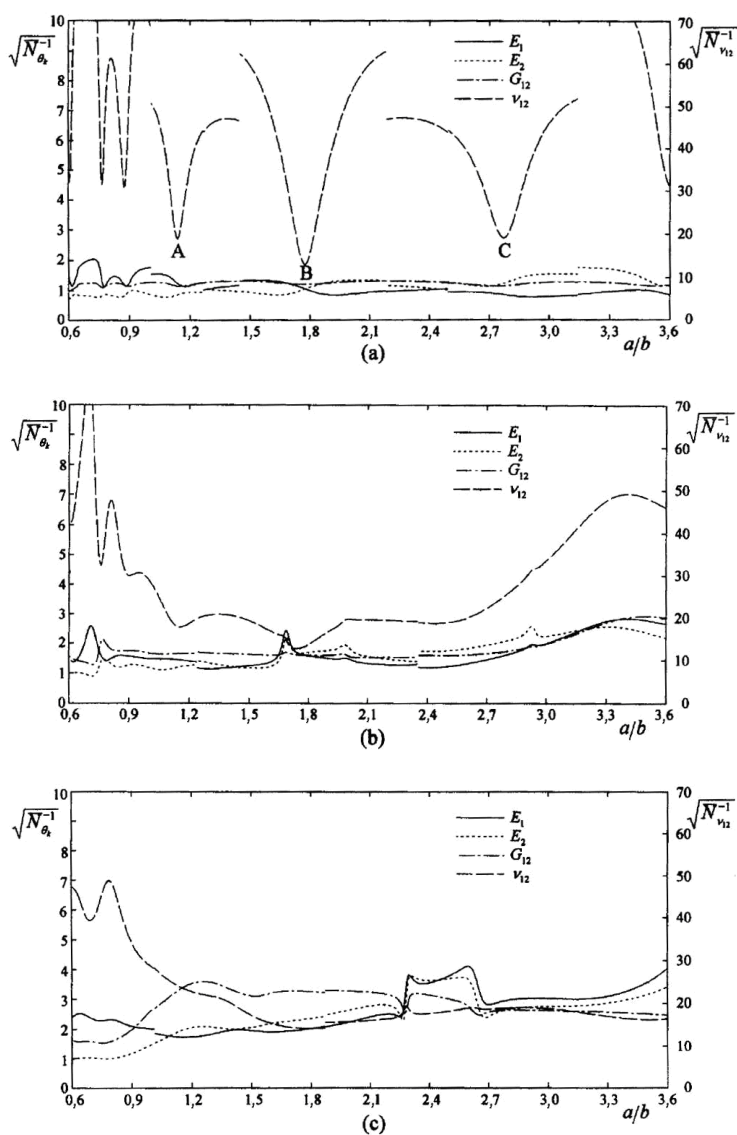
3.2. Bandinio geometrinių parametrų optimizavimas

Yra žinoma, kad Puasono koeficientų ir šlyties modulių įtaka bandinio virpesių tikriniams dažniams yra žymiai menkesnė lyginant su kitomis medžiagos savybėmis (Frederiksen 1998). Medžiagos tamprumo rodiklių identifikavimo proceso metu keičiant Puasono koeficientų ar šlyties modulių reikšmes tikslo funkcijos reikšmė kinta nežymiai, o tai lemia gana didelę neapibrėžtį. Esant tam tikroms bandinio geometriniams savybėms (plokštelės kraštinių ilgių santykis, ortotropijos kampas, bandinio storis) tamprumo rodiklių identifikavimas galėtų būti tikslus, tačiau minėti parametrai kiekvienai medžiagai skiriasi, todėl turi būti nustatomi prieš kiekvieną bandymą.

Iliustracijai pateikiami Frederiksen (Frederiksen 1998) aprašyti darbai. Siekiant įsitikinti šio reiškinių egzistavimu buvo atliekami bandymai su vienasluoksnėmis plokštelėmis. Pasirinktos vienasluoksnės plokštelės, nes jų bandymų rezultatai yra akivaizdūs ir žymiai paprastesni nei daugiasluoksnių bandinių. Vienasluoksnės plokštelės aprašomos dviem geometriniiais parametrais – bandinio kraštinių ilgių santykiu a/b ir kampu γ .

Viename iš Frederiksen darbų (Frederiksen 1998) teigiama, kad esant medžiagos ortotropijos kampui $\gamma = 0^\circ$, Jungo E_1 , E_2 ir šlyties G_{12} modulių identifikavimo neapibrėžtis yra maždaug vienoda ir kinta nedaug (3.8 pav. a)).

Paveiksle pavaizduotų diagramų horizontalioje ašyje atidėtas bandinio kraštinių santykis, kairiojoje ašyje – tamprumo rodiklių, išskyrus Puasono koeficientą, neapibrėžtis, o dešiniojoje – Puasono koeficiento neapibrėžtis. Atkreiptinas dėmesys į tai, kad pastarojo tamprumo rodiklio neapibrėžtis yra 10 kartų didesnė nei likusių koeficientų, todėl jam išskirta atskira ašis. Kreivę sudaro keletas lokalių minimumų. Panašios kreivės pavaizduotos ir 3.8 pav. b ir c, atitinkamai ortotropijos kampui esant $\gamma = 15^\circ$ ir $\gamma = 30^\circ$. Ieškant Puasono koeficiento šis kampas turi didelę reikšmę, kadangi esant optimaliam ortotropijos kampui, kraštinių santykio įtaka bandinio tikriniams dažniams yra menkesnė. Deja, tai įtakoja likusių parametrų radimo tikslumo sumažėjimą. Pavyzdžiui, esant $\gamma = 30^\circ$, šlyties modulio G_{12} neapibrėžtis triskart didesnė nei $\gamma = 0^\circ$, kraštinių santykį keičiant nuo 1,2 iki 2,2.

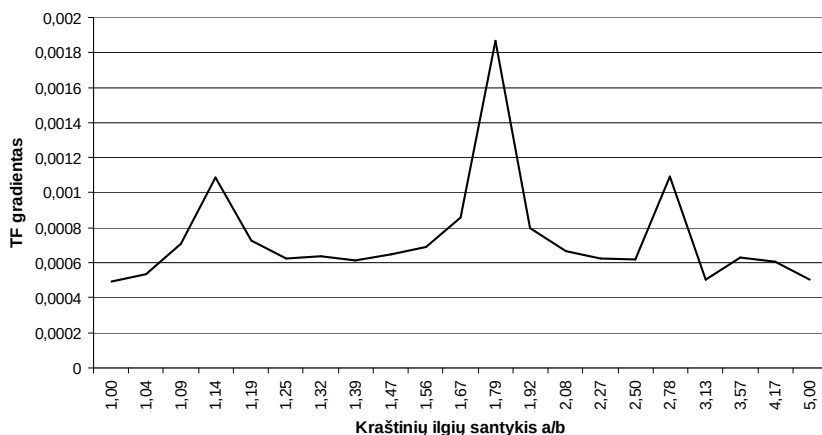


3.8 pav. Plokštuminių tamprumo rodiklių normalizuota neapibrėžtis atsižvelgiant į kraštinių santykį ir ortotropijos kampą: a) $\gamma = 0^\circ$, b) $\gamma = 15^\circ$ ir c) $\gamma = 30^\circ$.

Fig. 3.8. Normalized parameter uncertainties of in-plane elastic characteristics vs. side aspect ratio and orthotropic angle: a) $\gamma = 0^\circ$, b) $\gamma = 15^\circ$ and c) $\gamma = 30^\circ$.

Bandinio geometrinių rodiklių intervalams, kuriems Puasono koeficiento neapibrėžties kreivė turi ne minimalias vertes (3.8 pav. (Frederiksen 1998)), kiti medžiagos tamprumo rodikliai gali būti surasti pakankamai tiksliai. Nors Puasono koeficientas ν_{12} čia būtų surastas netiksliai, tamprumo moduliai E_1 , E_2 ir šlyties modulis G_{12} gali būti surasti pakankamai tiksliai.

Siekiant įsitikinti rezultatais ir tuo pačiu patikrinti disertacijoje siūlomos technologijos efektyvumą, atliktas analogiškas bandymas, panaudojant turimą GA (3.9 pav.).



3.9 pav. Puasono koeficiento jautrumo tikslo funkcijos gradientas

Fig. 3.9. The gradient of objective function of sensitivity of Poisson's ratio

Taikant siūlomą technologiją Frederiksen rezultatai pakartoti su abstrakčia medžiaga. Puasono koeficiento įtaka bandinio tikrinams dažniams čia pateikiama tikslo funkcijos gradientų ir bandinio kraštinių santykio skalėje. Nepaisant duomenų atvaizdavimo diagramose tarp Frederiksen ir siūlomos technologijos skirtumų galima pastebėti kreivės panašumų. Gautos ribinės reikšmės yra ties vienodais kraštinių ilgių santykiais. Atliktas bandymas su abstrakčia ortotropine medžiaga, kurios savybės yra bedimensinės: $E_1 = 1$, $E_2 = 0,1$, $\nu_{12} = 0,3$, $G_{12} = 0,05$, $G_{13} = 0,05$, $G_{23} = 0,03$.

Diagramoje pateikta vienasluoksnės ortotropinės medžiagos (ortotropijos kampas $\gamma = 0^\circ$) Puasono koeficiento įtaka bandinio tikrinams dažniams. Bandymas atliktas tik su vienu bandiniu, kurio $\gamma = 0^\circ$, kadangi esant tokiam ortotropijos kampui ryškiausiai matyti Puasono koeficiento įtaka bandinio tikrinams dažniams.

Bandymo eiga

Bandinių geometrijos optimizavimo uždavinys formuojamas taip: ieškoma didžiausio skaitmeninio gradiento tarp dviejų gretimų sprendinių naudojant centrinį skirtumų schemą. Suskaičiuojamos dvi tikslo funkcijos reikšmės su skirtinomis Puasono koeficiento reikšmėmis, besiskiriančiomis dv nuo prognostinės $p\nu$ reikšmės. Atliekami trys skaičiavimai ANSYS paketu, kad būtų įmanoma suskaičiuoti dvi tikslo funkcijos reikšmės (3.3 lentelė).

3.3 lentelė. Bandinio tikrinių dažnių žymėjimas perrinkimo uždaviniui

Table 3.3. Check of eigenfrequencies for direct solution problem

Moda	$p\nu - d\nu$	$p\nu$	$p\nu + d\nu$
1	$f_1^{p\nu-d\nu}$	$f_1^{p\nu}$	$f_1^{p\nu+d\nu}$
2	$f_2^{p\nu-d\nu}$	$f_2^{p\nu}$	$f_2^{p\nu+d\nu}$
...	...	...	...
$n-1$	$f_{n-1}^{p\nu-d\nu}$	$f_{n-1}^{p\nu}$	$f_{n-1}^{p\nu+d\nu}$
n	$f_n^{p\nu-d\nu}$	$f_n^{p\nu}$	$f_n^{p\nu+d\nu}$

Toliau naudojant šiuos tikrinių dažnių rinkinius skaičiuojamos dvi tikslo funkcijos:

$$T_1^{p\nu-d\nu} = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^{p\nu-d\nu} - f_i^{p\nu})^2}{(f_i^{p\nu-d\nu})^2}, \quad (3.1)$$

$$T_2^{p\nu+d\nu} = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i^{p\nu+d\nu} - f_i^{p\nu})^2}{(f_i^{p\nu+d\nu})^2}. \quad (3.2)$$

Skaitmeninis gradientas gaunamas abi tikslo funkcijas atėmus vieną iš kitos ir padalinus iš Puasono koeficiento žingsnio:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \nu} \cong \frac{T_2 - T_1}{d\nu}. \quad (3.3)$$

Ieškomas didžiausias tikslo funkcijos gradientas keičiant bandinio kraštinių ilgių santykį, ortotropijos kampą ir/arba bandinio storį:

$$\max \quad \Delta T(x). \quad (3.4)$$

Uždavinio kintamieji x yra bandinio geometriniai parametrai ir tikriniai dažniai (žr. 2.2 formulę), naudojami tamprumo rodiklių radimui. Naudojami apribojimai:

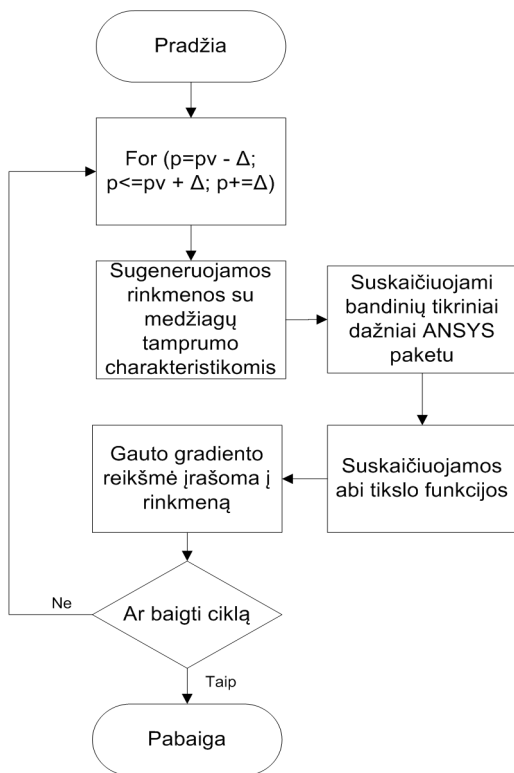
$$\begin{aligned}
 a &= \text{const}; \\
 \frac{1}{4}a &\leq b \leq a \\
 \frac{1}{100}a &\leq h \leq \frac{1}{10}a \\
 0^\circ &\leq \gamma \leq 90^\circ
 \end{aligned}
 \quad (3.4a)$$

Siūlomos technologijos tikrinimas pradėtas nuo perrinkimo uždavinio sprendimo. Parašytos programos algoritmas pateiktas blokinėje schemoje 3.10 pav. Pirmiausia sugeneruojamos rinkmenos su skirtingomis Puasono koeficiento reikšmėmis, besiskiriančiomis dydžiu dv . Šis dydis apibrėžia perrinkimo uždavi-

nio skiriamąją gebą, t. y. kuo jis mažesnis, tuo smulkiau galima atvaizduoti sprendinį grafiškai. Toliau sudaromi trys medžiagų tamprumo rodiklių rinkiniai, kuriuos naudojant ANSYS BEM paketu suskaičiuojami tikriniai dažniai. Rezultatai surašomi į sąrašą, kuris paskui analizuojamas.

Atlikus bandymą ir išanalizavus rezultatus, galima teigti, kad Frederiksen (Frederiksen 1998) paskelbtus rezultatus pavyko atkartoti. Įsitikinta, kad, norint pakankamai tiksliai gauti medžiagų tamprumo rodiklius, reikia turėti bandinius su tam tikru kraštinių ilgių santykiu ir atitinkamu ortotropijos kampu.

Norint kurį nors medžiagos tamprumo rodiklį rasti didžiausiu įmanomu tikslumu, reikėtų bandinio duomenis pakeisti taip, kad norimas bandinio medžiagos tamprumo rodiklis turėtų didžiausią įtaką bandinio tikriniais dažniais. Šių duomenų radimui siūloma formuluoti dviejų etapų optimizavimo uždavinį.



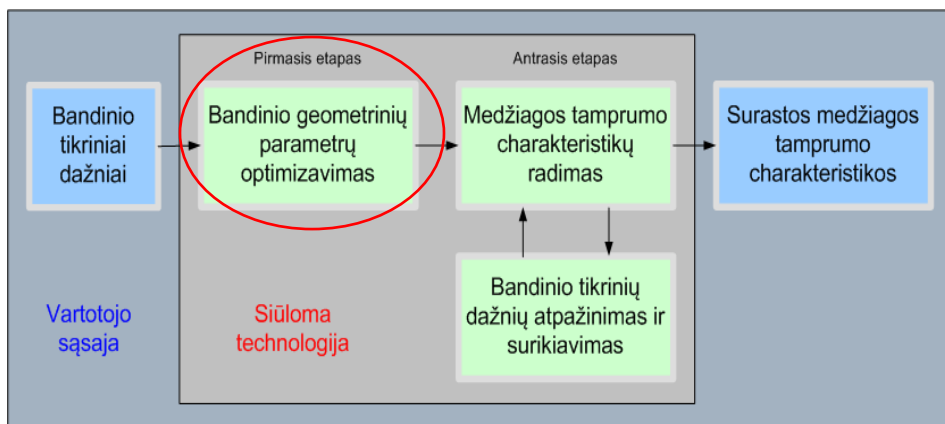
3.10 pav. Perrinkimo uždavinio blokinė schema

Fig. 3.10. Block scheme of direct problem

Pirmajame optimizavimo uždavinio etape naudojami apytikriai medžiagos tamprumo rodikliai (arba imama žinoma panaši medžiaga). Optimizuojamos bandinio geometrinės charakteristikos siekiant padidinti pasirinktos medžiagos tikrinių dažnių jautrumą pasirinktiems tamprumo rodikliams.

Pavyzdžiui, ieškant vienasluoksniu vienakrypčio kompozito optimalių geometrinių parametru, uždavinys sprendžiamas tik bandinio kraštinių ilgio santykiui ir ortotropijos kampui. Daugiasluoksnių kompozitinių laminatų bandinio optimizavimo uždaviniui dar pridemas storis. Optimizacijos uždavinys sprendžiamas GA ir BEM paketu ANSYS; išvestinės surandamos skaitmeniškai. Genetiniai uždavinio parametrai nustatyti tokie: kryžminimo tikimybė – 0,9, mutacijos tikimybė – 0,1, populiacijos dydis imamas – 30, o populiacijų skaičius – 500. Matematiniam modeliui sudaryti naudojamas SHELL63 arba SHELL99 BEM ir 5x5 BEM tinklelio tankis, kuriam gaunamas konvergavęs sprendinys.

Antrajame optimizavimo uždavinio etape paruošiamas atitinkamas bandinys ir sprendžiamas įprastas medžiagos tamprumo rodiklių radimo uždavinys. Norint rasti visus medžiagos tamprumo rodiklius vienodu tikslumu, reikia paruošti keletą skirtingų vienos medžiagos bandinių, kurių geometriniai parametrai išryškintų norimą surasti tamprumo rodiklį. Siekiant vaizdumo, 3.11 pav. pateikta bandinio geometrinių parametru optimizavimo dalies vieta siūlomoje technologijoje.



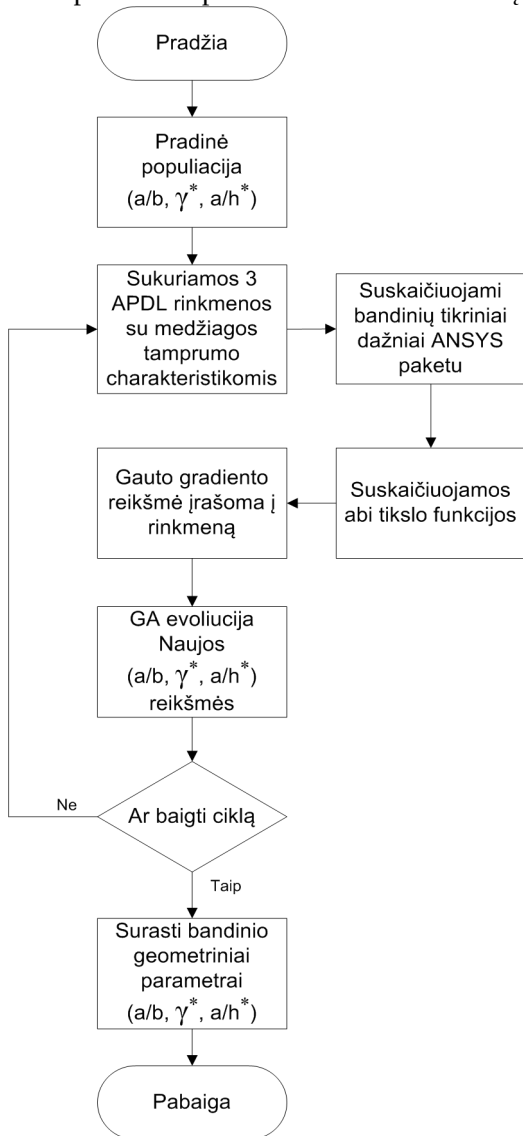
3.11 pav. Bandinio geometrijos optimizavimas siūlomoje technologijoje

Fig. 3.11. Optimization of sample geometry in proposed technology

Toliau pateikiamas bandinio geometrinių parametru optimizavimo algoritmas (3.12 pav.) ir jo aprašymas.

Bandinio geometrinių parametru optimizavimas atliekamas panaudojant GA. Sprendžiamas 3.1, 3.2 ir 3.3 formulėmis aprašytas uždavinys. Priklausomai nuo bandinio medžiagos ir norimų surasti medžiagos tamprumo rodiklių skaičiaus, bandinys optimizuojamas skirtingam geometrinių parametru skaičiui. Pa-

vyzdžiui, jei bus ieškoma tik plokštuminių medžiagos tamprumo rodiklių, tuomet optimizuoti pakanka bandinio kraštinių ilgių santykį (a/b) ir (nors ne visuomet būtina) ortotropijos kampą (γ). Kitu atveju, jei bus ieškoma medžiagos neplokštuminių tamprumo rodiklių, tuomet į bandinio geometrinių parametrų optimizacijos uždavinį turi būti įtrauktas bandinio storis (a/h). Esant pernešygiui plonam bandiniui, neplokštuminių tamprumo rodiklių nepavyktų surasti pakankamu tikslumu dėl menkos jų įtakos bandinio tikriniam dažniams. Taigi, optimizuojant bandinio geometrinius parametrus sprendžiamas vieno, dviejų arba trijų kintamųjų optimizacijos uždavinys. Jam spręsti pasirinktas turimas GA, nors tokio sudėtingumo uždavinį būtų galima spręsti ir paprastesniais algoritmais. Kita vertus, didžiąją dalį skaičiavimų laiko užima bandinio tikrinių virpesių gavimas iš BEM modelio (apie 90% skaičiavimo laiko), tad paprastesnis algoritmas tikėtino greičio efekto neduotų.



3.12 pav. Bandinio geometrinių parametrų optimizavimo algoritmas

Fig. 3.12. Optimization algorithm of sample geometry

Remiantis pasaulyje atliktais medžiagų tamprumo rodiklių radimo technologijų rezultatų tyrimais toliau visame skyriuje sutelkiamas dėmesys į Puasono koeficiento radimą, nes, kaip parodyta ankstesniuose bandymuose, šis tamprumo rodiklis buvo surandamas nepakankamai tiksliai. Šlyties koeficientas atskirai neaptariamas, kadangi šis tamprumo rodiklis yra suskaičiuojamas, jei žinomas Puasono koeficientas.

Toliau pateikiami skaitiniai medžiagų tamprumo rodiklių radimo pavyzdžiai su ankstesniame skyriuje aptartais bandiniais, kurių geometrija optimizuota išryškinant Puasono koeficiento įtaką bandinio tikriniams dažniams.

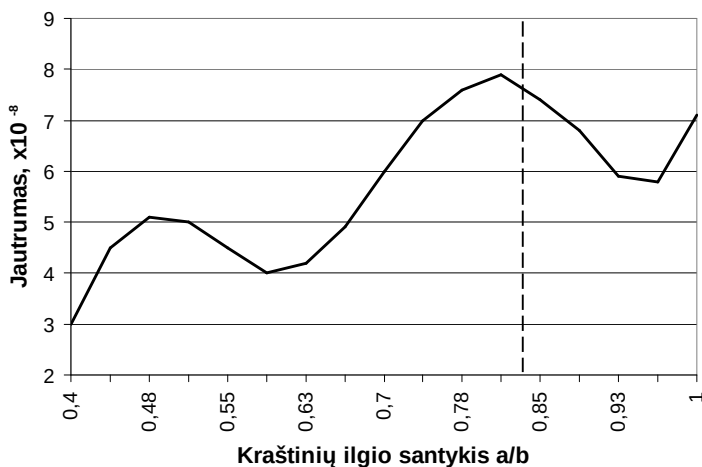
3.2.1. Vienasluoksnės medžiagos

Skaitinis pavyzdys Nr. 1

Siūlomos technologijos tikrinimui pirmoji medžiaga pasirinktas aliuminio lydinio bandinys. Šios medžiagos tamprumo rodikliai surandami pakankamai tiksliai, todėl bandinių geometrinių parametrų optimizuoti nereikia.

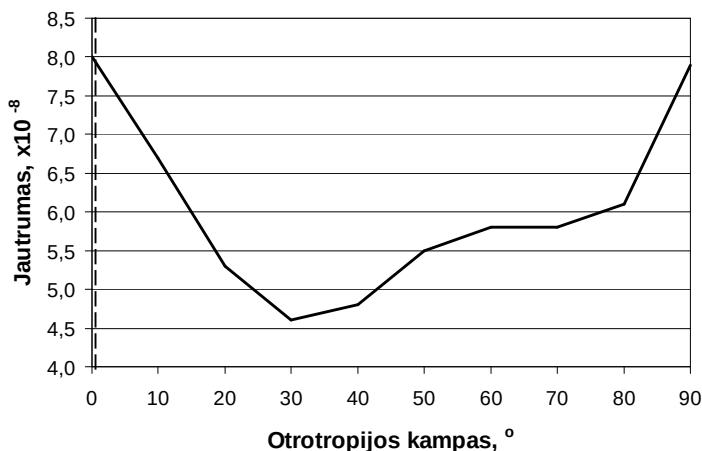
Skaitinis pavyzdys Nr. 2

Antrajame skaitiniame pavyzdyje pasirinktos dvi panašios medžiagos. Pirmoji medžiaga yra stiklo pluošto bandinys. Pagal anksčiau aprašytą algoritmą atliekamas bandinio kraštinių santykio ir ortotropijos kampo optimizavimas siekiant išryškinti Puasono koeficiento įtaką tikriniams dažniams. Rezultatai paraizduoti 3.13 ir 3.14 pav.



3.13 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio kraštinių santykiui

Fig. 3.13. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen side ratio



3.14 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio ortotropijos kampui

Fig. 3.14. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen orthotropy angle

Diagramos už atvaizduojamo intervalo ribų yra pavaizduotų kreivių veidrodinis atspindys. Kreivės atvaizduojamus rezultatus apdorojus mažiausių kvadratų nuokrypiu pasirinktame intervale.

Optimizavus bandinio geometrinius parametrus paaiškėjo, kad stiklo pluošto bandinio optimalus kraštinių ilgio santykis ir ortotropijos kampas yra:

- kraštinių ilgio santykis $a/b = 0,738$; $a = 250$, $b = 167,725$ [mm],
- ortotropijos kampas $\gamma = 0,694^\circ$.

Su gautomis a/b ir γ vertėmis bandyta surasti stiklo pluošto bandinio medžiagos tamprumo rodiklius ir juos palyginti su žinomais.

3.4 lentelė. Stiklo pluošto bandinio surasti tamprumo rodikliai

Table 3.4. Identified elastic characteristics of glass-fiber specimen

Tamprumo rodikliai	Stiklo pluoštas				
	Lit. ¹²	Neoptimizuotas	Δ , %	Optimizuotas	Δ , %
E_1 , GPa	45,2	45,3	0,22	45,2	0,01
$E_2 = E_3$, GPa	10,8	10,8	0,00	10,8	0,05
$G_{12} = G_{13}$, GPa	4,57	4,54	0,66	4,57	0,00
G_{23} , GPa	3,96	6,21	36,23	5,18	23,59
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,31	0,320890	3,39	0,312858	0,91
ν_{23}	0,36	0,384714	6,42	0,420220	14,33

Kaip matyti 3.4 lentelėje, po stiklo pluošto bandinio formos optimizavimo Puasono koeficiento radimo paklaida sumažėjo vidutiniškai nuo 3,39% neoptimizuoto bandinio iki 0,9% optimizuotam.

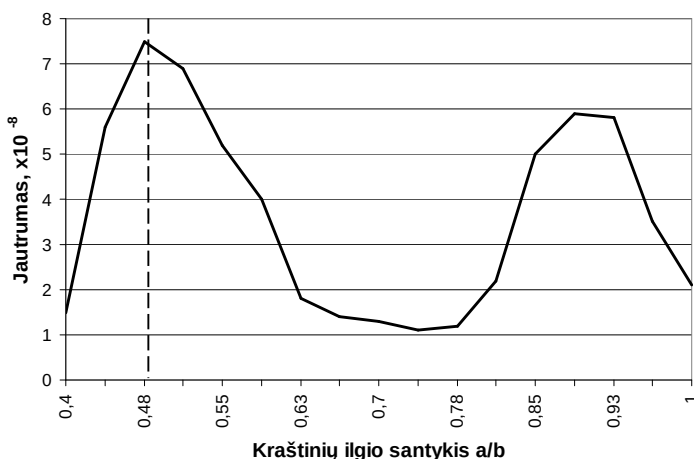
GA yra stochastinis algoritmas, todėl, kad užtikrintume rezultatų patikimumą, buvo atlikta 20 nepriklausomų bandymų. Lentelėje pateikiamas surastų medžiagos tamprumo rodiklių vidurkis ir jų radimo paklaida, kuri apskaičiuojama pagal 3.5 formulę. Čia MP^{BEM} yra suskaičiuoti, $MP^{Lit.}$ – žinomi medžiagos tamprumo rodikliai.

$$\Delta = \left| \frac{MP^{Lit.} - MP^{BEM}}{MP^{BEM}} \right| \times 100. \quad (3.5)$$

Antrasis skaitinio pavyzdžio bandinys yra anglies pluošto kompozitinė medžiaga. Kaip ir stiklo pluošto, šios medžiagos Puasono koeficientas randamas nepakankamu tikslumu dėl menkos jo įtakos tikriniam bandinio dažniams jei bandinio geometrija yra neoptimizuota. Kaip matyti iš 3.15 ir 3.16 pav., didesnės Puasono koeficiento įtakos galima pasiekti optimizuojant bandinio kraštinių santykį ir ortotropijos kampą, kaip ir pirmajai pavyzdžio medžiagai.

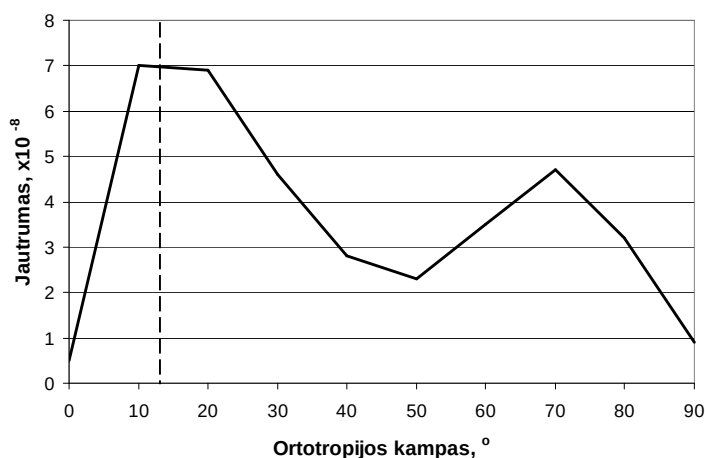
Optimizavus anglies pluošto bandinio geometrinius parametrus paaiškėjo, kad optimalūs bandinio geometriniai parametrai yra tokie:

- kraštinių ilgio santykis $a/b = 0,481$; $a = 250$, $b = 120,215$ [mm],
- ortotropijos kampas $\gamma = 15,355^\circ$.



3.15 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio kraštinių santykiui

Fig. 3.15. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen side ratio



3.16 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio ortotropijos kampui

Fig. 3.16. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen orthotropy angle

Kaip matyti paveikslėliuose, anglies pluošto bandinį optimizuoti yra būtina, nes optimali bandinio geometrija yra ganėtinai toli nuo kvadratinės formos bandinio ir nulinio ortotropijos kampo.

Po anglies pluošto bandinio geometrijos optimizavimo Puasono koeficiento radimo paklaida sumažėjo vidutiniškai nuo 8,01% iki 0,04%. Palyginimui pateikiami kvadratinio anglies pluošto bandinio tamprumo rodiklių radimo rezultatai ir paklaidos 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Anglies pluošto bandinio surasti tamprumo rodikliai

Table 3.5. Identified elastic characteristics of carbon-fiber specimen

Tamprumo rodikliai	Anglies pluoštas				
	Lit. ¹²	Neoptimizuotas	Δ , %	Optimizuotas	Δ , %
E_1 , GPa	229,4	228,0	0,61	229,0	0,17
$E_2 = E_3$, GPa	10,8	12,0	10,00	12,0	10,01
$G_{12} = G_{13}$, GPa	4,57	5,16	11,43	5,14	11,09
G_{23} , GPa	3,96	6,72	41,07	4,08	2,94
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,32	0,347864	8,01	0,319885	0,04
ν_{23}	0,39	0,351282	11,02	0,487892	20,06

Apibendrinimas

Kaip matyti 3.4 ir 3.5 lentelėse, dviejų pakopų medžiagos savybių radimo technologijos pagrindinis privalumas yra tiksliau randamos medžiagos norimos savybės. Iliustracijai pasirinktos dvi vienasluoksnės kompozitinės medžiagos, kurioms siūloma technologija surandamas Puasono koeficientas prieš bandinio geometrijos optimizaciją ir po jos. Stiklo pluošto tamprumo rodiklių radimo paklaida sumažėja nuo 3,39% neoptimizuoto bandinio iki 0,91% bandinio geometriją optimizavus, anglies pluošto bandiniui atitinkamai nuo 8,01% iki 0,04%.

Optimizavus stiklo ir anglies pluoštų bandinius siekiant išryškinti Puasono koeficiento įtaką bandinio tikriniams dažniams, kitų rodiklių įtaka nepakito arba sumenko, dėl to jie buvo surasti mažesniu tikslumu. Stiklo pluošto bandinį optimizavus visų kitų tamprumo rodiklių radimo tikslumas nežymiai pagerėjo, išskyrus neplokštuminius šlyties modulius ir Puasono koeficientą, kadangi šių tamprumo rodiklių įtaka bandinio tikriniams dažniams yra menka dėl palyginus mažo jo storio. Anglies pluošto bandinio optimizavimas siekiant išryškinti Puasono koeficiento įtaką tikriniams dažniams taip pat nežymiai įtakėjo kitų tamprumo rodiklių radimo tikslumą, tačiau ryškaus pokyčio nepastebima. Neplokštuminiai Puasono ir šlyties moduliai dėl palyginus mažo bandinio storio surandami vienodai netiksliai abiem atvejais.

3.2.2. Sluoksniuotos medžiagos

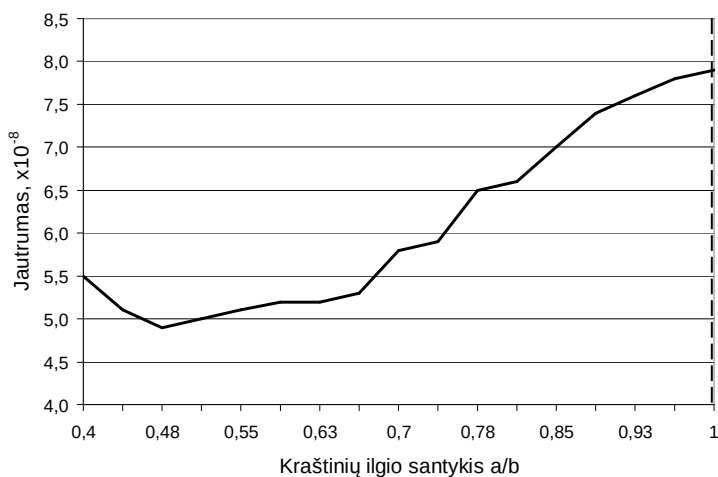
Skaitinis pavyzdys Nr. 3

Trečiasis skaitinis pavyzdys yra du vienakrypčio 16 sluoksnių anglies pluošto kompozito bandiniai. Ieškant neoptimizuotų bandinių tamprumo rodiklių paaiškėjo, kad vienas bandinys yra netinkamas dėl galimų medžiagos defektų. Tai sprendžiama pagal sąlyginai didelę tikslo funkcijos reikšmę, todėl tolesniems bandymams pasirinktas pirmasis bandinys LA-UD-SP1.

Siekiant išryškinti Puasono koeficiento įtaką bandinio tikriniams dažniams buvo atlikta bandinio geometrinių parametrų optimizacija. Gauti rezultatai pavaizduoti 3.17 ir 3.18 pav. Diagramos už atvaizduojamo intervalo ribų yra pavaizduotų kreivių veidrodinis atspindys. Kreivės atvaizduojamos rezultatus apdorojus antrojo laipsnio aproksimaciniu polinomu.

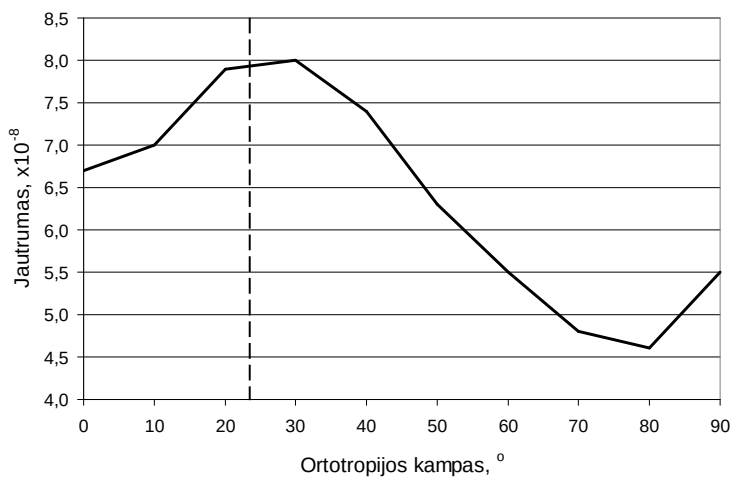
Optimizavus vienakrypčio 16 sluoksnių kompozito bandinio geometrinius parametrus paaiškėjo, kad optimalūs geometriniai parametrai yra tokie:

- kraštinių ilgio santykis $a/b = 1,0$; $a = b = 250$ [mm],
- ortotropijos kampas $\gamma = 23,728^\circ$.



3.17 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio kraštinių santykiui

Fig. 3.17. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen side ratio



3.18 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio ortotropijos kampui

Fig. 3.18. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen orthotropy angle

Kaip matyti paveikslėliuose, vienakrypčio 16 sluoksnių kompozito bandinį optimizuoti yra būtina, nepaisant to, kad optimali bandinio geometrija yra kvadrato formos. Tokia Puasono koeficiento įtaka bandinio tikriniams dažniams yra dėl sluoksnių orientacijos (ortotropijos) kampo, kuris turi žymiai ryškesnę įtaką Puasono koeficientui nei kraštinių ilgio santykis.

3.6 lentelė. LA-UD-SP1 bandinio surasti tamprumo rodikliai

Table 3.6. Identified elastic characteristics of LA-UD-SP1 specimen

Tamprumo rodikliai	LA-UD-SP1				
	LTL ^{C13}	Neoptimizuotas	Δ , %	Optimizuotas	Δ , %
E_1 , GPa	171,05	169,63	0,837	171,42	0,2158
$E_2 = E_3$, GPa	10,44	10,24	1,953	10,46	0,1912
$G_{12} = G_{13}$, GPa	6,07	6,19	1,939	6,06	0,1650
G_{23} , GPa	7,71	7,22	6,787	6,59	16,99
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,48	0,47	2,128	0,474	1,266

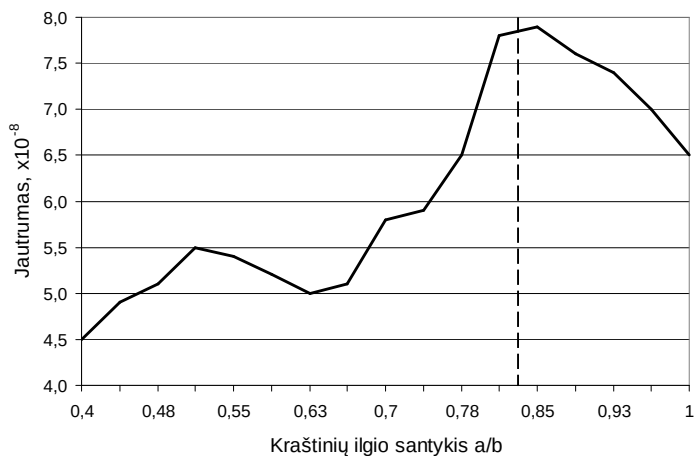
Po vienakrypčio 16 sluoksnių kompozito bandinio geometrijos optimizavimo Puasono koeficiento radimo paklaida sumažėjo nuo 2,128% iki 1,266%. Palyginimui 3.6 lentelėje pateikiami kvadratinio bandinio surasti tamprumo rodikliai ir jų paklaidos. Stulpelyje LTL^C pateiktos Taivanio laboratorijoje surasti šios medžiagos tamprumo rodikliai.

Skaitinis pavyzdys Nr. 4

Ketvirtasis skaitinis bandinys pasirinktas statmenai orientuotų 16 sluoksnių kompozitas. Siekiant išryškinti Puasono koeficiento įtaką tikriniams dažniams optimizuota šio bandinio geometrija (kraštinių ilgio santykis ir ortotropijos kampas). Gauti rezultatai pavaizduoti 3.19 ir 3.20 pav. Diagramos už atvaizduojamo intervalo ribų yra pavaizduotų kreivių veidrodinis atspindys. Kreivės atvaizduojamus rezultatus apdorojus antrojo laipsnio aproksimaciniu polinomu.

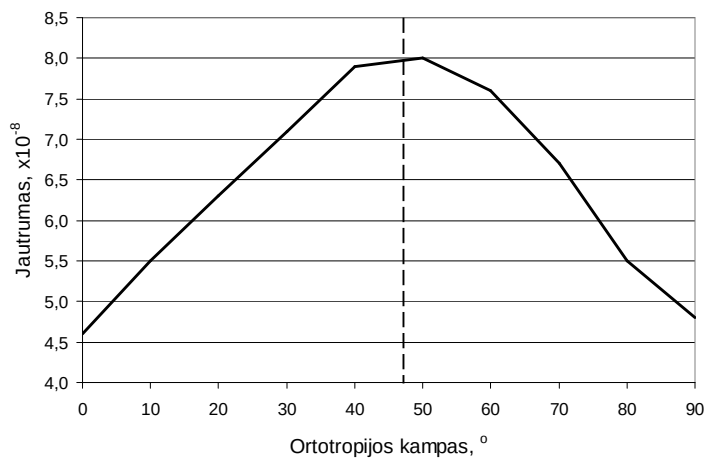
Optimizavus statmenai armuotos medžiagos bandinio geometrinius parametrus paaiškėjo, kad optimalūs geometriniai parametrai yra tokie:

- kraštinių ilgio santykis $a/b = 0,822$; $a = 250$, $b = 205,379$ [mm],
- ortotropijos kampas $\gamma = 47,767^\circ$.



3.19 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio kraštinių santykiui

Fig. 3.19. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen side ratio



3.20 pav. Aproximuotos Puasono koeficiento jautrumo reikšmės bandinio ortotropijos kampui

Fig. 3.20. Approximated sensitivity values of Poisson's ratio to specimen orthotropy angle

Kaip matyti paveikslėliuose, statmenai orientuotų sluoksnių medžiagos bandinį optimizuoti yra būtina, nes optimali bandinio geometrija nėra stačiakampės formos ir ortotropijos kampas nėra nulis. Bandinio sluoksniai vienas kito atžvilgiu yra išsidėstę 45° kampų, todėl po bandinio geometrinių parametrų optimizacijos siekiant ištyškinti Puasono koeficiento įtaką bandinio tikriniams dažniams matyti, kad šis tamprumo rodiklis geriausiai būtų surandamas bandinio pagrindinei ortotropijos ašiai esant pasuktai taip, kad su bandinio pagrindine ašimi visų sluoksnių kryptys sudarytų panašų kampą. Idealiu atveju šis kampas būtų 45° , jei bandinys būtų kvadrato formos. Optimizavus paaiškėja, kad stačiakampė bandinio forma taip pat turi įtakos Puasono koeficiento įtakai tikriniams dažniams, todėl pagrindinė ortotropijos ašis su bandinio pagrindine geometrine ašimi sudaro $47,7665^\circ$ kampą.

3.7 lentelėje pateikti statmenai orientuotų 16 sluoksnių anglies pluošto bandinio tamprumo rodikliai. Stulpelyje „Lit.“ pateikti Taivanie laboratorijos duomenys, pateikiama neoptimizuoto ir optimizuoto bandinių rezultatai ir paklaidos.

3.7 lentelė. Statmenai armuotos medžiagos bandinio surasti tamprumo rodikliai
Table 3.7. Identified elastic characteristics of perpendicularly laminated specimen

Tamprumo rodikliai	Statmenai armuota medžiaga				
	Lit. ¹⁴	Neoptim.	Δ , %	Optim.	Δ , %
E_1 , GPa	23,3	23,362	0,2654	24,85	6,2374
$E_2 = E_3$, GPa	13,8	14,23	3,0218	11,84	16,554
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$, GPa	2,7	2,71	0,369	2,71	0,369
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0,217	0,2566	15,433	0,2270	4,4053

Kaip matyti 3.7 lentelėje, dviejų pakopų technologijos pagrindinis privalumas yra gerokai tiksliau randami medžiagos norimi tamprumo rodikliai. Optimizavus statmenai orientuotų sluoksnių kompozito bandinio geometriją, Puasono koeficiento radimo paklaida sumažėjo nuo 15,4326% iki 4,4053%. Nors bandinys buvo optimizuojamas siekiant išryškinti tik Puasono koeficiento įtaką, kaip matyti 3.7 lentelėje tokia bandinio forma padidina Jungo modulių radimo paklaidą: E_1 modulio nuo 0,2654% neoptimizuoto bandinio iki 6,2374% bandinį optimizavus ir E_2 modulio atitinkamai nuo 3,0218% iki 16,5541%. Šlyties koeficientas randamas vienodai tiksliai prieš ir po bandinio geometrinių parametrų optimizavimo.

Poskyrio reziumė

Norint vienodai tiksliai surasti visus norimus medžiagos tamprumo rodiklius, gali prireikti tiek bandinių, kiek norima surasti medžiagos tamprumo rodiklių. Kiekvieno bandinio geometrinės savybės turi būti optimizuotos kiekvienam rodikliui atskirai. Optimizavus bandinio geometriją vienam kuriam nors tamprumo rodikliui išryškinti, gali nukentėti kitų tamprumo rodiklių įtaka bandinio tikriniams dažniams, o tai lems didesnę radimo paklaidą. Kaip pavyzdį galima imti anglies pluoštą. Optimizavus bandinio geometriją siekiant išryškinti Puasono koeficiento įtaką bandinio tikriniams dažniams, išilginio Jungo modulio radimo paklaida išauga ~ 3 kartus palyginus su neoptimizuotu bandiniu.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo procese susikeitusių vietomis modų atpažinimas turi nemenką reikšmę. Skaičiavimų eigoje keičiant medžiagos parametrus, tam tikros, paprastai aukštesnės eilės, modos gali keisti savo vietas tikrinių dažnių spektre. To neįvertinus, skaičiavimo metu tikslo funkcijoje būtų sugretinami skirtingų modų dažniai, dėl to nukentėtų galutinio rezultato tikslumas. Šios problemos sprendimui pasiūlytas algoritmas, atpažįstantis ir surikiuojantis modas pagal natūrinio bandymo duomenis prieš tikslo funkcijos skaičiavimą. Skaitinis pavyzdys su apibendrinta vienakrypte vienasluoksne medžiaga parodė, kad surikiavus modas tinkamai, tikslo funkcijos reikšmė iškreipiama 0,85%, jei sukeičiamos vietomis tik dvi modos. Ieškant sudėtingų medžiagų tamprumo rodiklių, esant tam tikram projektavimo kintamųjų deriniui, susikeitusių vietomis modų gali būti daugiau, todėl galutinio rezultato tikslumas nukentėtų žymiai daugiau.

2. Bandinio geometriniai parametrai, t. y. kraštinių ilgių santykis, ortotropijos kampas ir storis turi būti atitinkami, nes esant vienam ar kitam šių parametrų deriniui ženkliai pagerėja arba pablogėja tam tikrų tamprumo rodiklių radimas. Optimizuojant bandinių geometrinius parametrus sutelkiamas dėmesys į Puasono koeficiento radimą, nes ankstesniuose bandymuose šis tamprumo koeficientas buvo surandamas nepakankamai tiksliai. Atlikti tyrimai parodė, kad optimizavus bandinio geometrinius parametrus Puasono koeficientas surandamas tiksliau: stiklo pluoštui – 4, anglies pluoštui – 8, sluoksniuotai vienakryptei – 2, statmenai orientuotų sluoksnių kompozitui – 3,5 kartų, jei lygintume su neoptimizuoto bandinio identifikavimo rezultatais. Tyrimai taip pat atskleidė, kad ieškant medžiagos tamprumo rodiklių gali būti reikalingi keli tos pačios medžiagos bandiniai, optimizuoti norimam tamprumo rodikliui paryškinti, nes bandinio optimizavimas vienam kuriam nors dydžiui gali lemti blogesnius likusiųjų dydžių radimo rezultatus.

Programinės įrangos aprašymas

Šiame skyriuje pateikiamas trumpas darbe naudotos GA bibliotekos „*GAlib*“ aprašas – aprašomi joje esantys GA tipai, genetiniai operatoriai, populiacijos formavimo įrankis, individų atrankos metodai, tikslo ir tinkamumo funkcijų skaičiavimo įrankis.

Antrajame skyriuje aprašoma sukurta programinė įranga, skirta medžiagų tamprumo rodiklių radimui. Ja realizuota anksčiau aprašyta medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo technologija. Aprašomas valdymo pultas, duomenų valdymo mechanizmas.

Trečiajame skyriuje pateikiama vartotojo sąsaja, skirta patogesniai darbui su siūloma technologija ir programine įranga.

4.1. Genetinio algoritmo „*GAlib*“ trumpas aprašas

Disertacijoje aptariamų uždavinių sprendimui panaudota „*GAlib*“ programinė įranga, GA paketas, sukurtas Matthew Wall (Masačusetso technologijos institutas). Pagrindinės priežastys, lėmusios šios GA bibliotekos pasirinkimą buvo šios:

- „*GAlib*“ be klaidų kompiliuojama populiariose operacinėse sistemose;
- yra galimybė skaičiuoti keliais procesoriais vienu metu;

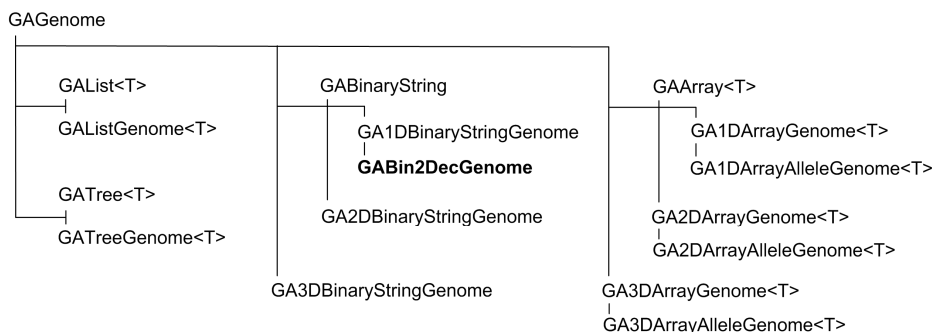
- bibliotekoje įtraukti keturi skirtingi atsitiktinių skaičių generatoriai;
- užprogramuoti keturi skirtingi GA;
- įtraukti skirtingi atrankos ir pakeitimo metodai.

Naudojant „*GAlib*“ biblioteką dirbama su dvejomis pagrindinėmis klasėmis: geno ir GA. Kiekvienas genomas (individas) yra vienas sprendžiamo uždavinio galimas sprendinys. GA simuliuoja evoliucijos mechanizmus, individo išgyvenimo atrankos metu galimybę, apibrėžia jo tikslo funkcija. Naudojami geno operatoriai ir atrankos strategijos naujų individų kūrimui.

Norint spręsti uždavinius su „*GAlib*“, reikia apsibrėžti:

- kaip bus kuriamas genomas;
- genetinius operatorius;
- tikslo funkciją.

Naudojant „*GAlib*“ optimizavimo uždavinių sprendimui, GA realizuojamas taip, kad būtų gaunamas vienas sprendinys. „*GAlib*“ populiacijos sukuriamos pagal pateiktą norimą duomenų struktūrą (4.1 pav.). Disertacijoje siūlomo algoritmo įgyvendinimui pasirinkta GA duomenų struktūra „*GABin2DecGenome*“ (paveiksle paryškinta), sukonstruota pagal Goldberg (Goldberg 1989).



4.1 pav. „*GAlib*“ populiacijos duomenų struktūra

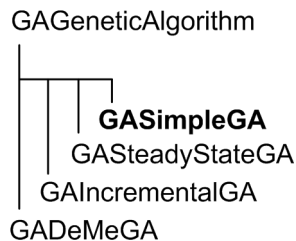
Fig. 4.1. Data structure of population in „*GAlib*“

Bibliotekoje „*GAlib*“ duomenų struktūra (individas, genomas), vadinama *GAGenome*, yra keturių rūšių:

- „*GAListGenome*“ – sąrašo tipo genomas;
- „*GATreeGenome*“ – medžio duomenų struktūra;
- „*GABinaryStringGenome*“ – dvejetainė sistema koduojamas genomas;
- „*GAArrayGenome*“ – masyvo tipo genomas.

Egzistuoja daug skirtingų GA rūšių, tačiau „*GAlib*“ apima šias (4.2 pav.): paprastą (angl. simple), pastovios būsenos (angl. steady-state), prieaugio (angl. incremental) ir lygiagrečių migruojančių populiacijų (angl. deme). Šie algoritmai

skiriasi naujų individų kūrimo evoliucijos metu ir jų pakeitimu vietoj senųjų principu.



4.2 pav. „GAlib“ GA rūšys

Fig. 4.2. Types of GA in „GAlib“

„GAlib“ įmanoma išplėsti integruotų objektų galimybes. Tai labiausiai primintina C++ programavimo kalbos požiūriu, nes galima konstruoti savo klases ir nusistatyti naujas funkcijas. Jei reikia atlikti tik nedidelį „GAlib“ klasės patobulinimą, įmanoma sukurti savo funkciją ir nurodyti „GAlib“ ją naudoti vietoj numatytos.

Genetinis algoritmas

Skaičiavimų metu GA nustato, kurie individai turėtų išlikti, kurie daugintis, o kurie turi būti sunaikinti, taip pat registruoja statistinius duomenis. Kadangi GA neturi konkretaus stabdymo kriterijaus, jį nustato vartotojas. Dažnai stabdymo kriterijumi pasirenkamas kartų skaičius, tačiau galima naudoti geriausio sprendinio ar konvergavimo kriterijų.

Kaip jau buvo minėta, bibliotekoje „GAlib“ yra užkoduoti keturių rūšių GA. Apie jas kiek plačiau. Pirmasis yra standartinis „paprastas“ GA, aprašytas Goldberg knygoje (Goldberg 1989). Šiame algoritme naudojamos nepersidengiančios populiacijos, o individų atrankai elitizmas nenaudojamas. Kiekvienoje naujoje kartoje algoritmas sukuria visiškai naują individų populiaciją. Antrasis yra pastovios būsenos GA, kuris naudoja persidengiančias populiacijas. Šiame GA galima nurodyti, kiek individų turi būti perkelta iš kiekvienos kartos. Trečiasis yra prieaugiu paremtas GA, kuriame vartotojui įmanoma nustatyti, koku būdu bus atrenkami individai ir kaip vyks evoliucija. Pavyzdžiui, naujai sukurtas individas galėtų pakeisti savo pirmtaką, pakeisti atsitiktinį individą arba pakeisti labiausiai į save panašų individą. Ketvirtasis tipas yra „DeMe“ GA. Šiame algoritme galima sukurti keletą populiacijų vienu metu naudojant pastovios būsenos algoritmą. Kiekvienoje kartoje keletas individų migruoja iš vienos populiacijos į kitą.

Disertacijoje siūlomo algoritmo įgyvendinimui pasirinkta „GASTeadyStateGA“ GA (4.2 pav. paryškinta), nes šio tipo algoritme naudojamas elitizmas, leidžiantis sparčiau konverguoti į globalų sprendinį. Tikimybė, kad sprendinys bus

gautas lokaliame minimume yra labai maža, nes naudojama sąlyginai nedaug projektavimo kintamųjų.

„*GAlib*“ yra integruotas statistikos mechanizmas, individų pakeitimo strategijos ir algoritmo paleidimo kriterijai, populiacijos objektas, individų konteineris, taip pat tam tikri statistikos bei atrankos ir mastelio operatoriai. Paprastas GA veikėtų amžinai, todėl šiame algoritme yra funkcijos, kurios nurodo kuomet algoritmas turėtų sustoti, t. y. nutraukti skaičiavimus, esant tam tikram kartų skaičiui arba pasiekus tam tikrą konvergavimo lygį. „*GAlib*“ taip sukonstruotas, kad būtų galima pritaikyti savo sukurtas nutraukimo funkcijas ir nurodyti savo sustojimo kriterijus. Disertacijoje pasirinkta taikyti kartų skaičiaus stabdymo kriterijų, nes sprendžiami uždaviniai yra skirtingo sudėtingumo (projektavimo kintamųjų gali būti nuo dviejų iki devynių), todėl nustačius konvergavimo lygio stabdymo kriterijų, uždavinys gali būti neišspręstas per protingą laiką.

Genetiniai operatoriai

Kiekvienas genomas „*GAlib*“ bibliotekoje turi savyje užkoduotus tris pagrindinius genetinius operatorius: inicializavimo, mutacijos ir kryžminimo. Su šiais operatoriais galima pakeisti pradinę populiaciją, nustatyti mutacijos arba kryžminimo specifinius parametrus pagal sprendžiamą uždavinį arba plėsti GA pagal tai, kaip sprendžiamas uždavinys.

Inicializavimo operatorius nustato, kaip konstruoti genomą. Jis kviečiamas kai kuriama populiacija arba pradedamas GA. Šis operatorius nekuria naujų genomų, o tik užpildo juos uždavinio ir genetinė informacija, pagal kurią toliau atliekamas uždavinio sprendimas. Populiacijos objektas turi savo inicializavimo operatorių, kuris pagal nutylėjimą tiesiog iškviečia genomo inicializavimo operatorių.

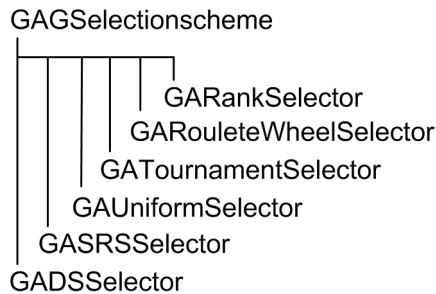
Mutacijos operatorius nustato kaip mutuos kiekvienas genomas. Mutacija skirtingiems duomenų tipams skiriasi. Pavyzdžiui, tipinė dvejetainio genomo mutacija individo dvejetainę eilutę suskaido į dalis ir sukeičia jas vietomis tam tikra tvarka.

Kryžminimo operatorius nustato, kaip bus sukuriamas palikuonis iš dviejų genomų, vadinamų tėvais. Kaip ir mutacijos operatoriuje, kryžminama priklausomai nuo duomenų tipo, tačiau kryžminimas apima daugiau nei vieną genomą. „*GAlib*“ GA bibliotekoje kiekvienas genomas „žino“ savo geriausią kryžminimosi metodą (naudojamas numatytasis kryžminimo metodas), tačiau pats jis negali atlikti kryžminimo. Remiantis šiuo principu galima gauti naujų GA klasių, kurios naudoja kitus, ne numatytuosius, kryžminimo metodus.

Populiacijos objektas

Populiacijos objektas, kitaip – populiacija, yra individų konteineris. Kiekvienas populiacijos objektas turi savo inicializatorių (numatytasis tiesiog iškvie-

čia inicializavimo operatorių kiekvienam populiacijos individui) ir vertinimo mechanizmą (pagal nutylėjimą išskviečia vertinimo mechanizmą kiekvienam populiacijos individui). Jis taip pat renka duomenis apie geriausią populiaciją, vidurkį ir kitus duomenis. Populiacijos objekte taip pat yra aprašyti atrankos metodai (4.3 pav.).



4.3 pav. „GAlib“ atrankos metodai
Fig. 4.3. Selection methods in „GAlib“

Jie yra naudojami, kai reikia nuspręsti, kurie individai turėtų daugintis. Kiekvienas populiacijos objektas turi ir mastelio schemas. Jos paverčia kiekvieno individo tikslo funkcijos reikšmę į tinkamumo funkcijos reikšmę, kuri yra naudojama GA atrankos mechanizme.

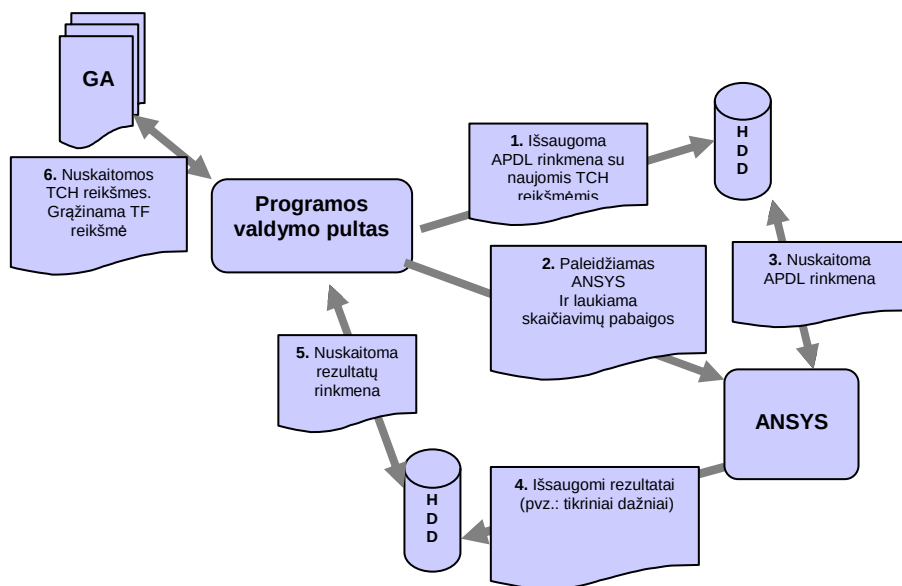
Tikslo ir tinkamumo funkcijos

GA turi tik vieną būdą, kaip vieną individą palyginti su kitais – tikslo funkciją. Svarbu atkreipti dėmesį į skirtumą tarp tinkamumo ir tikslo funkcijų. Tikslo funkcijos vertė yra tiesioginis genomo įvertinimas. Tinkamumo funkcijos rezultatas yra transformuotas vertinimo rodiklis, naudojamas nustatyti individo tinkamumą poravimuisi. Tinkamumo rodiklis paprastai gaunamas tiesiogiai iš tikslo funkcijos vertės. Pavyzdžiui, jei naudojamas linijinis mastelis, tuomet tinkamumo funkcijos rezultatas gaunamas atitinkamai didinant tikslo funkcijos vertes pagal metodą, aprašytą Goldberg knygoje. „GAlib“ GA atrankai naudoja tinkamumo, o ne tikslo funkcijos vertes.

Galima populiaciją vertinti naudojant individualais arba populiacija paremta vertinimo funkcija. Jei naudojamas pirmasis būdas, tai funkcija yra priskiriama kiekvienam genomui. Antruoju būdu vykdant vertinimą yra galimybė naudoti skirtingas tikslo funkcijas.

4.2. Sukurtos programinės įrangos aprašymas

Algoritmas realizuotas trimis savarankiškais programiniais paketais: ANSYS paketas yra komercinis, GA sukurtas Matthew Wall (Masačiuasetso technologijos institutas), programos valdymo pultas – disertacijos autoriaus. Išsami medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo ciklo schema pavaizduota 4.4 pav. Joje rodyklėmis pavaizduoti duomenų srautai tarp tamprumo rodiklių radimo programinės ir aparatinės įrangos dalių. Kiekvienas duomenų srautas numeruojamas pagal vykdymo eiliškumą.



4.4 pav. Tamprumo rodiklių radimo algoritmo schema

Fig. 4.4. Scheme of algorithm of identification of elastic characteristics

Medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo uždavinio pradžioje GA atsitiktiniu būdu sukuriami pirmoji individų karta (pirmasis žingsnis) ir išsaugoma kompiuterio kietajame diske. Kartą sudaro individai, kurių kiekvienas yra tam tikros medžiagos tamprumo rodiklis, t. y. prognozuojamų medžiagos savybių rinkinys. Genetinio proceso metu medžiagos savybės iš dešimtainės sistemos perskaičiuojamos į dvejetainę. Po genetinių manipuliacijų dvejetainė seka konvertuojama atgal į dešimtainę ir naujosios medžiagos savybės keliauja į skaitmeninį modelį (sukurtą pirmajame žingsnyje), iš kurio gaunami bandinio su naujais tamprumo rodikliais tikriniai dažniai (2 žingsnis). Užprogramuotas ANSYS paleidimo mechanizmas reikalingas iš medžiagos matematinio modelio gauti skaitmeninio bandinio tikrinius dažnius. Valdymo pultas paleidžia ANSYS

BEM paketą ir laukia, kol su naujais medžiagos tamprumo rodikliais bus gauti skaitmeninio modelio tikriniai dažniai. Pastarieji įrašomi į kietąjį diską (3 ir 4 žingsniai). Programos valdymo pultas tikrinius dažnius pateikia GA tikslo funkcijos skaičiavimui (5 žingsnis). GA suskaičiuoja tikslo funkciją su naujais skaitinio modelio tikriniais dažniais ir, jei stabdymo kriterijus nėra pasiektas, pateikia naują individų kartą su medžiagų tamprumo rodikliais (6 žingsnis). Procesas kartojamas, kol pasiekiamas stabdymo kriterijus. Juo gali būti kartų skaičius arba sprendinio konvergavimo lygis, pavyzdžiui, jei per paskutines 5 kartas bendras populiacijos tikslo funkcijos vidurkis kinta mažiau kaip 5%, GA stabdomas.

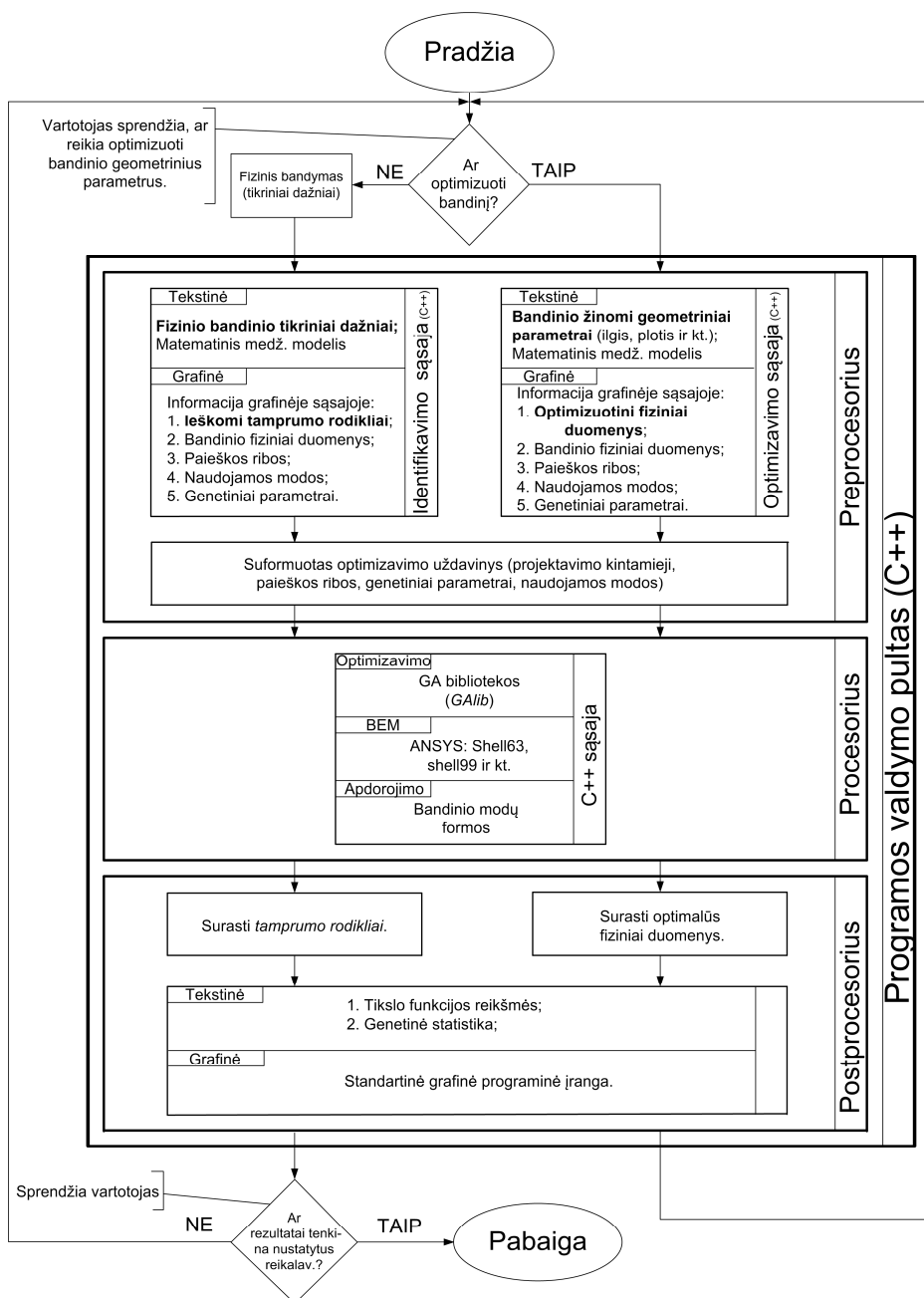
Medžiagų tamprumo rodiklių radimo programinė sistema sudaryta iš trijų pagrindinių dalių: preprocesoriaus, procesoriaus ir postprocesoriaus (4.5 pav.).

Pirmiausia vartotojas turi pasirinkti, ar reikia optimizuoti bandinio geometrinis parametrus vieno kurio nors tamprumo rodiklio išryškinimui. Tai atliekama duomenų įvedimo vartotojo sąsajoje pasirinkus atitinkamą meniu punktą¹⁶. Preprocesorius realizuotas taip, kad pagrindinės jo dalys yra vienodos abiem pasirinkimams, skiriasi procesoriui paruošiama informacija. Jei pasirenkama, kad bandinį reikia optimizuoti, APDL programavimo kalba paruošiami trys medžiagos matematiniai modeliai, besiskiriantys normimu optimizuoti parametru. Grafiniame valdymo lange nurodomi reikiami bandinio duomenys, projektavimo kintamieji ir jų paieškos ribos, nustatomi genetiniai parametrai, naudotinos modos. Suformuotą optimizavimo uždavinį vartotojas gali patikrinti tekstiniu redaktoriumi, atsidaręs procesoriui paruoštą bylą, kitaip – suformuotą matematinį uždavinį.

Skaičiavimai atliekami procesoriuje, jų eigą vartotojas gali stebėti atsidariusiame komandinio režimo lange. Procesorius apjungia BEM paketą, GA biblioteką ir bandinio modų formos atpažinimo algoritmą. BEM paketas ANSYS skaičiuoja bandinio tikrinius dažnius, kurie būtini tikslo funkcijos skaičiavimams. Programinis procesorius sukonstruotas taip, kad skaičiuojant duomenis BEM paketu, GA būtų laikinai pristabdomas iki bus gauti reikiami rezultatai (tikriniai dažniai). ANSYS programos kraunamas tik branduolys, be vartotojo grafinės sąsajos, taip sutaupomas skaičiavimų laikas. Bandinio modų formos atpažinimo algoritmas vykdomas prieš tikslo funkcijos skaičiavimus. Visus tris programinius paketus valdo C++ programavimo kalba parašyta sąsaja.

Atlikus numatytą kiekį skaičiavimų, gauti rezultatai perduodami į postprocesorių. Vartotojas gali naudoti tik galutinius rezultatus, t. y. gautas projektavimo kintamųjų reikšmes arba pasirinktu būdu analizuoti ir apibendrinti papildomus duomenis, juos apdoroti standartiniais grafiniais paketais. Papildomi duomenys yra genetinė informacija, evoliucijos greitis, lygis, kiekvienos kartos individo tikslo funkcijų vidurkis ir kt.

¹⁶ Apie vartotojo sąsają žr. 4.3 poskyrį.



4.5 pav. Siūlomos technologijos algoritmas
Fig. 4.5. Algorithm of proposed technology

Jei gauti bandinio geometrijos optimizavimo rezultatai tenkina nustatytus reikalavimus, tuomet galima atlikti medžiagos tamprumo rodiklių paiešką. Gauti rezultatai nurodomi grafinės duomenų įvedimo sąsajos lange, ten pat nurodomos projektavimo kintamųjų – tamprumo rodiklių – paieškos ribos, genetiniai parametrai, naudotinos modos ir kt.

Procesoriaus veikimas identifikavimo atveju nuo optimizavimo skiriasi suformuotų matematinių medžiagos modelių skaičiumi. Postprocesoriuje vartotojas gali analizuoti ir apdoroti duomenis anksčiau aprašytu būdu. Jei tamprumo rodiklių paieškos rezultatai tenkina nustatytus reikalavimus, vartotojas gali pasirinkti, arba optimizuoti bandinio geometriją kito tamprumo rodiklio įtakos išryškinimui, arba išsaugoti rezultatus ir baigti skaičiavimus. Jei rezultatai netenkina nustatytų reikalavimų, identifikuojama nuo pradžių, tačiau keičiamos projektavimo kintamųjų paieškos ribos ir/arba genetiniai parametrai siekiant pagerinti identifikavimą.

Natūrinio bandinio tikrinai dažniai

Bandinio tikriniai dažniai saugomi tekstinėje byloje, kuri įrašoma numatyta kataloge. Natūrinio bandinio tikriniai dažniai gaunami atlikus natūrinį bandymą laboratorijoje pagal 2.1 skyriuje aprašytą būdą.

Valdymo pulto informacija

Valdymo pulto informacija saugoma tekstinėje byloje tam, kad prireikus pakeisti norimą genetinį parametą ar suformuoti naują medžiagų tamprumo rodiklių radimo uždavinį, nereikėtų redaguoti programos kodo. Tekstinėje byloje užrašomos norimos paieškos ribos, genetiniai parametrai, žinomos bandinio geometrinės ir fizinės charakteristikos, BE tinklelio tankis, kiek ir kurios modos bus naudojamos.

Genetinis algoritmas

Valdymo pulte suformuojamas GA. Nurodoma kokį GA tipą naudoti, suformuojamas genomai, populiacija, nurodoma mutacijos, kryžminimo, elitizmo, atrankos parametrai ir kt.

Naudojamas dešimtainio skaičiaus vertimas į dvejetainį ir atgal genomai „GABin2DecGenome“. Šis genomai realizuotas tradiciniu būdu, kuomet konvertuojama dvejetainės eilutės į dešimtaines. Naudojant šį genomą reikia nurodyti atvaizdavimo bitų skaičių (pagal nutylėjamą dvejetainis kodas dešimtainiame atvaizduojamas 2 bitais). „GABin2DecGenome“ sukuriamas genomai kyla iš „1DBinaryStringGenome“ klasės. Valdymo konsolėje geno atvaizdavimo yra „GABin2DecPhenotype“ klasės objektas „map“, o individas sukonstruojamas „GABin2DecGenome“ klase ir vadinamas „genome“.

Prieš sukuriant genomą reikia nurodyti jo fenotipą. Fenotipas apibrėžia kaip bitai turi atvaizduoti dešimtainį skaičių ir atvirkščiai. Viena fenotipe yra saugomas bitų skaičius, naudojamas dešimtainių skaičių kodavimui į dvejetainius ir minimalios bei maksimalios paieškos ribos, nurodytos dešimtainiu formatu:

```
GABin2DecPhenotype map;
for(i=0; i<char_kiekis; i++)
    map.add(16, min_CHAR[i], max_CHAR[i]);
GABin2DecGenome genome(map, objective, (void *)T_CHAR);
```

Toliau suformuojamas norimas GA tipas ir paleidžiami skaičiavimai. GA tipas „*GASteadyStateGA*“ naudoja persidengiančias populiacijas pagal nurodytą persidengimo lygį. Algoritmas kiekvienoje iteracijoje klonavimu sukuria laikiną individų populiaciją, ją prideda prie ankstesnės populiacijos ir tuomet pašalina blogiausius individus iki nustatyto populiacijos individų skaičiaus, nurodomo parametru „*pReplacement*“ procentine išraiška. Numatytas atrankos būdas yra ruletės principo.

```
GASteadyStateGA ga(genome);
```

Nurodomi norimi genetiniai parametrai – kartų skaičius, populiacijos dydis, kiek narių populiacijoje keisti naujais, mutacijos ir kryžminimo tikimybė. Objektas „*minimize*“ nurodo, kad bus ieškoma tikslo funkcijos mažiausioji reikšmė, o „*evolve*“ paleidžia sukonstruotą GA.

```
ga.nGenerations(nngen);
ga.populationSize(popsiz);
ga.pReplacement(pNGen);
ga.pMutation(pmut);
ga.pCrossover(pcross);
ga.minimize();
ga.evolve();
```

Tikslo funkcija

Tikslo funkcija valdymo pulte vadinama „*objective*“, konstruojama „*GABin2DecGenome*“ klase, nurodant jai sukurtą geno konstrukciją „*genome*“:

```
float objective(GAGenome & c)
{ GABin2DecGenome & genome = (GABin2DecGenome &c); }
```

Suformuojama rinkmena BEM su medžiagos tamprumo rodikliais iš geno ir paleidžiamas ANSYS, iš kurio gaunami bandinio su spėjamais tamprumo rodikliais tikriniai dažniai. ANSYS paketas paleidžiamas klase „*loadAnsysInBatchMode*“, kuri pristabdo visą medžiagų tamprumo rodiklių radimo algoritmą kol bus suskaičiuoti bandinio tikriniai dažniai. BEM paketui matematinis bandi-

nio modelis pateikiamas iš anksto paruoštoje APDL rinkmenoje, nurodoma, kur saugoma ANSYS „log“ byla:

```
Dazniai.loadAnsyzInBatchMode("d:\...\Orto_mat.txt", "C:\ansys.rez");
```

Suskaičiavus bandinio tikrinius dažnius įvertinama tikslo funkcijos reikšmė. Iš rezultatų rinkmenos nuskaitomi bandinio tikriniai dažniai, kurie lyginami su iš anksto gautais natūrinio bandymo rezultatais. Tikslo funkcijoje vertinami tik vartotojo nurodyti tikriniai dažniai.

Bandinio geometrinių parametrų optimizavimas

Šioje programos dalyje GA konstruojamas visiškai taip pat, kaip ir medžiagų tamprumo rodiklių radimo algoritme, išskyrus tai, kad tikslo funkcija sukonstruota kitaip ir ji yra maksimizuojama. Skaičiuojant tikslo funkciją, ANSYS šiuo atveju paleidžiamas tris kartus tam, kad tikriniai dažniai būtų gauti trijų skirtingų bandinių, besiskiriančių siekiamu išryškinti parametru. Naudojamas centrinių skirtumų metodas, kuomet siekiamo išryškinti parametro žingsnis dalinamas pusiau ir gaunamos dvi naujos reikšmės, besiskiriančios Δ . Pavyzdžiui, jei tai būtų Puasono koeficientas, spėjama jo reikšmė yra 0,32, tai dvi naujos reikšmės, su kuriomis skaičiuojami to paties bandinio tikriniai dažniai yra $0,32+\Delta$ ir $0,32-\Delta$. Gaunamos dvi tikslo funkcijos vertės, su mažesniąja-viduriniąja ir su didesniąja-viduriniąja parametro reikšmėmis. Tikslo funkcijos viena iš kitos atimamos ir dalinamos iš ieškomo parametro žingsnio 2Δ .

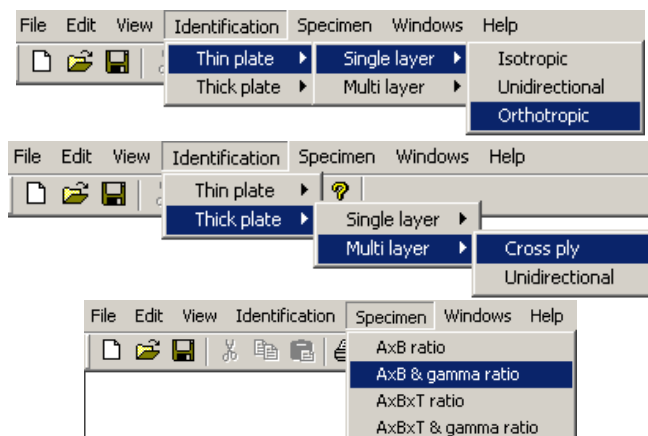
4.3. Vartotojo sąsaja

Vartotojo sąsaja, realizuota C++ programavimo kalba, skirta valdyti medžiagų tamprumo rodiklių radimo įrankį ir leidžia sutaupyti laiko atliekant skaičiavimus, kadangi, norint ieškoti vienos ar kitos medžiagos tamprumo rodiklių, reikia nurodyti reikiamus dydžius.

Vartotojo sąsajoje yra dvi pagrindinės atšakos: medžiagų tamprumo rodiklių radimo ir bandinių formos optimizavimo pasirinkto parametro atžvilgiu (4.6 pav.).

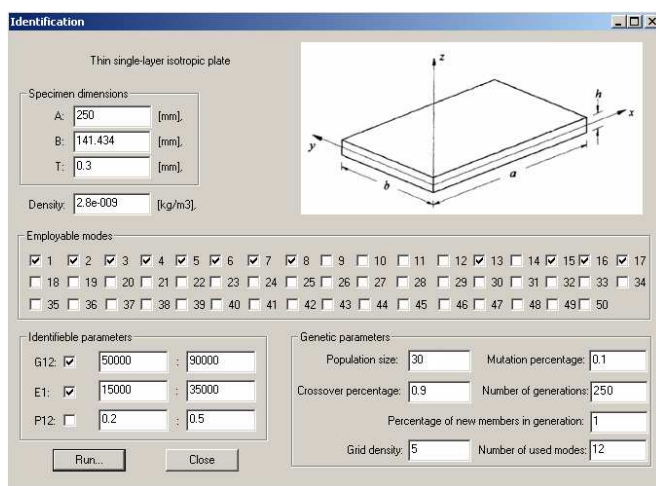
Pirmojoje atšakoje vartotojas gali pasirinkti kokio storio plokštelės bus ieškomi tamprumo rodikliai. Nuo plokštelės storio priklauso, ar bus įmanoma surasti statmenus pagrindinei plokštumai tamprumo rodiklius. Toliau seka pasirinkimas vienasluoksni arba daugiasluoksni plokštelė. Pasirinkus vienasluoksni bandinį reikia nurodyti kokio tipo medžiaga: izotropinė, vienakryptė arba ortotropinė. Pasirinkus daugiasluoksni bandinį nurodoma vienakryptė ar skersai armuota medžiaga. Plonai ir storai plokštei pasirinkimo galimybės yra vienodos,

skiriasi tik nustatymo langai, kuriuose galima papildomai į paiešką įtraukti ne-plokštuminius tamprumo rodiklius.



4.6 pav. Medžiagų tamprumo rodiklių radimo programinės įrangos meniu
Fig. 4.6. Menu of identification software of elastic characteristics of materials

Pasirinkus, pavyzdžiui, ploną izotropinę plokštelę matomas toks nustatymų langas (4.7 pav.), kuriame vartotojas turi nustatyti bandinio geometrinius parametrus, medžiagos tankį, naudojamas modas, ieškomų tamprumo rodiklių paieškos ribas.



4.7 pav. Izotropinės medžiagos tamprumo rodiklių radimo nustatymų langas
Fig. 4.7. Settings window of identification of isotropic material characteristics

Pasirinkus ieškoti sluoksniuotos medžiagos tamprumo rodiklius, nustatymų langas yra labai panašus į anksčiau aprašytą, tik jame yra daugiau medžiagų rodiklių (4.8 pav.). Kartais ieškant medžiagos tamprumo rodiklių yra daromos prielaidos, kad keli rodikliai yra vienodi. Ši sąlyga turi būti užrašyta APDL rinkmenoje, kuomet vartotojas ruošia medžiagos matematinį modelį.

The screenshot shows the 'Identification' window for a layered material. It includes sections for specimen dimensions (A, B, T, Density), a list of employable modes (1-50), identifiable parameters (G12, E1, P12, G13, E2, P13, G23, E3, P23), and genetic parameters (Population size, Crossover percentage, Number of generations, Mutation percentage, Percentage of new members in generation, Grid density). The 'Run' and 'Close' buttons are at the bottom right.

4.8 pav. Sluoksniuotos medžiagos tamprumo rodiklių radimo nustatymų langas

Fig. 4.8. Settings window of identification of layered material characteristics

Formoje rodomi rekomenduojami genetiniai parametrai, tačiau vartotojas juos gali reguliuoti, kadangi kiekvienam uždaviniui jie yra skirtingi. Nustačius visus reikiamus dydžius mygtuku „Run“ paleidžiamas algoritmas.

Algoritmo darbo metu vartotojas mato langą su vykstančio medžiagų tamprumo rodiklių radimo proceso indikatoriumi. Programai baigus darbą, į kietąjį diską įrašomos rinkmenos su kiekviename individe buvusiais tamprumo rodikliais ir gauta tikslo funkcija, parodomas geriausias sprendinys. Kitoje rinkmenoje užrašoma kiekvienos kartos vidutinė tikslo funkcijos vertė. Joje matyti kaip sprendinys konverguoja, ir, jei akivaizdžiai nepakankamai, vartotojas gali atitinkamai koreguoti genetinius dydžius.

Atliekant pasiūlytos technologijos bandymus su įvairiomis medžiagomis pirmieji bandymai buvo atliekami su programa be vartotojo sąsajos. Uždavinio suformulavimas ir skaičiavimų paruošimas paprastai trunka apie valandą. Vartotojo sąsaja sukurta remiantis atlikus eilę bandymų ir patirtimi ruošiant uždavinius skaičiavimui. Tolesni technologijos bandymai parodė, kad uždavinio paruošimui sugaištama iki 10 kartų mažiau laiko, jei naudojamosi siūloma vartotojo sąsaja.

Bendrosios išvados

Įprastinis medžiagų tamprumo rodiklių identifikavimo algoritmas papildytas bandinių geometrijos optimizavimo ir modų formos reguliavimo spektre įrankiais. Siūloma technologija patikrinta dviem etapais su keliomis skirtingomis medžiagomis. Atlikus teorinius tyrimus ir eksperimentus suformuluotos išvados:

1. Skaičiavimų eigoje atnaujinant matematinį medžiagos modelį preliminariais tamprumo rodikliais, tam tikros, paprastai aukštesnės eilės, modos gali keisti savo vietas tikrinių dažnių spektre. Nustatyta, kad to neįvertinus, tikslo funkcijoje būtų sugretinami skirtingų modų dažniai, dėl to nukentėtų galutinio rezultato tikslumas. Šios problemos sprendimui pasiūlytas algoritmas prieš tikslo funkcijos skaičiavimus atpažįstantis modas ir pagal natūrinio bandymo duomenis jas surikiuojantis spektre.
2. Žinoma, kad Puasono koeficiento įtaka bandinio tikriniam dažniams yra menka. Keičiant bandinio kraštinių ilgių santykį ir ortotropijos kampą nustatyta, kad šio tamprumo rodiklio įtaka ženkliai padidėja esant tam tikram geometrinių parametų deriniui, kuris kiekvienai medžiagai yra skirtingas.
3. Ieškant medžiagos tamprumo rodiklių gali būti reikalingi keli tos pačios medžiagos bandiniai, optimizuoti norimo tamprumo rodiklio išryškinimui. Bandinio optimizavimas vienam kuriam nors dydžiui gali lemti prastesnius likusiųjų rodiklių radimo rezultatus.

4. Optimizavus bandinių geometriją Puasono koeficientas surandamas nuo 2 (sluoksniuotoms medžiagoms) iki 8 kartų (vienasluoksnėms) tiksliau, palyginus su neoptimizuoto bandinio rezultatais.
5. Skaitiniai bandymai parodė, kad genetiniai algoritmai yra efektyviai pritaikomi medžiagų tamprumo rodiklių paieškai, naudojamų bandinių geometriniam parametrui optimizuoti.
6. Atlikus daugiau kaip 500 skaitinių bandymų buvo pastebėta, kad uždavinio sprendinys priklauso nuo genetinio algoritmo parametrų. Rekomenduojamos optimalios genetinių operatorių reikšmės: kryžminimo – 0,9, mutacijos – 0,1 tikimybės, mažiausias populiacijų skaičius – 250, mažiausias populiacijos dydis – 10 individų.
7. Siūloma technologija gali būti pritaikoma įvairių medžiagų (vienasluoksnių ir sluoksniuotų) tamprumo rodiklių radimui. Joje galima naudoti įvairius baigtinių elementų metodo paketus (komercinius ir atvirojo kodo). Rekomenduojama kaip efektyvi priemonė medžiagų tamprumo rodiklių radimui.

Literatūra ir šaltiniai

Agarwal, P.; Raich, A. M. 2006. Design and optimization of steel trusses using genetic algorithms, parallel computing and human-computer interaction. *Structural Engineering and Mechanics*. 23(4): 325–337.

Araujo, A. L.; Mota Skares, C. M.; Moreira de Freitas, M. J.; Pedersen, P.; Herskovits, J. 2000. Combined numerical-experimental model for the identification of mechanical properties of laminated structures. *Compos Struct*. 50: 363–372.

Ayorinde, E. O.; 1995. Elastic constants of thick orthotropic composite plates. *J Compos Mater*. 29: 1025–1039.

Ayorinde, E. O.; Gibson, R. F. 1993. Elastic constants of orthotropic composite materials using plate resonance frequencies, classical lamination theory and an optimized three-mode Rayleigh formulation. *Compos Eng*. 3: 395–407.

Baba, N. 1981. Convergence of a random optimization method for constrained optimization problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 33(4): 451–461. ISSN: 0022–3239 (Print) 1573–2878 (Online).

Back, T. 1996. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms. *Oxford University Press US*. ISBN: 0–1950–9971–0, 978–0–19509–971–3.

Back, T.; Fogel, D. B.; Michalewicz, Z. editors. 1997. Handbook of Evolutionary Computation. *Computational Intelligence Library*. Oxford University Press in cooperation with the Institute of Physics Publishing / CRC Press, Bristol, New York, ringbound edi-

tion. ISBN: 0-7503-0392-1, 978-0-75030-392-7, 0-7503-0895-8, 978-0-75030-895-3.

Back, T.; Hammel, U.; Schwefel, H. P. 1997. Evolutionary computation: comments on the history and current state. *IEEE Transactions on Evolutionary Comp.* 1(1): 3–17.

Back, T.; Hoffmeister, F.; Schwefel, H. P. 1991. A survey of evolution strategies. In *Proceedings of the 4th int Conference on Genetic Algorithms ICGA'91*. p. 2–9.

Back, T.; Schwefel, H. P. 1993. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. *Evolutionary Computation*. 1(1): 1–23,.

Balasubramaniam, K.; Rao, N. S. 1998. Inversion of composite material elastic constants from ultrasonic bulk wave phase velocity data using genetic algorithms. *Composites Part B, Engineering* 29, 171–180 Vol. 29B, 171–180.

Bareišis, J.; 2006. Stiffness and Strength of Multilayer Beams. *Journal of Composite Materials*. originally published online Jul 12, 2005. 40(515): 515–531.

Bentley, P. J.; Corne, D. W. 2002. An introduction to creative evolutionary design. In *Creative Evolutionary Design*. Academic Press, New York, p 1–75

Bentley, P. J.; Gordon, T. G. W.; Kim, J.; Kumar, S. 2001. New trends in evolutionary optimization. In *Proceedings of CEC 2001, The Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, Korea. p. 162–169

Berthelot, J. M. 1999. Composite materials. Mechanical behaviour and structural analysis. *Springer-Verlag New York, Inc.* p. 645. ISBN 0-387-98426-7.

Beyer, H. G. 2001. The theory of evolution strategies. Natural Computing Series. *Springer-Verlag New York, Inc.*, NY, USA, ISBN: 978-3-54067-297-5, 3-5406-7297-4.

Beyer, H. G.; Schwefel, H. P. 2002. Evolution strategies – a comprehensive introduction. *Natural Computing: an international journal*, 1(1): 3–52. ISSN: 1567-7818 (Print) 1572-9796 (Online). doi:10.1023/A:1015059928466.

Bledzki, A. K.; Kessler, A.; Rikards, R.; Chate, A. 1999. Determination of elastic constants of glass/epoxy unidirectional laminates by the vibration testing of plates. *Composite Science and Technology*. 59: 2015–2024.

Bremermann, H. J. 1958. “The evolution of intelligence. The nervous system as a model of its environment”, *Technical report no.1*, Dept. Mathematics, Univ. Washington, Seattle, 477(17).

Carlsson, L. A.; Pipes, R. B. 1987. Experimental characterization of advanced composite materials. New York: *Prentice-Hall*.

Chakraborty, S.; Mukhopadhyay, M.; Sha, O. P. 2002. Determination of Physical Parameters of Stiffened Plates using Genetic Algorithm, *Journal of computing in civil engineering*, p. 206–211.

Chambers, L. D. 2000. The Practical Handbook of Genetic Algorithms: Applications. *Chapman & Hall/CRC*, USA.

Chen, C. M.; Kam, T. Y. 2007. Elastic constants identification of simetric angle-ply laminates via two level optimization approach. *Compos science technology*. 67: 698–706.

Cunha, J.; Cogan, S.; Berthod, C. 1999. Application of genetic algorithms for the identification of elastic constants of composite materials from dynamic tests. *Int J Numer Methods Eng*. 45: 891–900.

De Jong, K. 1975. The Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems. *PhD thesis*, University of Michigan, Ann Harbor. Dissertation Abstract International, 36(10), 5140B, University Micro_lms No 76–9381.

De Visser, J.; Sol, H.; Maton, W.; De Wilde, W. P.; Vantomme, J. 1998. Identification of the temperature dependent complex moduli of composite materials using a mixed numerical experimental method. *Proceedings of the 1988 Sixth International Conference on Computer Methods in Composite Materials*, CADCOMP'98, Montreal, 181–190.

De Visser, J.; Sol, H.; De Wilde, W. P.; Vantomme J. 1997. "Identification of damping properties of orthotropic properties of orthotropic composite materials using a mixed numerical experiment method", *Appl Comp Mater*; 4: 13–33

Deobald, L. R.; Gibson, R. F. 1988. Determination of elastic constants of orthotropic plates by modal analysis/Rayligh-Ritz technique. *J. Sound Vib*. 124: 269–283.

Deneubourg, J. L.; Goss, S. 1989. Collective patterns and decision-making. *Ethology, Ecology & Evolution*, 1(4):295–311.

Deneubourg, J. L.; Pasteles, J. M.; Verhaeghe, J. C. 1983. Probabilistic behaviour in ants: a strategy of errors. *Journal of Theoretical Biology*, 105(2):259–271. doi:10.1016/S0022-5193(83)80007-1.

Dorigo, M.; Birattari, M.; Stutzle, T. 2006. Ant colony optimization. *Computational Intelligence Magazine*, 1(4):28–39. ISSN: 1556–603X. IN–SPEC Acc. No: 9184238.

Dorigo, M.; Blum, C. 2005. Ant colony optimization theory: a survey. *Theoretical Computer Science*, 344(2–3):243–278. ISSN: 0304–3975.

Dorigo, M.; Di Caro, G.; Gambardella, L. M. 1998. Ant algorithms for discrete optimization. *Technical Report IRIDIA/98–10*, Universite Libre de Bruxelles, Belgium.

Dorigo, M.; Birattari, M.; Stutzle T. 2006Ant colony optimization. *Computational Intelligence Magazine*, 1(4):28–39. ISSN: 1556–603X. INSPEC Acc. No: 9184238.

Dyer, M. E.; Frieze, A. M. 1991. Computing the volume convex bodies: a case where randomness probably helps. *Proc Symp in Applied Mathematics*. 44: 123–169.

Eberhart, R. C.; Kenedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science MHS'95*, p. 39–43. IEEE ISBN: 0–7803–2676–8.

Edwins, D. J. 1986. Modal testing: theory and practice. *Research Studies Press*.

Euler, E. Identification of the material properties of slender composite structures. *Vrije Universiteit Brussel, Faculteit Toegepaste Wetenschappen Werktuigkunde*.

- Fogel, D. B.; Ghoseil, A. 1997. Schema processing under proportional selection in the presence of random effects. *IEEE Transactions on Evolutionary Comp.* 1(4): 290–293.
- Frederiksen, P. S. 1997. Numerical studies for the identification of elastic constants of thick orthotropic laminates, *European Journal Mech. A/Solids*. 16: 117–140.
- Frederiksen, P. S. 1997. Experimental procedure and results for the identification of elastic constants of thick orthotropic plates. *J Compos Mater.* 31:360–82.
- Frederiksen, P. S. 1998. Parameter uncertainty and design of optimal experiments for the estimation of elastic constants. *International J of Solids and Structures*. 35: 1241–1260.
- Frederiksen, P. S. 1999. Single-layer plate theories applied to the flexural vibration of completely free thick laminates. *J Sound Vib.* 186:743–59.
- Goldberg, D. E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA. ISBN: 0–2011–5767–5.
- Goss, S.; Beckers, R.; Deneubourg, J. L.; Aron, S.; Pasteles, J. M. 1990. How trail laying and trail following can solve foraging problems for ant colonies. In R. N. Hughes, editor, *Behavioural Mechanisms of Food Selection*, NATO ASI Series, G 20, p. 661–678. Springer-Verlag, Berlin. ISBN: 0–3875–1762–6, 978–0–38751–762–9.
- Grefenstette, J. J. 1993. Deception considered harmful”. In L. D. Whitley, ed., *Foundations of Genetic Algorithms 2*. Morgan Kaufmann.
- Gurin, L. S.; Rastrigin, L. A. 1965. Convergence of the random search method in the presence of noise. *Automation and Remote Control*, 26:1505–1511.
- Han, X.; Liu, G. R. 2002. An inverse technique for identification of elastic constants of a glass/epoxy laminated plate, in 4th *International Conference on Inverse Problems in Engineering*, Brasil.
- Han, X. et al. 2002. On Determination of the Material Constants of Laminated Cylindrical Shells Based on an Inverse Optimal Approach, *Inverse Problems in Science and Engineering*. 10(4): 309–322.
- Han, X.; Jiang, C. 2008. Determination of elastic constants of laminates with uncertainty of loads. *State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body*, College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha City, P. R. China 410082.
- Heitkotter, J.; Beasley, D. editors. 1998. Hitch-Hiker’s Guide to Evolutionary Computation: A List of Frequently Asked Questions (FAQ). *ENCORE, The Evolutionary Computation REpository Network*. USENET: comp.ai.genetic.
- Holland, J. H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. The University of Michigan Press, Ann Arbor. ISBN: 0–4720–8460–7, 978–0–47208–460–9, 0–5850–3844–9, 978–0–58503–844–5, 978–0–26258–111–6. Reprinted by MIT Press, April 1992, NetLibrary, Inc.

Holland, J. H. 1962. Outline for a logical theory of adaptive systems". *Journal of the Association for Computing Machinery*. 3: 297–314.

Holland, J. H. 1968. Hierarchical descriptions of universal spaces and adaptive systems (Technical Report ORA Projects 01252 and 08226. Ann Arbor: University of Michigan, Department of Computer and Communication Sciences.

Hwang, S. F.; He, R. S. 2006. A hybrid real-parameter genetic algorithm for function optimization. *Advanced Engineering Informatics*. 20: 7–21.

Hwang, S.F. Elastic Constants of Composite Materials by an inverse method Based on a Hybrid Genetic Algorithm (to be published in Composite B)

Hwang, S. F.; Chang, C. S. 2000. Determination of elastic constants of materials by vibration testing. *Compos Struct*. 49: 183–90.

Kenedy, J.; Eberhart, R. C. 1995. Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. WA, Australia. 4: 1942– 1948. ISBN: 0–7803–2768–3.

Keršienė, N.; Žiliukas, A. 2006. Investigation of the mode I and mode II interlaminar fracture toughness in woven composites. *Mechanika*. Proc. of the 11th int. Conf. Kaunas University of Technology. p. 157–162.

Kotani, M.; Ochi, M.; Ozawa, S.; Akazawa, K. 2001. Evolutionary discriminant functions using genetic algorithms with variable-length chromosome. *Neural Networks*. Proceedings. IJCNN '01.

Kuranovas, A.; Kvedaras, A. K. 2007. Behaviour of hollow concrete-filled steel tubular composite elements. *J. of civil engineering and management*. 13(2): 131–141.

Lagarias, J. C.; Reeds, J. A.; Wright, M. H.; Wright, P. E. 1998. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on Optimization (SIOPT)*, 9(1): 112–147. ISSN: 1052–6234 (print) / 1095–7189 (online).

Lee, C. R.; Kam, T. Y. 2006. Identification of mechanical properties of elastically restrained laminated composite plates using vibration data. *J Sound Vib*. 295: 999–1016.

Levesque, M.; Gilchrist, M. D.; Fisa, B. 2003. A theoretical study of the tensile test for highly anisotropic composite materials. *Authorized reprint from standart technical publication*. p. 1436.

Lewis, R. M.; Torczon, V. J.; Trosset, M W. 2000. Direct search methods: Then and now. *Technical Report NASA/CR–2000–210125 and ICASE Report No. 2000–26*, Institute for Computer Applications in Science and Engineering, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA (Operated by Universities Space Research Association), National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center Hampton, Virginia 23681–2199.

Liu, G. R., et al. 2002. A Combined Genetic Algorithm and Nonlinear Least Squares Method for Material Characterization Using Elastic Waves. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 191: 1909–1921.

- Liu, G. R., et al. 2002. Determination of Elastic Constants of Anisotropic Laminated Plates Using Elastic Waves and Progressive Neural Network. *Journal of Sound and Vibration*. 252(2): 239–259.
- Liu, G. R., et al. 2002. An Inverse Procedure for Determination of Material Constants of Composite Laminates Using Elastic Waves, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 191: 3543–3554.
- Liu, G. R.; Ma, W. B. 2000. Inversion of Ply Orientations of Composite Laminates Using Genetic Algorithm *Proc of the Advances in Computational Engineering and Sciences*. Tech Science Press, Encino, CA. p. 1227–1232.
- Ma, C. C.; Lin, C. C. 1999. Inverse evaluation of material constants for composite plates by optical interferometry method. *AIAA J*. 37: 947–53.
- Maletta, C.; Pagnotta, L. 2004. On the determination of mechanical properties of composite laminates using genetic algorithms. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 1: 199–211.
- Manderick, B.; Moyson, F. 1988. The collective behaviour of ants: an example of self-organization in massive parallelism. *In Proceedings of AAAI Spring Symposium on Parallel Models of Intelligence*. Stanford, California.
- Maniezzo, V.; Gambardella, L. M.; de Luigi, F. 2004. Ant colony optimization. *In New Optimization Techniques in Engineering*, Springer-Verlag. 5: 101–117.
- Matyas, J. 1965. Random optimization. *Automation and Remote Control*, 26(2): 244–251.
- Matyas, J. 1968. Das zufällige optimierungsverfahren und seine konvergenz. *In Proceedings of the 5th International Analogue Computation Meeting*. Presses Academiques Europeens, Brussels, Lausanne. p. 540–544.
- McIntyre, M. E.; Woodhouse, J. 1988. On measuring the elastic and damping constants of orthotropic sheet materials. *Acta Metallurgica*. 36: 1397–1416.
- McKinnon, K. I. M. 1999. Convergence of the Nelder-Mead simplex method to a non-stationary point. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1): 148–158. ISSN: 1052–6234 (print) / 1095–7189 (online).
- Michalewicz, Z. 1996. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. *Springer*.
- Michalewicz, Z.; Schoenauer, M. 1996. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary Computation*, 4(1): 1–32.
- Michalewicz, Z.; Fogel, D. B. 2000. How to Solve It: Modern Heuristics. *Springer-Verlag*, Berlin.
- Mitchell, M. 1999. An Introduction to Genetic Algorithms. *Apogeo Scientifica*, Italy.
- Mota Scares, C. M.; Freitas, M. M.; Pederson, A. L. 1993. Identification of material properties of composite plate specimens, *Composite Structures*. 25: 277–285.

Nelder, J. A.; Mead, R. A. 1965. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*. 7: 308–313.

Olsson, D. M.; Nelson, L. S. 1975. The nelder-mead simplex procedure for function minimization. *Technometrics*. 17(1):45–51.

Pagnotta, L.; Stigliano, G. 2006. Identification of composite plate elastic properties by displacement field measurement. *Proceedings of the 2nd WSEAS Int. Conference on Applied and Theoretical Mechanics*, Venice, Italy. p. 333–338.

Parrish, J. K.; Hamner, W. M., editors. 1997. Animal Groups in Three Dimensions: How Species Aggregate. *Cambridge University Press*. ISBN: 0–5214–6024–7, 978–0–52146–024–8.

Partaukas, N.; Bareišis, J. 2009. The stress state in two-layer hollow cylindrical bars. *MECHANIKA*. 1(75): 5–12. ISSN 1392–1207.

Pederson, P. 1999. Identification techniques in composite laminates, In Mota Soares CA, Mota Soares CM, Freitas MM, editors *Mechanics of Composite Materials and Structures*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 443–452,.

Peter J. B. editor. 1999. Evolutionary design by computers.

Poli, R. 2000. Why the schema theorem is correct also in the presence of stochastic effects”. *Evolutionary Computation. Proceedings of the 2000 Congress*. 1: 487–492.

Radcliffe, N. J. 1997. Schema Processing. In: *Handbook of Evolutionary Computation* (T. Baack, D.B. Fogel and Z. Michalewicz, eds.) p. B.2.5–1.10, *Oxford University Press*.

Rastrigin, L. A. 1963. The convergence of the random search method in the extremal control of many-parameter system. *Automation and Remote Control*. 24:1337–1342.

Rechenberg, I. 1965. Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem. *Royal Aircraft Establishment*. Library Translation 1122, Farnborough.

Rechenberg, I. 1973. Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. *Frommann-Holzboog Verlag*, Stuttgart, Germany. ISBN: 978–3–77280–374–1.

Rechenberg, I. 1994. Evolutionsstrategie '94, vol. 1 of Werkstatt Bionik und Evolutions-technik. *Frommann-Holzboog Verlag*, Stuttgart, Germany. ISBN: 978–3–77281–642–0.

Rikards, R. 1992. Elaboration of Optimal Design Models for Objects from Data of Experiments // In: *Optimal Design with Advanced Materials. Proc of the IUTAM Symposium*, Lyngby, Denmark. ed. P. Pedersen, Elsevier Science Publishers, 1993. p. 148–162.

Rikards, R.; Chate, A.; Steinchen, W.; Kessler, A.; Bledzki, A. K. 1999. Method for identification of elastic properties of laminates based on experiment design. *Compos Part B*. 30:279–89.

Rikards, R.; Chate, A.; Gails G. 2001. Identification of elastic properties of laminates based on experiment design, *International J Solids and Structures*. 38: 5097–5115.

- Roseiro, L.; Ramos, U.; Leal, R. 2004. Determination of material constants of composite laminates using neural networks and genetic algorithms. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, ECCOMAS 2004, P. Neittaanmäki, T. Rossi, K. Majava, and O. Pironneau (eds.), H. W. Engl and F. Tröltzsch (assoc. eds.), Jyväskylä.
- Russell, S. J.; Norvig, P. 2002. Artificial Intelligence: A Modern Approach. *Prentice Hall, second edition*. ISBN: 0-1379-0395-2.
- Schumer, M. A. 1967. Optimization by adaptive random search. *PhD thesis*, Princeton University, NJ. Supervisor Kenneth Steiglitz.
- Schumer, M. A.; Steiglitz, K. 1968. Adaptive step size random search. *IEEE Transactions on Automatic Control*. AC-13(3): 270-276.
- Schwefel, H. P. 1995. Evolution and Optimum Seeking: *The Sixth Generation*. John Wiley & Sons, Inc., Wiley Interscience, New York, NY, USA, 1993. ISBN: 0-4715-7148-2, 978-0-47157-148-3.
- Silva, M. F T.; Burges, L. M. S. A.; Rochinha, F. A.; De Carvalho, L. A. V. 2004. A genetic algorithm applied to composite elastic parameters identification. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 12(1): 17-28.
- Stickland, T. R.; Tofts, C. M. N.; Franks, N. R. 1992. A path choice algorithm for ants. *Naturwissenschaften*. 79(12): 567-572. ISSN: 0028-1042 (Print) 1432-1904 (Online). doi:10.1007/BF01131415.
- Tanenbaum, A. S.; van Steen, M. 2003. Distributed Systems. Principles and Paradigms. *Pearson/Prentice Hall International*. ISBN: 0-1323-9227-5, 978-0-13239-227-3, 978-0-13121-786-7.
- Tazawa, I.; Koakutsu, S.; Hirata, H. 1996. An immunity based genetic algorithm and its application to the VLSI floorplan design problem. *Proc IEEE Int Conf Evolut Comp*. p. 417-421.
- Torczon, V. J. 1989. Multi-Directional Search: A Direct Search Algorithm for Parallel Machines. *PhD thesis*, Rice University, Houston, TX, USA.
- Trosset, M. W. 1997. I know it when i see it: Toward a definition of direct search methods. *SIAG/OPT Views and News: A Forum for the SIAM Act Group on Optim*, 9: 7-10.
- Vobolis, J.; Albrechtas, D. 2008. Estimating wood panels anisotropic properties by resonance vibrations method. *Vibromechanika. J of Vib*. 10(4): 582-588. ISSN 1392-8716.
- Whitley, L. D. 1994. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4(2):65-85. ISSN: ISSN 0960-3174 (Print) 1573-1375 (Online). doi:10.1007/BF00175354.
- Wright, M. H. 1995. Direct search methods: Once scorned, now respectable. In D. F. Griffiths and G. A. Watson, editors, *Numerical Analysis – Proceedings of the 16th Dundee Biennial Conference in Numerical Analysis*, Pitman Research Notes in Mathematics. University of Dundee, Scotland, UK. Addison Wesley Longman Limited / Chapman & Hall/CRC, Harlow, UK. p. 191-208. ISBN: 0-5822-7633-0, 978-0-58227-633-8.

Yeh, I. C. 1999. Hybrid Genetic Algorithms for Optimization of Truss Structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 4(3): 199–206.

Yu, T.; Bentley, P. 1998. Methods to evolve legal phenotypes. *In Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. Amsterdam, Springer.

Žilinskas, A. 2006. Strength criterion of unidirectional composite. *Indian Journal of Engineering and Mechanical Sciences*. 13(6): 520–524.

Žilinskas, A.; Meslinas, N.; Juzėnas, K. 2006. Fracture investigation of layered composite structural elements. *Mechanika*. 3(59): 13–18.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Ragauskas, P.; Skukis, E. 2007. Material properties identification. Comparison of two techniques // *Mechanika*. Kaunas: Technologija. 6(68): 39–44. ISSN 1392–1207, (ISI Web of Science).

Ragauskas, P.; Belevičius, R. 2009. Identification of material properties of composite materials // *Aviation*. Vilnius: Technologija. 13(4): 109–115. ISSN 1648–7788, (SCOPUS, Compendex).

Straipsniai kituose leidiniuose

Belevičius, R.; Puiša, R.; Ragauskas, P. 2005. Atvirkštinės inžinerijos technologija medžiagų charakteristikoms nustatyti (Konf. pranešimų medžiaga). Kaunas, KTU, p. 597–601, CD laikmena.

Šešok, D.; Ragauskas, P. 2007, Santvarų topologijos ir formos optimizavimas genetiniais algoritmais. Lietuvos matematikos rinkinys. Matematikos ir informatikos institutas, Lietuvos matematikų draugija, Vilniaus universitetas. spec. nr., 47: 484–488. ISSN 0132–2818.

Paulius RAGAUSKAS

SLUOKSNIUOTŲ KOMPOZITINIŲ MEDŽIAGŲ
TAMPRUMO RODIKLIŲ IDENTIFIKAVIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (09T)

Paulius RAGAUSKAS

IDENTIFICATION OF ELASTIC PROPERTIES
OF LAYERED COMPOSITE MATERIALS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2010 07 12. 11,50 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius