



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Marius Mickaitis

**STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ JUNGČIŲ ĮTAKA
VIBRACIJŲ SILPIMUI**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, Statybos inžinerija - 02T

Vilnius, 2005

Disertacija rengta 2001–2005 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Vytautas Jonas STAUSKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

TURINYS

ŽYMENŲ SĄRAŠAS	3
BENDRA DARBO CHARAKTERISTIKA	6
• Tyrimų sritis ir aktualumas	6
• Tyrimų objektas	7
• Tikslas ir uždaviniai	7
• Tyrimų metodika	8
• Mokslinis naujumas	8
• Aprobacija	8
• Struktūra ir apimtis	9
 1. ĮVADAS	 10
1.1. Garso sklidimas pastatuose	10
1.2. Garso sklidimo pastatuose skaičiavimo metodai	12
1.2.1. Standartizuotas metodas	13
1.2.2. Statistinės energijos analizės metodas	13
1.2.3. Baigtinių elementų metodas	14
1.3. Pasirinktės motyvacija ir trumpa darbo apžvalga	15
 2. VIBRACIJŲ SILPIMO STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ JUNGTYSE	
MODELIAVIMAS.....	17
2.1. SEA teorijos koncepcija ir modeliavimo principai	17
2.2. SEA teorijos pusiau begalinių plokščių jungčių modelis	21
2.2.1. Plokščių jungtis	21
2.2.2. „Plokštės-strygo“ jungtis	29
2.2.3. Jungtis su tampriais tarpsluoksniais	33
2.2.4. Akustiškai storų plokščių jungtis	34
2.3. Baigtinio ilgio plokščių jungties modelis	34
2.4. Ortotropinių plokščių jungties modelis	36
2.5. Taškiniu būdu sujungtų plokščių jungties modelis	37
2.6. Išvados ir tyrimų tikslas	38

3. VIBRACIJŲ SILPIMO PLOKŠTĖS TIPO JUNGTYJE MODELIS	40
3.1. Garso bangų sklaidimo plokštės tipo elemente principai	40
3.2. Vibracijų silpimas jungtyje	41
3.2.1. Lankstymosi bangos lygtis ir savybės	42
3.2.2. Lankstymosi bangos sklaidimas	46
3.2.3. Kraštinės sąlygos	50
3.2.4. Vibracijų perdavimo koeficientai	53
3.3. Vibracijų silpimas simetrinėse jungtyse	54
3.4. Vibracijų silpimas asimetrinėse jungtyse	55
3.5. Išvados	61
4. VIBRACIJŲ SILPIMO „PLOKŠTĖS-STRYPO“ TIPO JUNGTYSE MODELIS	62
4.1. Garso bangų sklaidimo strypo tipo elemente principai	62
4.2. Vibracijų silpimas „plokštės-strypo-plokštės“ tipo jungtyje	63
4.2.1. Lankstymosi bangos sklaidimas	64
4.2.2. Kraštinės sąlygos	66
4.2.3. Vibracijų perdavimo koeficientai	68
4.3. Vibracijų silpimas „strypo-plokštės-strypo“ tipo jungtyje	68
4.3.1. Lankstymosi bangos sklaidimas	79
4.3.2. Kraštinės sąlygos	70
4.3.3. Vibracijų perdavimo koeficientai	71
4.4. Išvados	72
5. VIBRACIJŲ SILPIMO PASTATO JUNGTYSE SKAIČIAVIMO REZULTATAI	73
5.1. Skaičiavimo prielaidos ir naudojami duomenys	73
5.2. Plokštės tipo simetrinių jungčių skaičiavimo rezultatai	74
5.3. Plokštės tipo asimetrinių jungčių skaičiavimo rezultatai	82
5.4. „Plokštės-strypo“ tipo jungčių skaičiavimo rezultatai	86
5.5. Rezultatų sugretinimas su kitų autorių tyrimų rezultatais	90
5.6. Rezultatų pritaikymo galimybės standartizuotam metodui	92
5.7. Išvados	93
6. PAGRINDINIAI DARBO REZULTATAI IR IŠVADOS	95
LITERATŪROS SĄRAŠAS	97

ŽYMENŲ SĄRAŠAS

Matematiniai simboliai

e	eksponentė
i	iracionalusis skaičius ($=\sqrt{-1}$)
$\lg$	dešimtainis logaritmas
$\ln$	natūrinis logaritmas
π	3,14159...
$\operatorname{Re} (..)$	reali menamo skaičiaus dalis
$\frac{\partial f}{\partial x}$	funkcijos f dalinė išvestinė pagal x

Lotyniški rašmenys

A	bangos amplitudė (m)
B	lenkimo standumas plokštės ploto vienetui arba strypui (Nm)
D_v	greičio lygis (dB)
E	tamprumo modulis (N/m^2)
E_i	kinetinė sistemos i energija (J)
F	jėga (N)
G	šlyties modulis (N/m^2)
I	inercijos momentas (m^4)
J	momentinis impedansas (Nms/rad)
J_c	poliarinis strypo inercijos momentas (m^4)
K	vibracijų redukavimo rodiklis (dB)
K_T	sukimosi standumo konstanta (m^4)
L	garso slėgio lygis (dB)
L_{ij}	jungties tarp plokščių ilgis (m)
M	lenkimo momentas (Nm)
$P_{i, \text{in}}$	energijos srautas, suteikiamas sistemai i (W)
P_{ij}	energijos srautas iš sistemos i į sistemą j (W)
P_{id}	energijos nuostolių lygis (W)
R_{ij}	vibracijų perdavimo nuostoliai (dB)
S	paviršiaus plotas (m^2)

T_s	reverberacijos laikas (s)
Z	impedansas (Ns/m)
a	absorbcijos ilgis (m)
c	bangos greitis (m/s)
c_g	grupinis bangų greitis (m/s)
c_o	bangos greitis ore (m/s)
f	dažnis (Hz)
f_c	kritinis dažnis (Hz)
h	storis (m)
k	banginis skaičius (rad/m)
l	ilgis (m)
m	masė (kg)
p	slėgis (Pa)
t	laikas (s)
v	greitis (m/s)
w	kampinis greitis (rad/s)
x, y, z	koordinatės (m)

Graikiški rašmenys

γ_{ij}	vibracijų perdavimo koeficientas tarp plokštės i ir j (nedimensinis dydis)
ϕ	posūkio kampas (rad)
η_{ij}	ryšio nuostolių koeficientas sklindant energijai iš sistemos i į sistemą j (1/rad)
η_{id}	vidinis sistemos i nuostolių koeficientas (1/rad)
η_{tot}	pilnas sistemos i nuostolių koeficientas (1/rad)
λ	bangos ilgis (m)
μ	Puasono koeficientas (nedimensinis dydis)
θ	bangos kritimo kampas (rad)
ρ	tankis (kg/m ³)
ρ_s	plokštės ploto vieneto tankis (kg/m ²)
ρ_l	kolonos ilgio vieneto tankis (kg/m)
ξ	poslinkis (m)
ω	kampinis dažnis (rad/s)

Indeksai:

B	lankstymosi banga
L	išilginė banga
T	skersinė banga
inc	krentanti į jungtį banga
n	artimo lauko lankstymosi banga
ref	atspindėta banga
tr	praėjusi pro jungtį banga
c	kolona
p	plokštė

Santrumpos:

BEM	baigtinių elementų metodas
SEA	statistinės energijos analizė
g.k.pl.	gipso kartono plokštė
leng. bet.	lengvasis betonas
m.d.pl.	medžio drožlių plokštė
plytų mūr.	plytų mūras
por.bet.	poringas betonas
sunk. bet.	sunkusis betonas

BENDRA DARBO CHARAKTERISTIKA

Tyrimų sritis ir aktualumas

Pastato apsauga nuo triukšmo yra vienas iš šešių pagrindinių Europos Sąjungos statybos produktų direktyvos 89/106/EEC reikalavimų [126], kuriuos turi atitikti pastatas. Šios ir kitų apsaugą nuo triukšmo apibrėžiančių direktyvų reikalavimai buvo perkelti į nacionalinę teisę statybos techninių reglamentų, higienos normų ir kitų įstatymų forma. Daugiau kaip prieš 50 metų daugelyje Europos valstybių sukurta norminė gyvenamųjų pastatų apsaugos nuo triukšmo rodiklių sistema yra sudėtinga. Todėl nuspręsta ES mastu standartizuoti pastatų akustinių charakteristikų projektinius skaičiavimus ir matavimų procedūras. Lietuvai tapus Europos Sąjungos nare, tapo privalomi visi apsaugos nuo triukšmo sritį Europoje reguliuojantys teisės aktai. Daugelyje Europos šalių atlikti tyrimai atskleidė, jog ne tik anksčiau pastatytų, o Lietuvoje ir dalis naujai statomų gyvenamųjų pastatų neatitinka galiojančių apsaugos nuo triukšmo reikalavimų. Net ir įvykdžius šiuos reikalavimus, ne visuomet apsauga nuo triukšmo gyvenamosiose patalpose bus pakankama, kadangi normos nustato tik minimalius apibendrintus akustinio komforto reikalavimus.

Dėl šiuolaikinio technikos progreso labai pagausėjo pastato viduje ir išorėje esančių triukšmo šaltinių ir padidėjo jų keliamas triukšmas. Patalpose tipiniai triukšmo šaltiniai yra pastato inžinerinės sistemos, buitinė technika, žmogaus kalba ar žingsniai. Pagrindiniai išorės triukšmo šaltiniai yra stacionarių ar kilnojamųjų įrenginių darbas, transporto eismas. Per pastaruosius du dešimtmečius automobilių skaičius Lietuvoje išaugo kelis kartus, taip pat intensyvėja susisiekimas oro transportu. Todėl miestuose aplinkos triukšmo lygis kasmet pastebimai didėja. Darbo ir gyvenamosios aplinkos triukšmo padariniai vargina apie 20 % Europos Sąjungos gyventojų, kelia pavojų žmogaus sveikatai. Todėl visuomenė, reaguodama į šiuos neigiamus aplinkos pokyčius, priima tam tikrus apsaugos nuo triukšmo sprendimus. Priimti nacionaliniai ir tarptautiniai standartai įpareigoja architektus, inžinierius ir statybininkus projektuoti bei statyti pastatus, kuriuose būtų užtikrintas pakankamas žmogaus akustinis komfortas.

Statybos technologijų pažanga, mažinant triukšmo sklaidimą pastatuose, gali būti įgyvendinta eksperimentinių ar analitinių tyrimų pagrindu. Eksperimentinių tyrimų plėtotė vadovaujasi bandymų ir klaidų strategija, o analitiniai tyrimai nukreipti tobulinti garso sklaidimo pastatuose skaičiavimo modelius. Teoriniai modeliai padeda sėkmingiau skaičiuoti garso sklaidimą

pastatuose ir naudojami kaip priemonė projektui rengti. Skaičiavimo modelių tikslumas priklauso nuo teorinių prielaidų ir modelio detalizavimo lygio.

Pastatų apsauga nuo triukšmo įgyvendinama pastatą projektuojant, statant ir atiduodant naudoti. Pastato akustinės charakteristikos rengiant projektą, skaičiuojamos remiantis LST EN 12354 standartais. Jei tiesioginio triukšmo sklidimo įtaka pašalinama parengus optimalų projektą, pavyzdžiui, išdėstant „tylias“ patalpas atokiau nuo „triukšmingų“, tai netiesioginio triukšmo sklidimo pastato konstrukcijomis yra itin sudėtinga išvengti. Itin aktualus šiuo atžvilgiu yra struktūrinio triukšmo sklidimas pastato konstrukcijomis. Mūrinių ir monolitinių pastatų konstrukcijomis vibracijos sklinda dideliu atstumu ir yra menkai slopinamos. Pagrindinis vibracijų lygio sumažėjimas vyksta pastato jungtyse. Praktika parodė, jog netiesioginis struktūrinio garso sklidimas pro pastato mazgus dažniausiai būna veiksnys, labai sumažinantis orinio ir smūginio garso izoliaciją.

Todėl modeliuoti vibracijų silpimą statybinių konstrukcijų jungtyse yra aktualus statybos mokslo tyrimų objektas.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – vibracijų silpimas įvairių formų pastato konstrukcinėse jungtyse. Pastato konstrukcinės jungties elementai aprašomi kaip idealizuotos plokštės ir strypai. Vibracijų silpimas įvertinamas vibracijų perdavimo koeficientu arba perdavimo nuostoliais. Šie rodikliai priklauso nuo garso bangos savybių, jungties geometrinių ir fizinių parametrų.

Tikslas ir uždaviniai

Mokslinio darbo tikslas – ištirti jungties geometrinių ir fizinių parametrų įtaką vibracijų silpimui kampo, tėjinės, fasado tėjinės ir kryžiaus formos pastato konstrukcinėse jungtyse. Šiam tikslui įgyvendinti sprendžiami šie uždaviniai:

- Atlikti garso sklidimo pastatuose skaičiavimo metodų analizę.
- Išanalizuoti vibracijų silpimo pastato konstrukcinėse jungtyse modeliavimo galimybes taikant statistinės energijos analizės teoriją.
- Sudaryti teorinį vibracijų silpimo plokštės tipo jungtyse modelį ir nustatyti vibracijų perdavimo nuostolius įvairiais šio tipo jungčių atvejais.
- Sudaryti teorinį vibracijų silpimo kompleksinėse „plokštės-strypo“ jungtyse modelį ir nustatyti vibracijų perdavimo nuostolius įvairiais šio tipo jungčių atvejais.
- Nustatyti geometrinių ir fizinių parametrų įtaką plokštės ir kompleksinių „plokštės-strypo“ tipo jungčių vibracijų silpimui.

Tyrimų metodika

Statybinių konstrukcijų jungčių įtaka vibracijų silpumui tiriama naudojantis statistinės energijos analizės teorija. Šis analitinis tyrimų metodas pagrįstas klasikinėmis lankstymosi bangos savybėmis bei lygtimis ir suteikia galimybę nustatyti jungties vibracijų perdavimo nuostolius. Taip pat taikomi skaitiniai tyrimų metodai, leidžiantys įvertinti įvairių garso bangos savybių, jungties geometrinių ir fizinių parametrų įtaką vibracijų silpumui jungtyje.

Rengiant darbą remtasi Lietuvos ir užsienio autorių mokslinėmis publikacijomis, tarptautiniu mastu galiojančiais norminiais dokumentais.

Mokslinis naujumas

- Sudaryti vibracijų silpimo plokštės tipo bei kompleksinėse „plokštės-strypo“ tipo jungtyse skaičiuojamieji modeliai.
- Pasiūlytos supaprastintos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos asimetrinėms plokštės tipo statybinių konstrukcijų jungtims.
- Nustatyta teorinė geometrinių ir fizinių jungties elementų parametrų įtaka plokštės bei kompleksinių „plokštės-strypo“ tipo jungčių vibracijų perdavimo nuostoliams.
- Gauti vibracijų silpimo statybinių konstrukcijų jungtyse rezultatai gali būti naudojami garso sklidimui pastatuose skaičiuoti taikant standartizuotą metodą.

Aprobacija

Svarbiausi tyrimų rezultatai publikuoti moksliniuose straipsniuose, paskelbtuose recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose:

- Mickaitis, M.; Stauskis, V. J. Vibration transmission through joints of walls and columns in framed buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol XI, No 3, Vilnius: Technika, 2005, p. 185–192. ISSN 1392-3730.
- Stauskis, V. J.; Mickaitis, M. Vibration attenuation at asymmetric cross-form joints of buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol XI, No 2, Vilnius: Technika, 2005, p.129–135. ISSN 1392-3730.

Pagrindiniai disertacinio darbo teiginiai buvo pristatyti ir aptarti respublikinėse ir tarptautinėje mokslinėse konferencijose:

- Stauskis, V. J.; Mickaitis, M. Estimation of vibration transmission coefficient at asymmetric junctions of buildings. In: Abstracts of 8th International conference “Modern building materials, structures and techniques”, 2004 May 19–22. Vilnius: Technika, 2004. p. 297–298. ISBN 9986-05-722-1.
- Mickaitis, M. Kolonos įtaka garso sklidimui tarp sienų karkasiniuose pastatuose. Iš: 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 24–25 d., medžiaga. Statyba. Vilnius: Technika, 2005, p. 227–232. ISBN 9986-05-893-7.
- Mickaitis, M. Įvairių parametrų įtaka pastato konstrukcinių jungčių struktūrinio triukšmo izoliacijai. Iš: 6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2003 m. kovo 27–28 d., medžiaga. Statyba. Vilnius: Technika, 2003, p. 126–131. ISBN 9986-05-618-7.
- Mickaitis, M. Struktūrinio garso sklidimas daugiaaukščiuose gelžbetoniniuose ir mūriniuose pastatuose. Iš: 5-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo - Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2002 m. kovo 27–29 d., medžiaga. Statyba. Vilnius: Technika, 2002, p. 133–138. ISBN 9986-05-559-8.

Struktūra ir apimtis

Darbą sudaro bendra darbo charakteristika, žymenų sąrašas, įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados ir literatūros sąrašas. Darbe yra 56 paveikslai ir 2 lentelės. Viso 106 puslapiai.

1 SKYRIUS

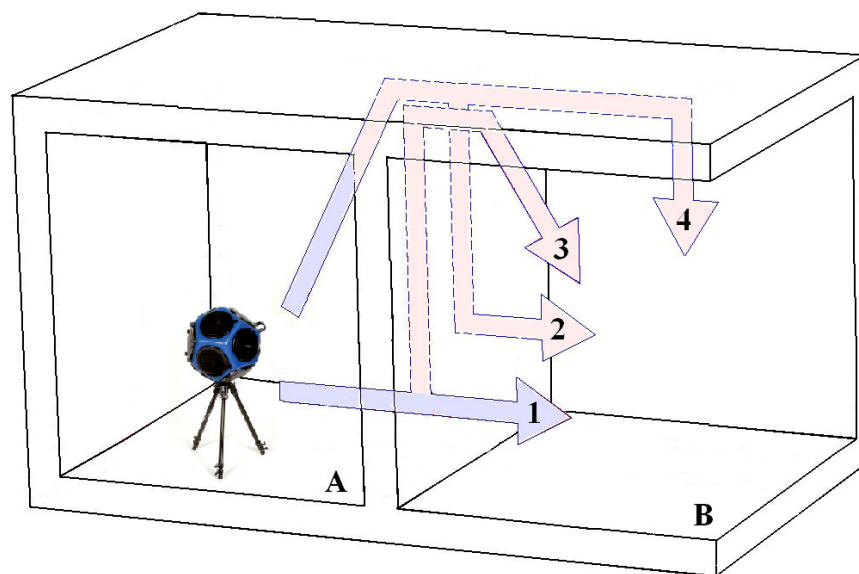
IVADAS

1.1. GARSO SKLIDIMAS PASTATUOSE

Pastatuose sklinda įvairaus intensyvumo ir dažnio garsų visuma, kuri yra vadinama statistiniu triukšmu. Triukšmas pastatuose skirstomas į išorės šaltinių ir vidaus šaltinių triukšmą. Išorinio triukšmo režimas priklauso nuo miestų planavimo, užstatymo ir transporto organizavimo. Jis gali būti slopinamas urbanistinėmis (miestų ir pastatų planavimas), technologinėmis (triukšmo slopinimas pačiame šaltinyje), administracinėmis (pvz.: garsinių signalų draudimas miestuose) ir konstrukcinėmis (atitvarų garso izoliacija) priemonėmis.

Vidaus šaltinių triukšmas pagal aplinką, kurioje jis sklinda, skirstomas į orinį ir struktūrinį triukšmą. Orinio triukšmo šaltiniai yra garsi žmogaus kalba ar dainavimas, buitinės technikos veikimas, grojimas muzikos instrumentais ir pan. Šie šaltiniai yra nesujungti su pastato konstrukcijomis ir garso energiją spinduliuoja į patalpos orą. Struktūrinis garsas atsiranda tuomet, kai tarp triukšmo šaltinio (kieto kūno) ir pastato konstrukcijų yra tiesioginis kontaktas. Garso energija, nuo triukšmo šaltinio pereina į pastato konstrukcijas ir sklinda jomis lankstymosi, išilginėmis ir skersinėmis bangomis. Struktūrinio triukšmo šaltiniai gali būti pastate esančių lifto įrenginių, šiukšlių surinktuvų, vandentiekio bei nuotekų sistemų veikimas ir pan. Viena iš struktūrinio triukšmo sklidimo pastatuose formų yra smūginis triukšmas. Jis gali atsirasti dėl kieto kūno dinaminio poveikio į grindis ir perdangas, o šio tipo triukšmo šaltiniai gali būti vaikščiojimas, šokimas, baldų perstūmimas ir pan. Skirtingai nuo orinio triukšmo, kuris veikimo pradžioje vienu metu sužadina virpesius visose patalpos atitvarose, smūginio triukšmo poveikis dažniausiai sužadina tik vieną atitvarą – perdangą. Struktūrinis triukšmas pasiekia toliausiai nuo jo šaltinio esančias patalpas. Struktūrinio garso šaltinių iššaukti konstrukcijų virpesiai pereina į jų orinio garso išspinduliavimą.

Tarp gretimų patalpų triukšmas sklinda tiesiogiai per jas skiriančią atitvarą (tiesioginis sklidimas) ir netiesiogiai, apeinant ją (netiesioginis sklidimas). Paveiksle 1.1 pavaizduoti tiesioginiai ir netiesioginiai triukšmo sklidimo keliai į gretimą patalpą. Netiesiogiai garsas gali sklirti ne tik per šonines atitvaras (šoninis sklidimas), tačiau ir šalutiniais keliais per atitvarose esančias angas ar nesandarumus. Netiesioginiu keliu į patalpą prasiskverbęs triukšmas padidina tiesiogiai į patalpą patekusio triukšmo lygį.



1.1 pav. Triukšmo sklaidimas tarp patalpos su triukšmo šaltiniu A ir izoliuojamos patalpos B:

1 – tiesioginis sklaidimas; 2, 3, 4 – netiesioginis sklaidimas

Išskiriamos trys struktūrinio triukšmo veikimo stadijos:

- struktūrinio triukšmo sužadinimas,
- struktūrinio triukšmo sklaidimas,
- struktūrinio triukšmo spinduliavimas.

Pirma ir paskutinė struktūrinio triukšmo veikimo stadijos neturi esminių skirtumų lyginant su tiesioginio garso sklaidimu. Specifinis yra struktūrinio triukšmo sklaidimas pastato konstrukcijomis.

Struktūrinio triukšmo sužadinimas

Struktūrinis triukšmas sužadinamas veikiant į atitvarą akustiniam arba mechaniniam šaltiniui. Akustinio šaltinio (garsi kalba, veikiantys garsiakalbiai ir pan.) sukeltas garso laukas orinių garso bangų pavidalu pasiekia visas patalpos atitvaras. Veikiant mechaniniam garso šaltiniui, struktūrinis triukšmas sužadinamas veikiant jėgai tiesiogiai į atitvarą (žingsniai, durų uždarymas ir pan.). Sužadinamo triukšmo galingumui sumažinti naudojamos minkštos tarpinės, vibroizoliuojančios atramos triukšmingiems įrengimams arba didinama statybinių konstrukcijų masė ir standumas.

Struktūrinio triukšmo sklidimas

Minėtiems šaltiniams sužadinus struktūrinį triukšmą, jis sklinda pastato konstrukcijomis kaip virpesiai iš patalpos su garso šaltiniu per pastato jungtis į izoliuojamos patalpos atitvaras. Struktūriniam triukšmui sklindant pastato konstrukcijomis sutinkami šie reiškiniai:

- struktūrinio triukšmo lygio sumažėjimas dėl energijos pasiskirstymo didelėje srityje (šiuo atveju triukšmas slopinamas didinant atstumą nuo jo šaltinio);
- struktūrinio triukšmo virtimas į šilumos energiją (struktūrinio triukšmo lygis mažinamas garsą sugeriančiomis medžiagomis, vibroizoliuojančiomis tarpinėmis ir pan.);
- atspindžiai nuo triukšmo kilimo vietos (tokiu atveju struktūrinis triukšmas slopinamas izoliuojant lankstymosi bangas);
- struktūrinio triukšmo sklidimo bangų tipo konversija (pavyzdžiui, lankstymosi bangų konversija į kito tipo bangas);
- lankstymosi bangų dispersijos didėjimas;
- garso energijos išspinduliavimas į supančią aplinką (dažniausiai orą).

Pastatų konstrukcijomis struktūrinis garsas sklinda dideliu atstumu ir yra mažai slopinamas. Pagrindinis triukšmo lygio sumažėjimas vyksta pastato konstrukcinėse jungtyse. Jungtyje virpesių energija yra atspindima į elementą, kuriuo ją pasiekė bei pasiskirsto tarp kitų jungties elementų.

Struktūrinio triukšmo spinduliavimas

Paskutinėje struktūrinio triukšmo veikimo stadijoje atitvaros išspinduliuoja garso energiją izoliuojamoje patalpoje. Spinduliuojamo triukšmo lygis priklauso nuo spinduliavimo ploto ir virpesių amplitudės.

Disertacijoje analizuojamos struktūrinio triukšmo problemos sklidimo stadijoje.

1.2. GARSO SKLIDIMO PASTATUOSE SKAIČIAVIMO METODAI

Garso sklidimo pastatuose modeliavimo tikslas yra skaičiavimais įvertinti akustines pastatų savybes projektavimo stadijoje. Nuolat tobulinami skaičiavimo metodai remiasi tuo, kad būtų įvykdyti atitinkami norminiai reikalavimai. Šiame poskyryje trumpai aprašomi trys garso sklidimo pastatuose skaičiavimo metodai. Pirmasis metodas yra skirtas garso sklidimo pastatuose projektavimui. Sekantys du metodai yra taikomieji bei remiasi statistinėmis ir deterministinėmis prielaidomis.

1.2.1. Standartizuotas metodas

Pastato akustinės charakteristikos projektavimo etape apskaičiuojamos remiantis LST EN 12354 standartų serija. Standartą sudaro šešios dalys, kurio pirmoji [82] ir antroji [83] apibrėžia atitinkamai orinio ir smūginio garso izoliacijos projektavimo principus. Minėtose dalyse aprašyti pusiau empiriniai orinio ir smūginio garso izoliacijos tarp patalpų skaičiavimo modeliai remiasi Gerretsen E. darbais [43-45]. Dokumente apibrėžti teoriniai struktūrinio garso sklidimo konstrukcijomis modeliai, o projektiniams skaičiavimams naudojami tiesioginio garso sklidimo pro atitvaras matavimų rezultatai. Kadangi netiesioginio garso sklidimo skaičiavimo modelis yra gerokai supaprastintas, jis yra pakankamai tikslus tik vienerūšiams elementams. Kuo sudėtingesnė modelio geometrija ar atitvarų konstrukcija, tuo labiau išryškėja šio metodo trūkumai.

Vienas iš standarto trūkumų yra tai, kad jame galime rasti tik dalį rodiklių, skirtų struktūrinio garso sklidimui pastato jungtyse įvertinti. Modernioje statyboje vis dažniau naudojami sprendimai, kuriuose jungtys yra asimetrinės, su kolonomis ir pan. Projektuotojai, norėdami įvertinti struktūrinio garso sklidimą pro tokias jungtis, dėl duomenų trūkumo gali susidurti su rimtomis kliūtimis. Todėl daugeliu tokių atvejų tenka remtis analogiškų jungčių tyrimų rezultatais, apskaičiuotais pagal kitus metodus.

1.2.2. Statistinės energijos analizės metodas

Statistinės energijos analizės (SEA) teorija remiasi kompleksinių sistemų dinaminio atsako analize. Akustinės ar konstrukcinės sistemos modeliuojamos kaip atskiros subsistemos, turinčios savybę priimti, išsklaidyti ir perduoti garso energiją. Energijos sklidimas tarp subsistemų nustatomas remiantis analitiniais skaičiavimo metodais. SEA teorijoje naudojama vidutinė laiko ir erdvės kinetinė energija aprašo energijos lygius dažnių juostose. Teorijos pagrindinis principas yra tai, kad fizinės subsistemų savybės yra priimanamos kaip atsitiktinai pasirinktų reikšmių rinkinio vidurkis. Prognozuojami teorijos rezultatai susideda iš bendro panašių sistemų atsako vidurkio. Įvairios vidurkio skaičiavimo procedūros naudojamos teorijoje žymiai sumažina nežinomųjų kiekį. Naudojant SEA teoriją, rezultatai pasiekiami su žymiai mažesnėmis skaičiavimo sąnaudomis. Taip pat yra galimybė atlikti „žingsnis po žingsnio“ tipo analizę, kuri suteikia galimybę pačiam vartotojui tiksliai apskaičiuoti garso sklidimą pastate svarbiausiais keliais. Statybinės akustikos specialistai turi ilgametę SEA teorijos naudojimo patirtį skaičiuojant garso sklidimą pastatuose. Vienas pirmųjų šią teoriją statybinės akustikos problemų sprendimui panaudojo Kihlman T., vadindamas šį metodą „energijos metodu“ ir skaičiavo struktūrinio garso

sklidimą tarp sienų ir perdangų pastatuose [69]. Kaip statistinės energijos analizės teorija šis metodas pradėtas naudoti kiek daugiau nei prieš keturis dešimtmečius ir nuo tada juo remiasi dauguma statybinės akustikos srities mokslininkų. Šiuo metu SEA teorija naudojama ne tik statybinės akustikos problemų sprendimui, tačiau kaip triukšmo kontrolės priemonė ir kosminių laivų statyboje, automobilių ir laivų pramonėje.

1.2.3. Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas (BEM) yra diferencialinių lygčių skaitinis sprendimo metodas erdvėje išdėstytoje srityje, kuri apribota kraštinėmis sąlygomis. Iš esmės šis metodas diferencialines lygtis transformuoja į tiesinių lygčių sistemą. Tuo tikslu, diferencialinės lygtys ir kraštinės sąlygos formuluojamos kaip silpnos formos integralinės išraiškos. Problemos sprendimas yra gaunamas priartėjimo būdu sumuojant formos funkcijų rinkinį, kuris nustatomas pagal sritį sudarančių elementų skaičių.

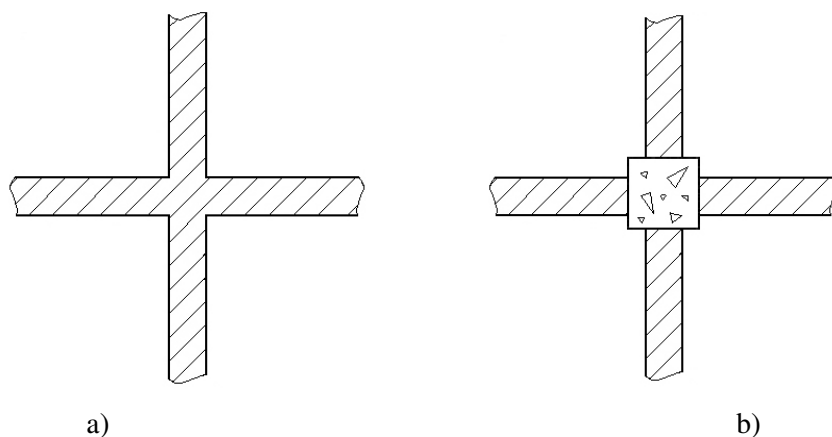
BEM naudojamas daugelyje inžinerijos mokslo sričių, tarp kurių plačiausiai taikomas statinei ir dinaminei sistemų analizei. Padidėjus skaičiavimo priemonių galimybėms per pastaruosius du dešimtmečius dinaminė struktūrų analizė išsiplėtė iki garso dažnių srities ir BEM šiuo metu gali būti naudojamas vibroakustinių problemų sprendimui. Pagrindinis BEM privalumas yra tai, kad fizinė sistema gali būti smulkiai detalizuota ir nėra jokių apribojimų geometrinėms ar kraštinėms sąlygoms formuluoti. Dinaminis sistemos atsakas į sužadinimą gali būti nustatomas norimoje padėtyje ir paprastai išreiškiamas kintamųjų sąlygomis kartu su laisvės laipsnių skaičiumi. BEM skaičiavimai atliekami diskretiniuose dažnio taškuose ir suteikia galimybę detalizuoti dažninį funkcijos atsaką. Tačiau šis privalumas atskleidžia ir neigiamą šio metodo savybę. Modeliuojant sistemas šiuo metodu, dėl didelio reikalingų duomenų kiekio nuolat susiduriama su varginančiu paruošiamuoju darbu ir ilgu skaičiavimo procesu. Dar svarbiau yra tai, kad naudojant BEM, skaičiavimo sąnaudos stipriai išauga didėjant dažniui. Tuo tarpu laisvės laipsnių skaičius, reikalingas tiksliai statybinės akustikos problemos analizei, augant dažniui padidėja tiesiog drastiškai. Kadangi kiti garso sklidimo pastatuose skaičiavimo metodai naudoja dažnio ir erdvės vidurkį, jų skaičiavimo rezultatus palyginti su BEM skaičiavimo rezultatais yra labai sunku dėl itin didelių laiko sąnaudų naudojant pastarąjį metodą. Vos keletas autorių naudojo BEM statybinės akustikos problemų analizei ir jų darbai buvo apriboti iki siauro ir konkretaus garso sklidimo pastatuose aspekto. Kihlman T. ir kt. [70] pritaikė BEM žemo orinio garso sklidimui pro viensluksnę atitvarą. Hopkins C. [62-63] lygino garso sklidimo mūrinėmis sienomis teorinių skaičiavimų rezultatus naudojantis SEA teorija ir BEM bei su eksperimentinių tyrimų rezultatais.

Struktūrinio garso sklidimą pro įvairias plokščių jungtis analizavo Simmons C. [107], Steel J. A. ir kt. [112] bei Fredö C. R. [40]. Pastarieji autoriai atliko tyrimus žemuose dažniuose ir tik santykinai nedidelėms plokštelių jungtims.

1.3. PASIRINKTIES MOTYVACIJA IR TRUMPA DARBO APŽVALGA

Vibracijų silpimo pastato jungtyse modeliavimas yra aktualus statybinių sistemų mechaninių vibracijų srities klausimas. Standartiniame metode aprašyti pusiau empiriniai orinio ir smūginio garso izoliacijos tarp patalpų skaičiavimo modeliai naudojami pastato akustinių charakteristikų apskaičiavimui projektavimo etape. Tuo tarpu kiti du – teoriniai metodai – laikomi papildantys vienas kitą, kadangi kiekvienas iš jų turi savo pritaikymo sritį. BEM yra dalinai pranašesnis žemų dažnių srityje, kurioje SEA metodas nėra itin patikimas. Vidutinių ir aukštų dažnių srityje SEA metodas yra akivaizdžiai pranašesnis už BEM dėl skaičiavimo efektyvumo ir dėl tiesioginių rezultatų gavimo vietoje perteklinių rezultatų visoje dažnių ir erdvės sityje. Todėl, remiantis šiais argumentais, nuspręsta struktūrinio garso sklidimą statybinių konstrukcijų jungtimis teoriškai analizuoti remiantis SEA metodu.

Lietuvoje statybinės akustikos, vienos iš statybinės fizikos mokslo šakos, mokslinių tyrimų patirtis yra gan kukli. Prof. habil. dr. Stauskio V. J. [129, 130, 134-137] prieš tris dešimtmečius atlikti vibracijų sklidimo daugiabučiuose gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose tyrimai buvo vieninteliai, kuriuose analizuojamas vibracijų silpimas pastato jungtyse. Todėl disertacijoje siekiama nuosekliai prieiti prie analizuojamos problemos, pradedant šios srities mokslinių tyrimų raidos apžvalga nuo jų užuomazgos iki naujausių tyrimų rezultatų bei baigiant iškeltų uždavinių sprendimu.



1.2 pav. Analizuojamų pastato konstrukcinių jungčių principinės schemas:

a) atitvarų jungtis, b) aitvarų ir kolonos jungtis

Kadangi dėl struktūrinio garso sklaidimo itin sudėtingos triukšmo valdymo problemos kyla daugiabučiuose gyvenamuosiuose ir visuomeniniuose pastatuose, todėl moksliniame darbe analizuojamas vibracijų sklaidimas šių konstrukcijų jungtimis (1.2 pav.), daliai kurių tiesiogiai įvertinti skaičiavimuose naudojantis standartizuotu metodu nėra galimybės.

Antrame skyriuje pateikta literatūros apie garso energijos sklaidimo statybinių konstrukcijų jungtimis modeliavimą apžvalga, kurioje didžiausias dėmesys skiriamas pagrindiniam statistinės energijos analizės modeliui, sukurto pusiau begalinio ilgio plokščių jungtims analizuoti. Analizuojami ir kiti šio, modelio pagrindu išvystyti skaičiavimo modeliai, kurie yra skirti vibracijų silpimo tyrimams kompleksinėse „plokštės-strypo“, su tampriais tarp sluoksniais, akustiškai storų plokščių, baigtinio ilgio plokščių, ortotropinių plokščių ir taškiniu būdu sujungtų plokščių jungtyse. Pateikti svarbiausi ir reikšmingiausi tyrimų rezultatai, suformuluotas tyrimų tikslas.

Trečiame skyriuje pateiktas SEA teorijos prielaidomis ir klasikinėmis lankstymosi bangos sklaidimo lygtimis sudarytas vibracijų silpimo pusiau begalinio ilgio plokščių jungtyse modelis. Gautos supaprastintos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos vibracijų silpimui įvairiose asimetrinėse statybinių konstrukcijų jungtyse apskaičiuoti.

Ketvirtame skyriuje pateiktas SEA teorijos pusiau begalinio ilgio plokščių jungčių modelio pagrindu sudarytas vibracijų silpimo kompleksinėse „plokščių-strypo“ jungtyse skaičiavimo modelis. Modelis skirtas nustatyti vibracijų silpimą sienų ir kolonos jungtyje. Pateikti vibracijų silpimo pastato kolonų ir perdangų jungtyse skaičiavimo principai.

Penktame skyriuje pateikti sudarytų modelių pagrindu gauti skaitinių tyrimų rezultatai. Nustatyta geometrinių ir fizinių jungties elementų parametrų įtaka plokštės tipo jungčių ir geometrinių jungties elementų parametrų įtaka kompleksinių „plokštės-strypo“ tipo jungčių vibracijų perdavimo nuostoliams. Gauti teorinio skaičiavimo rezultatai sugretinami su kitų autorių analogiškų jungčių tyrimų rezultatais.

Šeštame skyriuje pateikiami pagrindiniai mokslinio darbo rezultatai bei išvados

2. SKYRIUS

VIBRACIJŲ SILPIMO STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ JUNGTYSE MODELIAVIMAS

Skyriuje pateikiama literatūros apie garso energijos sklidimo statybinių konstrukcijų jungtimis modeliavimą apžvalga, kurioje daugiausiai dėmesio skiriama pagrindiniam statistinės energijos analizės modeliui. Statistinės energijos analizės teorija jau daugiau kaip keturis dešimtmečius naudojama kompleksinių problemų, susijusių su akustika ir vibracijomis, sprendimui ir yra itin tinkama modeliuoti vibracijų sklidimą pastatuose. Ilgainiui, šios teorijos pagrindu buvo išplėtoti kiti skaičiavimo modeliai, kurie skirti vibracijų silpimo tyrimams specifinėse statybinėse konstrukcijose ir jų jungtyse. 1999 metais Europos Sąjunga pradėjo įgyvendinti projektą SEANET, kuris skirtas palengvinti informacijos apsikeitimą tarp statistinės energijos analizės teorijos vartotojų. Vienas iš projekto tikslų yra išleisti etaloninį perdavimo koeficientų skaičiavimo modelį tam, kad sukūrus garso sklidimo modelį būtų galima patikrinti jo patikimumą.

2.1. SEA TEORIJOS KONCEPCIJA IR MODELIAVIMO PRINCIPAI

Koncepcija

Statistinės energijos analizės (SEA) teorija pagrįsta vibracinės energijos sklidimo tarp dviejų sujungtų rezonatorių tyrimais esant plačiajuosčiam sužadanimui [78]. Pastebėta, kad vibracinės energijos sklidimas yra proporcingas kinetinės energijos skirtumui tarp rezonatorių. Energija sklido iš daugiau energijos turinčio rezonatoriaus į mažiau jos turintį. Vėliau ši analizė buvo išplėsta iki daugiamodalinių sistemų ryšio ir tokiu pagrindu išsivystė SEA teorija.

Statistinės energijos analizės teorija remiasi kompleksinių sistemų dinaminio atsako analize. Akustinės ar konstrukcinės sistemos modeliuojamos kaip atskiros subsistemos, turinčios savybę priimti, išsklaidyti ir perduoti garso energiją. Yra išvystyti du SEA teorijos naudojimo metodai – teorinis ir eksperimentinis. Eksperimentinis taikymo metodas remiasi įvairių garso sklidimo kelių matavimo duomenų apskaičiavimu vibruojančioje sistemoje. Disertacijoje remiamasi teorine šio metodo taikymo dalimi – garso sklidimo pastate teoriniam modeliavimui. Pagrindinės teorijos galiojimo prielaidos garso sklidimo modeliavimui:

- kiekvienos subsistemos modos savasis dažnis yra vienodai tikėtinas visame dažnių intervale;

- sistemų energija yra lygi pasiskirsčiusiai energijai modose, o modalinis atsakas yra inkoherentinis;
- veikiančios jėgos poveikis sužadinantis individualias modas sistemose yra nekoreliacinis;
- energija sklindanti į sistemą yra labiau išsklaidoma nei perduodama į kitas sistemas.

Modeliavimo principai

Uždavinio modelis arba sistema sudaroma iš atskirai aprašytų sistemų, kurios apjungiamos įvertinus kraštines sąlygas. Kai kurios modelio savybės SEA metodu gali būti aprašomos be duomenų apie visą fizinę sistemą. Bet kuriai sistemai (arba sistemai) galioja energijos pusiausvyra, kad įeinanti energija lygi išeinančiai energijai. Tai leidžia užrašyti galios balanso lygtis, naudojamas įvairiems parametrams nustatyti. Klasikinėje akustikoje parametras, apibūdinantis triukšmo lygį patalpoje yra garso slėgis p (arba garso slėgio lygis L), o parametras, apibūdinantis vibracijų sklaidimą atitvaroje yra greitis v (arba greičio lygis D_v). Įvertinant garsą ir vibracijas skaičiavimams supaprastinti SEA metode visoms sistemoms naudojamas vienas parametras – energija E . Parametras, kuris apibūdina energijos sklaidimą sistemoje yra ryšio nuostolių koeficientas η . Šis parametras įvertina galios P_{ij} netekimą, energijai sklindant iš sistemos i į sistemą j viename spinduliavimo cikle ω .

$$\eta_{ij} = \frac{P_{ij}}{E_i \omega}. \quad (2.1)$$

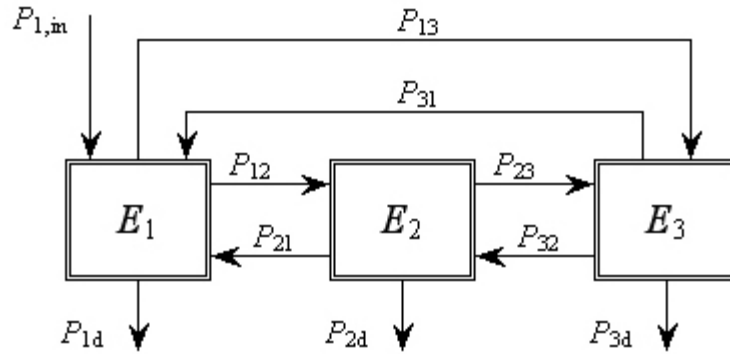
Dalies energijos – P_{id} – yra netenkama jai virstant į šilumos energiją viename spinduliavimo cikle. Šis dydis apibūdinamas kaip vidinis nuostolių koeficientas η_{id} :

$$\eta_{id} = \frac{P_{id}}{E_i \omega}. \quad (2.2)$$

Pilnas nuostolių koeficientas η_{tot} įvertina visus energijos nuostolius, atsiradusius viename spinduliavimo cikle dėl visų energijos sklaidimo mechanizmų:

$$\eta_{tot} = \eta_{id} + \sum \eta_{ij}. \quad (2.3)$$

Sistema modeliuojama įtraukiant tik tiesiogiai procese dalyvaujančius elementus. Patariama pradėti nuo santykinai paprasto modelio ir vėliau pridėti reikiamas papildomas subsystemas [78]. Sudarant garso sklaidimo tarp dviejų patalpų modelį, sistema susidės iš dviejų patalpų ir skiriančios sienos. Jei įvertinamas netiesioginis šoninis garso sklaidimas, tuomet įtraukiamos ir šoninės sienos. Sienos ir grindys, esančios toliau nuo tiriamų objektų neįtraukiamos dėl to, kad jos santykinai neturi jokios įtakos garso sklaidimui. Kai kuriais atvejais pakanka įtraukti į modelį tik tiesiogiai susijusius komponentus. Tačiau pakankamai sunku iš anksto numatyti, kurios sistemos dalys gali būti ignoruojamos, todėl paprasčiau sudaryti modelį iš esminių subsystemų, o kitas, reikalui esant, pridėti vėliau.



2.1 pav. Principinis SEA sistemos modelis iš trijų subsystemų

Sistemai, sudarytai iš trijų subsystemų, kiekvienai iš jų energijos sklaidimo balansas užrašomas:

$$\begin{aligned} P_{1,in} + P_{21} + P_{31} &= P_{1d} + P_{12} + P_{13}, \\ P_{12} + P_{32} &= P_{21} + P_{2d} + P_{23}, \\ P_{13} + P_{23} &= P_{31} + P_{32} + P_{3d}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Lygtis (2.1) ir (2.2) ištačius į (2.4), gautą lygtį galime užrašyti matricine forma:

$$\begin{bmatrix} \eta_{1d} + \eta_{12} + \eta_{13} & -\eta_{21} & -\eta_{31} \\ -\eta_{12} & \eta_{21} + \eta_{2d} + \eta_{23} & -\eta_{32} \\ -\eta_{13} & -\eta_{23} & \eta_{31} + \eta_{32} + \eta_{3d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,in} / \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Išsprendus šią lygčių sistemą, gaunama kiekvienos sistemos energija, kuri rezultatų interpretacijai yra transformuojama į įprastus matavimo vienetus. Vibracijų sklaidimas atitvarose eksperimentiniuose tyrimuose įprastai analizuojamos pagal vidutinės kvadratinės šaknies greitį $\langle v^2 \rangle$. Homogeniškomis vienodo storio plokštėms, pilna kinetinė energija E_i susiejama su vibracijų greičiu:

$$E_i = m_i \langle v_i^2 \rangle. \quad (2.6)$$

Tuo tarpu ryšio perdavimo nuostoliai η išreiškiami per vibracijų perdavimo koeficientą γ . Sklandant vibracijoms plokštės tipo jungtyje ryšio perdavimo nuostoliai apskaičiuojami:

$$\eta_{ij} = \frac{c_{gi} L_{ij} \gamma_{ij}}{2\pi^2 f S_i}. \quad (2.7)$$

Vibracijų perdavimo koeficientas γ_{ij} SEA teorijoje yra pagrindinis rodiklis, kuris įvertina garso energijos sumažėjimą statybinių konstrukcijų jungtyse. Rezultatams pateikti dažniausiai naudojamas atvirkštinis dydis – vibracijų perdavimo nuostoliai jungtyje:

$$R_{ij} = 10 \lg \frac{1}{\gamma_{ij}}. \quad (2.8)$$

Vibracijų silpimo modeliavimo principai

Modeliuojant vibracijų silpimą statybinių konstrukcijų jungtyse pradedama nuo sistemų identifikavimo. Kompleksinė sistema dalinama į jos fizinius komponentus. Pastate tokią fizinę sistemą sudaro oro tūris, sienos, perdangos, sijos ir kolonos. Kadangi kiekviename kieto kūno elemente gali sklisti daugiau nei vieno tipo bangos, todėl sistema modeliuojama atskirai kiekvieno tipo bangoms. Vibracijų silpimas modeliuojamas įvairiose pastatų konstrukcijų, kurios idealizuojamos kaip plokštės (pvz.: perdangos, sienos) ir strypai (pvz.: kolonos, sijos), jungtyse. Plokštės tipo elementuose gali sklisti lankstymosi, išilginės ir skersinės bangos. Todėl elementas gali būti modeliuojamas kaip trys sistemos. Strypo tipo elementuose gali sklisti dviejų tipų lankstymosi, išilginės ir sukimosi bangos. Todėl strypinio tipo elementas gali būti modeliuojamas kaip keturios sistemos. Disertacijoje didžiausias dėmesys skiriamas vibracijų

silpimui plokštės tipo elementuose, kadangi gyvenamuosiuose ir visuomeniniuose pastatuose jie yra dominuojantys. Strypo tipo elementai yra vertinami kaip galintys įtakoti vibracijų silpimą plokštės tipo jungtyse. Tačiau nevisuomet modelyje būtina įvertinti visas sklindančias garso bangas. Pačios svarbiausios yra lankstymosi bangos, kadangi jos ir lemia garso energijos išspinduliavimą iš konstrukcijų orinio garso pavidalu. Kitų tipų garso bangų įtaka yra nežymi ir dažniausiai vertinama tik tiriant jungčių sistemas. Disertacijoje atskirai analizuojamos kiekvieno tipo konstrukcinės jungtys, todėl įvertinamas lankstymosi bangų sklidimas.

SEA teorijos modelis formuluojamas homogeniškoms, izotropiškoms, pusiau begalinio ilgio plokštėms ir strypams, kurie gali būti standžiai ar tampriai sujungti linijine jungtimi. Teorijos pusiau begalinių plokščių modelyje naudojamas lankstymosi bangos sklidimo aprašymas pagal Kirchhoffo plonų plokščių ir Mindlino teorijų prielaidas. Remiantis pirmąja teorija, sėkmingai modeliuojamos standžios ar su tampriais tarpsluoksniais plonų plokščių ir strypų jungtys. Antroji teorija skirta akustiškai storų plokščių jungčių modeliavimui. Pusiau begalinio ilgio plokštės modeliuojamos lygtis formuluojant banginiu principu.

Vibracijų silpimas statybinėse konstrukcijose ir jų jungtyse didele dalimi priklauso nuo konstrukcinio elemento prigimties ir jo savybių, todėl ilgainiui SEA teorijos pagrindu buvo išvystyta keletas skaičiavimo modelių, kurie yra skirti vibracijų silpimui statybinių konstrukcijų grupėms su panašiomis savybėmis. Tai baigtinio ilgio, ortotropinių, taškiniu būdu sujungtų plokščių ir kiti modeliai.

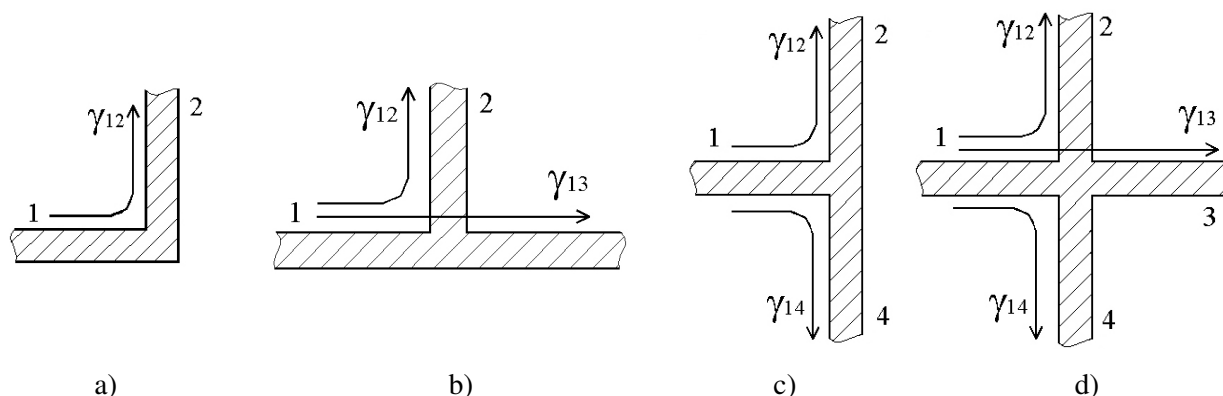
2.2. SEA TEORIJOS PUSIAU BEGALINIŲ PLOKŠČIŲ JUNGČIŲ MODELIS

Poskyryje aprašoma struktūrinio garso sklidimo pusiau begalinių plokščių jungtyse modeliavimo patirtis. Pusiau begalinių plokščių jungtims poslinkiai aprašomi kaip lankstymosi ir plokštuminių bangų sklidimas mazgo elementais. Analizuojamas banginis sužadinimas ir atsakas, o struktūrinio garso sklidimas įvertinamas vibracijų perdavimo koeficientais arba perdavimo nuostoliais, kurie nustatomi pagal sistemos elementų savybes ir jungties dinamines charakteristikas. Bendru atveju, vibracijų perdavimo koeficientas apibrėžiamas kaip praėjusios pro jungtį ir krentančios į ją garso galios santykis.

2.2.1. Plokščių jungtis

Daugelio gyvenamųjų ir dalies visuomeninių pastatų karkasai susideda iš mūrinių sienų ir gelžbetoninių perdangų. Analizuojant tokių pastatų vertikalius ir horizontalius pjūvius, pastebimos dažniausiai pasitaikančios – L (kampų) formos, T (tėjinės) formos, fasadinės T

(tėjinės) formos ir X (kryžiaus) – formų idealizuotos plokštės tipo jungtys (2.2 pav.). Vibracijų silpimas šiose pusiau begalinių plokščių jungtyse tirtas daugelio autorių.



2.2 pav. Statybinių konstrukcijų jungtys:

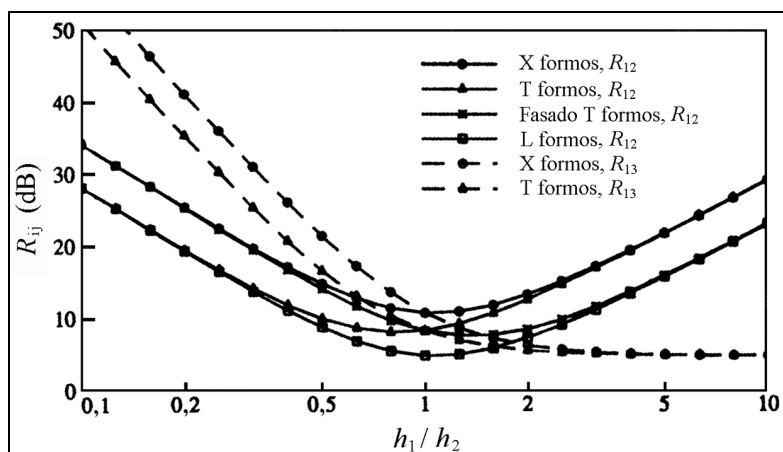
a) L formos, b) T formos, c) fasadinė T formos, d) X formos

1948 metais Cremer L. atliko pirmuosius vibracijų silpimo pastatuose skaičiavimus. Dėl ribotų skaičiavimo galimybių, autorius apsiribojo jungtimi iš dviejų plokštelių. Vėliau, patobulinus skaičiavimo modelį pasirodė, kad jis gali būti pritaikomas bet kurio tipo į jungtį krentančiai bangai. Jungtyje galėjo būti modeliuojami tamprūs tarp sluoksniai ar strypo tipo elementai. Cremer L. [30] ilgamečiais tyrimais analizavo lankstymosi ir išilginių bangų sklaidimą įvairiomis plokščių ir strypų jungtimis esant atsitiktinio (2.3 pav.) bei įstrižo kampo bangos kritimui. Analizavo lankstymosi bangos konversiją į plokštumines bangas dviejų identiškų plokščių kampo formos jungtyje esant įstrižam bangos kritimo kampui. Autorius pateikė supaprastintas (nepriklausančias nuo dažnio) vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškas L, T, fasadinės T ir X formų konstrukcijų jungtims. Cremer L. pasiūlė vibracijų perdavimo koeficientus L formos jungčiai apskaičiuoti pagal formulę:

$$\gamma_{12} = \frac{2\psi\chi}{(\psi + \chi)^2}. \quad (2.9)$$

T formos jungties vibracijų perdavimo koeficientai nustatomi išraiškomis 2.10 ir 2.11:

$$\gamma_{12} = \frac{\psi\chi}{2\left(\frac{\psi}{2} + \chi\right)^2}, \quad (2.10)$$



2.3 pav. Vibracijų perdavimo nuostolių priklausomybė nuo jungties elementų skerspjūvio aukščio santykio esant atsitiktiniam bangos kritimo kampui

$$\gamma_{13} = \frac{1}{2 \left(1 + \frac{\psi\chi}{2} \right)^2}. \quad (2.11)$$

Cremer L. pastebėjo, kad fasadinėje T formos jungtyje vibracijos silpsta kitaip nei įprastoje T formos jungtyje. Fasadinės T formos jungčiai vibracijų perdavimo koeficientai apskaičiuojami pagal formulę:

$$\gamma_{12} = \gamma_{14} = \frac{2\psi\chi}{(2\psi + \chi)^2}. \quad (2.12)$$

Vibracijų perdavimo koeficientai X formos jungčiai nustatomi pagal šias išraiškas:

$$\gamma_{12} = \gamma_{14} = \frac{\psi\chi}{2(\psi + \chi)^2}, \quad (2.13)$$

$$\gamma_{13} = \frac{1}{2(1 + \psi\chi)^2}. \quad (2.14)$$

Formulėse (2.9–2.14) naudojami žymėjimai:

$$\chi^2 = \frac{k_2^2}{k_1^2}, \quad \psi = \frac{B_2 k_2^2}{B_1 k_1^2}. \quad (2.15)$$

Lyon R. H. ir Eichler E. [79] tyrė lankstymosi bangų energijos pokytį T formos jungtyje. Jų skaičiavimai buvo pagrįsti paprastu lankstymosi bangos sklaidimo modeliu esant atsitiktiniam garso bangos kritimo kampui. Plokštuminių bangų sklaidimas buvo neįvertintas, nes buvo priimta prielaida, jog nagrinėjamas mazgas yra šarnyrinis. Vibracijų perdavimo koeficientai buvo apskaičiuoti vidutinėms bangos kritimo kampo reikšmėms. Budrin S. U. ir Nikiforov A. S. [127] tyrė struktūrinio garso sklaidimą plokščių jungtyse esant skirtingo skerspjuvio aukščio plokštėms. Autoriai įvertino lankstymosi bei išilginės bangas.

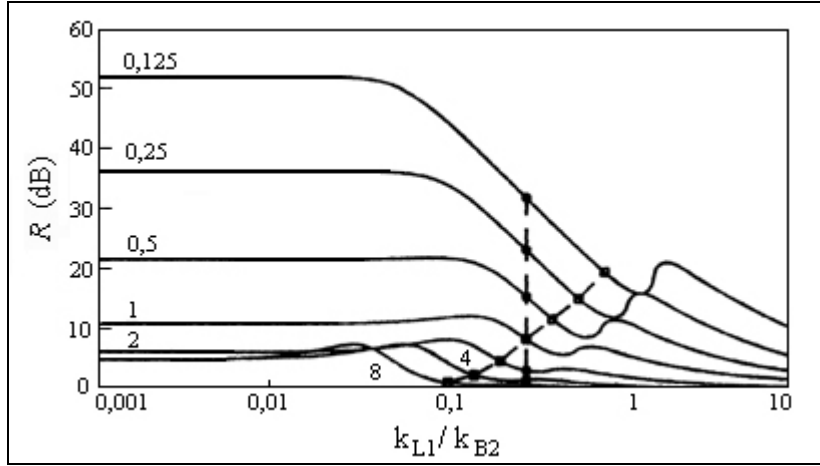
Kihlman T. [69] tyrimai įnešė vieną didžiausių indėlių į statybinės akustikos mokslo sritį. Jis pateikė difuzinio lauko lankstymosi ir plokštuminių bangų sklaidimo X formos jungtyje teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatus. Minėtoje jungtyje analizuotas lankstymosi, išilginių ir skersinių bangų sklaidimas esant atsitiktiniam bangos kritimo kampui (2.4 pav.). Autorius teigė, kad poslinkiai tarp lengvojo betono sienų ir sunkiojo betono perdangų yra svarbesni nei posūkiai tarp jų. Taip pat nustatė, kad nepalankus šoninio garso sklaidimas pastate priklauso nuo lengvojo betono sienų lenkimo standumo. Todėl, Kihlman T. manymu, geriausia išeitis yra naudoti sluoksniuotas sienas, kurių lenkimo standumas yra mažesnis. Skaičiavimai buvo supaprastinti modeliuojant simetrinę X formos jungtį bei laikant, jog plokštuminės bangos sklinda tik plokštėse, statmenose sužadintai plokštei. Kihlman T. pasiūlė vibracijų perdavimo koeficiento skaičiavimo formules simetrinei X formos jungčiai:

$$\gamma_{12} = \gamma_{14} = \frac{m_2}{m_1} \frac{k_1}{k_2} \int_0^{\pi/2} |A_2|^2 \cos \theta_2 d\theta_1, \quad (2.16)$$

$$\gamma_{13} = \int_0^{\pi/2} |A_3|^2 \cos \theta_1 d\theta_1, \quad (2.17)$$

čia:

$$q = \frac{B_1 k_1}{B_2 k_2}, \quad (2.18)$$



2.4 pav. Vibracijų perdavimo nuostolių priklausomybė nuo banginio skaičiaus jungties elementuose santykio X formos jungtyje sklindant garsui tiesiai

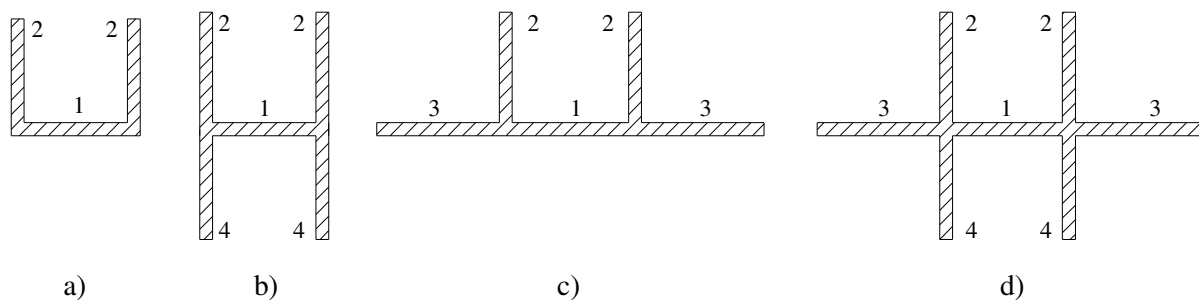
$$A_2 = i \frac{B_1 k_1^2}{B_2 k_2^2} \cos \theta_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \theta_1} + q \sqrt{1 + \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} - i \left(\cos \theta_1 + q \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} \right)}, \quad (2.19)$$

$$A_3 = \frac{2i \cdot \cos \theta_1 - \frac{\omega Z_{2LT} q}{B_1 k_1^3 \sqrt{1 + \sin^2 \theta_1}} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} + i \sqrt{1 + \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} \right)}{2 + \frac{\omega Z_{2LT}}{B_1 k_1^3} \left(\frac{1}{\cos \theta_1} - \frac{i}{\sqrt{1 + \sin^2 \theta_1}} \right)}, \quad (2.20)$$

$$Z_{2LT} = \frac{2G_2 h_2 k_{2L}^2}{(1 - \mu_2) \omega} \cdot \frac{1}{k_{2L} \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_{2L}}\right)^2 \sin^2 \theta_1} + \frac{k_1^2 \sin^2 \theta_1}{k_{2T} \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_{2T}}\right)^2 \sin^2 \theta_1}}}. \quad (2.21)$$

Vis dėl to, šis garso sklidimo modelis yra netinkamas asimetrinėms X formos bei visoms kitų formų jungtims skaičiuoti.

Specifines pusiau begalinio ilgio plokščių jungtis analizavo Zaborov V. I. [122]. Autoriaus skaičiavimo modeliai buvo sudaryti iš dvigubų L, T, fasadinės T ir X formos jungčių (2.5 a–d pav.). Mokslininkas pasiūlė supaprastintas vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo formules šioms jungtims esant lankstymosi bangų bei esant lankstymosi ir išilginių bangų sklidimui.



2.5 pav. Zaborov V. I. analizuotos jungtys:

a) dviguba L formos, b) dviguba fasadinė T formos, c) dviguba T formos, d) dviguba X formos

Vibracijų perdavimo koeficientai 2.5 a pav. konstrukcinei jungčiai:

$$\gamma_{12} = \frac{ch}{\rho^2 c^3 h^5 + 2\rho c^{1,5} h^{2,5} + 2}. \quad (2.22)$$

Vibracijų perdavimo koeficientai 2.5 b pav. konstrukcinei jungčiai:

$$\gamma_{12} = \gamma_{14} = \frac{0,5ch}{2\rho^2 c^3 h^5 + 2\rho c^{1,5} h^{2,5} + 1}. \quad (2.23)$$

Vibracijų perdavimo koeficientai 2.5 c pav. konstrukcinei jungčiai:

$$\gamma_{12} = \frac{ch}{\rho^2 c^3 h^5 + 4\rho c^{1,5} h^{2,5} + 5}, \quad (2.24)$$

$$\gamma_{13} = \frac{1}{\rho^2 c^3 h^5 + 4\rho c^{1,5} h^{2,5} + 5}. \quad (2.25)$$

Vibracijų perdavimo koeficientai 2.5 d pav. konstrukcinei jungčiai:

$$\gamma_{12} = \gamma_{14} = \frac{ch}{4\rho^2 c^3 h^5 + 8\rho c^{1,5} h^{2,5} + 5}, \quad (2.26)$$

$$\gamma_{13} = \frac{1}{4\rho^2 c^3 h^5 + 8\rho c^{1,5} h^{2,5} + 5}. \quad (2.27)$$

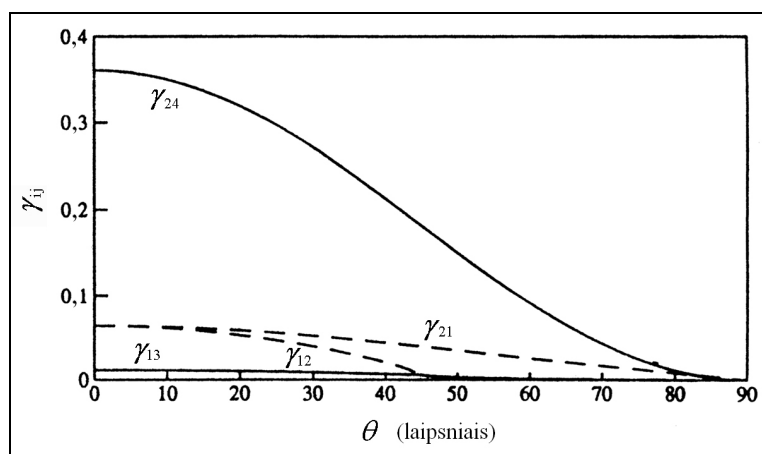
Formulėse (2.22–2.27) naudojami žymėjimai:

$$\rho = \rho_2 / \rho_1, \quad c = c_2 / c_1, \quad h = h_2 / h_1. \quad (2.28)$$

Zaborov V. I. teigia [128], kad gautos skaičiavimo išraiškos yra gana apytikslės. Kitas rusų mokslininkas Kreitan V. G. atliko ilgamečius struktūrinio garso sklidimo pastatų konstrukcijomis eksperimentinius tyrimus [131–133] ir pateikė nemažai metodikos praktiniam struktūrinio garso izoliacijos skaičiavimui.

Dėl ribotų tuometinių skaičiavimo galimybių, autoriai galėjo atlikti santykinai nedidelės apimties skaitinius eksperimentus ir tik paprasčiausiems jungčių geometrijos atvejams. Kiek vėliau, atsiradus galingesnei skaičiavimo technikai ir galiausiai personaliniams kompiuteriams, atsivėrė galimybės sudėtingesniems vibracijų silpimo konstrukcinėse jungtyse tyrimams, kurie tobulino pagrindines garso sklidimo pro pastato jungtis teorijas. Bhattacharya M. C. ir kt. tyrimais [2] įrodė, kad pusiau begalinės plokštės gali jungtis daugiau nei viename linijinio tipo mazge, kuriame bus išlaikytos tolydumo ir pusiausvyros sąlygos. Woehle W. ir kt. modeliavo [117–118] jungtį iš pusiau begalinių plokščių, standžiai prijungtų prie strypo, kuris neturi masės. Autorius apskaičiavo ryšio nuostolių koeficientus, remiantis vidutinėmis pusiau begalinių plokščių vibracijų perdavimo koeficientų reikšmėmis. Remdamasis SEA teorijos principais sukūrė [119] kompiuterinį garso sklidimo skaičiavimo modelį pastatams, kuriuose yra didelis kiekis konstrukcijų. Modelio pagrindu autoriaus atlikti skaičiavimai buvo sugretinti su atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatais, kurie buvo gauti naudojant orinių ir mechaninių vibracijų šaltinių sužadinimą konstrukcijose [120]. Craven P. G. ir kt. [29] bei Gibbs B. M. ir kt. [46] išvystė supaprastintą skaičiavimo modelį, tačiau naudojo skirtingą kraštinių sąlygų formulavimą ir įvertino plokštės medžiagos vidinius energijos nuostolius. Gibbs B. M. pateikė [50] detalią bangos tipo konversijos analizę serijai T formos plokščių jungčių.

Plačias SEA teorijos pritaikymo galimybes statybinėje akustikoje savo tyrimais pademonstravo Craik R. J. M. Autorius analizavo teorijos taikymo ribas teorinius skaičiavimus lygindamas su eksperimentinių tyrimų rezultatais [10, 11, 13, 16]. Vertino ilgų šoninių kelių [26], žemų dažnių [17], bangos kritimo kampo (2.6 pav.) ir atsitiktinių paklaidų [12] bei kitų parametrų įtaką [14, 15, 18] vibracijų sklidimui pastatuose. Kartu su bendraautoriais apžvelgė linijinio tipo jungčių tyrimų patirtį [27], teorinius teiginius pagrįsdamas eksperimentinių tyrimų rezultatais. Analogiškų tyrimų rezultatus pateikia Woodhouse J. [121], Magrans F. X. [84], Crocker M. J. ir Price A. J. [31], Furukawa H. ir kt. [42], Davies J. C. [35], Gibbs B. M. ir kt. [49], Guo Y. P. [58–59], Schmidt A. [105], bei Sarradj E. [102, 103].



2.6 pav. Vibracijų perdavimo koeficientų priklausomybė nuo bangos kritimo kampo į X formos jungtį

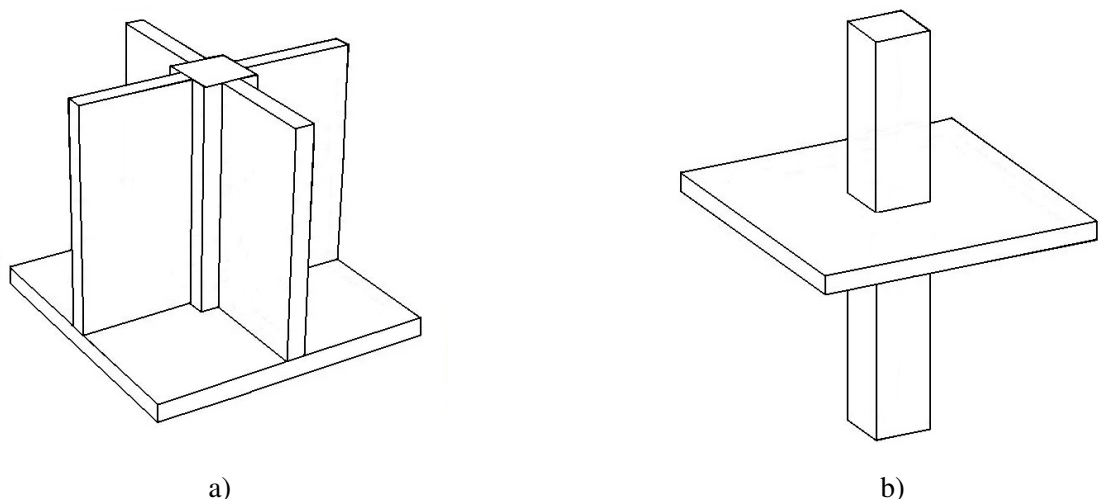
Keletas autorių analizavo vibracijų silpimą specifinėse pusiau begalinio ilgio plokščių jungtyse. Langley R. S. ir Heron K. H. modeliavo [74] linijines jungtis, kuriose plokštės buvo sujungtos įvairiais kampais esant atsitiktiniam garso bangos kritimo kampui. Langley R. S. sudarė lankstymosi bangų sklidimo lenktų plokščių jungtimis modelį [75]. Naujausi Kessissoglou N. J. teoriniai ir eksperimentiniai L formos jungčių tyrimai [66, 67] įvertina visų tipų bangų sklidimą žemuose ir aukštuose dažniuose.

Mokslinėje literatūroje, kurioje analizuojamas vibracijų sklidimas statybinių konstrukcijų jungtyse, jos visuomet buvo modeliuojamos kaip simetrinės. Apie vibracijų sklidimą asimetrinėse jungtyse trumpai užsimenama vos keliuose darbuose. Tuo tarpu Reis F. [99] atliko kiek išsamesnę vibracijų silpimo asimetrinėse T formos jungtyse analizę. Autorius, remdamasis gautais minėtos jungties eksperimentinių tyrimų rezultatais teigia, kad vibracijų silpimas asimetrinėse T formos jungtyse priklauso nuo vibracijų sklidimo krypties.

Dalis tyrimų buvo skirta garso sklidimui strypinio tipo elementų jungtimis, kurių rezultatai gali būti panaudoti bangų sklidimui iš strypinio į plokštės tipo elementus esant normaliniam bangos kritimui. Kurtze G. ir kt. [72] atliko detalius eksperimentinių lankstymosi bangos sklidimo L formos strypine jungtimi tyrimus. Tiriama jungtis buvo standi, tampri ir šarnyrinė. Rosenhouse G. [101] tyrė garso sklidimą uždaro profilio strypinėse jungtyse esant normaliniam bangos kritimui ir įvertino medžiagos vidinio slopinimo įtaką. Gibbs B. M. ir kt. [47], Moore J. A. [89] ir Horner J. L. ir kt. [64, 65] analizavo strypinės jungties formos įtaką energijos sklidimui ir bangos tipo konversijai mazge, taip pat pasitelkiant ir precizišką jungties elementų modeliavimą, kai elementai yra skirtingų matmenų, masės ar standumo. Craik R. J. M. ir Galbrun L. analizavo [28] SEA teorijos pritaikymo galimybes medinių karkasinių pastatų jungtims skaičiuoti. Autoriai pastebėjo, kad strypų jungtys apskaičiuojamos tiksliau, kai jungtis aprašoma ne standi, o šarnyrinė. Vibracijų silpimą strypinėse jungtyse taip pat tyrė Tso Y. K. ir Norwood C. J. [114], Walsh S. J. ir White R. G. [116] bei Szwerc R. P. [114].

2.2.2. „Plokštės-strypo“ jungtis

Karkasiniuose pastatuose patalpos suformuojamos iš sienų ir perdangų (plokštės tipo elementai), kurios gali jungtis su kolonomis ir sijomis (strypo tipo elementai). Analizuojant tokio pastato planus ir pjūvius, pastebimos įvairios idealizuotos kompleksinės „plokštės-strypo“ jungtys (2.7 pav.). Lyginant su analogiškėmis plokščių jungtimis, šiuo atveju papildomai įvertinama bangų sklidimo strypiniuose elementuose įtaka.



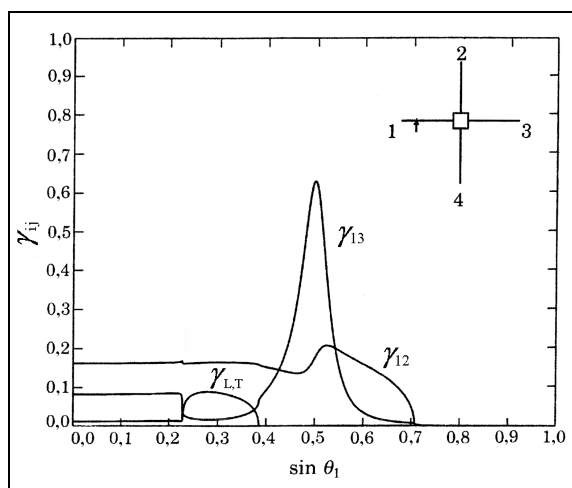
2.7 pav. „Plokštės-strypo“ tipo jungtys:

a) sienų ir kolonos jungtis pastato plane, b) kolonų ir perdangos jungtis pastato pjūvyje

„Plokštės-strypo-plokštės“ jungtis

Jungtį, kai jame yra dvi plokštės prijungtos prie kolonos iš priešingų pusių esant normaliniam bangos kritimui, tyrė Cremer L. [30]. Autorius įvertino lankstymosi ir išilgines bangas, o kolona modeliuota kaip labai mažų matmenų strypas. Vėliau autorius išplėtė linijinių jungčių tyrimus, įvertindamas šlyties jėgų sukeltus momentus sienose, veikiančius į kolonos kraštus. Heckl M. modeliavo [61] jungtis tarp baigtinio ilgio ir pusiau begalinių plokščių jungdamas klasikines garso bangos lygtis ir modalinį superpozicijos principą. Lankstymosi ir išilginių bangų sklaidimą įvairių formų „plokštės-strypo“ stačiakampėms jungtims analizavo Fujiwara K. [41] esant normaliniam bangų kritimo kampui. Jo darbuose strypas buvo modeliuojamas kaip masė, kuri plokščių sankirtos centre galėjo pasisukti. Masės ekscentriškumo pozicija jungties centro atžvilgiu buvo įvertinta kaip modifikuotas inercijos momentas.

Craven P. G. ir Gibbs B. M. [29] bei Gibbs B. M. ir Gilford L. S. [48] įvertino kolonos įtaką vibracijų silpimui L, T ir X formos jungtyse. Koloną veikė momentai ir jėgos, pridėtos iš prijungtų sienų. Pastaruosiuose tyrimuose plokštuminės bangos nebuvo išskirtos į išilgines ir skersines bangas. Tai atliko Steel J. A. [108–111], kuris analitiniu ir eksperimentiniu būdu įvertino dažnio įtaką garso sklaidimui įvairių formų jungtyse su kolonomis esant atsitiktiniam bangos kritimo kampui. Skaičiavimo modelyje strypas aprašytas kaip spyruoklės tipo elementas, kuriame sklinda lankstymosi ir sukimosi bangos bei kurio skerspjūvis deformuojasi. Teoriniais skaičiavimais nustatė vibracijų perdavimo koeficiento priklausomybę nuo bangos kritimo kampo (2.8 pav.).

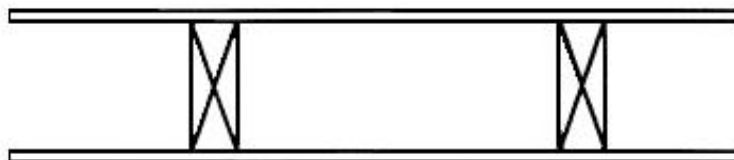


2.8 pav. Vibracijų perdavimo koeficiento priklausomybė nuo bangos kritimo kampo į X formos „plokštės-strypo-plokštės“ tipo jungtį

Langley R. S. ir Heron K. H. modeliavo [74] jungtis, kuriose plokštės buvo sujungtos per strypą esant atsitiktiniam garso bangos kritimo kampui. Strypo atsakas aprašytas lankstymosi, sukimosi ir išilginių bangų lygtimis. Sukimosi bangos sukeldavo strypo skerspjūvio deformacijas. Atstumas tarp plokščių kraštų ir jungties svorio centro ir strypo šlyties centras buvo įvertintas „plokštės-strypo“ jungties pusiausvyros ir tolydumo lygtyse. Ši analizė yra tinkama norint įvertinti vibracijų silpimą pilnavidurio skerspjūvio strypuose bei plonuose uždaro ar atviro tuščiavidurio skerspjūvio strypuose. Fahy F. J. ir Mohammed A. D. [39] atliko „plokštės-strypo-plokštės“ jungčių skaitinius eksperimentus ir vertino SEA teorijos pritaikymo galimybes plokščių ir strypų jungtims. Nepaisant kai kurių teigiamų išvadų autoriai pripažino, kad vienos jungčių grupės tyrimai nėra reprezentatyvūs.

Naują skaitinio integravimo metodą vibracijų sklidimo plokščių sujungtų per strypą mazge skaičiavimams panaudojo Sarradj E. [104]. Autorius plokštėms ir strypui pritaikė atitinkamai Mindlino ir Timošenko teorijas. Ryšio perdavimo nuostolius periodinėms „plokštės-strypo“ jungtims tyrė Tso Y. K. ir kt. [115]. Mokslininkai įvertino tik lankstymosi bangų sklidimą, tačiau būtent pasikartojančiose jungtyse tampa svarbi išilginių ir skersinių bangų įtaka. Greičiausiai dėl to ir atsirado nesutapimų tarp teorinio skaičiavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų. Tuo tarpu Kessissoglou N. J. [68] modeliavo vibracijų silpimą strypo ir plokštės jungtyse esant kritiniam garso bangos dažniui.

Galima išskirti dar vieną specifinį „plokštės-strypo“ tipo jungties atvejį, kuomet dvigubų atitvarų plokštės sujungiamos strypiniu elementu (2.9 a pav.). Ši jungtis būdinga mediniams skydiniams pastatams. Dėl strypo atsirandantis garso tiltelis prideda papildomą garso sklidimo kelią atitvaroje ir mažina jos garso izoliaciją. Vibracijų sklidimas atitvaroje gali būti nustatomas modeliuojant jungtį iš keturių pusiau begalinio ilgio plokščių ir strypo (2.9 b pav.). Craik R. J. M. ir Wilson R. [21] naudojo šią supaprastintą garso sklidimo analizę pro lygiagrečias atitvaros karkaso plokštes, įvertindami strypą kaip standų, neturintį masės elementą.

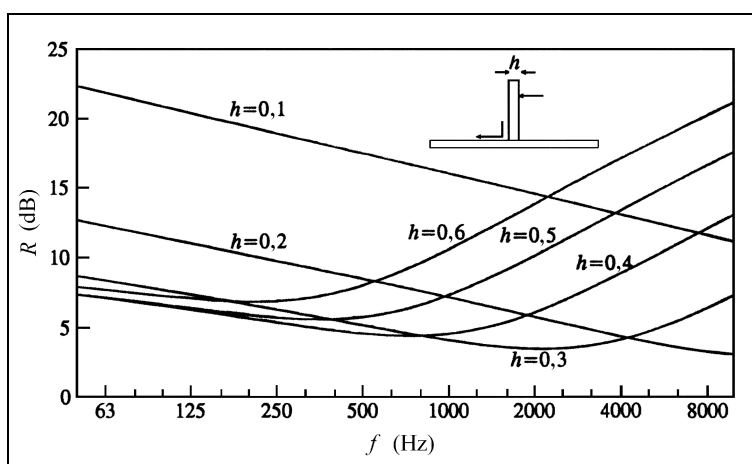


2.9 pav. Specifinė „plokštės-strypo“ tipo jungtis: dvigubos atitvaros karkasas

Craik R. J. M. ir kt. [22] tyrė netiesioginį garso sklidimą plokštės briauna ir modeliavo strypą kaip spyruoklės tipo elementą. Kiek vėliau, Craik R. J. M. ir Smith R. S. [24–25] papildomai modeliavo lankstymosi ir sukimosi bangų sklidimą, panašiai kaip ir Steel J. A. [110], taip įvertinant strypo skerspjūvio deformacijas.

„Strypo-plokštės-strypo“ jungtis

Struktūrinio garso sklidimą tarp pusiau begalinio ilgio plokštės ir prie jos statmenai prijungto begalinio ilgio strypo, SEA teorijos kontekste analizavo Lyon R. H. ir Eichler E. [79]. Autoriai jungtyje įvertino lankstymosi bangų sklidimą, o vibracijų perdavimo koeficientus susiejo su bangų impedanso lygtimis. Steel J. A. [109] taip pat pritaikė impedanso ir lankstymosi bangų lygtis vibracijų sklidimui šio tipo jungtyse apskaičiuoti ir nustatė dažnio įtaką vibracijų perdavimo nuostoliams vienos kolonos jungčiai su perdanga (2.10 pav.).



2.10 pav. Vibracijų perdavimo nuostolių priklausomybė nuo dažnio „strypo-plokštės“ jungčiai (perdangos storis 0,1 m; kolonos kraštinė: 0,1–0,6 m)

Šiuose vibracijų silpimo uždaviniuose dažnai neįvertinama jungtis tarp skirtingo laisvės laipsnių skaičiaus elementų, o impedanso formulę išvedimas ir jų susiejimas su vibracijų perdavimo koeficientais yra uždavinio sprendimas priartėjimo būdu. Kai reikalingas tikslus gaminio „plokštės-strypo“ jungties lygčių aprašymas, impedanso formulės nėra tinkamos. DeLanghe K. ir kt. [36] išvengė impedanso formulę išvedimo naudodamas bangos sklidimo lygtis ir baigtinių elementų metodą struktūrinio garso energijos sklidimui jungtyje apskaičiuoti, kai ją sudaro strypas ir apskrita plokštė. Baigtinis jungties elementų ilgis buvo simuliuojamas modelyje prijungiant bangas sugeriantį elementą, kuris filtravo atspindžius nuo briaunų. Vieni

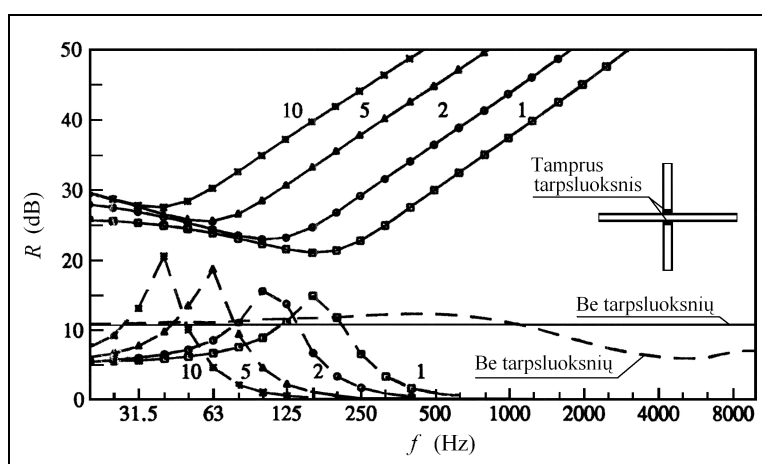
naujausių Ljunggren S. [80] tyrimų skirti lankstymosi, išilginių ir sukimosi bangų sklidimo iš pusiau begalinio ilgio strypo į begalinio ilgio plokštę analizei.

2.2.3. Jungtis su tampriais tarpsluoksniais

Tamprūs tarpsluoksniai jungtyse tarp sienų ir perdangų bendru atveju rekomenduojami tam, kad būtų sumažintas šoninio garso sklidimas pastatuose. Dėl tamprųjų tarpsluoksnių atsiradęs impedansų neatitikimas sąlygoja žymų struktūrinio garso slopinimą. Cremer L. ir kt. [30], analizavo tamprųjų tarpsluoksnių įtaką išilginių ir lankstymosi bangų sklidimui jungtyse esant normaliniam bangos kritimui. Papildomai atlikta bangų sklidimo tarpsluoksnyje analizė parodė, kad dažnių srityje, kur tarpsluoksnių storis lyginant su sklindančios bangos ilgiu yra mažas, tarpsluoksniis gali būti modeliuojamas kaip spyruoklės tipo elementas.

Woehle W. ir kt. modeliavo [117, 118] tamprūs tarpsluoksnius L, T ir X formos konstrukcijų jungtyse įvertindamas vieną besisukančią ir tris slenkamas spyruokles jungtyje. Leung R. C. ir Pinnington R. J. [76, 77] tyrė išilginių ir lankstymosi bangų sklidimą kampo formos jungtyje su amortizuojančia spyruokle įvertindami jų sukimąsi ir slinkimą. Analizuota įvairaus skerspjuvio aukščio ir skirtingų medžiagos savybių strypo tipo jungtis, o gauti rezultatai gali būti panaudoti ir plokštės elementų kampo formos jungčiai su tarpsluoksniais.

Remdamiesi tikslesnėmis teorinėmis prielaidomis Mees P. ir Vermeir G. [87] papildomai įvertino bangų sklidimą tarpsluoksnyje ir rezonanso efektą naudodami pasiduodamumo matricos formulavimą. Menamas tarpsluoksnių standumas buvo įvertintas BEM simuliacijos rezultatų



2.11 pav. Vibracijų perdavimo nuostolių priklausomybė nuo dažnio X formos jungčiai su tampriais tarpsluoksniais iš kamščio tarp sienų ir perdangos: R_{12} – išilginė linija; R_{13} – punktyrinė linija; 1, 2, 5, 10 – tarpsluoksnių storis (mm)

vidurkio pagalba. Palyginimas tarp teorinių skaičiavimų ir eksperimentinių tyrimų rezultatų parodė jungties atitraukimo, tamprumo modulio, Puasono koeficiento, dažnio (2.11 pav.) ir jungties formos įtaką vibracijų silpimui tampriai sujungtose plokštėse. Šiuos tyrimų rezultatus patvirtino Craik R. J. M. ir Osipov G. [20] bei Osipov G. ir Vermeir G. [93], o kiek vėliau, juos papildė Pedersen D. B. [94]. Pastarasis autorius teigia, jog vibracijų perdavimo nuostoliai T formos jungtyje yra beveik nepriklausomi nuo dažnio. Tuo tarpu Menq C. H. [88] pasiūlė tamprių tarpsluoksnių modeliavimą patobulinti įvertinant jungtyse atsirandančius mikroposlinkius.

2.2.4. Akustiškai storų plokščių jungtis

Ankstesniuose poskyriuose analizuoti skaičiavimo modeliai rėmėsi lankstymosi bangos lygties aprašymu pagal Kirchhoffo plonų plokščių teoriją. Dažnių srityje, kai lankstymosi bangos ilgis yra mažas lyginant su plokštės storu ir galioja sąlyga:

$$\lambda_B < 6h, \quad (2.29)$$

plokštės laikomos akustiškai storomis. Tokios plokštės modeliuojamos taikant Mindlino teoriją, kuri papildomai įvertina sukimosi inercijos efektą bei šlyties deformacijas ir esant aukštiems dažniams yra svari alternatyva plonų plokščių teorijai.

Rindel J. H. [100] teorinius akustiškai storų plokščių priklausomybės nuo dažnio tyrimus pagrindė eksperimentinių tyrimų rezultatais. Autorius matavo vibracijų silpimą betono, lengvojo betono ir mūro sienų bei perdangų jungtyse. McCollum M. C. ir Cuschieri J. M. [86] sukūrė paprastą L formos akustikai storų plokščių jungčių skaičiavimo modelį. Minėtų jungčių analizė parodė, kad sukimosi inercijos įtaka bei šlyties deformacijos yra nereikšmingos žemuose dažniuose. Tačiau naudojant plonų plokščių teoriją aukštuose dažniuose gaunamas lankstymosi bangų sklidimo įtakos pervertinimas. Vėliau autoriai patobulino skaičiavimo modelį įvertindami plokštuminių bangų sklidimą.

2.3. BAIGTINIO ILGIO PLOKŠČIŲ JUNGTIES MODELIS

Šiame modelyje energijos sklidimas pro jungtį išreiškiamas vidutinės kvadratinės šaknies greičio lygių skirtumu tarp plokštės–šaltinio ir plokštės–imtuvo. Skaičiuojamasis garso sklidimo baigtinio ilgio plokštėmis modelis yra artimas pusiau begalinių plokščių skaičiavimo modeliui.

Principinis šių modelių skirtumas yra tai, kad baigtinio ilgio plokščių skaičiavimo modelyje papildomai įvertinamas modalinis struktūrinio garso sklidimo atsakas. Baigtinio ilgio plokščių modelyje pusiausvyros lygtys užrašomos remiantis ne banginiu principu, o pusiau modaliniu superpozicijos principu. Deterministinės šio metodo prielaidos suteikia galimybę gauti pilną dažnio funkcijos atsaką ir erdvinę plokštės vibracijų variaciją. Metodas leidžia gauti tikslius skaičiavimo rezultatus, išskyrus skaičiavimus už plonų plokščių teorijos galiojimo ribų ir idealiai standaus mazgo atvejį. Vis dėl to, analitinių lygčių sistemos sprendiniai galioja tik griežtai apibrėžtų kraštinių sąlygų rinkiniui ir santykinai paprastos geometrijos jungtims.

Baigtinio ilgio plokščių modeliavimas vyksta dvejomis kryptimis – įvertinant globalų modalinį sumavimą arba lokalų modalinį sumavimą. Globalaus modalinio sumavimo atveju, sistemos atsakas išreiškiamas modų esančių sistemoje sumavimo sąlygomis. Tuo tarpu lokalaus modalinio sumavimo atveju, sistemos atsakas išreiškiamas kaip atskirų plokščių modų funkcija.

Globalus modalinis sumavimas

Guyader J. L. ir kt. [56] naudojo globalaus modalinio sumavimo metodą vibracijų silpimui L, T ir X formos plonų baigtinio ilgio plokščių jungtyse tirti. Autorius apskaičiavo vidutinę plokščių kinetinę energiją esant plačiajuosčiam jėgos sužadinimui ir lankstymosi bangų sklidimui. Boisson C. ir kt. [3] pritaikė šią teoriją L formos plokščių jungties analizei. Skaičiavimo modelis buvo patikrintas dviejų plieno plokščių kampo formos jungties eksperimentiniais tyrimais. Kiek vėliau, Guyader J. L. ir kt. [57] panaudojo baigtinio ilgio plokščių skaičiavimo modelį šoninio triukšmo sklidimo tarp gretimų patalpų pastate analizei. Šoninis garso sklidimas tarp patalpų įvertintas skaičiuojant vibracijų sklidimą T formos plokščių jungtimi tarp patalpų. Gautų rezultatų sugretinimas su pagal SEA teoriją apskaičiuotais rezultatais parodė, kad SEA teorija linkusi kiek pervertinti šoninio triukšmo sklidimo įtaką, ypač jei sujungtos plokštės yra skirtingų savybių. Shen Y. ir Gibbs B. M. [106] sudarė paprastą plonų baigtinio ilgio plokštelių jungčių skaičiavimo modelį. Gauto modelio privalumas yra tai, kad kraštines sąlygas plokštėms galima keisti nuo šarnyriškai atremto iki visiškai suvaržyto būvio. Gibbs Y. ir Shen B. M. pademonstravo gerą šio teorinio metodo tikslumą gautais eksperimentinių L formos [51] bei dviejų tipų T formos plokščių jungčių [52] tyrimų rezultatais.

Lokalus modalinis sumavimas

Cuschieri J. M. [32] sukūrė metodą, kuris buvo žinomas kaip „paslankumo galios sklidimo (mobility power flow)“ metodas. Šiuo atveju, vibracijų energijos sklidimas tarp sujungtų dviejų

baigtinio ilgio plokščių išreiškiamas energijos įvedimo ir perdavimo mobilumo sąlygomis. Autorius pasiūlė griežtai identiškų ir šarnyriškai atremtų L formos plokščių jungčių skaičiavimo modelį esant lankstymosi bangų sklidimui. Skaičiavimo rezultatai, gauti naudojant šį modelį, buvo sugretinti su BEM ir SEA teorijos metodų analogiškos jungties skaičiavimo rezultatais ir parodė gerą jų sutapimą. Cuschieri J. M. [33] patobulino minėtą modelį, todėl tapo galima skirtingų savybių plokščių jungčių analizė. McCollum M. C. ir Cuschieri J. M. [85] naudojo „paslankumo galios sklidimo“ metodą vibracijų sklidimo dviejų identiškų akustiškai storų plokščių kampo formos jungtyse analizei. Kaip plokštės atsakas buvo analizuotas lankstymosi bangos sklidimas, papildomai įvertinta sukimosi inercija ir šlyties deformacijos. Panašiu modeliu Cuschieri J. M. ir McCollum M. C. [34] analizavo plokštuminių bangų įtaką vibracijų sklidimui jungtyje.

Kiek vėliau, pastarasis skaičiavimo metodas pradėtas taikyti vibracijų silpimo analizei plokštės jungčių sistemose. Kim H. ir kt. [71] išvystė modalinės analizės metodą lankstymosi bangų sklidimui kompleksinėse lygiagrečių, vienodo ilgio plokščių sistemose. Rebillard E. ir Guyader J. L. [98] studijavo struktūrinio garso sklidimą plokščių sistemomis, sujungtomis grandinės principu. Tyrimuose įvertintos lankstymosi ir plokštuminės bangos, o plokščių atsakas aprašytas naudojantis pusiau modaliniu skaidymo metodu. Taikant šį modeliavimo būdą, priimamos šarnyrinio atrėmimo briaunose kraštinės sąlygos. Bosmans I. ir Vermeir G. [6] skaičiavo vibracijų silpimą kampo formos plokščių jungtyse ir lygino gautus rezultatus su SEA teorijos skaičiavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatais bei nustatė teorinių skaičiavimų paklaidas. Zhang X. M. ir kt. [123] sukūrė vibracijų sklidimo modelį lengvų ir sunkių strypinių elementų jungtims. Šiame modelyje lengva konstrukcija modeliuojama kaip plonas strypas, kuris prijungtas prie sunkios masės bloko.

2.4. ORTOTROPINIŲ PLOKŠČIŲ JUNGTIŲ MODELIS

Pusiau begalinio ilgio ir baigtinio ilgio skaičiavimo plokščių jungčių modeliai yra tinkami plokštėms, kurių savybės yra izotropinės. Statybos praktikoje dažnai naudojamos ir kitos medžiagos, kurių savybės nėra vienodos visomis kryptimis. Dalis šių medžiagų yra ortotropinės dėl savo medžiagos savybių, pavyzdžiui, statybinė mediena, laminuotos medžio drožlių plokštės ir pan. Kitos statybinės medžiagos laikomos ortotropinėmis dėl savo skerspjūvio geometrijos, pavyzdžiui, gofruoto, rifliuoto ar briaunuoto skerspjūvio plokštės. Dinaminės šių plokščių savybės gali būti aprašomos kaip ekvivalentiškos vientisos ortotropinės plokštės. Dėl savo vidinės struktūros arba skerspjūvio geometrijos daugelis perdangų pastatuose yra ortotropinės.

Ortotropinių plokščių jungties modelis remiasi pusiau begalinio ilgio ir baigtinio ilgio skaičiavimo modelių sudarymo principais. Lygtys užrašomos remiantis banginiu principu, pusiau modaliniu superpozicijos principu arba ekvivalentinių plokščių teorija.

Daugelis mokslinių publikacijų, kurios remiasi šiuo skaičiavimo modeliu, nagrinėja ortotropinių plokščių vibracijas kaip skersines homogeniškų plokščių vibracijas. Visos plokštės priimamos kaip natūraliai ar geometriškai ortotropinės, kurioms taikomi ekvivalentinių plokščių teorijos apribojimai. Didžioji dalis publikacijų remiasi analitiniais metodais ir įvertina lankstymosi bangų sklidimą stačiakampėmis plokštėmis. Dalis autorių pateikia labiau išvystytą struktūriškai ortotropinių plokščių vibracijų analizę, įvertindami inercijos įtaką ir ekscentrišką standumo briaunų išsidėstymą.

Heckl M. [60] tyrė ortotropinių plokščių vibracinį atsaką esant taškinės jėgos sužadinimui ir nustatė taškinio impedanso išraiškas bei modalinį tankį. Darbe nemažai dėmesio skirta ortotropinių plokščių garso izoliacijai ir garso spinduliavimui. Orrenius U. ir Finnveden S. [92] pritaikė pusiau analitinį baigtinių elementų metodą standumo briaunose sklindančių garso bangų analizei. Tuo tikslu plokštės skerspjūvis buvo sudalintas į baigtinius juostos formos ruožus. Analizėje įvertintas ne tik lankstymosi bangų, tačiau ir plokštuminių bangų sklidimas. Skaitinių tyrimų rezultatus autorius palygino su ekvivalentinės ortotropinių plokščių teorijos skaičiavimo rezultatais. Pastebėta, kad žemų dažnių srityje rezultatai sutampa.

Ištyrus vibracijų sklidimą ortotropinėmis plokštėmis, pradėta vibracijų silpimo šio tipo konstrukcijų jungtyse analizė. Nightingale T. R. T. analizavo [90, 91] vibracijų silpimą ortotropinių plokščių ir strypų jungtyse. Bosmans I. ir kt. [5, 8] pademonstravo banginio principo pusiau begalinio ilgio ir modalinio sumavimo baigtinio ilgio L formos jungtims modelių panašumus ir skirtumus. Šių modelių pagalba gauti skaičiavimo rezultatai buvo sulyginami su SEA teorijos ekvivalentiškų plokščių jungčių tyrimų rezultatais.

2.5. TAŠKINIŲ BŪDU SUJUNGTŲ PLOKŠČIŲ JUNGTIŲ MODELIS

Ankstesniuose poskyriuose apžvelgti skaičiavimo modeliai tinkami vibracijų silpimo linijinėse statybinių konstrukcijų jungtyse analizei. Daugelyje realių statybinių konstrukcijų galima pastebėti, kad plokštės jungiamos ne visu savo ilgiu, tačiau tik tam tikrose vietose varžtais, kniedėmis ar tiesiog suvirintos taškiniu būdu. Pavyzdžiui, sienos ir perdangos mediniuose pastatuose gali būti sujungtos per statramsčius ar sijas. Tokiuose pastatuose šoninis garso sklidimas dažniausiai bus vibracijų sklidimas strypo tipo elementais, esančiais greta jungties. Tuo tarpu mūrinėje ar monolitinėje statyboje, sienų ir viso pastato karkaso pastovumui

bei stabilumui užtikrinti naudojami lokalūs standūs ryšiai. Minėtais atvejais, struktūrinis garsas persiduos ne visu jungties ilgiu, tačiau per lokalius garso tiltelius. Dėl šių priežasčių buvo sukurtas vibracijų sklidimo modelis taškiniu būdu sujungtoms plokštėms analizuoti. Sudarant šį modelį, priimama eilė prielaidų ir supaprastinamų. Labiausiai yra išvystyti du taškiniu būdu sujungtų plokščių skaičiavimo modeliai – banginiu principu ir pusiau modalinės superpozicijos principu formuluojamos lygtys plokščių jungtims.

Bangų sklidimo analizės metodu gautas ryšio perdavimo nuostolių skaičiavimo išraiškas taškiniai jungčiai turinčiai vieną laisvumo laipsnį pateikė Lyon R. H. ir DeJong R. G. [78]. Jis buvo pakankamai patikimas vidutinių dažnių srityje. Jungčiai, turinčiai keletą laisvumo laipsnių, ryšio perdavimo nuostoliai buvo sumuojami. Pavyzdžiui, ryšio perdavimo nuostolių įtaka aprašant lankstymosi bangos sklidimą linijinėje dviejų taškiniu būdu sujungtų plokščių jungtyje skaičiuojama kaip suma sukamųjų ir skersinių poslinkių. Ši procedūra buvo pagrįsta multikomponentų ryšio prielaida, t.y. ryšys tarp laisvumo laipsnių gali būti ignoruojamas. Tačiau, bendru atveju multikomponentų ryšys negali būti ignoruojamas. Strypų ir plokščių jungčių rinkiniui tai pademonstravo Petersson B. [95]. Naudojant modalinį tyrimo metodą turi būti atsižvelgta į baigtinio ilgio ar pusiau begalinių plokščių taško mobilumo funkciją. Daugelis skaičiuojamųjų išraiškų moksliniuose tyrimuose taikomos plonoms izotropinėms plokštėms. Įvairios taško mobilumo išraiškos buvo apibendrintos Cremer ir kt. [36] bei Lyon R. H. ir DeJong R. G. [82] tyrimuose. Plokštuminio paslankumo skaičiavimo rezultatus dviejų statmenų plokščių jungčiai pateikė Petersson B. [96, 97]. Keleto plokštės ir strypo taškiniu būdu sujungtų jungčių tipų tyrimus atliko Langley R. S. ir Shorter P. J. [73].

Didžiausias šio metodo privalumas yra tai, kad sklindant vibracijoms taškiniu būdu sujungtose sistemose kylančios sudėtingos dinaminės problemos gali būti išsprendžiamos keletu nesudėtingų lygčių. Didžiausios problemos kyla atliekant priartėjimus bei neaiškumas tarp linijinės ir taškiniu būdu sujungto mazgo naudojimo ribos. Bosmans I. ir Nightingale T. R. T. [4, 9] tyrė struktūrinio triukšmo sklidimą medinių karkasinių pastatų grindų ir sienų jungtyse bei nustatė ribas, kada jungtį galima vertinti kaip linijiniu būdu sujungtą, ir kada sujungtą kaip seriją lokalių taškinių jungčių. Teoriniai skaičiavimai buvo pagrįsti didelės apimties eksperimentinių tyrimų rezultatais

2.6. IŠVADOS IR TYRIMŲ TIKSLAS

Atlikus mokslinės literatūros analizę paaiškėjo, kad SEA teorijos pusiau begalinių plokščių metodas labiausiai tinkamas analizuoti vibracijų sklidimą gelžbetoninių ir mūrinių pastatų

konstrukcinėse jungtyse, kurios modeliuojamos kaip standžios ar tamprios plokščių ir strypų jungtys. Jo pagrindu išvystyti kiti skaičiavimo metodai, skirti vibracijų sklidimo kito tipo statybinių pastatų konstrukcijomis ir jų jungtimis skaičiuoti. Ortotropinių plokščių modelis skirtas garso sklidimui statybinių konstrukcijų jungtims, kurių elementai yra ortotropiniai dėl geometrinių ar fizinių savybių, skaičiuoti. Taškiniu būdu sujungtų plokščių modelis skirtas vibracijų silpimui medinių karkasinių pastatų jungtyse analizuoti. Pastarasis metodas tinkamas ir kitoms konstrukcinėms jungtims, kurios sujungtos varžtais, vinimis ar suvirintos taškiniu būdu analizuoti. Baigtinio ilgio plokščių metodas remiasi pusiau modaliniu superpozicijos principu ir yra tinkamas skaičiuoti sudėtingoms, didelį kiekį elementų turinčioms, sistemoms.

Išnagrinėtoje mokslinėje literatūroje nėra pakankamai informacijos apie vibracijų silpimą asimetrinėse jungtyse bei jungtyse su kolona. Tiesiogiai įvertinti vibracijų sklidimą šio tipo jungtimis naudojantis standartizuotu metodu taip pat nėra galimybės. Taip pat nepakanka informacijos apie jungties elementų geometrinių ir fizinių savybių įtaką vibracijų sklidimui. Todėl ši informacija turi būti gauta atlikus mokslinius tyrimus.

Tokiu būdu šio mokslinio darbo tikslas yra sudaryti teorinį vibracijų silpimo modelį plokštės tipo ir kompleksinių „plokštės-strypo“ tipo jungtims bei nustatyti vibracijų perdavimo nuostolius įvairiems šių jungčių atvejams naudojant SEA teorijos pusiau begalinio ilgio plokščių metodą.

3 SKYRIUS

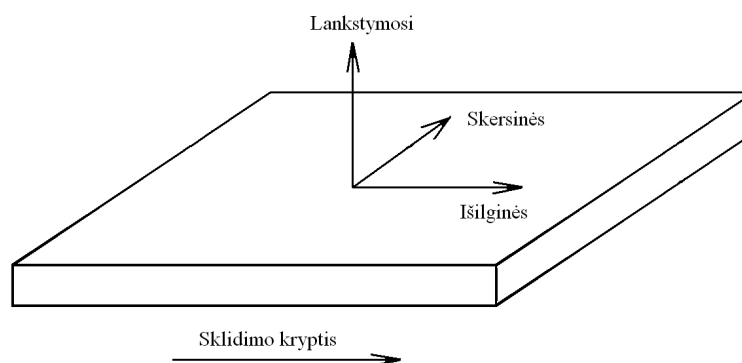
VIBRACIJŲ SILPIMO PLOKŠTĖS TIPO JUNGTYJE MODELIS

Atliekant projektinius garso energijos sklidimo pastatuose skaičiavimus pagal LST EN 12354, norminiame dokumente galima rasti tik dalį rodiklių dažniausiai pastatuose naudojamoms konstrukcinėms jungtims įvertinti. Modernioje statyboje vis dažniau naudojami sprendimai, kuriuose jungtys yra asimetrinės, su kolonomis ir pan. Todėl projektuotojai, norėdami įvertinti netiesioginio garso sklidimą pro šias jungtis, dėl duomenų trūkumo gali susidurti su rimtomis kliūtimis. Daugeliu atvejų tenka remtis pavieniais, neapibendrintais analogiškų jungčių tyrimų rezultatais. Viena iš tokios problemos priežasčių yra šios srities norminių dokumentų trūkumas. Standartas ISO 10848, apibrėžiantis pastato konstrukcinių jungčių eksperimentinius tyrimus, jau paruoštas, tačiau įsigaliojimo data dar nėra aiški. Todėl ypač svarbus yra minėtų jungčių analitinis įvertinimas.

Skyriuje analizuojamas vibracijų sklidimas simetrinėse ir asimetrinėse L, T, fasadinės T ir X formos plokštės tipo statybinių konstrukcijų jungtyse.

3.1. GARSO BANGŲ SKLIDIMO PLOKŠTĖS TIPO ELEMENTE PRINCIPAI

Krentant bet kurio tipo bangoms į plokštę, bendru atveju, joje bus sužadinamos trijų tipų bangos – lankstymosi, išilginės ir skersinės (3.1 pav.).



3.1 pav. Plokštės tipo elemente sklindančių garso bangų tipai

Tačiau praktikoje kai kurios bangos dalyje jungties elementų nebus sužadinamos. Pavyzdžiui, simetrinėje kryžiaus formos jungtyje, sužadinus pirmą jungties plokštę lankstymosi banga, visose jungties plokštėse bus taip pat sužadinamos lankstymosi bangos. Sklindant

lankstymosi bangai iš pirmos jungties plokštės, antroje ir ketvirtoje plokštėse bus papildomai sužadinamos išilginės ir skersinės bangos, tačiau šios bangos nebus sužadinamos pirmoje ir trečioje plokštėse. Garso energija iš statybinių konstrukcijų į aplinką (dažniausiai orą) yra išspinduliuojama tik dėl lankstymosi bangų sklidimo, todėl plokštuminės bangos (išilginės ir skersinės) dažnai į skaičiavimo modelį neįtraukiamos. Tačiau vienoje konstrukcinėje jungtyje sužadintos išilginės ir skersinės bangos sekančioje jungtyje gali transformuotis į lankstymosi bangas. Todėl sudarant atskiros konstrukcinės jungties skaičiavimo modelį, plokštumines bangas galima ignoruoti. Tačiau jei skaičiavimo modelis apima daugiau nei vieną jungtį, bendru atveju jos nežymiai padidina struktūrinio garso sklidimo energiją ir turi būti įvertintos. Plokštuminių bangų sklidimo pastatuose įtaką tyrė Craik R. J. M. ir Thancanamootoo A. [19] ir kiti. Tačiau, net ir įvertinus plokštuminių bangų sklidimą pastato konstrukcijomis teoriškai, patikrinti šį veiksmą eksperimentiniu būdu techniškai yra itin sudėtinga [23].

Kadangi moksliniame darbe analizuojamos įvairių tipų konstrukcinės jungtys, todėl sudaromi atskiri jų skaičiavimo modeliai įvertinant lankstymosi bangų sklidimą.

3.2. VIBRACIJŲ SILPIMAS JUNGTYJE

Vibracijų silpimas jungtyje analizuojamas L formos, T formos, fasadinėje T formos ir X formos jungtyse sklindant lankstymosi bangoms. Skaičiavimo modelyje pirma plokštė visuomet priimama kaip vibracijų sklidimo šaltinis, ji sužadinama vienetinės amplitudės lankstymosi banga. Pagrindinis rodiklis, kuris įvertina garso energijos sumažėjimą statybinių konstrukcijų jungtyje yra vibracijų perdavimo koeficientas γ_{ij} . Tai yra praėjusios pro jungtį ir krentančios į ją galių santykis:

$$\gamma_{ij} = \frac{P_{tr}}{P_{inc}}. \quad (3.1)$$

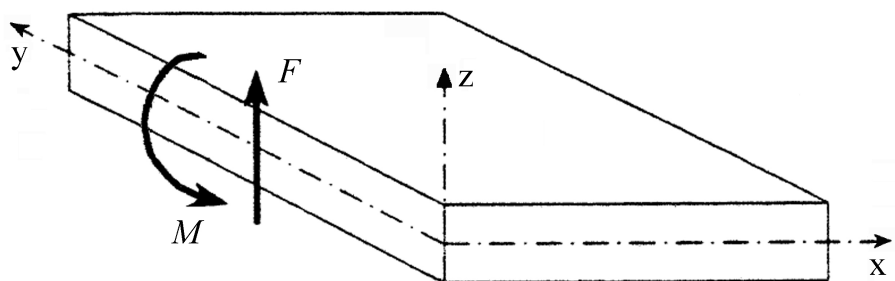
Jungties vibracijų perdavimo koeficientams nustatyti, atliekami šie veiksmai:

- aprašomos lankstymosi bangos, sklindančios kiekviename jungties elemente;
- užrašomos kraštinės sąlygos;
- nustatomos lankstymosi bangų, sklindančių iš jungties, amplitudės;
- nustatomos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos.

3.2.1. Lankstymosi bangos lygtis ir savybės

Bangos lygtis

Lankstymosi bangos sklidimas plokštėje aprašomas remiantis klasikine Kirchhoffo plonų plokščių teorija. Pagal šią teoriją neįvertinama sukimosi inercijos ir šlyties deformacijų įtaka, o jos taikymas galioja srityje, kur lankstymosi bangos ilgis yra žymiai didesnis nei plokštės storis ($\lambda_B > 6h$). Garso bangos savybės plokštėje nustatomos pagal jėgos ir momento poveikį į elementą. Jėgų ir momentų sąveika aprašoma lygtimi, kuri vadinama garso bangos lygtimi. Pagal šią lygtį gali būti nustatomi įvairūs garso bangos parametrai, tokie kaip bangos greitis plokštėje ir kiti.



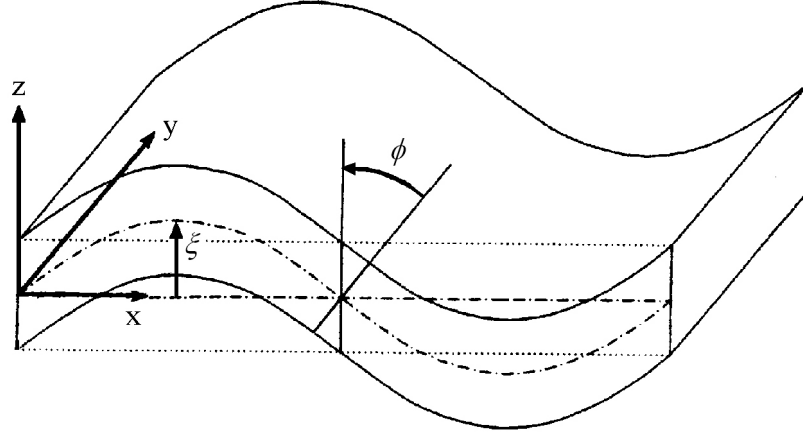
3.2 pav. Plokštę veikiančios jėgos dėl lankstymosi bangos sklidimo joje

Plokštė deformuojama lankstymosi bangos – jos kairėje pusėje veikia šlyties jėga F bei lenkimo momentas M (3.2 pav.). Lankstymosi banga sukelia plokštės poslinkį ξ bei posūkį kampe ϕ (3.3 pav.). Elemento posūkis ϕ siejamas su poslinkiu ξ lygtimi:

$$\phi = \frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (3.2)$$

Į plokštės kraštą veikia lenkimo momentas, kuris aprašomas lygtimi:

$$M_y = -B \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right). \quad (3.3)$$



3.3 pav. Plokštės deformacijos dėl lankstymosi bangos poveikio

Plokštės lenkimo standumas B apskaičiuojamas pločio vienetui pagal formulę:

$$B = EI = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (3.4)$$

Jėga, veikianti į plokštės kraštą, susideda iš šlyties jėgos ir atsparumo jėgos sukimuisi plokštės krašte komponentių.

$$F_x = B \left(\frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 \xi}{\partial x \partial y^2} \right). \quad (3.5)$$

pagal Niutono dėsnį, suma jėgų prilyginama masei padaugintai iš pagreičio, todėl užrašoma sekanti lygtis:

$$-\frac{\partial F}{\partial x} = m \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (3.6)$$

Užrašytos keturios lygtys (3.3–3.6) sujungiamos į lygčių sistemą, kuri vadinama lankstymosi bangos lygtimi:

$$\frac{B}{m} \left(\frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 \xi}{\partial y^4} \right) + \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0. \quad (3.7)$$

Bangos savybės

Pagrindinės garso bangos savybės yra jos sklidimo greitis c , amplitudė A ir banginis skaičius k . Lankstymosi bangos, sklindančios plokštėje, bangų skaičius k siejamas su amplitude A lygtimi:

$$\xi = A \cos(\omega t - kx). \quad (3.8)$$

Lygtis (3.8) aprašo bangos, sklindančios teigiama x ašies kryptimi, maksimalią amplitudę. Lankstymosi bangos greitis susijęs su faziniu bangos greičiu lygtimi $c_B = \omega/k$. Skaičiavimams statybinėje akustikoje patogiau naudoti kompleksinius skaičius. Priėmus, kad m yra realus arba kompleksinis skaičius, galima užrašyti:

$$e^{im} = \cos(m) + i \sin(m), \quad (3.9)$$

čia: $i = \sqrt{-1}$, todėl lygtį (3.8) galima perrašyti:

$$\xi = A \operatorname{Re} \left(e^{i(\omega t - kx)} \right) = A \operatorname{Re} \left(e^{-ikx} e^{i\omega t} \right), \quad (3.10)$$

čia: $\operatorname{Re}(\dots)$ reiškia realią dalį. Pagal nutylėjimo principą naudojama tik reali rodiklio dalis, todėl visos lygtys rašomos be $\operatorname{Re}(\dots)$. Lygtį (3.10) įstačius į lygtį (3.7), atlikus pertvarkymus ir sudiferencijavus, gaunama lygtis:

$$k^4 = \frac{\omega^2 \rho_s}{B}. \quad (3.11)$$

Lygtis (3.11) turi keturis sprendinius:

$$k = \pm \omega^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{B} \right)^{1/4} \quad (3.12)$$

ir

$$k_n = \pm i \omega^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{B} \right)^{1/4} = \pm i k. \quad (3.13)$$

Lygtis (3.12) aprašo sklindančias lankstymosi bangas teigiama ir neigiama kryptimi (atitinkamai su neigiamu ir teigiamu ženklu). Lygtis (3.13) aprašo antrines lankstymosi bangas. Šios bangos amplitudė staigiai silpsta didėjant atstumui nuo jungties ir yra vadinama artimo lauko banga. Antrinė banga yra svarbi tik prie jos šaltinio. Lygtyje (3.10), pakeitus k į ik , gaunama artimo lauko bangų amplitudė, užrašyta per poslinkį ξ :

$$\xi = A_n e^{\pm kx} e^{i\omega t}. \quad (3.14)$$

Lankstymosi bangos amplitudė A priklauso nuo atstumo x ašyje ir kinta eksponentiškai $e^{\pm kx}$. Teigiamas eksponentės ženklas aprašo bangą, sklindančią neigiama x ašies kryptimi ir atvirkščiai. Lankstymosi bangos fazinis greitis c_B yra lygus:

$$c_B = \frac{\omega}{k} = \omega^{1/2} \left(\frac{B}{\rho_s} \right)^{1/4}. \quad (3.15)$$

Bendru atveju, grupinis lankstymosi bangos greitis atitinka greitį, kuriuo yra pernešama energija ir pagal Cremer L. [30] apskaičiuojamas:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}. \quad (3.16)$$

Lankstymosi bangoms grupinis bangų greitis lygus $2c_B$.

Galios srautas

Galios srautas elemento pločio vienetui bangos sklidimo kryptimi yra aprašomas struktūriniu intensyvumu I . Pastarasis rodiklis randamas iš jėgos ir greičio sandaugos ir momento bei kampinio greičio sandaugos sumos:

$$I = Fv + Mw. \quad (3.17)$$

Atlikus (3.17) lygties pertvarkymus ir sudiferencijavus, gaunama išraiška lygi:

$$I = \left(\frac{B \partial^3 \xi}{\partial x^3} \right) (i \omega \xi) + \left(- \frac{B \partial^2 \xi}{\partial x^2} \right) \left(i \omega \frac{\partial \xi}{\partial x} \right). \quad (3.18)$$

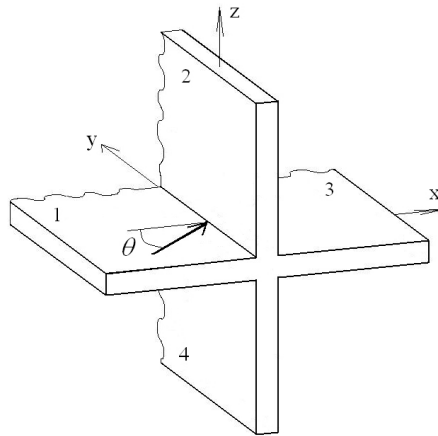
Supaprastinus pastarąją išraišką, ji perrašoma panaudojant jos realią dalį:

$$I = 2 \rho_s \omega^2 c_B \frac{\xi^2}{2} = 2 \rho_s \omega^2 c_B \langle \xi^2 \rangle, \quad (3.19)$$

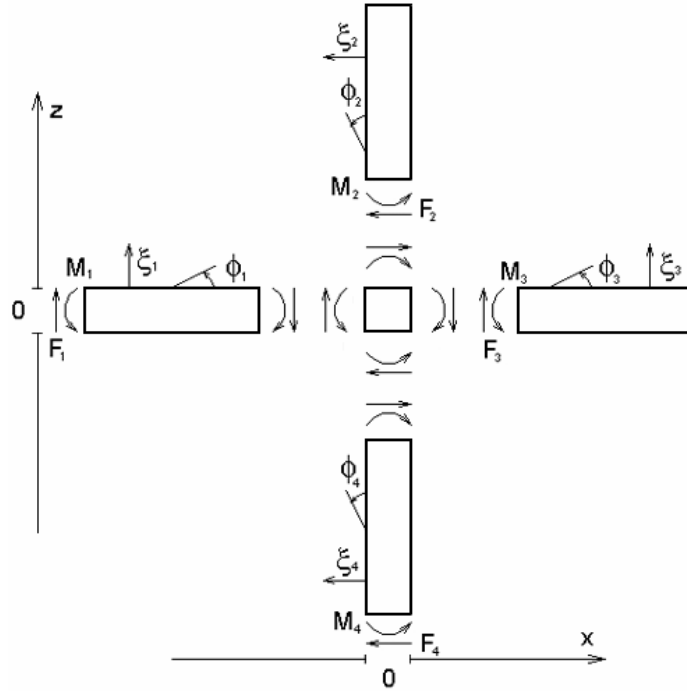
čia: ξ – maksimalus poslinkis, kurio reikšmė skaičiuojama sekančiuose poskyriuose, o $\langle \xi^2 \rangle$ yra vidutinės kvadratinės šaknies amplitudė, kuri nustatoma matavimais. Jei lankstymosi banga kris į plokštės kraštą kampu θ , tuomet galia krentanti į vieno metro ilgio kraštą sumažės dydžiu $\cos \theta$ ir krentančios galios dydis bus $I \sin \theta$.

3.2.2. Lankstymosi bangos sklidimas

Vibracijų silpimas analizuojamas kryžiaus formos statybinių konstrukcijų jungtyje. Lankstymosi banga, kurios amplitudė yra vienetinė, krenta į jungtį iš pirmos plokštės kampu θ (3.4 pav.). Remiantis SEA teorija priimama prielaida, kad jungties elementai yra pusiau begalinės plokštės, kurios yra prijungtos prie strypo (3.5 pav.). Šis strypas neturi masės ir nesideformuoja plokštumose, statmenose jungčiams. Bangų skaičius x ašies kryptimi $k_x = k \cos \theta$, o bangų skaičius y ašies kryptimi $k_y = k \sin \theta$.



3.4 pav. Lankstymosi banga krenta į jungtį iš pirmos plokštės kampu θ



3.5 pav. X formos jungties koordinatų sistema, poveikiai ir deformacijos

Šios krentančios bangos poslinkis ξ lygus:

$$\xi_{inc} = e^{-ik_1 \cos \theta x} e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.20)$$

Lygtis (3.20) aprašo lankstymosi bangos sklidimą teigiamomis x ir y ašių kryptimis. Kiekvienoje jungties plokštėje veiks dvi lankstymosi bangos – sklindanti ir artimo lauko. Bangos ilgio pėdsakas y ašies kryptimi turi būti vienodas visoms bangoms visose plokštėse. Ši priklausomybė išreiškiama per krentančią į jungtį bangą ir naudojama nustatyti kampui, kuriuo bangos ją palieka:

$$k_1 \sin \theta_j = k_j \sin \theta_j. \quad (3.21)$$

Bet kuri banga, sklindanti iš jungties plokštėje j bendru atveju turi šią formą:

$$\xi_j = A_j e^{\pm ik_j x} e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.22)$$

Ženklas bus teigiamas arba neigiamas priklausomai nuo bangos sklidimo krypties (atitinkamai sklindant neigiama ir teigiama kryptimi). Pakeitus šią bendrąją formą į lankstymosi bangos lygtį (3.7) gaunama sekanti išraiška:

$$k_j^4 = (k_{xj}^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_1)^2. \quad (3.23)$$

Ištraukus šaknį iš abiejų (3.23) lygties pusių gaunamas sprendinys:

$$k_{xj} = \pm \sqrt{k_j^2 + k_1^2 \sin^2 \theta_1}. \quad (3.24)$$

Šis lankstymosi bangų skaičius aprašo eksponentiškai silpstančią artimo lauko bangą. Jei vienos (3.23) lygties pusės kvadratinė šaknis yra neigiama, o kitos teigiama, tuomet gaunama:

$$k_{xj} = \pm i \sqrt{k_j^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_1} = \pm i k_j \cos \theta_j. \quad (3.25)$$

Pastaroji lygtis aprašo sklindančios lankstymosi bangos skaičių. Tačiau jei neigiama yra kita (3.23) lygties pusės kvadratinė šaknis, tuomet artimo lauko lankstymosi bangų skaičius bus lygus:

$$k_{xj} = \pm \sqrt{k_1^2 \sin^2 \theta_1 - k_j^2}. \quad (3.26)$$

Kryžiaus formos jungtyje sklindanti banga pirmoje plokštėje atsispindės tuo pačiu kampu kaip ir įeinanti banga. Ji sklis neigiama x ašies kryptimi ir teigiama y ašies kryptimi. Atsispindėjusios bangos į pirmą jungties elementą sukeltas poslinkis bus lygus:

$$\xi_{ref} = A_1 e^{ik_1 \cos \Theta_1 x} e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.27)$$

Artimo lauko banga, kurios amplitudė A_{n1} , aprašoma lygtimi:

$$\xi_{n,1} = A_{n1} e^{k_{n1}x} e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.28)$$

Atspindėjusios ir artimo lauko bangos sukeltas pilnas pirmos plokštės poslinkis bus lygus:

$$\xi_1 = \left(e^{-ik_1 \cos \theta_1 x} + A_1 e^{ik_1 \cos \theta_1 x} + A_{n1} e^{k_{n1}x} \right) e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.29)$$

Antroje plokštėje praėjusi pro jungtį lankstymosi banga, kurios amplitudė A_2 , turės tokią formą:

$$\xi_{tr,2} = A_2 e^{-ik_2 \cos \theta_2 z} e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.30)$$

Tuo tarpu artimo lauko banga antroje jungties plokštėje aprašoma lygtimi:

$$\xi_{n,2} = A_{n2} e^{-k_{n2}x} e^{-ik_2 \sin \theta_2 y} e^{i\omega t}. \quad (3.31)$$

Antroje plokštėje sukeltas pilnas poslinkis dėl keliaujančios ir artimo lauko bangų lygus:

$$\xi_2 = \left(A_2 e^{-ik_2 \cos \theta_2 z} + A_{n2} e^{-k_{n2}x} \right) e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.32)$$

Trečioje ir ketvirtoje plokštėse praėjusios pro jungtį lankstymosi bangos turės analogišką formą:

$$\xi_{tr,3} = A_3 e^{-ik_3 \cos \theta_3 x} e^{-ik_3 \sin \theta_3 y} e^{i\omega t}, \quad (3.33)$$

$$\xi_{tr,4} = A_4 e^{ik_4 \cos \theta_4 z} e^{-ik_4 \sin \theta_4 y} e^{i\omega t}. \quad (3.34)$$

bei artimo lauko bangų lygtis šiose plokštėse aprašomos lygtimis:

$$\xi_{n,3} = A_{n3} e^{-k_{n3}x} e^{-ik_3 \sin \theta_3 y} e^{i\omega t}, \quad (3.35)$$

$$\xi_{n,4} = A_{n4} e^{k_{n4} z} e^{-ik_4 \sin \theta_4 y} e^{i\omega t}. \quad (3.36)$$

Todėl analogiškai užrašomi trečioje ir ketvirtoje plokštėse sukelti pilni poslinkiai dėl keliaujančios ir artimo lauko bangų poveikio:

$$\xi_3 = \left(A_3 e^{-ik_3 \cos \theta_3 x} + A_{n3} e^{-k_{n3} x} \right) e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}, \quad (3.37)$$

$$\xi_4 = \left(A_4 e^{ik_4 \cos \theta_4 z} + A_{n4} e^{k_{n4} z} \right) e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}. \quad (3.38)$$

3.2.3. Kraštinės sąlygos

Norint apskaičiuoti praėjusių pro jungtį lankstymosi bangų amplitudes, reikia užrašyti kraštinės sąlygas. Priimama, kad jungtyje nėra poslinkių. Praktiškai, jungtyje visuomet bus nedidelės deformacijos, tačiau tai gali turėti įtakos tik aukštų dažnių srityje. Sąlyga, kad krašte (kur $x = 0$), poslinkis pirmoje plokštėje ξ_1 bus lygus nuliui, leidžia supaprastinti (3.29) išraišką:

$$1 + A_1 + A_{n1} = 0, \quad (3.39)$$

atitinkamai, iš sekančios kraštinės sąlygos ($z = 0$) gaunama sekanti išraiška:

$$A_2 + A_{n2} = 0. \quad (3.40)$$

Trečiai ir ketvirtai plokštėms pagal analogiškas kraštinės sąlygas gaunamos dar dvi lygtys:

$$A_3 + A_{n3} = 0, \quad (3.41)$$

$$A_4 + A_{n4} = 0. \quad (3.42)$$

Standžios jungties atveju, jei viena plokštė pasisuka, tai kitos turi pasisukti taip, kad kampas tarp jų išliktų pastovus, t.y. 90° . Jėgų pusiausvyrai reikalinga, kad suma momentų, veikiančių į jungties elementus būtų lygi nuliui. Todėl pirmos ir antros plokščių posūkiai $\phi_1 = \phi_2$. Išreiškus posūkius iš poslinkių sąlygos $\phi = \partial \xi / \partial x$ (esant $x = 0$ ir $z = 0$) gaunama:

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = \frac{\partial \xi_2}{\partial z}. \quad (3.43)$$

Ištačius atitinkamas ξ_1 ir ξ_2 reikšmes gaunama lygtis:

$$-ik_1 \cos \theta_1 + A_1 ik_1 \cos \theta_1 + A_{n1} k_{n1} = -A_2 ik_2 \cos \theta_2 - A_{n2} k_{n2}. \quad (3.44)$$

I lygtį (3.44) ištačius atitinkamas A_{n1} ir A_{n2} reikšmes gaunama:

$$A_1(-k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1) + A_2(-k_{n2} + ik_2 \cos \theta_2) = k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1. \quad (3.45)$$

Analogiškai gaunama, kad pirmos ir trečios plokščių posūkiai taip pat lygūs $\phi_1 = \phi_3$, todėl užrašoma sekanti pusiausvyros lygtis:

$$-ik_1 \cos \theta_1 + A_1 ik_1 \cos \theta_1 + A_{n1} k_{n1} = -A_3 ik_3 \cos \theta_3 - A_{n3} k_{n3}. \quad (3.46)$$

I lygtį (3.46) ištačius atitinkamas A_{n1} ir A_{n3} reikšmes gaunama:

$$A_1(-k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1) + A_3(-k_{n3} + ik_3 \cos \theta_3) = k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1. \quad (3.47)$$

Pirmos ir ketvirtos plokščių posūkiai taip pat lygūs $\phi_1 = \phi_4$, todėl užrašoma dar viena pusiausvyros lygtis:

$$-ik_1 \cos \theta_1 + A_1 ik_1 \cos \theta_1 + A_{n1} k_{n1} = A_4 ik_4 \cos \theta_4 + A_{n4} k_{n4}. \quad (3.48)$$

I lygtį (3.48) ištačius atitinkamas A_{n1} ir A_{n4} reikšmes gauname:

$$A_1(-k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1) + A_4(k_{n4} - ik_4 \cos \theta_4) = k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1. \quad (3.49)$$

Galutinė pusiausvyros sąlyga yra ta, kad suma momentų, veikiančių į jungtį turi būti lygi nuliui:

$$M_1 - M_2 - M_3 + M_4 = 0. \quad (3.50)$$

Pastarojoje, momentus M_i pakeitus atitinkamomis reikšmėmis išreikštomis poslinkiais pagal (3.3) lygtį, gaunama:

$$\begin{aligned} & -B_1 \left(\frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} + \mu_1 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial y^2} \right) + B_2 \left(\frac{\partial^2 \xi_2}{\partial z^2} + \mu_2 \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial y^2} \right) + \\ & + B_3 \left(\frac{\partial^2 \xi_3}{\partial x^2} + \mu_3 \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial y^2} \right) - B_4 \left(\frac{\partial^2 \xi_4}{\partial z^2} + \mu_4 \frac{\partial^2 \xi_4}{\partial y^2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (3.51)$$

Ištačius atitinkamas ξ reikšmes gaunama:

$$\begin{aligned} & B_1 k_1^2 \cos^2 \theta_2 + A_1 B_1 k_1^2 \cos^2 \theta_1 - A_{n1} B_1 k_{n1}^2 - A_2 B_2 k_2^2 \cos^2 \theta_2 + A_{n2} B_2 k_{n2}^2 - \\ & - A_3 B_3 k_3^2 \cos^2 \theta_3 + A_{n3} B_3 k_{n3}^2 + A_4 B_4 k_4^2 \cos^2 \theta_4 - A_{n4} B_4 k_{n4}^2 = 0. \end{aligned} \quad (3.52)$$

I pastarąją išraišką ištačius atitinkamas A_n reikšmes gaunama:

$$A_1(B_1 k_1^2) + A_2(-B_2 k_2^2) + A_3(-B_3 k_3^2) + A_4(B_4 k_4^2) = -B_1 k_1^2. \quad (3.53)$$

Lygtis (3.45, 3.47, 3.49 ir 3.53) galima sujungti į lygčių sistemą:

$$\begin{cases} A_1(-k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1) + A_2(-k_{n2} + ik_2 \cos \theta_2) = k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1 \\ A_1(-k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1) + A_3(-k_{n3} + ik_3 \cos \theta_3) = k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1 \\ A_1(-k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1) + A_4(k_{n4} - ik_4 \cos \theta_4) = k_{n1} + ik_1 \cos \theta_1 \\ A_1(B_1 k_1^2) + A_2(-B_2 k_2^2) + A_3(-B_3 k_3^2) + A_4(B_4 k_4^2) = -B_1 k_1^2 \end{cases} \quad (3.54)$$

Išsprendus lygčių sistemą (3.54) nustatomos visos nežinomos praėjusių pro X formos jungtį lankstymosi bangų amplitudės A_2 , A_3 ir A_4 .

3.2.4. Vibracijų perdavimo koeficientai

Bendra vibracijų perdavimo koeficiento γ_{ij} reikšmė pagal Cremer L. [30], kai garsas sklinda iš jungties elemento i į jungties elementą j apskaičiuojama pagal formulę:

$$\gamma_{ij} = \frac{\rho_{sj} k_i \cos \theta_j}{\rho_{si} k_j \cos \theta_i} |A_j|^2. \quad (3.55)$$

Skaičiavimams supaprastinti įvedami sutartiniai žymėjimai:

$$x = \frac{k_2}{k_1}, \quad y = \frac{k_3}{k_1}, \quad z = \frac{k_4}{k_1}, \quad (3.56)$$

$$X = \frac{B_2 k_2^2}{B_1 k_1^2}, \quad Y = \frac{B_3 k_3^2}{B_1 k_1^2}, \quad Z = \frac{B_4 k_4^2}{B_1 k_1^2}, \quad (3.57)$$

$$a_1 = 1 + \sin^2 \theta_1, \quad a_2 = 1 - \sin^2 \theta_1. \quad (3.58)$$

Todėl lygčių sistemą (3.54) galima pertvarkyti į:

$$\begin{cases} A_1(-\sqrt{a_1} + i\sqrt{a_2}) + A_2(-\sqrt{x^2 + \sin^2 \theta_1} + i\sqrt{x^2 - \sin^2 \theta_1}) = (\sqrt{a_1} + i\sqrt{a_2}) \\ A_1(-\sqrt{a_1} + i\sqrt{a_2}) + A_3(-\sqrt{y^2 + \sin^2 \theta_1} + i\sqrt{y^2 - \sin^2 \theta_1}) = (\sqrt{a_1} + i\sqrt{a_2}) \\ A_1(-\sqrt{a_1} + i\sqrt{a_2}) + A_4(\sqrt{z^2 + \sin^2 \theta_1} - i\sqrt{z^2 - \sin^2 \theta_1}) = (\sqrt{a_1} + i\sqrt{a_2}) \\ A_1 + A_2(-X) + A_3(-Y) + A_4(Z) = -1 \end{cases} \quad (3.59)$$

Esant normaliniam lankstymosi bangos kritimo kampui, gaunamos praėjusių pro jungtį lankstymosi bangų amplitudžių A_2 , A_3 ir A_4 bendrosios išraiškos:

$$A_2 = \frac{zy(1-i)}{Xyz + Yxz + Zxy + xyz}, \quad (3.60)$$

$$A_3 = \frac{xz(1-i)}{Xyz + Yxz + Zxy + xyz}, \quad (3.61)$$

$$A_4 = \frac{xy(i-1)}{Xyz + Yxz + Zxy + xyz}. \quad (3.62)$$

Į lygtį (3.55) įstačius atitinkamas (3.56–3.58) išraiškas ir atlikus pertvarkymus gaunamos bendrosios vibracijų perdavimo koeficiento skaičiavimo išraiškos X formos jungčiai:

$$\gamma_{12} = xX \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} |A_2|^2, \quad (3.63)$$

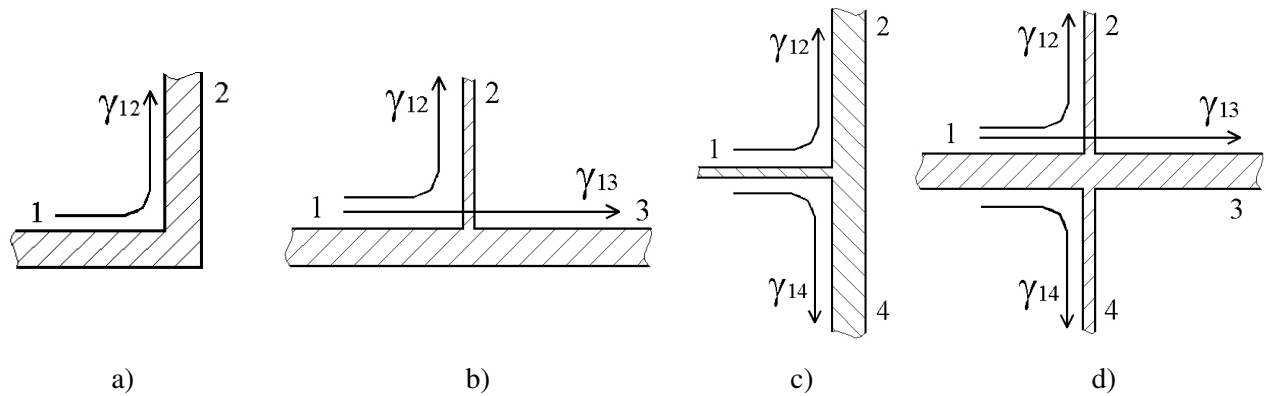
$$\gamma_{13} = yY \frac{\cos \theta_3}{\cos \theta_1} |A_3|^2, \quad (3.64)$$

$$\gamma_{14} = zZ \frac{\cos \theta_4}{\cos \theta_1} |A_4|^2. \quad (3.65)$$

Pagal gautas skaičiavimo formules (3.63–3.65) galima teigti, kad vibracijų silpimas jungtyje priklauso nuo lankstymosi bangos kritimo kampo bei jungties geometrinių ir fizinių parametrų. Naudojant tas pačias SEA teorijos prielaidas sudaromi analogiškai vibracijų silpimo skaičiavimo modeliai T formos, fasadinės T formos ir L formos statybinių konstrukcijų jungtims, kurie pateikti sekančiuose poskyriuose.

3.3. VIBRACIJŲ SILPIMAS SIMETRINĖSE JUNGTYSE

Analizuojant įvairių pastatų planus ir pjūvius, galima pastebėti, kad daugelis statybinių konstrukcinių jungčių yra simetrinės (3.6 pav.). Simetrinių L, T, fasadinės T ir X formų konstrukcinių jungčių amplitudėms ir vibracijų perdavimo koeficientams apskaičiuoti skaičiavimo modelyje priimama, kad horizontalūs (pirma ir trečia plokštės) ir vertikalūs (antra ir ketvirta plokštės) jungties elementai yra vienodi. Tuomet, šie elementai yra vienodo skerspjūvio aukščio ($h_1 = h_3$ ir $h_2 = h_4$) ir vienodų medžiagos savybių ($\rho_{S1} = \rho_{S3}$, $c_{L1} = c_{L3}$ ir $\rho_{S2} = \rho_{S4}$, $c_{L2} = c_{L4}$). Priėmus, kad vienetinės amplitudės lankstymosi banga krenta iš pirmos plokštės į jungtį normaliniu kampu, apskaičiuotos simetrinių L, T, fasadinės T ir X formos jungčių amplitudės.



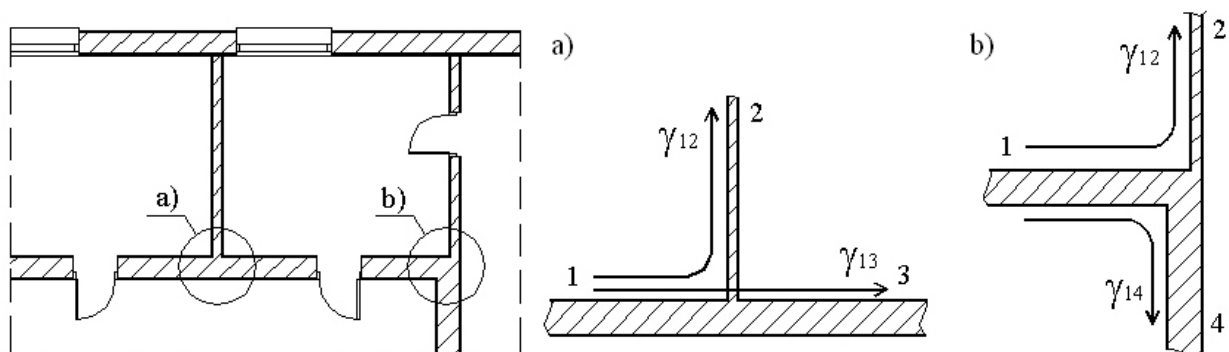
3.6 pav. Simetrinės statybinių konstrukcijų jungtys:

a) L formos, b) T formos, c) fasadinė T formos, d) X formos

Remiantis bendrąja vibracijų perdavimo koeficiento skaičiavimo išraiška (3.55) nustatytos minėtų simetrinių jungčių vibracijų perdavimo koeficientų formulės. Atlikus gautų formulių matematinius pertvarkymus paaiškėjo, kad jos yra analogiškos Cremer L. formulėms (2.9–2.14). Todėl, gauti simetrinių jungčių skaičiavimo modeliai bus naudojami jungties elementų geometrinių ir fizinių parametrų įtakos vibracijų silpimui analizei. Taip pat pastebėta, kad Cremer L. vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos nėra tinkamos asimetrinėms jungtims skaičiuoti [99]. Todėl galima teigti, kad gautas patikimas vibracijų silpimo skaičiavimo modelis, kurio pagrindas bus panaudotas asimetrinių jungčių analizei.

3.4. VIBRACIJŲ SILPIMAS ASIMETRINĖSE JUNGTYSE

Šiuolaikinėje statyboje vis dažniau tenka susidurti su asimetrinėmis jungtimis (3.7 pav.). Statybinių konstrukcijų jungtys asimetrinėmis gali būti dėl skirtingų jungties elementų geometrinių ir/ar fizinių parametrų. Naudodamiesi standartizuotame metode pateikta skaičiavimo metodika galima įvertinti tik simetrines jungtis.

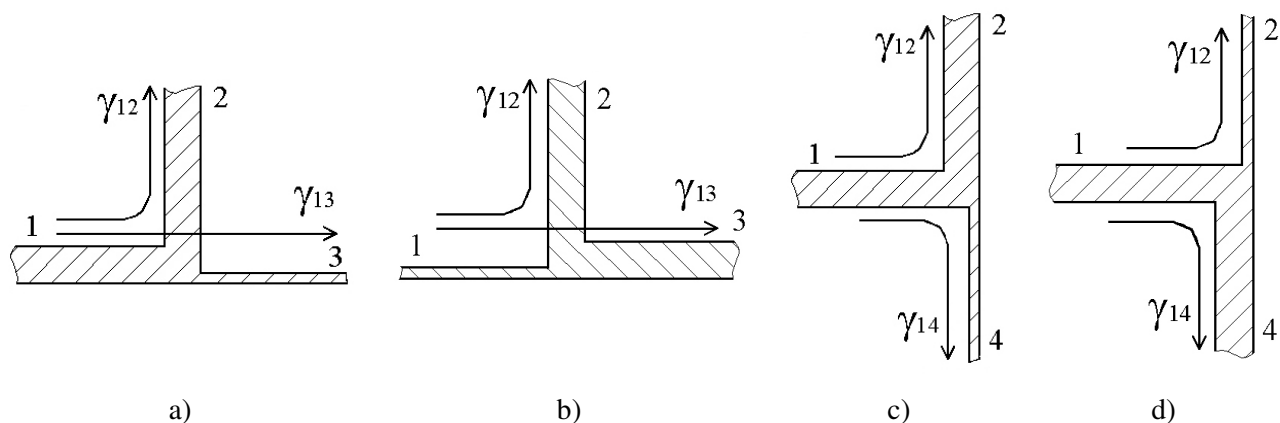


3.7 pav. T formos jungtys pastato plane: a) simetrinė, b) asimetrinė

Todėl itin svarbūs yra analitiniai ir eksperimentiniai vibracijų sklaidimo asimetrinėse jungtyse tyrimai. Poskyryje pateikiami vibracijų silpimo įvairiose asimetrinėse T ir X formos jungtyse skaičiavimo modeliai. Neanalizuojami atvejai, kai jungtyje yra daugiau kaip du elementai su skirtingomis geometrinėmis ar fizinėmis savybėmis.

Asimetrinės T formos jungtys

3.8 paveiksle pateikiami įvairūs asimetrinių T formos jungčių atvejai.



3.8 pav. Asimetrinės T formos jungtys

Sudarius vibracijų silpimo modelius, kai į jungtį iš pirmo elemento normaliniu kampu krenta vienetinės amplitudės lankstymosi banga, apskaičiuotos išeinančių iš jungties lankstymosi bangų amplitudės ir nustatytos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Vibracijų perdavimo koeficientų formulės asimetrinėms T formos jungtims

Jungties tipas	γ_{12}	γ_{13}	γ_{14}
3.8 a pav.	$\frac{1}{2\left(1 + \frac{Y}{2y}\right)^2}$	$\frac{yY}{2\left(\frac{Y}{2} + y\right)^2}$	—
3.8 b pav.	$\frac{2xX}{(2X + x)^2}$	$\frac{2xX}{(2X + x)^2}$	—
3.8 c pav.	$\frac{1}{2\left(1 + \frac{Z}{2z}\right)^2}$	—	$\frac{zZ}{2\left(\frac{Z}{2} + z\right)^2}$
3.8 d pav.	$\frac{xX}{2\left(\frac{X}{2} + x\right)^2}$	—	$\frac{1}{2\left(1 + \frac{X}{2x}\right)^2}$

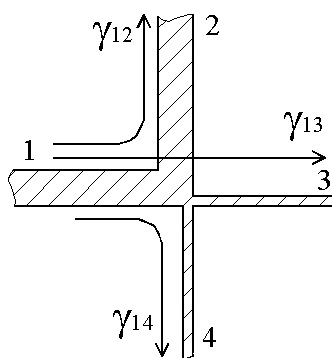
Paaiškėjo, kad šios skaičiavimo išraiškos yra analogiškos simetrinės jungties skaičiavimo išraiškoms. 3.8 a, c ir d paveiksle pateiktos asimetrinės T formos jungtys gali būti skaičiuojamos pagal simetrinių T formos jungčių formules. Tuo tarpu 3.8 b paveiksle pateikta asimetrinė jungtis gali būti skaičiuojama pagal simetrinės fasadinės T formos jungties formules. Todėl manytina, kad vibracijų silpimas T formos jungtyse nepriklauso nuo jų padėties jungtyje, o tik nuo elementų geometrinių ir fizinių savybių.

Asimetrinės X formos jungtys

Analizuojami X formos konstrukcinių jungčių asimetriškumo atvejai, kai:

- jungtyje yra po du vienodus elementus,
- jungtyje yra trys vienodi elementai.

Vienodais elementais laikomi elementai, kurie yra to paties skerspjūvio aukščio h ir pagaminti iš medžiagos, turinčios vienodą tankį ρ ir išilginių bangų sklidimo greitį c_L . Asimetrinei X formos jungčiai, kurioje yra po du vienodus elementus (3.9 pav.), sudarytas vibracijų silpimo modelis, kai į jungtį iš pirmo elemento normaliniu kampu krenta vienetinės amplitudės lankstymosi banga.



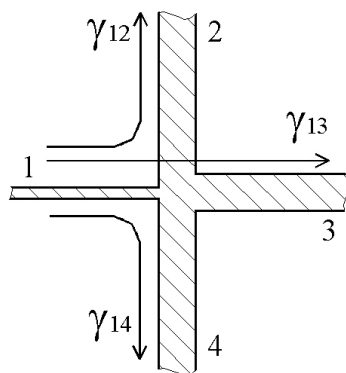
3.9 pav. Asimetrinė X formos jungtis su dviem porom vienodų elementų

Apskaičiavus išeinančių iš jungties lankstymosi bangų amplitudes ir nustatius vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškas paaiškėjo, kad šiam jungties atvejui (kaip ir T formos jungtims) skaičiuoti naudotinos simetrinės X formos jungties formulės. Todėl manytina, kad vibracijų silpimas X formos jungtyje, kurioje yra po du elementus nepriklauso nuo jų padėties jungtyje, o tik nuo elementų geometrinių ir fizinių savybių.

Asimetrines X formos jungtis, kuriose yra trys vienodi elementai, savo ruožtu taip pat galima išskirti į tris tipus, priklausomai nuo asimetrinio elemento padėties jungtyje:

- pirmo elemento asimetrija,
- antro (ketvirto) elemento asimetrija,
- trečio elemento asimetrija.

Esant pirmo elemento asimetrijai (3.10 pav.), vienodi yra likusieji elementai – antras, trečias ir ketvirtas ($h_2 = h_3 = h_4$, $\rho_{S2} = \rho_{S3} = \rho_{S4}$ ir $c_{L2} = c_{L3} = c_{L4}$). Priėmus, kad asimetrinis elementas sužadinamas vienetinės amplitudės lankstymosi banga, apskaičiuotos išeinančių iš šios jungties lankstymosi bangų amplitudės ir nustatytos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos.

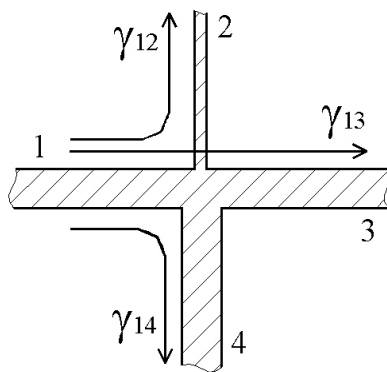


3.10 pav. X formos jungtis su pirmo elemento asimetriją

X formos jungtyje su pirmo elemento asimetriją vibracijų silpimas visomis kryptimis bus vienodas ir gali būti nustatomas pagal formulę:

$$\gamma_{12} = \gamma_{13} = \gamma_{14} = \frac{2zZ}{(z + 3Z)^2}. \quad (3.66)$$

Kai X formos jungtyje su trimis vienodais elementais yra antro elemento asimetrija (3.11 pav.), likusiųjų elementų geometrinės ir fizinės savybės yra identiškos ($h_1 = h_3 = h_4$, $\rho_{S1} = \rho_{S3} = \rho_{S4}$ ir $c_{L1} = c_{L3} = c_{L4}$). Sužadinus šios jungties pirmą elementą vienetinės amplitudės lankstymosi banga, nustatomos išeinančių iš šios jungties lankstymosi bangų amplitudės ir randamos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos.



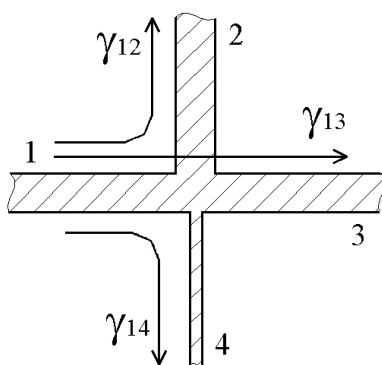
3.11 pav. X formos jungtis su antro elemento asimetrija

Garso energijai sklindant iš jungties pirmojo elemento į asimetrinį, vibracijų perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma_{12} = \frac{2xX}{(3x + X)^2}. \quad (3.67)$$

Tuo tarpu vibracijoms sklindant į likusius jungties elementus minėtas rodiklis bus apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

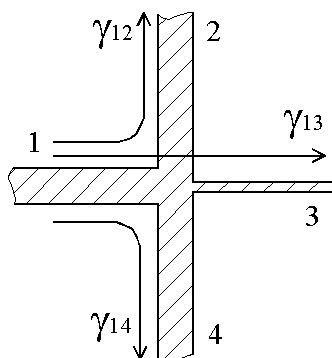
$$\gamma_{13} = \gamma_{14} = \frac{2x^2}{(3x + X)^2}. \quad (3.68)$$



3.12 pav. X formos jungtis su ketvirto elemento asimetrija

Analogiškos formulės gautos esant ketvirto elemento asimetrijai (3.12 pav.). Tokiu atveju, šios jungties γ_{12} bus lygus γ_{13} ir jo reikšmė apskaičiuojama naudojantis (3.68) formule. Analogiškai, rodiklio γ_{14} reikšmė nustatoma pagal (3.67) išraišką.

Esant trečio elemento asimetrijai X formos jungtyje (3.13 pav.) su trimis vienodais elementais ($h_1 = h_2 = h_4$, $\rho_{S1} = \rho_{S2} = \rho_{S4}$ ir $c_{L1} = c_{L2} = c_{L4}$), naudojantis aukščiau aprašyta procedūra, gaunamos dar dvi vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos.



3.13 pav. X formos jungtis su trečio elemento asimetrija

Vibracijų silpimas vertikaliuose jungties elementuose bus vienodas ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma_{12} = \gamma_{14} = \frac{2y^2}{(3y + Y)^2}. \quad (3.69)$$

Tuo tarpu, perdavimo koeficientas vibracijoms sklindant į asimetrinį jungties elementą gali būti apskaičiuojamas pagal sekančią išraišką:

$$\gamma_{13} = \frac{2yY}{(3y + Y)^2}. \quad (3.70)$$

Iš autoriaus gautų asimetrinės X formos jungties su trimis vienodais elementais skaičiavimo išraiškų (3.66–3.70) galima pastebėti, kad vibracijų silpimas priklauso ne tik nuo jungties geometrinių ir fizinių savybių, tačiau ir nuo jungties formos.

3.5. IŠVADOS

1. Vibracijų silpimas plokštės tipo statybinių konstrukcijų jungtyse priklauso nuo jungties tipo, lankstymosi bangos kritimo kampo bei jungties geometrinių (skerspjūvio aukščio h) ir fizinių (medžiagos tankio ρ ir jose sklindančių išilginių bangų greičio c_L) parametrų.
2. Sudarius vibracijų silpimo įvairiose asimetrinėse T formos jungtyse modelius paaiškėjo, kad šių jungčių vibracijų perdavimo koeficientai nepriklauso nuo elementų padėties jungtyje ir yra skaičiuotini pagal simetrinių T formos ir fasadinės T formos jungčių formules. Analogiškai, simetrinės X formos jungties vibracijų perdavimo koeficiento formulės naudotinos X formos jungtims, kuriose yra po du vienodus elementus, nepriklausomai nuo jų padėties jungtyje, skaičiuoti.
3. Sudarytas vibracijų silpimo modelis asimetrinėms X formos jungtims su trimis vienodais elementais ir nustatytos vibracijų perdavimo koeficiento skaičiavimo išraiškos įvairiems šių jungčių atvejams.

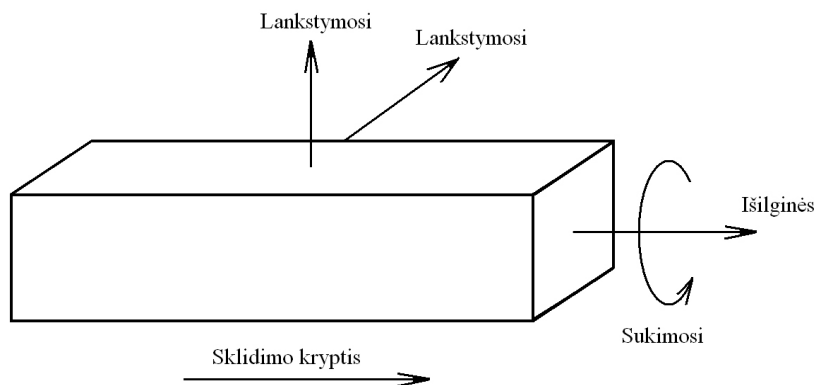
4 SKYRIUS

VIBRACIJŲ SILPIMO „PLOKŠTĖS-STRYPO“ TIPO JUNGTYSE MODELIS

Skyriuje analizuojamas vibracijų sklidimas karkasinių pastatų jungtyse tarp sienų ir kolonų. Tiriama du dažniausiai tokių pastatų statybos praktikoje pasitaikantys atvejai: „plokštės-strypo-plokštės“ jungtis, kuri atitinka sienų ir kolonos jungtį pastato plane bei „strypo-plokštės-strypo“ jungtis, kuri yra jungties tarp kolonų ir perdangos pastato pjūvyje modelis. Pirmu atveju tiriamas vibracijų sklidimas L, T, fasadinės T ir X formos kompleksinėse „plokštės-strypo-plokštės“ tipo statybinių konstrukcijų jungtyse. Antru atveju reikalingas impedanso formulių išvedimas ir pateikiami šio tipo jungčių vibracijų silpimo skaičiavimo principai.

4.1. GARSO BANGŲ SKLIDIMO STRYPO TIPO ELEMENTE PRINCIPAI

Bendru atveju, strypo tipo elemente gali sklisti keturių tipų bangos – dvi lankstymosi, išilginės ir sukimosi bangos (4.1 pav.).



4.1 pav. Strypo tipo elemente sklindančių garso bangų tipai

Kadangi skaičiavimo modelis apims vibracijų sklidimą atskirose statybinių konstrukcijų jungtyse, analogiškai plokščių jungties modeliui įvertinamas lankstymosi bangos sklidimas. Bangos lygtis ir savybės sklindant lankstymosi bangai plokštės tipo elementu pateiktas 3 skyriuje. Šis aprašas yra tinkamas lankstymosi bangos sklidimui strypiniame elemente, išskyrus keletą parametru, būdingų lankstymosi bangos sklidimui tik strypo tipo elementu. Strypo lenkimo standumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$B_c = EI = \frac{Eh^3b}{12}. \quad (4.1)$$

Strypo poliarinis inercijos momentas randamas iš formulės:

$$J_c = h_c^4 / 6. \quad (4.2)$$

Strypo sukimosi standumas apskaičiuojamas:

$$G_c = \frac{EK_c}{2(1 + \mu)}. \quad (4.3)$$

Kvadratinio skerspjūvio formos strypo sukimosi standumo konstanta randama:

$$K_c = 0,14h_c^4. \quad (4.4)$$

Galios srautas strypo tipo elemente gali būti sužadinamas taškine jėga arba momentu. Taškinis sužadinimas daugiau būdingas plokštės tipo elementams (pvz.: smūginis poveikis į perdangą), tuo tarpu strypinio elemento sužadinimas aprašomas momentiniu impedansu. Momentinis impedansas Z bendru atveju apskaičiuojamas kaip santykis tarp sužadinimo momento M ir kampinio greičio w pagal formulę:

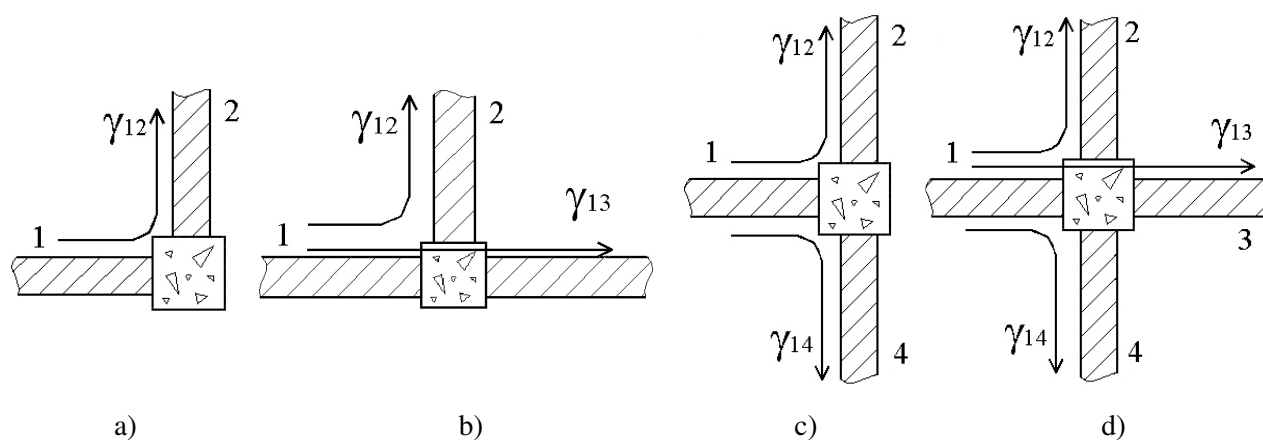
$$Z = \frac{M}{w}. \quad (4.5)$$

4.2. VIBRACIJŲ SILPIMAS „PLOKŠTĖS-STRYPO-PLOKŠTĖS“ TIPO JUNGTYJE

Karkasiniuose pastatuose patalpos suformuojamos iš sienų ir perdangų, kurios jungiasi prie kolonų. Pastato plane prie kolonos gali prisijungti keletas sienų, taip suformuodamos įvairių formų jungtis. Tokios jungtys modeliuojamos kaip idealizuotos „plokštės-strypo-plokštės“ jungtys. Trečiame skyriuje analizuotas vibracijų sklidimas plokščių jungtimis, kurios skaičiavimo modelyje buvo sujungtos per centre esantį strypą, neturintį masės ir standumo.

„Plokštės-strypo-plokštės“ jungties atveju turi būti įvertintos ir jėgos, veikiančios jungties centre esančiame strypo.

Vibracijų silpimas analizuojamas sklindant lankstymosi bangoms statybinių konstrukcijų jungtimis (4.2 pav.), kurios yra analogiškos plokščių jungtims, analizuotoms 3 skyriuje. Šiuo atveju, L, T, fasadinės T ir X formų konstrukcinėse jungtyse dvi, trys ir keturios plokštės jungiasi prie centre esančio stačiakampio skerspjuvio strypo. Skaičiavimo modelyje pirma plokštė priimta kaip vibracijų sklidimo šaltinis, kuris sužadinas vienietinės amplitudės lankstymosi banga. Paveiksle 4.2 pažymėtos lankstymosi bangos sklidimo jungtyse kryptys.



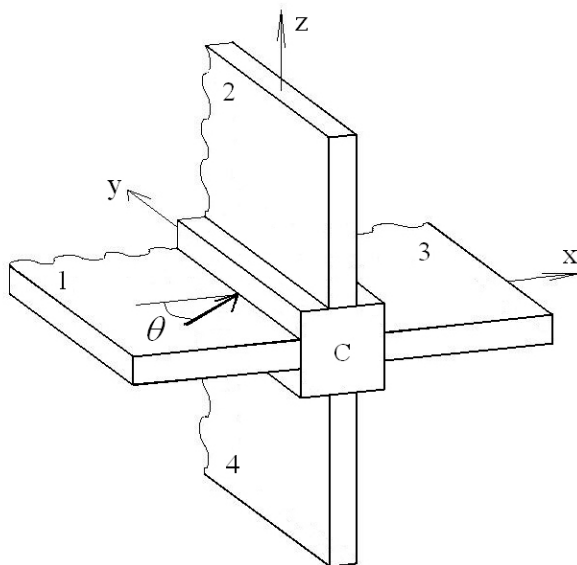
4.2 pav. „Plokštės-strypo-plokštės“ tipo statybinių konstrukcijų jungtys:

a) L formos, b) T formos, b) fasadinės T formos, c) X formos

„Plokštės-strypo-plokštės“ tipo jungčių vibracijų perdavimo koeficientai nustatomi aprašius lankstymosi bangų sklidimą kiekviename jungties elemente, užrašius kraštines sąlygas ir nustačius kiekvienos bangos, išeinančios iš jungties, amplitudę.

4.2.1. Lankstymosi bangos sklidimas

Garso energijos sklidimas karkasinių pastatų jungtyse tarp sienų ir kolonų analizuojamas modeliuojant jungtį iš pusiau begalinių plokščių, standžiai prijungtų prie centre esančio strypo. Vienietinės amplitudės lankstymosi banga krenta į pirmą jungties plokštę kampų θ (4.3 pav.).



4.3 pav. Lankstymosi banga krenta į jungtį iš pirmos plokštės kampu θ

Konstrukcinės jungties modelio koordinačių sistema, poveikiai ir deformacijos pateikti 4.4 pav. Pirmoje jungties plokštėje sužadinta lankstymosi banga keliauja teigiama x ašies kryptimi. Lankstymosi banga plokštėse sukels poslinkių lygų:

$$\xi_1 = \left(e^{-ik_1 \cos \theta_1 x} + A_1 e^{ik_1 \cos \theta_1 x} + A_{n1} e^{k_{n1} x} \right) e^{-ik_1 \sin \theta_1 y} e^{i\omega t}, \quad (4.6)$$

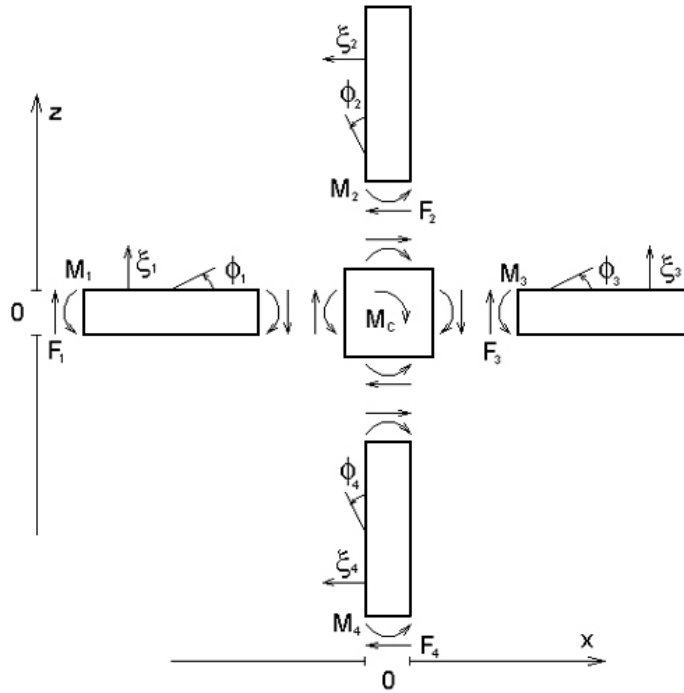
$$\xi_2 = \left(A_2 e^{-ik_2 \cos \theta_2 z} + A_{n2} e^{-k_{n2} z} \right) e^{-ik_2 \sin \theta_2 y} e^{i\omega t}, \quad (4.7)$$

$$\xi_3 = \left(A_3 e^{-ik_3 \cos \theta_3 x} + A_{n3} e^{-k_{n3} x} \right) e^{-ik_3 \sin \theta_3 y} e^{i\omega t}, \quad (4.8)$$

$$\xi_4 = \left(A_4 e^{ik_4 \cos \theta_4 z} + A_{n4} e^{k_{n4} z} \right) e^{-ik_4 \sin \theta_4 y} e^{i\omega t}. \quad (4.9)$$

Kiekvienos plokštės posūkis ϕ_i gaunamas iš atitinkamų poslinkių sąlygos pagal 4.4 pav.:

$$\phi_1 = \frac{\partial \xi_1}{\partial x}, \quad \phi_2 = \frac{\partial \xi_2}{\partial z}, \quad \phi_3 = \frac{\partial \xi_3}{\partial x}, \quad \phi_4 = \frac{\partial \xi_4}{\partial z}. \quad (4.10)$$



4.4 pav. X formos „plokštės-strypo-plokštės“ jungties koordinatinių sistema, poveikiai ir deformacijos

Dėl veikiančių jėgų plokštėse, kolonoje atsiras atsparumo momentas, kuris pagal Cremer L. [30] apskaičiuojamas:

$$M_c = -\left(w^2 \rho_c J_c - G_c k_1^2 \sin^2 \theta_1\right) \frac{\partial \xi_1}{\partial x}. \quad (4.11)$$

4.2.2. Kraštinės sąlygos

Lankstymosi banga iš pirmos jungties plokštės veiks į kolonos kraštą ir sukels kolonos skerspjūvio deformacijas. Dėl šios priežasties, lankstymosi bangos bus išspinduliuotos į antrą, trečią ir ketvirtą jungties plokštę. Priimama, kad jungtyje nėra poslinkių. Todėl plokštės krašte kur $x = 0$, poslinkis pirmoje plokštėje $\xi_1 = 0$ ir pertvarkius (4.6) lygtį gaunamas rezultatas:

$$1 + A_1 + A_{n1} = 0, \quad (4.12)$$

atitinkamai, iš sekančios kraštinės sąlygos ($z = 0$) gaunama sekanti išraiška:

$$A_2 + A_{n2} = 0. \quad (4.13)$$

Analogiškai iš (4.8) ir (4.9) lygčių gaunama:

$$A_3 + A_{n3} = 0, \quad (4.14)$$

$$A_4 + A_{n4} = 0. \quad (4.15)$$

Momentą, veikiantį pirmoje plokštėje atsvers atsparumo momentai, veikiantys kolonoje bei likusiose plokštėse. Tiksliai dalis momento veikiančio pirmoje plokštėje, kuri lygi momentui, veikiančiam trečioje plokštėje, deformuos kolonos skerspjūvį. Todėl kolonos deformacijos gali būti apskaičiuotos naudojant momentą, veikiantį trečioje plokštėje. Skirtumas tarp pirmos ir trečios plokštės posvyrio yra lygus M_3/B_c . Galima užrašyti sekančią – posvyrių kraštinę sąlygą, pagal kurią posvyris pirmoje plokštėje yra lygus trečios plokštės posvyriui, įvertinus posvyrių skirtumą dėl kolonos deformacijos:

$$\phi_1 = \phi_3 - M_3 / B_c. \quad (4.16)$$

Posvyris pirmoje plokštėje gali būti susietas su atitinkamais antros ir ketvirtos plokščių posvyriais. Skirtumas tarp pirmos ir antros plokščių posvyrių bus pusė skirtumo tarp pirmos ir trečios plokščių posvyrių. Analogiškai šiam dydžiui bus lygus skirtumas tarp pirmos ir ketvirtos plokščių posvyrių. Todėl galima užrašyti dar dvi posvyrių kraštines sąlygas:

$$\phi_1 = \phi_2 - M_3 / 2B_c, \quad (4.17)$$

$$\phi_1 = \phi_4 - M_3 / 2B_c. \quad (4.18)$$

Paskutinė kraštinė sąlyga yra momentų, veikiančių jungtyje, pusiausvyra. Momentai, veikiantys plokštėse į kolonos kraštus bus lygūs atsparumo momentui, veikiančiam kolonoje:

$$M_1 - M_2 - M_3 + M_4 = M_c. \quad (4.19)$$

Išsprendus (4.16–4.19) lygčių sistemą, gaunamos nežinomos, iš jungties sklindančių lankstymosi bangų amplitudės A_2 , A_3 ir A_4 .

4.2.3. Vibracijų perdavimo koeficientai

Kryžiaus formos statybinių konstrukcijų jungties vibracijų perdavimo koeficientų reikšmės gaunamos į bendrąją formulę (3.56) įstačius lankstymosi bangos amplitudės reikšmes. X formos jungčių amplitudžių ir vibracijų perdavimo koeficiento skaičiavimo išraiškos dėl savo sudėtingumo išvedamos nebuvo. Vibracijų perdavimo koeficientų reikšmės gautos modeliuojant pastarąją jungtį su konkrečiomis geometrinių ir fizinių parametrų reikšmėmis matematinių programinės įrangos paketų pagalba.

Vibracijų silpimas T, fasadinės T ar L formos jungtims jungtyse analizuojamas sudarius analogiškus modelius ir atsisakant atitinkamų kraštinių sąlygų iš (4.16–4.18) lygčių bei veikiančių momentų iš (4.19) lygties. T, fasadinės T ir L formos jungtims vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo formulės nėra pateikiamos taip pat dėl savo sudėtingumo. Koeficientų reikšmės buvo nustatytos matematinių programinės įrangos paketų pagalba. Vibracijų silpimo įvairių formų „plokštės-strypo-plokštės“ tipo jungtyse skaičiavimo rezultatai pateikiami 5 skyriuje.

4.3. VIBRACIJŲ SILPIMAS „STRYPO-PLOKŠTĖS-STRYPO“ TIPO JUNGTYJE

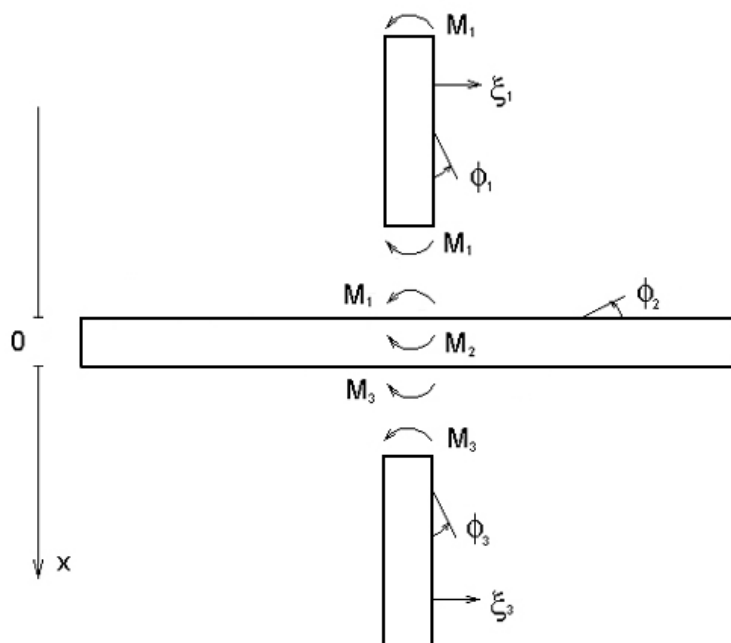
Karkasiniuose pastatuose galimi ir kiti konstrukcinių jungčių tipai, kurie iššaukia specifines vibracijų silpimo problemas. Analizuojant karkasinių pastatų pjūvius, galima pastebėti kolonų ir perdangos jungtis. Prie pastato perdangos vienoje jungtyje gali jungtis viena ar dvi kolonos. Šio tipo jungtys modeliuojamos kaip idealizuotos „strypo-plokštės-strypo“ jungtis.

Sudarant vibracijų silpimo „strypo-plokštės-strypo“ jungties skaičiavimo modelį, naudojamos ankstesniuose skyriuose aprašytos lankstymosi bangos lygtys ir savybės jai sklindant plokštėse ir strypuose. Esant jungtyje dviem strypams, skaičiavimo modelyje priimama, kad jie yra vienodi.

4.3.1. Lankstymosi bangos sklidimas

Pirmas jungties elementas (strypas) sužadinamas vienetinės amplitudės lankstymosi banga, kuri krenta į jungtį normaliniu kampu. Koordinačių ašys, poveikiai ir deformacijos šio tipo jungčiai pateikti 4.5 paveiksle.

Pirmame strype atsispindės lankstymosi banga, kurios amplitudė A_1 ir artimo lauko lankstymosi banga, kurios amplitudė A_{n1} . Trečiame strype bus sužadinta keliaujanti lankstymosi banga, kurios amplitudė A_3 ir artimo lauko lankstymosi banga, kurios amplitudė A_{n3} . Dalis garso energijos pereis į plokštę.



4.5 pav. „Strygo-plokštės-strygo“ jungties koordinačių sistema, poveikiai ir deformacijos

Dėl lankstymosi bangos poveikio poslinkiai pirmame ir trečiame strype bus lygūs:

$$\xi_1 = \left(e^{-ik_1x} + A_1 e^{ik_1x} + A_{n1} e^{k_1x} \right) e^{i\omega t}, \quad (4.20)$$

$$\xi_3 = \left(A_3 e^{-ik_3x} + A_{n3} e^{-k_3x} \right) e^{i\omega t}. \quad (4.21)$$

4.3.2. Kraštinės sąlygos

Priimama, kad plokštėje nėra poslinkių, tuomet pirmos ir trečios kolonos kraštuose kur $x = 0$, poslinkiai bus lygūs nuliui. Jei $\xi_1 = 0$, tuomet pertvarkius (4.20) lygtį gaunamas rezultatas:

$$1 + A_1 + A_{n1} = 0, \quad (4.22)$$

analogiškai, jei $\xi_3 = 0$ gaunama:

$$A_3 + A_{n3} = 0. \quad (4.23)$$

Deformuojantis tarp strypų ir plokštės išlieka status kampas, tuomet kiekvieno elemento posvyris krašte bus vienodas. Pirmo strypo posvyris bus lygus plokštės posvyriui $\phi_1 = \phi_2$, todėl užrašoma sąlyga:

$$-ik_1 + ik_1 A_1 + k_1 A_{n1} = \phi_2. \quad (4.24)$$

Pirmo strypo posvyris taip pat bus lygus trečio strypo posvyriui $\phi_1 = \phi_3$, todėl užrašoma sekanti sąlyga:

$$-ik_1 + ik_1 A_{n1} + k_1 A_{n1} = -ik_3 A_3 - k_3 A_{n3}. \quad (4.25)$$

Galutinė kraštinė sąlyga yra ta, kad jungtyje veikiančių momentų suma turi būti lygi nuliui. Pirmame strype veiks lenkimo momentas, kuris lygus:

$$M_1 = -B_1 \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} = B_1 k_1^2 + B_1 k_1^2 A_1 - B_1 k_1^2 A_{n1}. \quad (4.26)$$

Lenkimo momentas, veikiantis trečiame strype yra lygus:

$$M_3 = -B_3 \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial x^2} = -B_3 k_3^2 A_3 + B_3 k_3^2 A_{n3}. \quad (4.27)$$

Dėl posvyrio atsiradęs lenkimo momentas plokštėje priklausys ir nuo momentinio impedanso bei bus apskaičiuojamas pagal formulę:

$$M_2 = i\omega\phi_2 Z_2. \quad (4.28)$$

Begalinio ilgio plokštės momentinis impedansas Z gali būti apskaičiuojamas pagal Cremer L. formulę:

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{\omega}{16B_2} \left[1 - i \frac{4}{\pi} \ln \left(0,9k_2 \frac{h_c}{2} \right) \right]. \quad (4.29)$$

Todėl kraštinę momentų pusiausvyros sąlygą galima užrašyti:

$$B_1 k_1^2 + A_1 B_1 k_1^2 - A_{n1} B_1 k_1^2 + M_2 - A_3 B_3 k_3^2 + A_{n3} B_3 k_{n3}^2 = 0. \quad (4.30)$$

Visas kraštines sąlygas (4.24, 4.25 ir 4.30) galima sujungti į lygčių sistemą:

$$\begin{cases} -ik_1 + ik_1 A_1 + k_1 A_{n1} = \phi_2 \\ -ik_1 + ik_1 A_{n1} + k_1 A_{n1} = -ik_3 A_3 - k_3 A_{n3} \\ B_1 k_1^2 + A_1 B_1 k_1^2 - A_{n1} B_1 k_1^2 + M_2 - A_3 B_3 k_3^2 + A_{n3} B_3 k_{n3}^2 = 0 \end{cases}. \quad (4.31)$$

Išsprendus šią lygčių sistemą, gaunami nežinomieji – plokštės posvyris ϕ_2 ir lankstymosi bangos trečiame strype amplitudė A_3 .

4.3.3. Vibracijų perdavimo koeficientai

Gavus nežinomųjų reikšmes nesunku nustatyti, kad vibracijų perdavimo koeficientas iš pirmo strypo į trečią yra lygus:

$$\gamma_{13} = \frac{\rho_{l3} k_1}{\rho_{l1} k_3} |A_3|^2. \quad (4.32)$$

Tuo tarpu vibracijų perdavimo koeficientas sklindant garso energijai iš pirmo strypo į plokštę nustatomas pagal pirmame strype sklindančios lankstymosi bangos amplitudę:

$$\gamma_{12} = 1 - |A_1|^2 - \gamma_{13}. \quad (4.33)$$

Jei šio tipo jungtyje yra tik viena kolona (modelyje eliminuojamas trečias strypas), tuomet vibracijų perdavimo koeficientas garso energijai sklindant iš kolonos į perdangos plokštę gali būti apskaičiuojamas naudojantis šia Goyder H. D. G. ir White R. G. [53–55] išraiška:

$$\gamma_{12} = \frac{16 B_1^2 k_1^4 \operatorname{Re}(Z)}{\rho_{l1} c_{g1} |2 B_1 k_1 + (1+i)\omega Z|^2}. \quad (4.34)$$

Šis „strypo-plokštės-strypo“ skaičiavimo modelis nėra tinkamas skaičiuoti vibracijų silpimą jungtyse, kuriose kolona į perdangą yra atremiama per siją ar vietoje kolonos yra siena ir pan. Tokiu atveju reikalingas papildomų elementų momentinių impedansų įvertinimas.

4.4. IŠVADOS

1. Sudarytas vibracijų silpimo „plokštės-strypo-plokštės“ tipo jungtyse skaičiuojamasis modelis. Šio tipo jungties vibracijų perdavimo koeficientams nustatyti turi būti įvertintos jėgos, veikiančios jungties centre esančiame strype.
2. Pateiktas vibracijų silpimo „strypo-plokštės-strypo“ tipo jungtyse skaičiavimo modelis. Šio tipo jungties vibracijų perdavimo koeficientams nustatyti turi būti įvertinta momentinio impedanso įtaka plokštėje veikiančioms jėgoms.
3. Modeliuojant vibracijų silpimą įvairiose kompleksinėse „plokštės-strypo“ jungtyse vibracijų perdavimo koeficiento formulės tampa per daug sudėtingos praktiniam naudojimui, todėl šių rodiklių reikšmės nustatomos matematinių programinės įrangos paketų pagalba.

5 SKYRIUS

VIBRACIJŲ SILPIMO PASTATO JUNGTYSE SKAIČIAVIMO REZULTATAI

5.1. SKAIČIAVIMO PRIELAIIDOS IR NAUDOJAMI DUOMENYS

Akustinės terpės gali būti skirstomos į tris rūšis. Dažniausiai akustikoje pasitaikanti terpė yra patalpos. Šios terpės visi matmenys yra žymiai didesni lyginant su garso bangos ilgiu. Kita akustinės terpės rūšis yra ta, kurios vienas matmuo yra mažas lyginant su bangos ilgiu (sienos, perdangos plokštės). Rečiausiai pasitaikanti yra trečia akustinės terpės rūšis, kurios du matmenys yra maži lyginant su bangos ilgiu (kolonos, sijos). Analizuojant garso energijos sklidimą pastatų konstrukcijomis galima pastebėti, kad jų elementai priskiriami dviem paskutinėms akustinių terpių rūšims.

Vibracijų silpimui įvairiose statybinių konstrukcijų jungtyse nustatyti reikalingos jungties elementų fizinės ir geometrinės savybės, tokios kaip skerspjūvio matmenys, tankis, bangų sklidimo greitis, tamprumo modulis. Pagal šias pagrindines medžiagų savybes gali būti nustatomos kitos. Norint įvertinti tam tikroms statybinėms medžiagoms jų fizines ir akustines savybes susiduriama su tam tikrais sunkumais. Mūrui naudojamos statybinės medžiagos yra itin priklausomos nuo sudedamųjų dalių. Skirtingose šalyse plytų savybės priklauso nuo molio tipo ar kitų medžiagų savybių, kaip ir betonas, kurio savybės įtakoja užpildas. Mūrijimui naudojamų blokelių tankio skalė yra dar platesnė, kadangi gerinant blokelių šiluminės savybes naudojami įvairiausi lengvi užpildai. Dar vienas trūkumas yra tai, kad gamintojai labiau suinteresuoti teikti informaciją apie šių statybinių medžiagų stiprio savybes ir kitos savybės nevisuomet yra pateikiamos. Tuo tarpu medienos savybės priklauso ne tik nuo jos rūšies, tačiau ir nuo išpjovimo bei drėgmės kiekio. Statybinių medžiagų, kurių sudėtyje yra medienos (medžio plaušo, medžio drožlių plokštės), gipso kartono plokštės ir pan., savybės taip pat kinta pakankamai plačiose ribose priklausomai nuo gamintojo. Daugelis statybinių medžiagų dėl savo savybių (mediena, armatūra gelžbetonyje) ar geometrijos (tuštymėtos ar briaunuotos perdangos plokštės) yra ortotropiškos. Dalies medžiagų savybės kinta dėl medžiagų senėjimo, kitų savybės kinta dėl drėgmės būsenos. Dėl šių priežasčių galima tam tikra šio (kaip ir kitų) metodo skaičiavimo paklaida.

Skaičiavimams naudojami apibendrinti dažniausiai pastatų statybai naudojamų statybinių medžiagų rodikliai pagal įvairių literatūros šaltinių [1, 37, 38, 81] ir nacionalinių gamintojų pateiktus duomenis (5.1 lentelė).

5.1 lentelė. Skaičiavimams naudojamų statybinių medžiagų rodikliai

Medžiaga	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)	c_L (m/s)
Plienas	7850	210×10^9	5200
Aliuminis	2770	70×10^9	5000
Stiklas	2600	70×10^9	5200
Betonas (sunkusis)	2500	25×10^9	3300
Plytų (silikatinių) mūras	2000	16×10^9	2800
Betonas (lengvasis)	1300	4×10^9	1700
Gipso kartono plokštė	880	16×10^9	4300
Medžio drožlių plokštė	650	9×10^9	2650
Betonas (poringas)	600	$1,7 \times 10^9$	1800

Literatūroje yra pateikta nedaug informacijos susijusios su skaičiavimams naudojamų statybinių medžiagų Puasono koeficientu. Todėl dažniausiai naudojamos pastovios šio rodiklio reikšmės, kurios skirtingoms statybinėms medžiagoms priimamos $\mu = 0,2\text{--}0,3$. Šis nedidelis Puasono koeficiento reikšmių pokytis neturi didelės reikšmės skaičiavimo rezultatų tikslumui.

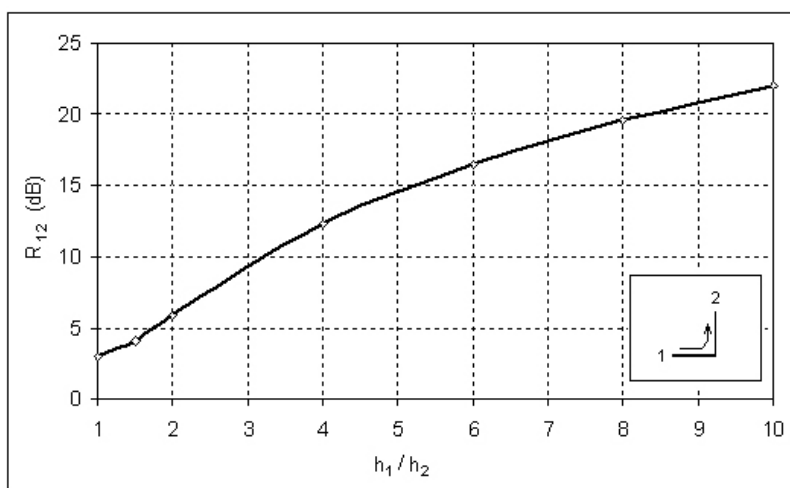
Skaičiavimuose vienodais konstrukcinės jungties elementais laikomi elementai, kurių geometrinės (skerspjūvio aukštis h) ir fizinės (medžiagos tankio ρ ir jose sklindančių išilginių bangų greičio c_L) savybės yra identiškos.

5.2. PLOKŠTĖS TIPO SIMETRINIŲ JUNGČIŲ SKAIČIAVIMO REZULTATAI

Naudojantis 3 skyriuje pateiktu skaičiavimo modeliu, analizuojama įvairių parametų įtaka vibracijų silpimui simetrinėse statybinių konstrukcijų jungtyse esant normaliniam lankstymosi bangos kritimo kampui. Bendru atveju, vibracijų perdavimo nuostoliai simetrinėse jungtyse priklauso nuo jungties geometrinių (skerspjūvio aukščio h) ir fizinių (medžiagos tankio ρ ir jose sklindančių išilginių bangų greičio c_L) parametų.

Jungties geometrinių savybių įtaka vibracijų silpimui

Siekiant nustatyti geometrinių parametrų įtaką vibracijų silpimui priimama, kad visi jungties elementai yra iš medžiagos su vienodomis fizinėmis savybėmis. Tokiu atveju visiems simetrinių jungčių atvejams galioja sąlygos $h_1 = h_3$ ir $h_2 = h_4$, todėl vibracijų perdavimo nuostoliai priklauso tik nuo santykio h_1/h_2 . Priimdami pastarąjį nuo 0,1 iki 1 ($h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1 - 0,1$ m) ir nuo 1 iki 10 ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m) nustatome vibracijų perdavimo koeficientus γ_{ij} simetrinėms L, T, fasadinės T ir X formos jungtims. Gauti rezultatai pateikiami kaip vibracijų perdavimo nuostolių R_{ij} priklausomybė nuo jungties elementų skerspjūvio aukščio santykio h_1/h_2 5.1–5.6 paveiksluose.



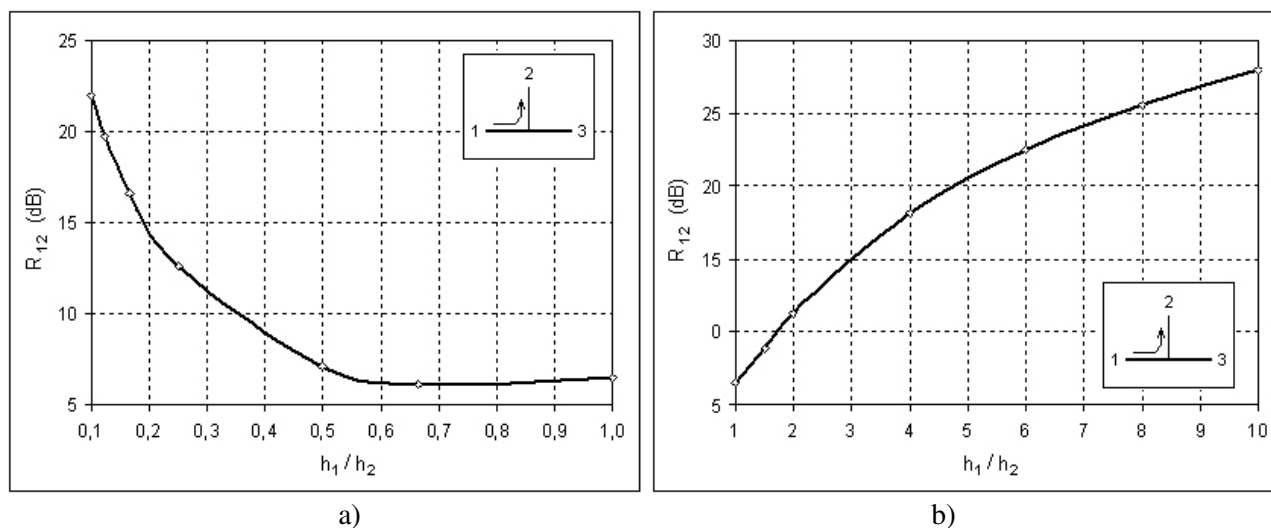
5.1 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai L formos jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m)

Sklindant vibracijoms L formos jungtyje, perdavimo nuostoliai auga didėjant pirmojo elemento skerspjūvio aukščiui antrojo elemento atžvilgiu (5.1 pav.). Kai pirmojo elemento skerspjūvio aukštis yra dešimt kartų didesnis už antrojo elemento skerspjūvio aukštį, vibracijų perdavimo nuostoliai išauga iki 22 dB. Jei sklindant garso energijai didės antrojo elemento skerspjūvio aukštis pirmojo elemento atžvilgiu, gaunama analogiška kreivė pateiktai 5.1 pav. Taip atsitinka todėl, kad šiuo atveju galioja dualumo ryšys, kuris pagal Kihlman [69] aprašomas lygtimi:

$$\gamma_{ij} / \gamma_{ji} = \sqrt{f_{c,j} / f_{c,i}} . \quad (5.1)$$

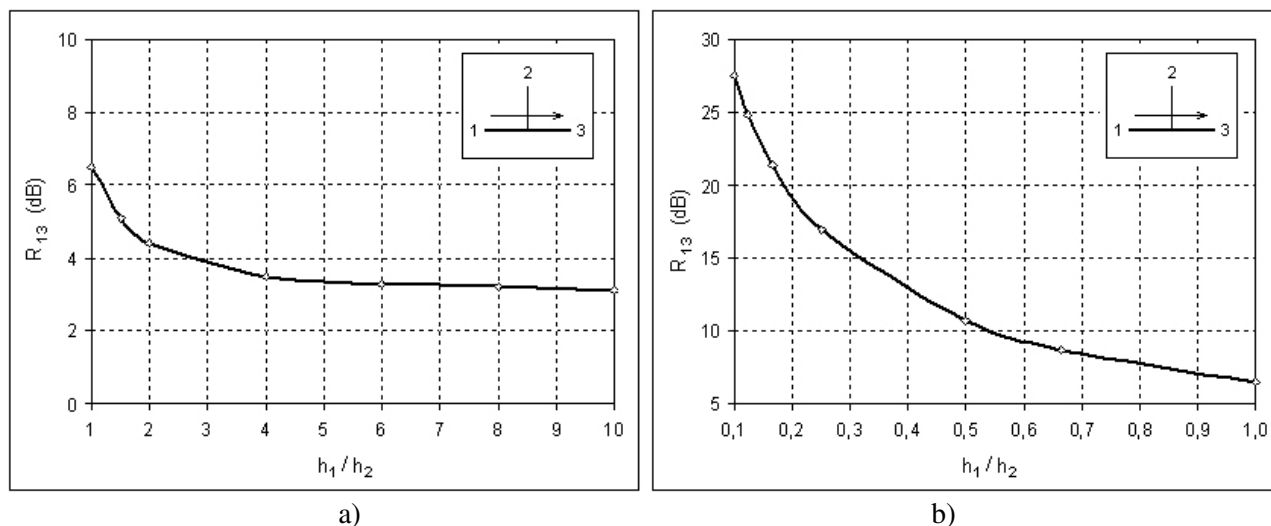
Tai reiškia, kad vibracijų sklaidimo kryptis tarp šių elementų nėra svarbi ir perdavimo nuostoliai šiuo atveju bus priklausomi tik nuo skerspjūvio aukščio skirtumo tarp jungties elementų. Mažiausias vibracijų silpimo lygis L formos jungtyje bus tuomet, kai abiejų elementų skerspjūvio aukščiai bus vienodi.

Didėjant antrojo elemento skerspjūvio aukščiui pirmojo elemento atžvilgiu T formos jungtyje, vibracijų nuostoliai nežymiai kinta esant skirtumui iki dviejų kartų (5.2 a pav.). Vėliau nuostoliai auga sparčiau ir antrojo elemento skerspjūvio aukščiui esant dešimt kartų didesniau už pirmojo elemento skerspjūvio aukštį, vibracijų perdavimo nuostoliai išauga iki 22 dB. Tuo tarpu didėjant pirmojo elemento skerspjūvio aukščiui antrojo elemento atžvilgiu (5.2 b pav.), vibracijų slopinimas yra didesnis. Kai jungties pirmojo elemento skerspjūvio aukštis yra dešimt kartų didesnis už antrojo elemento skerspjūvio aukštį, vibracijų perdavimo nuostoliai padidėja jau iki 28 dB. T formos jungtyje garso energijai sklindant iš pirmojo elemento į trečią, kai antrojo elemento skerspjūvio aukštis didėja pirmojo atžvilgiu iki dešimties kartų, garso energijos perdavimo nuostoliai auga taip pat sparčiai, kaip ir prieš tai nagrinėtais atvejais (5.3 a pav.). Esant maksimaliam elementų skerspjūvio aukščio skirtumui jie siekia 27,5 dB. Tačiau, analogiškas pirmojo jungties elemento skerspjūvio aukščio didėjimas antrojo elemento atžvilgiu beveik neturi didesnės įtakos vibracijų perdavimo nuostoliams į trečią elementą (5.3 b pav.). Pirmojo elemento skerspjūvio aukščiui antrojo atžvilgiu padidėjus dešimt kartų garso energijos perdavimo nuostoliai į trečią elementą padidėja vos 3,2 dB.



5.2 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos jungtyje:

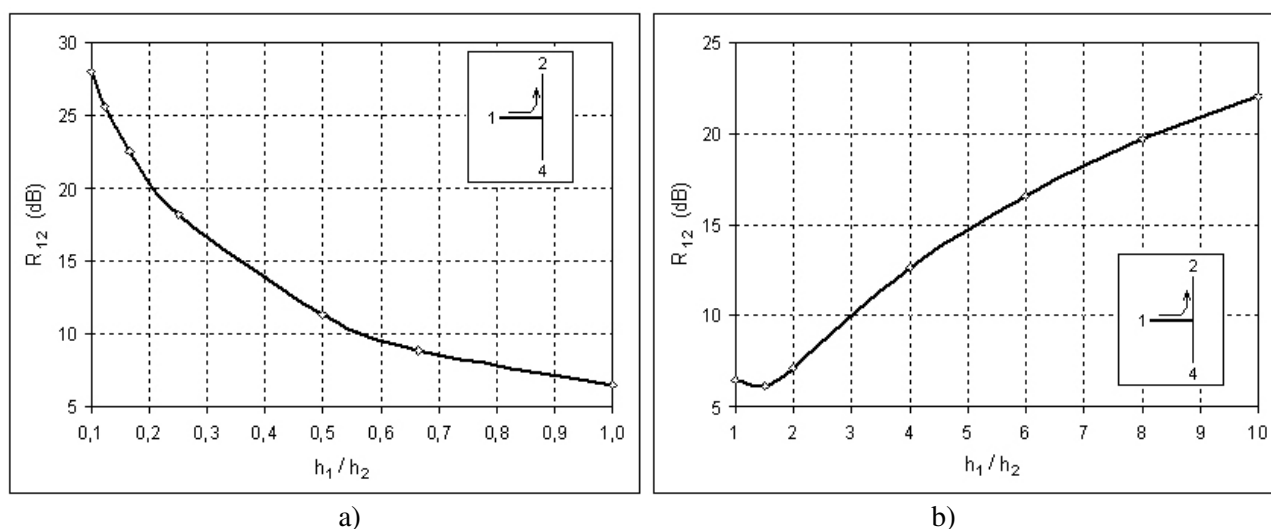
a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m



5.3 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos jungtyje:

a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m

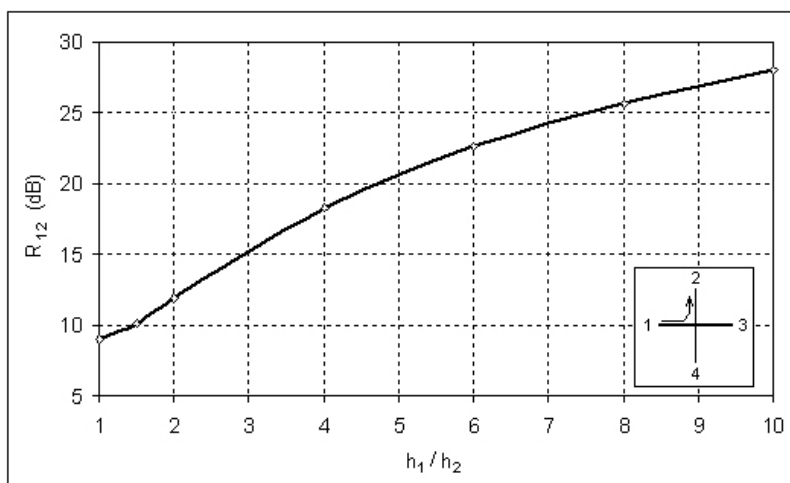
Esant fasadinės T formos jungties atvejui, vibracijų perdavimo nuostoliai taip pat žymiai auga didėjant skerspjūvio aukščių skirtumui tarp jungties elementų. Antrajam elementui padidėjus dešimt kartų pirmojo atžvilgiu vibracijų silpimas pasieks 28 dB (5.4 a pav.), o kai pastarasis bus tiek pat kartų didesnis už antrąjį, vibracijų perdavimo nuostoliai augs mažiau ir sieks 28 dB (5.4 b pav.). Analogiškos reikšmės bus gaunamos vibracijoms sklindant iš pirmojo jungties elemento į ketvirtąjį.



5.4 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai fasadinei T formos jungtyje:

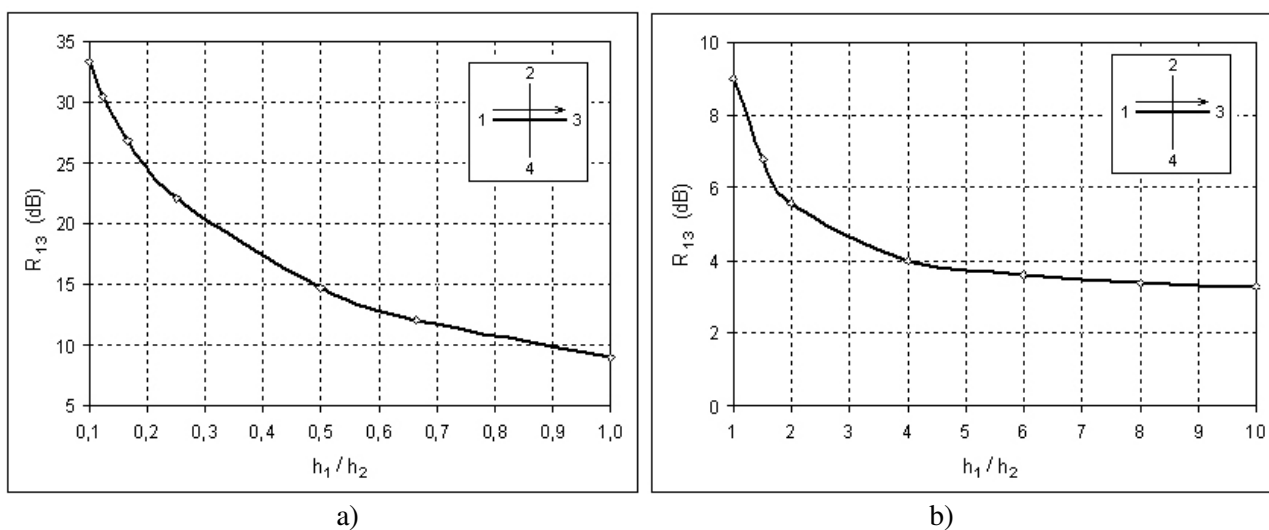
a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m

5.4 b paveiksle galima pastebėti paradoksalų reiškinį, kad antrajam elementui padidėjus 1,5 karto pirmojo atžvilgiu vibracijų perdavimo nuostoliai netgi sumažėja 0,4 dB lyginant su atveju, kai minėti elementai yra vienodo skerspjūvio aukščio. Vėliau, kai antrasis elementas padidėja dvigubai ir daugiau kartų pirmojo atžvilgiu, šis reiškinys išnyksta ir vibracijų perdavimo nuostoliai toliau auga taisyklinga parabolės forma.



5.5 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m)

Simetrinei X formos jungčiai, kai garso energija sklis iš pirmojo elemento į antrąjį, taip pat galios dualumo ryšys. Kai skerspjūvio aukščių skirtumas tarp minėtų elementų didės, augs ir



5.6 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos jungtyje:

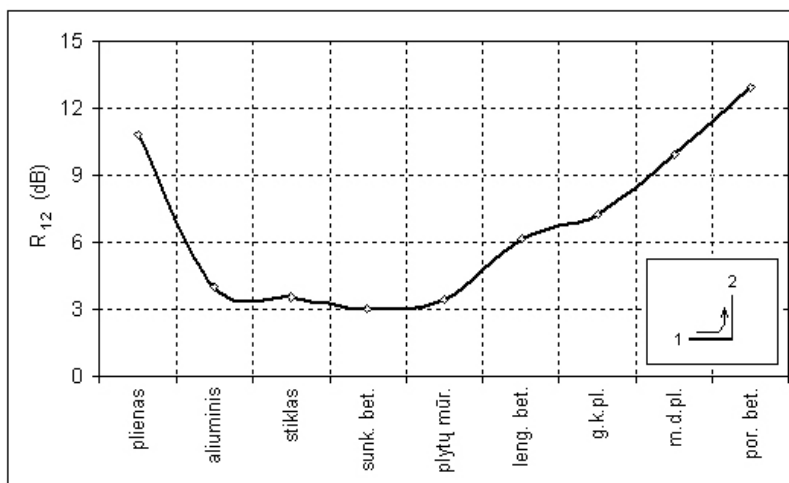
a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m

vibracijų perdavimo nuostoliai (5.5 pav.). Išaugus šiam skirtumui iki dešimties kartų, perdavimo nuostoliai padidės 22 dB. Sklindant vibracijoms iš pirmojo elemento į ketvirtąjį, gausime reikšmes, analogiškas pateiktoms 5.5 pav. Sklindant vibracijoms iš pirmojo jungties elemento į trečiąjį, ir antram elementui esant dešimt kartų didesniai už pirmąjį, vibracijų perdavimo nuostoliai bus maksimalūs lyginant su analogišku skirtumu tarp elementų anksčiau nagrinėtose jungtyse ir pasieks 33,4 dB ribą (5.6 a pav.). Tuo tarpu, didėjant pirmajam elementui antrojo atžvilgiu vibracijų silpimas į trečią elementą bus nedidelis. Skirtumui tarp pirmo ir antro elementų esant dešimt kartų, vibracijų perdavimo nuostoliai į trečiąjį padidės vos 5,6 dB lyginant su atveju, kai šie elementai bus vienodi (5.6 b pav.).

Jungties fizinių savybių įtaka vibracijų silpimui

Siekiant nustatyti fizinių jungties savybių įtaką struktūrinio triukšmo izoliacijai laikoma, kad visų jungties elementų geometriniai parametrai vienodi. Tokiu atveju, visiems simetrinių jungčių atvejams galioja sąlygos $c_{L1} = c_{L3}$, $\rho_1 = \rho_3$ ir $c_{L2} = c_{L4}$, $\rho_2 = \rho_4$, todėl vibracijų perdavimo koeficientai priklauso tik nuo šių parametrų santykio. Simetrinės jungtys dažniausiai sutinkamos pastatų pjūviuose, kur prie horizontalaus elemento – perdangos – jungiasi viena ar dvi atitvaros. Todėl skaičiavimuose pirmas ir trečias (horizontalūs) elementai priimami kaip sunkusis betonas, o antras ir ketvirtas (vertikalūs) elementai priimami nuo santykinai mažiausią tankį ir išilginių bangų sklaidimo medžiagoje greitį turinčio poringo betono iki santykinai didžiausius minėtų parametrų rodiklius turinčio plieno. Visų skaičiavimuose naudotų medžiagų rodikliai pateikti 5.1 lentelėje. Pagal 3 skyriuje pateiktą modelį apskaičiuojami vibracijų perdavimo koeficientai γ_{ij} L, T, fasadinės T ir X formos jungtims. Gauti rezultatai pateikiami kaip vibracijų perdavimo nuostolių R_{ij} priklausomybė nuo jungties elementų fizinių charakteristikų santykio tarp sunkiojo betono (pirmasis jungties elementas) ir kitų medžiagų (jungties elementas į kurį iš jungties sklinda vibracijos). Grafikuose pateikiami vibracijų perdavimo nuostoliai kinta netiesiškai todėl, kad nėra tiesinės priklausomybės tarp medžiagos tankio ρ ir išilginių bangų sklaidimo greičio c_L .

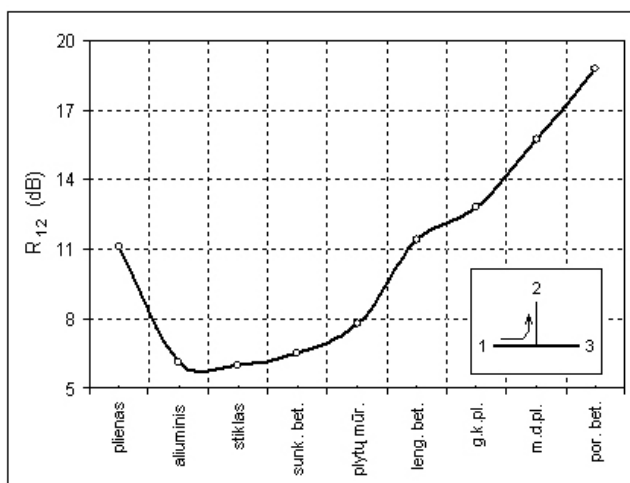
L formos jungtyje vibracijų perdavimo nuostoliai bus didžiausi tuomet, kai skirtumas tarp jungties elementų savybių bus maksimalus (5.7 pav.). Sklindant iš vienodo skerspjūvio aukščio sunkiojo betono elemento į plieninį elementą šie nuostoliai sieks 12,9 dB, o į poringo betono elementą – 10,8 dB. Vibracijų perdavimo nuostoliai L formos jungtyje bus minimalūs, kai jungties elementų fizinės savybės bus vienodos.



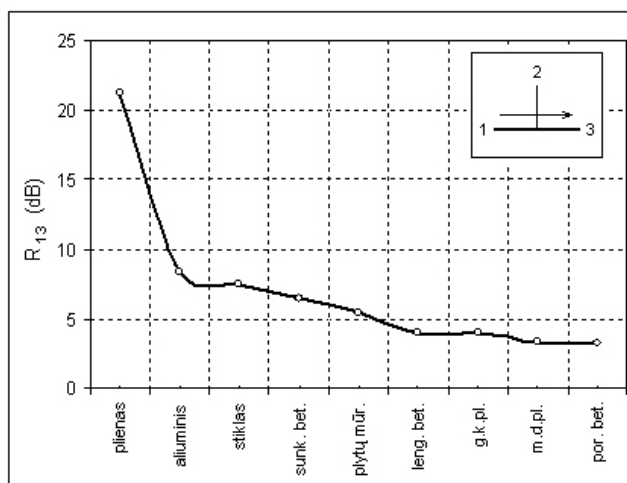
5.7 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai L formos jungtyje:

1 elementas – sunkusis betonas, 2 elementas – nuo plieno iki poringo betono

Sklindant vibracijoms T formos jungtyje iš pirmo elemento į antrą elementą (plienas), perdavimo nuostoliai bus panašūs kaip ir L formos jungtyje ir sieks 11,1 dB (5.8 a pav.). Tuo tarpu garso energijos perdavimas iš pirmo elemento į elementą iš poringo betono iššauks didesnius garso energijos nuostolius – 18,8 dB. Esant vibracijų sklidimui iš pirmo elemento į trečią elementą, kai vertikalus jungties elementas iš plieno, gauname žymiai didesnius perdavimo nuostolius, lygius 21,2 dB. Tuo tarpu sklindant garsui iš T formos jungties pirmojo elemento į trečiąjį, vibracijų perdavimo nuostoliams antrojo jungties elemento žymus tankio ar išilginių



a)

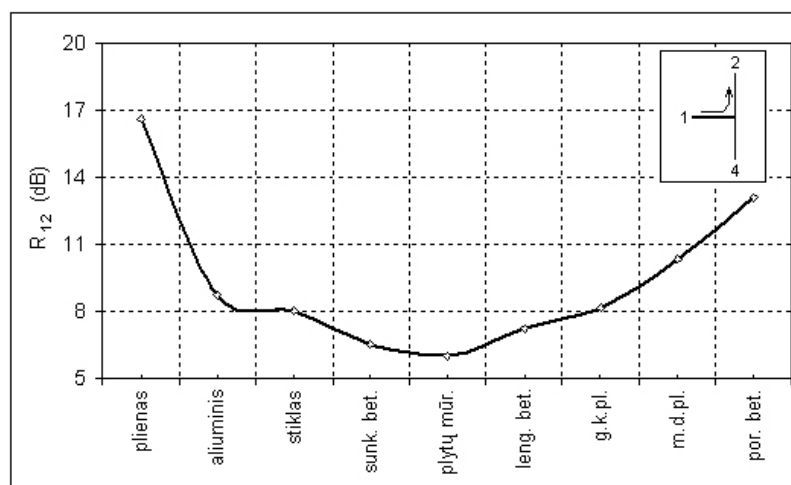


b)

5.8 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos jungtyje:

1 elementas – sunkusis betonas, 2 elementas – nuo plieno iki poringo betono

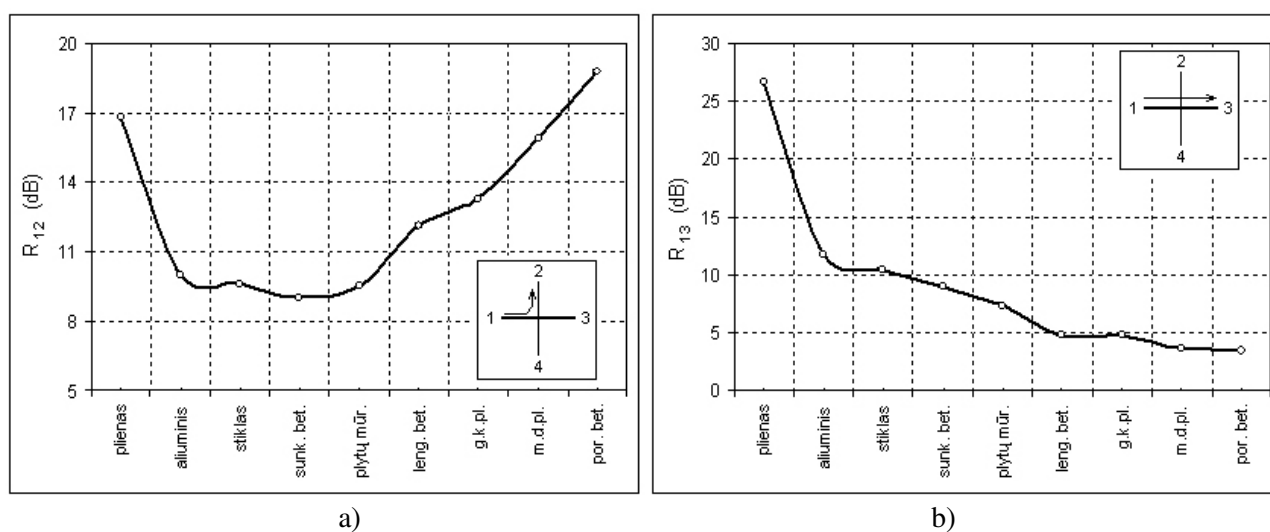
bangų sklaidimo greičio rodiklių mažėjimas lyginant su horizontalių elementų atitinkamais rodikliais neturi didesnės įtakos. Šiuo atveju, perdavimo nuostoliai netgi sumažėja iki 3,1 dB.



5.9 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai fasadinėje T formos jungtyje:

1 elementas – sunkusis betonas, 2 elementas – nuo plieno iki poringo betono

Perdavimo nuostoliai fasadinėje T formos jungtyje bus didžiausi, kuo bus didesnis skirtumas tarp jungties elementų medžiagos tankio ir išilginių bangų sklaidimo greičio (5.9 pav.). Esant vienodiems skerspjūvio matmenims, vibracijų perdavimo nuostoliai iš perdangos (sunkusis betonas) į fasado elementus iš poringo betono sudarys 16,6 dB, o į plieninį 13,1 dB. Mažiausiai vibracijos silps garsui sklindant į plytų mūro jungties elementus.



5.10 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos jungtyje:

1 elementas – sunkusis betonas, 2 elementas – nuo plieno iki poringo betono

X formos jungtyje vibracijoms sklindant iš pirmo elemento (sunkus betonas) į vertikalius jungties elementus, perdavimo nuostoliai taip pat augs didėjant skirtumui tarp vertikalų ir horizontalių jungties elementų medžiagos tankio ir išilginių bangų sklidimo greičio (5.10 a pav.). Sklindant garso energijai jungtyje iš pirmo elemento į trečią, vertikalų elementų medžiagos tankio ir išilginių bangų sklidimo greičio rodiklių mažėjimas horizontaliųjų atžvilgiu, atitinkamai mažina vibracijų perdavimo nuostolius (5.10 b pav.).

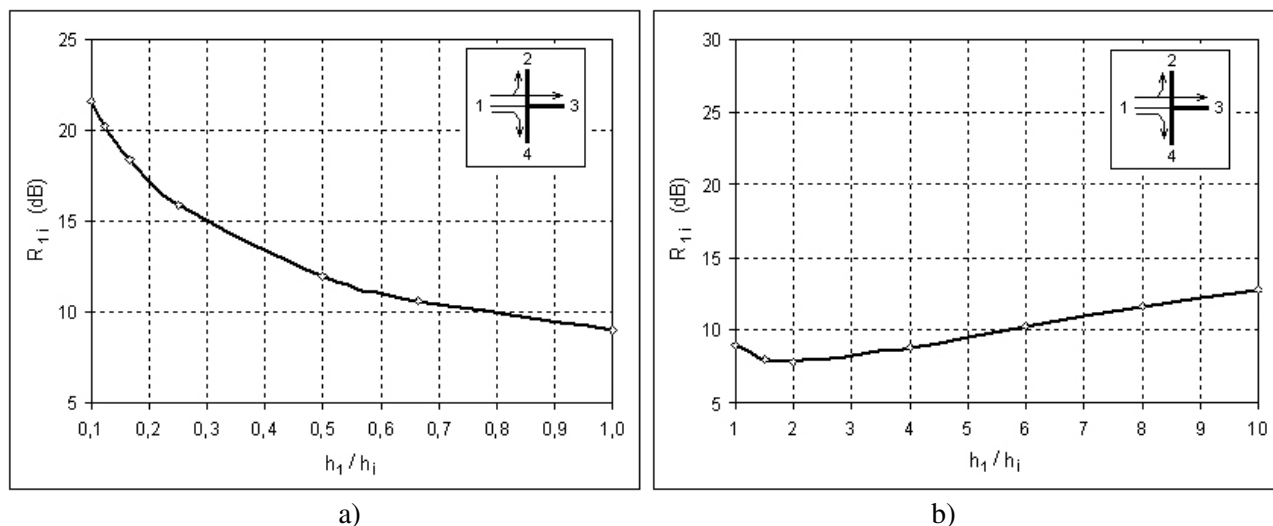
Pagal gautus skaičiavimo rezultatus, pateiktus 5.1–5.10 paveiksluose, galima išskirti struktūrinio triukšmo izoliacijai būdingus tam tikrus bruožus, priklausomai nuo vibracijų sklidimo kelio jungtyje: tiesiai ar kampu, nepriklausomai nuo jungties formos. Esant garso energijos sklidimui jungtyje kampu, vibracijų perdavimo nuostoliai bus didesni, kuo bus didesnis skirtumas tarp jungties elementų fizinių ar geometrinių parametrų. Esant garso energijos sklidimui jungtyje tiesia kryptimi, vibracijų perdavimo nuostoliai sparčiai išauga tuomet, kai vertikalų jungties elementų geometrinių ir fizinių parametrų reikšmės mažėja lyginant su horizontalių elementų atitinkamų rodiklių reikšmėmis. Esant tai pačiai vibracijų sklidimo kryptiai, minėtų rodiklių reikšmių didėjimas neturi žymios įtakos perdavimo nuostoliams.

5.3. PLOKŠTĖS TIPO ASIMETRINIŲ JUNGČIŲ SKAIČIAVIMO REZULTATAI

Remiantis 3 skyriuje gauto skaičiavimo modeliu ir jo pagalba išvestomis skaičiavimo formulėmis (3.67–3.71) nustatoma geometrinių ir fizinių parametrų įtaka vibracijų silpimui asimetrinėse statybinių konstrukcijų X formos su trimis vienodais elementais jungtyse. Siekiant nustatyti geometrinių parametrų įtaką laikoma, kad jungties elementai yra iš medžiagos su vienodomis fizinėmis savybėmis. Siekiant nustatyti jungties fizinių savybių įtaką laikoma, kad visų jungties elementų skerspjūvio aukštis yra vienodas. Analizuojant vibracijų perdavimo nuostolių priklausomybę nuo jungties elementų medžiagos savybių, priimamos tos pačios sąlygos kaip ir simetrinėms jungtims (žr. 3.2 poskyrį).

Jungties geometrinių savybių įtaka vibracijų silpimui

Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su pirmo elemento asimetrija jungtyje pateikti 5.11 paveiksle, kuriame galima pastebėti, jog visais vibracijų sklidimo keliais jungtyje jų silpimas yra vienodas. Vibracijų perdavimo nuostoliai žymiai padidėja tuo atveju, kai pirmo elemento skerspjūvio aukštis yra žymiai mažesnis nei likusiųjų jungties elementų (5.11 a pav.). Kai asimetrinio jungties elemento skerspjūvio aukštis kitų elementų atžvilgiu mažėja nuo vieno iki dešimties kartų, vibracijų perdavimo nuostoliai išauga nuo 9 dB iki 21,6 dB.

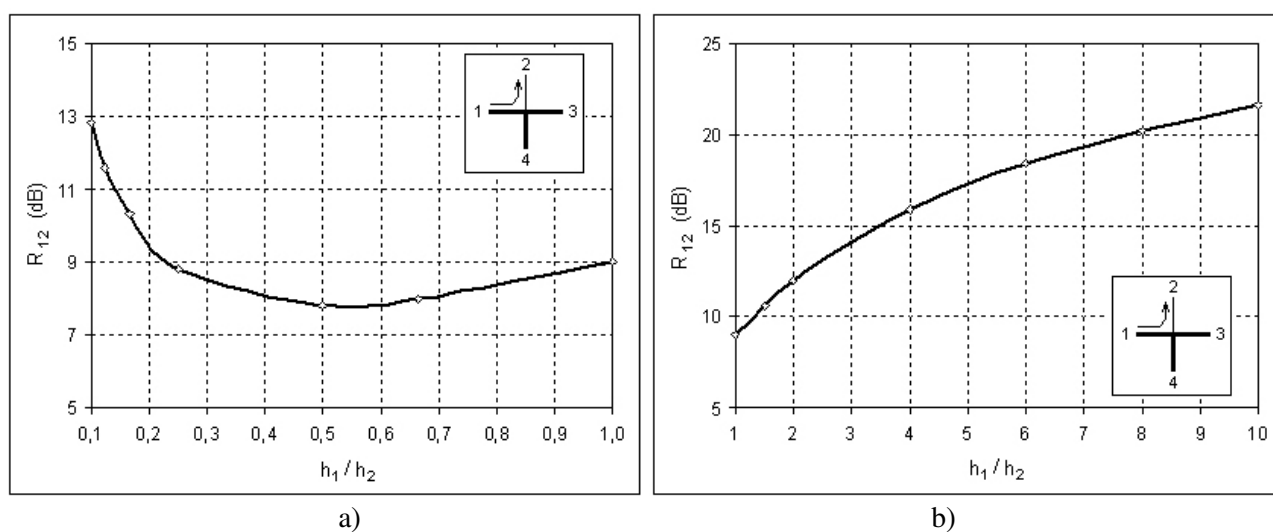


5.11 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su pirmo elemento asimetrija jungtyje:

a) $h_1 = 0,1$ m, $h_i = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_i = 0,1$ m; $i = 2, 3, 4$

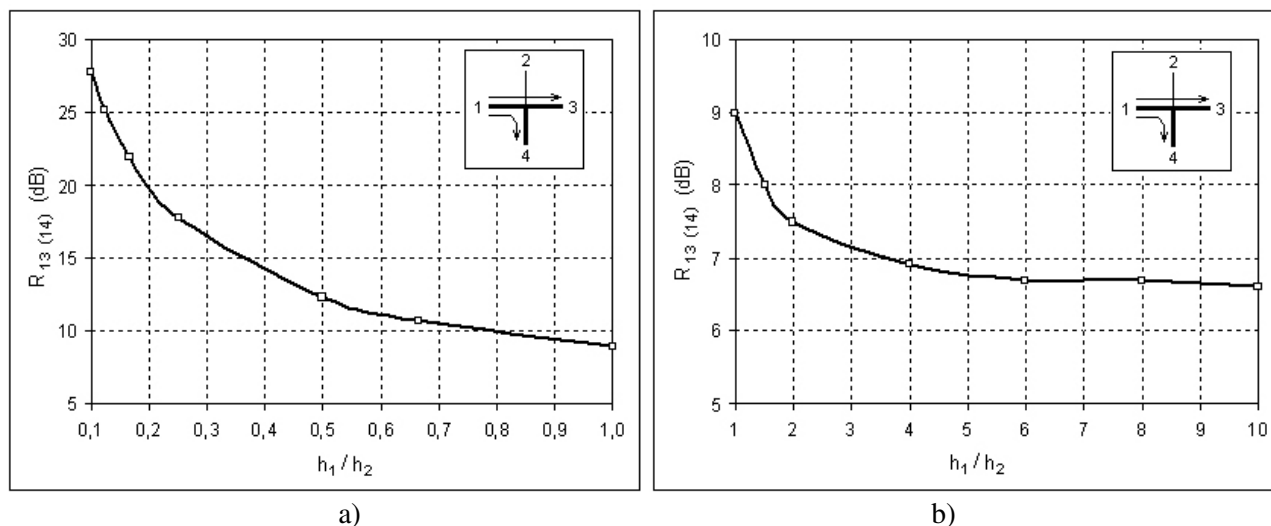
Tuo tarpu, asimetriniam elementui išaugus iki dešimties kartų lyginant su antru, trečiu ir ketvirtu jungties elementais, vibracijų perdavimo nuostoliai tepasiekia 12,8 dB (5.11 b pav.). Mažiausi perdavimo nuostoliai yra srityje, kur asimetrinio ir likusių jungties elementų skerspjūvio aukščių santykis h_1/h_i yra tarp vieno ir keturių.

Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su antro elemento asimetrija jungtyje pateikti 5.12 ir 5.13 paveiksluose. Asimetrinio jungties elemento skerspjūvio aukščio didėjimas likusiųjų atžvilgiu neturi reikšmingos įtakos perdavimo nuostoliams į asimetrinį elementą (5.12 a pav.).



5.12 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su antro elemento asimetrija jungtyje:

a) h_1 (h_3, h_4) = 0,1 m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) h_1 (h_3, h_4) = 0,1 – 1,0 m, $h_2 = 0,1$ m



5.13 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su antro elemento asimetrija jungtyje:

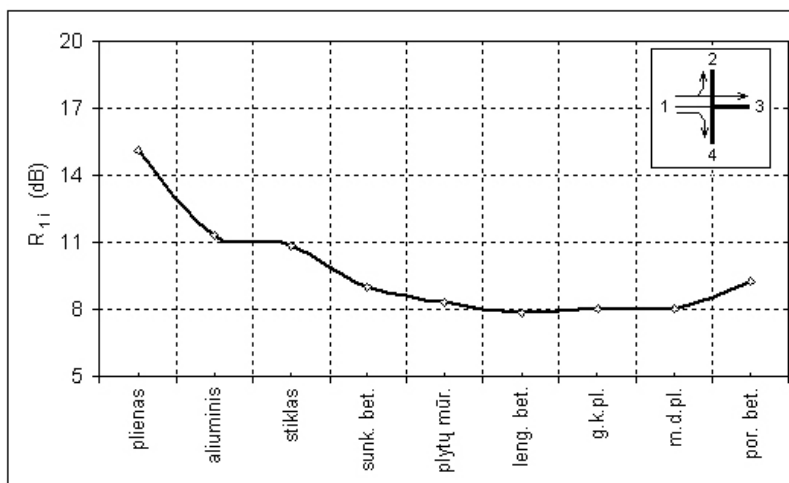
a) $h_1(h_3, h_4) = 0,1 \text{ m}$, $h_2 = 1,0 - 0,1 \text{ m}$; b) $h_1(h_3, h_4) = 0,1 - 1,0 \text{ m}$, $h_2 = 0,1 \text{ m}$

Tik esant itin dideliame skerspjūvio aukščių skirtumui (dešimt kartų) perdavimo nuostoliai padidėja apie 4 dB, lyginant su vienodo elementų skerspjūvio aukščio atveju. Toje pačioje jungtyje didėjant pirmo, trečio ir ketvirto elemento skerspjūvio aukščiui asimetrinio elemento atžvilgiu, vibracijų perdavimo nuostoliai į asimetrinį elementą sparčiai auga ir skirtumui esant dešimt kartų perkopia 20 dB ribą (5.12 b pav.). Asimetrinio elemento didėjimas likusių atžvilgiu neturi beveik jokios įtakos garso perdavimo iš pirmo į trečią ir ketvirtą elementus nuostoliams – išaugus aukščių skirtumui nuo vieno iki dešimties kartų, perdavimo nuostoliai išauga vos 3,8 dB (5.13 a pav.). Tačiau didėjant jungties pirmam, trečiam ir ketvirtam elementui antrojo atžvilgiu, perdavimo nuostoliai iš pirmo į trečią ir ketvirtą elementus auga žymiai greičiau ir esant skirtumui dešimt kartų pasiekia 27,8 dB (5.13 b pav.).

Analogiški rezultatai gaunami X formos su ketvirto elemento asimetrija jungčiais. Šios jungties vibracijų perdavimo nuostoliai R_{14} atitiks R_{12} 5.12 paveiksle, o R_{12} ir R_{13} atitiks 5.13 paveiksle atitinkamai R_{13} ir R_{14} kreives.

Jungties fizinių savybių įtaka vibracijų silpimui

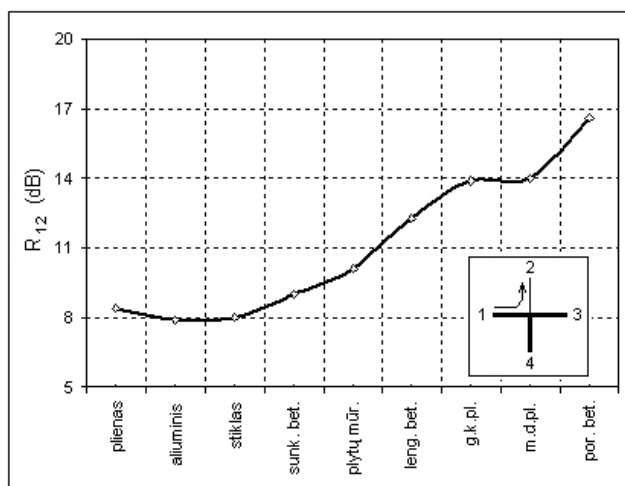
X formos su pirmo elemento asimetrija jungtyje vibracijoms sklindant iš pirmo į likusius jungties elementus, jų silpimas yra vienodas visomis kryptimis (5.14 pav.). Esant didesniems ir toliau didėjant vienodų jungties elementų tankio ir išilginių bangų sklaidimo greičio rodikliams asimetrinio elemento atžvilgiu, vibracijų nuostoliai ribiniu atveju išauga iki 15,1 dB (sunkusis betonas – plienas). Tuo tarpu minėtų rodiklių reikšmėms vienoduose elementuose mažėjant



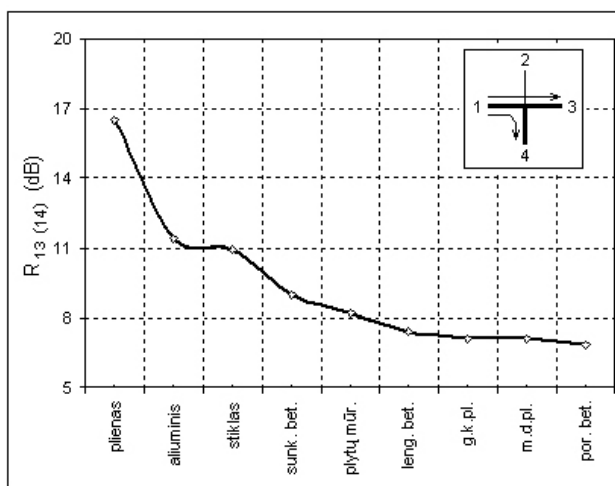
5.14 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su pirmo elemento asimetrija jungtyje:

1 elementas – sunkusis betonas, 2, 3, 4 elementai – nuo plieno iki poringo betono

asimetrinio elemento atžvilgiu, vibracijų perdavimo nuostoliai svyruoja vos 1,2 dB ribose. Perdavimo nuostoliai X formos su antro elemento asimetrija jungtyje beveik nesikeis jei sklindant vibracijoms į asimetrinį elementą jo fizinių savybių rodiklių reikšmės bus mažesnės ir toliau mažės lyginant su atitinkamomis pirmo, trečio ir ketvirto elementų rodiklių reikšmėmis (5.15 a pav.). Jei minėti asimetrinio elemento rodikliai bus didesni ir augs, tuomet perdavimo nuostoliai taip pat atitinkamai išaugs ir sklindant į asimetrinį poringo betono elementą sieks 16,6 dB.



a)



b)

5.15 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su antro elemento asimetrija jungtyje:

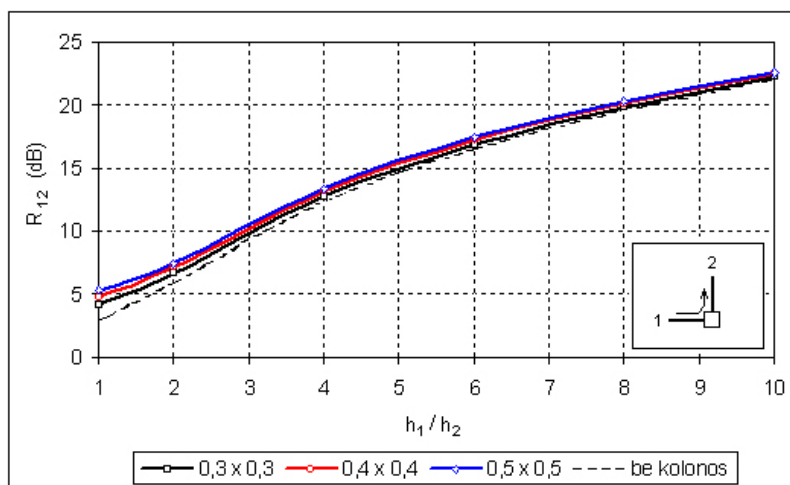
1 elementas – sunkusis betonas, a) 2 elementas ir b) 3, 4 elementai – nuo plieno iki poringo betono

Tuo tarpu, kai asimetrinio elemento fizinių savybių rodiklių reikšmės bus mažesnės ir toliau mažės lyginant su atitinkamomis pirmo, trečio ir ketvirto elemento rodiklių reikšmėmis, vibracijų slopinimas sklindant garsui į trečią ir ketvirtą elementus augs ir ribiniu atveju (sunkusis betonas – plienas) bei pasieks 16,4 dB ribą (5.15 b pav.). Kintant minėtų rodiklių reikšmėms priešinga kryptimi, garso slopinimas jam sklindant į trečią ir ketvirtą elementus kils 2,2 dB ribose. Mažiausiai vibracijos silps garsui sklindant vienodų fizinių savybių jungties elementais.

Analogiški vibracijų silpimo rezultatai gaunami X formos su ketvirto elemento asimetrija jungtyje. Šios jungties vibracijų perdavimo nuostoliai R_{14} atitiks R_{12} 5.15 a paveiksle, o R_{12} ir R_{13} atitiks 5.15 b paveiksle pateiktas R_{13} ir R_{14} kreives.

5.4. „PLOKŠTĖS-STRYPŲ“ TIPO JUNGČIŲ SKAIČIAVIMO REZULTATAI

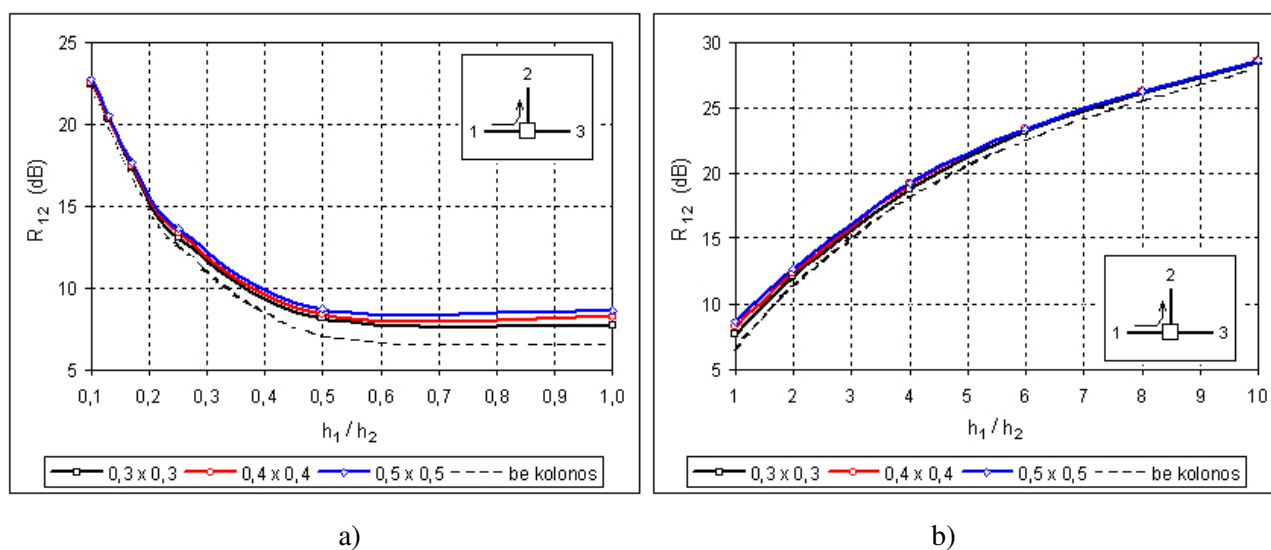
Analizuojamas vibracijų silpimas L, T, fasadinės T ir X formos statybinių konstrukcijų jungtyse su kolona. Skaičiavimais siekiama nustatyti sienų ir kolonos skerspjūvio aukščio įtaką vibracijų silpimui kompleksinėse „plokštės-strypo“ tipo statybinių konstrukcijų jungtyse. Priimama, kad visos atitvaros (plokštės) yra iš plytų mūro (žr. 5.1 lentelę), o jungtyse esanti kolona pagaminta iš gelžbetonio, kurio savybės: $\rho_c = 2500 \text{ kg/m}^3$, $c_{Lc} = 3500 \text{ m/s}$, $\mu_c = 0,3$ [1]. Kolonos skerspjūvis yra taisyklingo kvadrato formos, kurio kraštinės ilgis kinta nuo 0,3 m iki 0,5 m kas 0,1 m. Tiriamos jungtys su kolona yra simetrinės, todėl galioja sąlygos $h_1 = h_3$ ir $h_2 = h_4$ ir vibracijų perdavimo koeficientai priklauso tik nuo santykio h_1/h_2 . Priėmus šį santykį nuo 0,1 iki 1 ($h_1 = 0,1 \text{ m}$, $h_2 = 1 - 0,1 \text{ m}$) ir nuo 1 iki 10 ($h_1 = 0,1 - 1,0 \text{ m}$, $h_2 = 0,1 \text{ m}$) nustatomi vibracijų perdavimo koeficientai η_j įvairių formų jungtims. Gauti rezultatai pateikiami kaip vibracijų



5.16 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai L formos su kolona jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0 \text{ m}$, $h_2 = 0,1 \text{ m}$)

perdavimo nuostolių R_{ij} priklausomybė nuo jungties elementų skerspjūvio aukščio santykio h_1/h_2 esant įvairiems kolonos skerspjūvio dydžiams.

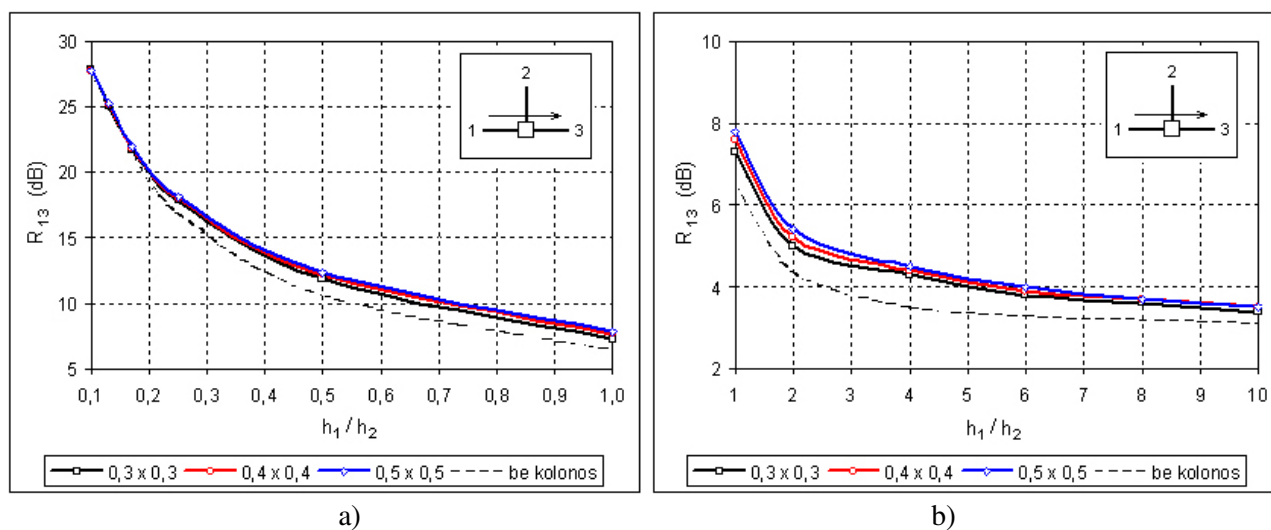
L formos jungtyje esant 0,3 m x 0,3 m skerspjūvio kolonai perdavimo nuostoliai padidėja 1,2 dB, kai elementų skerspjūviai vienodi ir 0,2 dB, kai jie skiriasi dešimt kartų lyginant su analogiška jungtimi be kolonos (5.16 pav.). Kai elementai vienodi, 0,5 m x 0,5 m skerspjūvio kolona perdavimo nuostolius padidina 2,6 dB, o kai jie skiriasi dešimt kartų – 0,5 dB. Vibracijų sklidimui L formos su kolona jungtyje galioja dualumo ryšys, todėl didėjant antro elemento skerspjūvio aukščiui pirmojo atžvilgiu, perdavimo nuostolių kreivė bus tokia pat kaip 5.16 pav.



5.17 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos su kolona jungtyje:

a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m

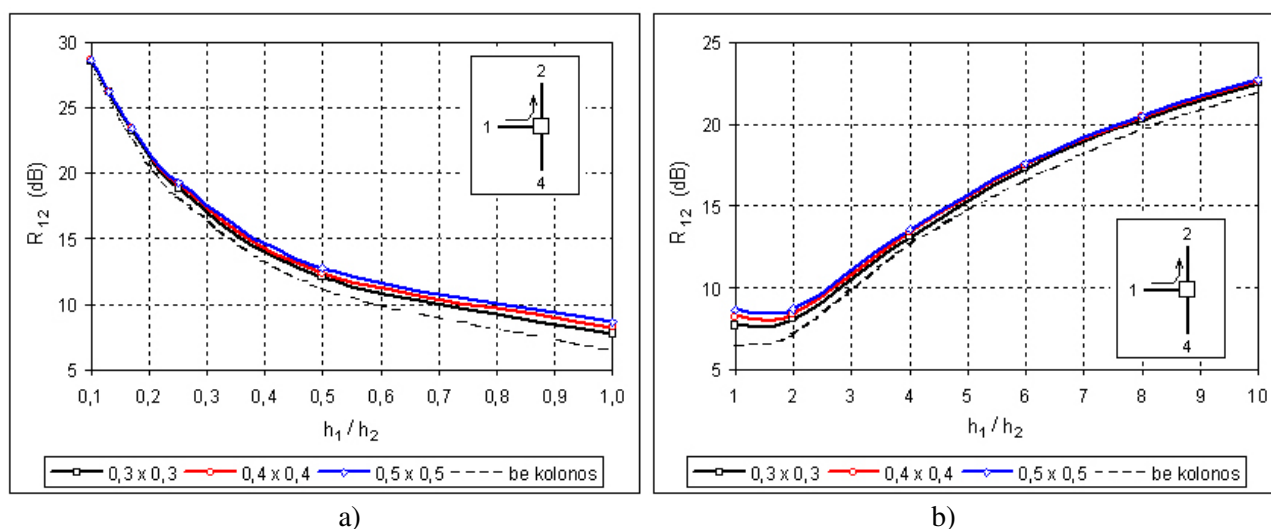
T formos jungtyje su 0,3 m x 0,3 m kolona didėjant antro elemento skerspjūvio aukščiui pirmojo atžvilgiu, vibracijų perdavimo į antrą elementą nuostoliai padidėja 0,5 dB kai elementai vienodi ir tiek pat kai jie skiriasi dešimt kartų (5.17 a, b pav.). Tuo tarpu 0,5 m x 0,5 m dydžio kolona visais atvejais padidina perdavimo nuostolius į antrą elementą iki 0,8 dB, lyginant su analogiška jungtimi be kolonos. Kai T formos jungties antro elemento skerspjūvio aukštis kinta nuo 1,0 m iki 0,1 m, o pirmo ir trečio elemento pastovus (0,1 m), perdavimo nuostolius į trečią elementą 0,3 m x 0,3 m kolona padidina nuo 0,2 dB iki 0,8 dB, o 0,5 m x 0,5 m kolona – nuo 0,3 dB iki 1,3 dB lyginant su analogišku vibracijų silpimu jungtyje be kolonos (5.18 a pav.). Esant priešingam plokščių skerspjūvio aukščių pokyčiui, mažesnioji kolona perdavimo nuostolius į trečią elementą padidina nuo 0,8 dB iki 0,3 dB, o didesnioji – nuo 1,3 dB iki 0,4 dB lyginant su jungties be kolonos rezultatais (5.18 b pav.).



5.18 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos su kolona jungtyje:

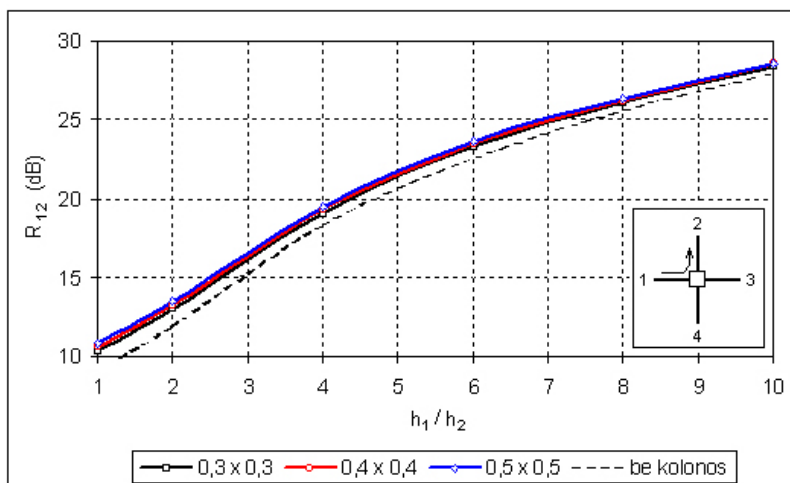
a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m

Fasadinėje T formos jungtyje kolonos taip pat padidina perdavimo nuostolius lyginant su analogiškėmis jungtimis be kolonos. Perdavimo nuostoliai į vertikalius elementus $0,3$ m x $0,3$ m kolonai padidėja nuo $0,5$ dB (kai h_1 ir h_2 skiriasi dešimt kartų) iki $1,2$ dB (kai h_1 ir h_2 vienodi), o $0,5$ m x $0,5$ m kolonai padidėja nuo $0,6$ dB (kai h_1 ir h_2 skiriasi dešimt kartų) iki $1,1$ dB (kai h_1 ir h_2 vienodi) lyginant su jungtimi be kolonos (5.19 a, b pav.).



5.19 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai fasadinės T formos su kolona jungtyje:

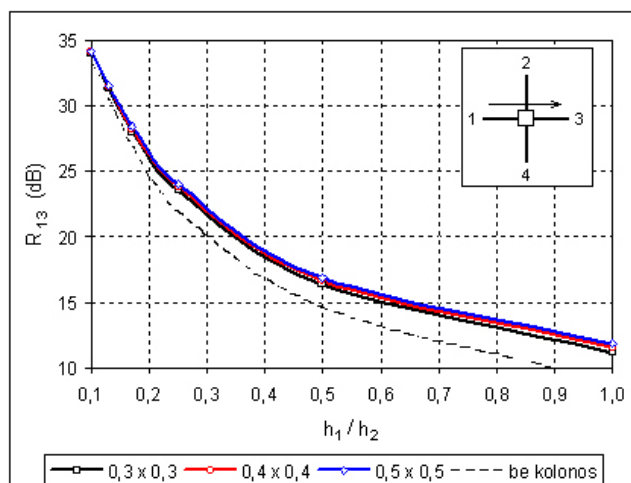
a) $h_1 = 0,1$ m, $h_2 = 1,0 - 0,1$ m; b) $h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m



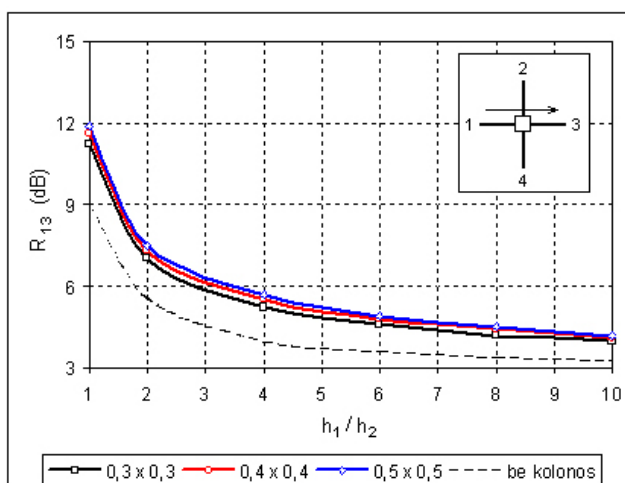
5.20 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su kolona jungtyje:

$$h_1 = 0,1 \text{ m}, h_2 = 1,0 - 0,1 \text{ m}$$

X formos jungtyje su kolona vibracijoms sklindant iš horizontalaus elemento į vertikalius galioja dualumo ryšys, todėl perdavimo nuostoliai priklauso tik nuo elementų skerspjūvio aukščių santykio ir nepriklauso nuo vibracijų sklidimo krypties tarp minėtų elementų jungtyje (5.20 pav.). Kai visi jungties elementai bus vienodi, 0,3 m x 0,3 m kolona padidins nuostolius nuo 1,3 dB, o 0,5 m x 0,5 m kolona – 1,8 dB. Kai vertikalių ir horizontalių elementų skerspjūvio aukštis skirsis dešimt kartų, dėl mažiausios nagrinėjamo skerspjūvio kolonos perdavimo nuostoliai išaugs 0,4 dB, o dėl didžiausios – 0,5 dB lyginant su analogiškos jungties be kolonos



a)



b)

5.21 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos su kolona jungtyje:

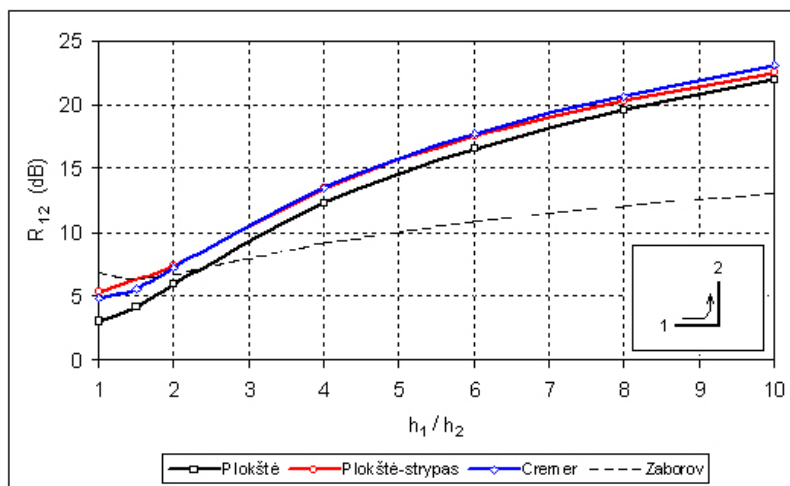
a) $h_1 = 0,1 \text{ m}, h_2 = 1,0 - 0,1 \text{ m}$; b) $h_1 = 0,1 - 1,0 \text{ m}, h_2 = 0,1 \text{ m}$

skaičiavimo rezultatais. Sklindant vibracijoms X formos jungtyje iš pirmo elemento į trečiąjį, 0,3 m x 0,3 m kolona padidins perdavimo nuostolius nuo 0,7 dB (kai h_1 ir h_2 skiriasi dešimt kartų) iki 1,2 dB (kai h_1 ir h_2 vienodi). Tuo tarpu esant analogiškam vibracijų sklidimui jungtyje 0,5 m x 0,5 m kolona perdavimo nuostolius padidins nuo 0,8 dB (kai h_1 ir h_2 skiriasi dešimt kartų) iki 1,9 dB (kai h_1 ir h_2 vienodi).

Pagal gautus teorinio skaičiavimo rezultatus galima teigti, jog plokščių jungtyje atsiradus strypui vibracijų perdavimo nuostoliai padidėja. Tolimesniuose tyrimuose numatoma įvertinti strypo įtaką vibracijų silpimui asimetrinėse įvairių formų jungtyse bei nustatyti plokštės ir strypo medžiagos savybių įtaką šio tipo statybinių konstrukcijų jungtyse.

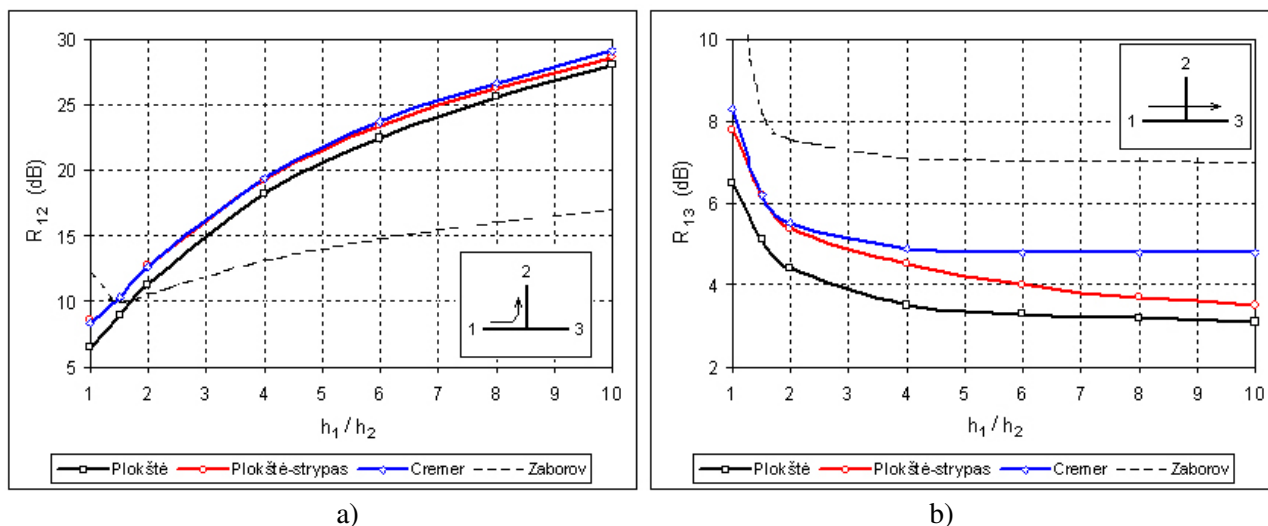
5.5. REZULTATŲ SUGRETINIMAS SU KITŲ AUTORIŲ TYRIMŲ REZULTATAIS

Gauti vibracijų silpimo įvairių statybinių konstrukcijų jungtyse skaičiavimo rezultatai buvo sulyginti su kitų autorių analogiškų jungčių skaičiavimo rezultatais. Cremer L. ir Kihlman T. paskelbti vibracijų silpimo įvairiose jungtyse teorinio skaičiavimo rezultatai gerai sutampa su jų eksperimentinių tyrimų rezultatais. Tuo tarpu, gauti skaičiavimo rezultatai naudojantis Zaborov V. I. pateikta skaičiavimo metodika visose jungtyse gerokai skiriasi nuo kitų autorių skaičiavimo rezultatų.



5.22 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai L formos jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m)

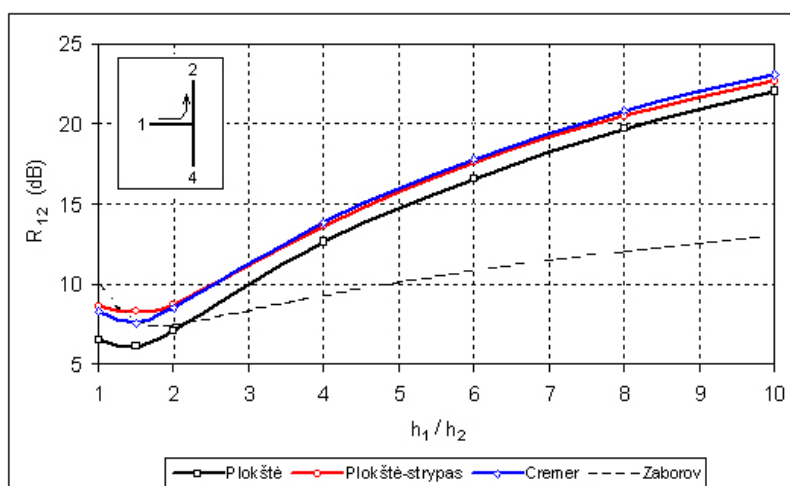
Gauti vibracijų perdavimo nuostoliai L formos konstrukcinėje jungtyje skiriasi nuo Cremer L. skaičiavimo rezultatų nuo 1,1 dB iki 1,8 dB (5.22 pav.). Jungtyje įvertinus 0,5 m x 0,5 m dydžio koloną, gauti perdavimo nuostoliai didesni nuo 0,2 iki 2,6 dB lyginant su jungties be kolonos skaičiavimo rezultatais.



5.23 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m)

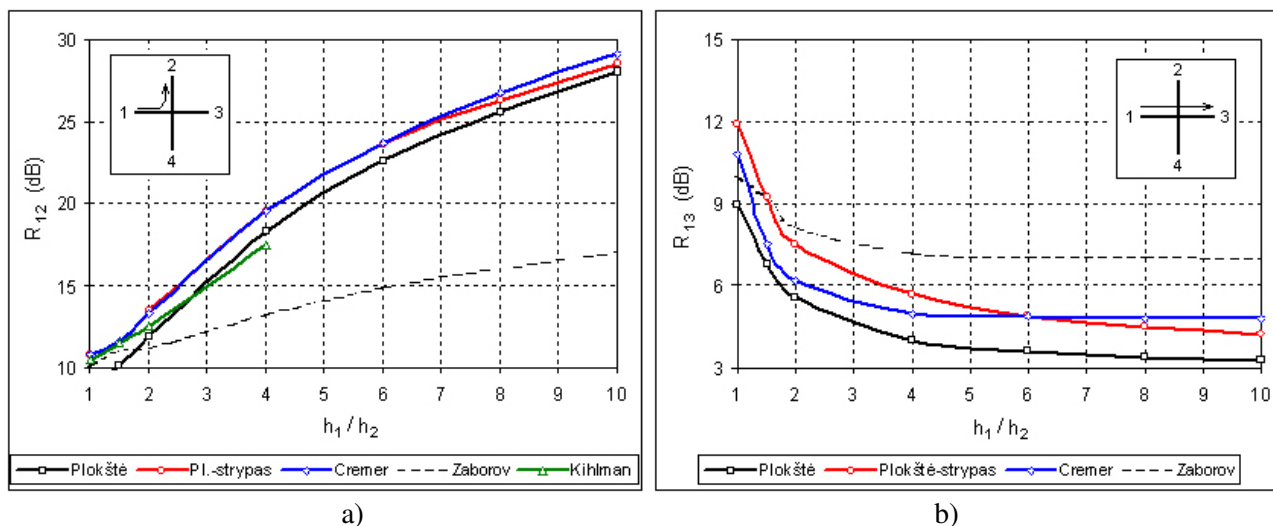
a) vibracijoms sklindant jungtyje kampu; b) vibracijoms sklindant jungtyje tiesiai

Vibracijų perdavimo nuostoliai T formos jungtyje skiriasi nuo Cremer L. skaičiavimo rezultatų nuo 1,1 dB iki 1,8 dB sklindant vibracijoms į antrą jungties elementą (5.23 a pav.) ir nuo 1,6 dB iki 1,8 dB sklindant garsui į trečią jungties elementą (5.23 b pav.).



5.24 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai fasadinėje T formos jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m)

Nedidelis rezultatų skirtumas gaunamas ir vibracijų perdavimo nuostoliams fasadinėje T formos jungtyje – nuo 1,1 dB iki 1,8 dB (5.24 pav.). Tuo tarpu, vibracijų silpimo X formos jungtyje gauti teoriniai skaičiavimo rezultatai lyginami ir su Kihlman T. [69] simetrinių X formos jungčių skaičiavimo rezultatais (5.25 a pav.). Minėtas autorius pateikia vibracijų



5.25 pav. Vibracijų perdavimo nuostoliai X formos jungtyje ($h_1 = 0,1 - 1,0$ m, $h_2 = 0,1$ m)

a) vibracijoms sklindant jungtyje kampu; b) vibracijoms sklindant jungtyje tiesiai

perdavimo nuostolius, kai pirmasis jungties elementas yra didesnis už antrąjį nuo 1 iki 4 kartų. Šie skaičiavimo rezultatai nuo gautųjų skiriasi iki 1,5 dB.

Kaip ir aukščiau pateiktuose grafikuose, gauti vibracijų perdavimo nuostoliai nedaug skiriasi nuo Cremer L. gautų teorinio skaičiavimo rezultatų. Esant vibracijų sklidimui į antrą jungties elementą (5.25 a pav.), perdavimo nuostoliai skiriasi nuo 0,9 iki 1,7 dB. Tuo tarpu sklindant garso energijai į trečią jungties elementą, gauti rezultatai skiriasi nuo 1,5 dB iki 2,3 dB.

Gauti teoriniai skaičiavimo rezultatai su rezultatais, gautais naudojantis Zaborov V. I. metodika, gerai sutampa srityje kur skerspjūvio aukščių skirtumas yra iki dviejų kartų. Kuo labiau šis skirtumas didėja, tuo išryškėja didesnis skirtumas tarp gautų skaičiavimo rezultatų naudojant šiuos du skaičiavimo metodus. Gautų rezultatų praktinio naudojimo patikimumui įvertinti, numatoma atlikti analizuotų jungčių eksperimentinius tyrimus.

5.6. REZULTATŲ PRITAIKYMO GALIMYBĖS STANDARTIZUOTAM METODUI

Pastato akustinės charakteristikos projektavimo stadijoje apskaičiuojamos remiantis LST EN 12354 standartų serija. Pirmosios dvi standarto dalys apibrėžia atitinkamai orinio ir smūginio garso izoliacijos projektavimo principus. Statybų praktika parodė, jog netiesioginis garso sklidimas pro konstrukcines jungtis dažniausiai būna veiksnys, žymiai sumažinantis pastato atitvarų orinio ir smūginio garso izoliaciją. Projektiniuose skaičiavimuose [82, 83] jis įvertinamas vibracijų redukavimo rodikliu K_{ij} . Rodiklio reikšmės skaičiavimams nustatomos pagal jungties vibracijų perdavimo koeficiento γ_{ij} reikšmę ir įvertinant dažnį f :

$$K_{ij} = -10 \lg \gamma_{ij} + 51 \lg \frac{f_c}{f_{ref}}, \quad (5.2)$$

čia $f_{ref} = 1000$ Hz, o kritinis dažnis f_c apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_c = \frac{c_o^2}{1,8c_L h}. \quad (5.3)$$

Projektiniuose skaičiavimuose norint įvertinti garso sklidimą pro LST EN 12354 nenurodytas jungtis (asimetrines jungtis, jungtis su kolona ir pan.), reikalingos supaprastintos, tačiau patikimos tokių jungčių skaičiavimo formulės. Autoriaus siūlomos asimetrinių X formos statybinių konstrukcijų jungčių skaičiavimo išraiškos gali būti taikomos šių jungčių vibracijų perdavimo koeficientams apskaičiuoti. Jei jungties elementai yra iš vienodo skerspjūvio aukščio elementų, tokiu atveju vibracijų perdavimo nuostolių reikšmė nustatoma iš grafikų, pateiktų 5.2 ir 5.3 poskyriuose. Šio rodiklio reikšmės pagal grafikus, pateiktus 5.4 poskyryje, naudotinos garso sklidimui sienų ir kolonų jungtyse įvertinti, jei sienos yra iš medžiagos su vienodomis savybėmis. Gautų rezultatų praktinio naudojimo patikimumui įvertinti, numatoma atlikti analizuotų jungčių eksperimentinius tyrimus.

5.7. IŠVADOS

1. Gauti simetrinių statybinių jungčių skaičiavimo rezultatai parodė, kad vibracijų perdavimo nuostoliai yra tuo didesni, kuo didesnis skirtumas tarp jungties elementų geometrinių ar tarp medžiagos fizinių parametrų:

- L formos jungtyje,
- fasadinės T formos jungtyje,
- T formos jungtyje sklindant vibracijoms kampu ir tiesiai, kai pirmojo elemento skerspjūvio aukštis, tankis ir išilginių bangų greitis didėja antrojo elemento atžvilgiu,
- X formos jungtyje sklindant vibracijoms kampu ir tiesiai, kai pirmojo elemento skerspjūvio aukštis, tankis ir išilginių bangų greitis didėja antrojo atžvilgiu.

T ir X formos jungtyse, kai antrojo elemento skerspjūvio aukštis, tankis ir išilginių bangų greitis didėja pirmojo atžvilgiu, pastebimas nedidelis vibracijų perdavimo nuostolių pokytis.

2. Gauti teoriniai asimetrinių X formos su trimis vienodais elementais jungčių vibracijų silpimo skaičiavimo rezultatai parodė, kad vibracijų perdavimo nuostoliai šioje jungtyje bendru atveju yra kiek mažesni nei simetrinėje X formos jungtyje. Kai skirtumas tarp asimetrinio ir kitų jungties elementų yra dešimt kartų, perdavimo nuostoliai siekia 27,8 dB, tuo tarpu analogišku atveju simetrinėje jungtyje – 33,3 dB.
3. Gauti vibracijų silpimo „plokštės-strypo“ jungtyse skaičiavimo rezultatai parodė, jog kolona plokštės tipo jungtyse padidina vibracijų perdavimo nuostolius lyginant su analogiškomis jungtimis be kolonos. Didėjant jungties centre esančios kolonos skerspjūviui, vibracijų perdavimo nuostoliai taip pat nežymiai didėja.
4. Sugretinus autoriaus gautus skaičiavimo rezultatus su kitų autorių tyrimų rezultatais, nustatyta, kad gauti vibracijų perdavimo nuostoliai įvairių statybinių konstrukcijų jungtyse gerai atitinka kitų autorių tyrimus.

6 SKYRIUS

PAGRINDINIAI DARBO REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Iš atliktos vibracijų silpimo statybinių konstrukcijų jungtyse tyrimų, pateiktų literatūroje, analizės nustatyta, kad nėra pakankamai pagrįstos vibracijų silpimo asimetrinėse jungtyse ir jungtyse su kolona skaičiavimo metodikos. Jai sukurti būtini specialūs analitiniai ir eksperimentiniai tyrimai.
2. Sukurtas vibracijų silpimo plokštės tipo simetrinėse ir asimetrinėse statybinių konstrukcijų jungtyse skaičiavimo modelis, kuris įvertina lankstymosi bangų sklidimą. Skaičiuojant sistemas, kuriose yra daugiau nei viena konstrukcinė jungtis, reikia įvertinti išilginių ir skersinių bangų sklidimą.
3. Gautos supaprastintos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos įvairioms asimetrinėms T ir X formos jungtims parodė, kad asimetrinėms T formos jungtims bei X formos jungčiams, kurioje yra dvi poros vienodų elementų, naudotinos simetrinių jungčių skaičiavimo formulės. Pasiūlytos supaprastintos vibracijų perdavimo koeficientų skaičiavimo išraiškos įvairioms X formos jungtims su trimis vienodais elementais.
4. Sukurtas vibracijų silpimo modelis, įvertinantis lankstymosi bangų sklidimą pro „plokštės-strygo-plokštės“ tipo jungtis, yra skirtas skaičiuoti garso energijos sklidimą jungtyse tarp sienų ir kolonų pastato plane. Palyginus su analogiškais plokščių tipo jungtimis, šiuo atveju reikia papildomai įvertinti stryge veikiančių jėgų įtaką.
5. Gauti teoriniai simetrinių statybinių jungčių skaičiavimo rezultatai parodė, kad garso energijai sklindant jungtyje kampu, vibracijų perdavimo nuostoliai bus tuo didesni, kuo bus didesnis skirtumas tarp jungties elementų fizinių ar geometrinių parametrų reikšmių. Kai garsas jungtyje sklinda tiesiai, vibracijų perdavimo nuostoliai sparčiai išauga tuomet, kai antro jungties elemento geometrinių ir fizinių parametrų reikšmės mažėja palyginti su pirmo elemento atitinkamų rodiklių reikšmėmis. Kintant šiems rodikliams priešinga kryptimi, vibracijų perdavimo nuostoliai beveik nekinta.
6. Gauti teoriniai asimetrinių X formos su trimis vienodais elementais jungčių vibracijų silpimo skaičiavimo rezultatai parodė, kad vibracijų perdavimo nuostoliai šioje jungtyje bendruoju atveju yra kiek mažesni nei simetrinėje X formos jungtyje.
7. Gauti vibracijų silpimo „plokštės-strygo“ tipo jungtyse skaičiavimo rezultatai parodė, jog kolonos įvertinimas ir jos skerspjūvio didėjimas plokštės tipo jungtyse padidina vibracijų

perdavimo nuostolius, palyginti su analogiškais jungtimis be kolonos. Šis perdavimo nuostolių augimas daugeliu atvejų neturi reikšmingos įtakos.

8. Sugretinus autoriaus gautus skaičiavimo rezultatus su kitų autorių tyrimų rezultatais, nustatyta, kad gauti vibracijų perdavimo nuostoliai įvairių statybinių konstrukcijų jungtyse atitinka kitų autorių tyrimus. Gautų rezultatų patikimumui įvertinti numatoma atlikti analizuotų jungčių eksperimentinius tyrimus.
9. Pasiūlytos gautų skaičiavimo rezultatų pritaikymo galimybės įvertinti tiesioginį vibracijų sklaidimą pro asimetrines jungtis ir jungtis su kolonomis taikant standartizuotą metodą LST EN 12354.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Beranek, L. L.; Ver, I. L. Noise and vibration control engineering. Principles and application. New York: J. Willey and Sons, 1992. 816 p.
2. Bhattacharya, M. C.; Mulholland, K. A.; Crocker, M. J. Propagation of sound energy by vibration transmission via structural junctions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 18, Issue 2, 1971, p. 221-234.
3. Boisson, C.; Guyader, J. L.; Millot, P.; Lesueur, C. Energy transmission in finite coupled plates. Part II: application to an L shaped structure. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 81, Issue 1, 1982, p. 93-105.
4. Bosmans, I.; Mees, P.; Vermeir, G. Vibration attenuation at junctions of point connected plates. In: Proceedings of "Forum Acusticum 1996", Antwerpen, 1996, p. 109.
5. Bosmans, I.; Mees, P.; Vermeir, G. Structure-borne sound transmission between thin orthotropic plates: analytical solutions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 191, Issue 1, 1996, p. 75-90.
6. Bosmans, I.; Vermeir, G. Diffuse transmission of structure-borne sound at periodic junctions of semi-infinite plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 101, Issue 6, 1997, p. 3443-3456.
7. Bosmans, I.; Nightingale, T. R. T. Modelling structure-borne sound transmission at bolted joints and a stiffening rib. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 109, Issue 3, 2001, p. 999-1010.
8. Bosmans, I.; Vermeir, G.; Mees, P. Coupling loss factors for coupled anisotropic plates. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 250, Issue 2, 2002, p. 351-355.
9. Bosmans, I.; Nightingale, T. R. T. Structure-borne sound transmission in rib stiffened plate structures typical of woodframe buildings. *Journal of Building Acoustics*, Vol. 6, No 3-4, 1999, p. 289-308.
10. Craik, R. J. M. Sound transmission through buildings using statistical energy analysis. England: Gower, 1996. 261 p.
11. Craik, R. J. M. The prediction of sound transmission through buildings using statistical energy analysis. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 82, Issue 4, 1982, p. 505-516.
12. Craik, R. J. M. The effect of random errors on a large statistical energy analysis model. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 91, Issue 1, 1983, p. 57-64.
13. Craik, R. J. M. The noise reduction of flanking paths. *Applied Acoustics*, Vol 22, Issue 3, 1987, p. 163-175.
14. Craik, R. J. M.; Steel, J. A. The effect of workmanship of sound transmission through buildings. Part 1 - airborne sound. *Applied Acoustics*, Vol 27, Issue 1, 1989, p. 57-64.

-
15. Craik, R. J. M.; Evans, D. I. The effect of workmanship of sound transmission through buildings. Part 2 – structure-borne sound. *Applied Acoustics*, Vol 27, Issue 2, 1989, p. 136-145.
 16. Craik, R. J. M. Sound transmission paths through a Statistical Energy Analysis model. *Applied Acoustics*, Vol 30, Issue 1, 1990, p. 45-55.
 17. Craik, R. J. M.; Steel, J. A.; Evans, D. I. Statistical energy analysis of structure-borne sound transmission at low frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 144, Issue 1, 1991, p. 95-107.
 18. Craik, R. J. M.; Barry, P. J. The internal damping of building materials. *Applied Acoustics*, Vol 35, Issue 2, 1992, p. 139-148.
 19. Craik, R. J. M.; Thancanamootoo, A. The importance of in-plane waves in sound transmission through buildings. *Applied Acoustics*, Vol 37, Issue 2, 1992, p. 85-109.
 20. Craik, R. J. M.; Osipov, A. G. Structural isolation of walls using elastic interlayers. *Applied acoustics*, Vol 46, Issue 3, 1995, p. 233-249.
 21. Craik, R. J. M.; Wilson, R. Sound transmission through a parallel plates coupled along a line. *Applied acoustics*, Vol 49, Issue 4, 1996, p. 353-372.
 22. Craik, R. J. M.; Nightingale, T. R. T.; Steel, J. A. Sound transmission through a double leaf partition with edge flanking. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 101, Issue 2, 1997, p. 964-969.
 23. Craik, R. J. M. In-plane wave propagation in buildings. *Applied Acoustics*, Vol 53, Issue 4, 1998, p. 273-289.
 24. Craik, R. J. M.; Smith, R. S. Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: airborne sound. *Applied Acoustics*, Vol 61, Issue 2, 2000, p. 223-245.
 25. Craik, R. J. M.; Smith, R. S. Sound transmission through lightweight parallel plates. Part II: structure-borne sound. *Applied Acoustics*, Vol 61, Issue 2, 2000, p. 247-269.
 26. Craik, R. J. M. The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings. *Applied Acoustics*, Vol 62, Issue 1, 2001, p. 247-269.
 27. Craik, R. J. M.; Bosmans, I.; Cabos, C.; Heron, K. H.; Sarradj, E.; Steel, J.A.; Vermeir, G. Structural transmission at line junctions: a benchmarking exercise. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 272, Issue 3-5, 2004, p. 1086-1096.
 28. Craik, R. J. M.; Galbrun, L. Vibration transmission through a frame typical of timber-framed buildings. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 281, Issue 3-5, 2005, p. 763-782.
 29. Craven, P. G.; Gibbs, B. M. Sound transmission and mode coupling at junctions of thin plates. Part I: representation of problem. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 77, Issue 3, 1981, p. 417-427.

-
30. Cremer, L.; Heckl, M.; Ungar, E. E. Structure borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies. Berlin: Springer Verlag (2nd ed.), 1990. 573 p.
 31. Crocker, M. J.; Price, A. J. Sound transmission using statistical energy analysis. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 9, Issue 3, 1969, p. 469-486.
 32. Cuschieri, J. M. Structural power-flow analysis using a mobility power flow approach of an L-shaped plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 87, Issue 3, 1990, p. 1159-1165.
 33. Cuschieri, J. M. Parametric analysis of the power flow of an L-shaped plate using a mobility power flow approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 91, Issue 5, 1992, p. 2686-2695.
 34. Cuschieri, J. M.; McCollum, M. C. In-plane and out-of-plane waves' power transmission through an L-plate junction using the mobility power flow approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 100, Issue 2, 1996, p. 857-870.
 35. Davies, J. C. Gibbs, B. M. Sound transmission at the corner of concrete plates. *Acustica*, Vol 45, Issue 1, 1980, p. 39-45.
 36. De Langhe, K.; Sas, P.; Vandepitte, D. The use of wave elements for the study of transmission characteristics of beam junctions. *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol 119, 1993.
 37. Fahy, F. J. Sound and structural vibration. Radiation, transmission and response. San Diego: Academic Press, 1987. 309 p.
 38. Fahy, F. J. Foundations of engineering acoustics. London: Academic Press, 2000. 443 p.
 39. Fahy, F. J.; Mohammed, A. D. A study of uncertainty in applications of sea to coupled beam and plate systems. Part I: computational experiments. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 158, Issue 1, 1992, p. 45-67.
 40. Fredö, C. R. A SEA-like approach for the derivation of energy flow coefficients with a finite element model. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 199, Issue 4, 1997, p. 645-666.
 41. Fujiwara, K. Numerical study on the structure-borne sound propagation through the junctions with the blocking-masses. *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol 4, Issue 1, 1983, p. 13-25.
 42. Furukawa, H.; Fujiwara, K.; Ando, Y.; Maekawa, Z. Analysis of the structure-borne sound in an existing building by the SEA method. *Applied Acoustics*, Vol 29, Issue 4, 1990, p. 255-271.
 43. Gerretsen, E. Calculation of the sound transmission between dwelling by partitions and flanking structure. *Applied Acoustics*, Vol 12, Issue 6, 1979, p. 413-433.

-
44. Gerretsen, E. Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings. *Applied Acoustics*, Vol 19, Issue 4, 1979, p. 245-264.
 45. Gerretsen, E. European developments in prediction models for building acoustics. *Acta Acustica*, Vol 2, Issue 3, 1994, p. 205-214.
 46. Gibbs, B. M.; Craven, P. G. Sound transmission and mode coupling at junctions of thin plates. Part II: parametric survey. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 78, Issue 3, 1981, p. 429-435.
 47. Gibbs, B. M.; Tattersall, J. D. Vibrational energy transmission and mode conversion at a corner junction of square section rods. *Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design*, Vol 109, 1987, p. 348-355.
 48. Gibbs, B. M.; Gilford, L. S. The use of powerflow methods for the assessment of sound transmission in building structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 49, Issue 2, 1976, p. 267-286.
 49. Gibbs, B. M.; Gilford, L. S. Prediction by power flow methods of shunt and series damping in building structures. *Applied Acoustics*, Vol 10, Issue 4, 1977, p. 291-301.
 50. Gibbs, B. M. Mode coupling and energy partition of sound in a system of plate junctions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 104, Issue 2, 1986, p. 127-136.
 51. Gibbs, B. M.; Shen, Y. The predicted and measured bending vibrations of an L-combination of rectangular thin plates. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 112, Issue 3, 1987, p. 469-485.
 52. Gibbs, B. M.; Shen, Y. Bending vibrations of a plate combination subject to point excitation. *Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design*, Vol 112, 1990, p. 346-349.
 53. Goyder, H. D. G.; White, R. G. Vibrational power flow from machines into built up structures. Part I: introduction and approximate analysis of beam and plate like foundations. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 68, Issue 1, 1980, p. 59-76.
 54. Goyder, H. D. G.; White, R. G. Vibrational power flow from machines into built up structures. Part II: wave propagation and power flow in beam-stiffened plates. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 68, Issue 1, 1980, p. 77-96.
 55. Goyder, H. D. G.; White, R. G. Vibrational power flow from machines into built up structures. Part III: power flow through isolation systems. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 68, Issue 1, 1980, p. 97-117.
 56. Guyader, J.L.; Boisson, C.; Lesueur, C. Energy transmission in finite coupled plates. Part I: theory. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 81, Issue 1, 1982, p. 81-92.
 57. Guyader, J.L.; Boisson, C.; Lesueur, C.; Millot, P. Sound transmission by coupled structures: application to flanking transmission in buildings. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 106, Issue 2, 1986, p. 289-310.

-
58. Guo, Y.P. Flexural wave transmission through angled structural joints. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 97, Issue 1, 1995, p. 289-297.
59. Guo, Y.P. Effects of structural joints on sound scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 93, Issue 2, 1993, p. 857-863.
60. Heckl, M. Untersuchungen an orthotropen Platten, *Acustica*, Vol 10, 1960, p. 109-115.
61. Heckl, M. Wave propagation on beam-plate systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 33, Issue 5, 1961, p. 640-651.
62. Hopkins, C. Vibration transmission between coupled plates using finite element methods and statistical energy analysis. Part 1: comparison of measured and predicted data for masonry walls with and without apertures. *Applied Acoustics*, Vol 64, Issue 10, 2003, p. 955-973.
63. Hopkins, C. Vibration transmission between coupled plates using finite element methods and statistical energy analysis. Part 2: the effect of window apertures in masonry flanking walls. *Applied Acoustics*, Vol 64, Issue 10, 2003, p. 975-997.
64. Horner, J. L.; White, R. G. Prediction of vibrational power transmission through bends and joints in beam-like structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 147, Issue 1, 1991, p. 87-103.
65. Horner, J. L.; White, R. G. Prediction of vibrational power transmission through jointed beams. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 32, Issue 3, 1990, p. 215-223.
66. Kessissoglou, N. J. Power transmission in L-shaped plates including flexural and in-plane vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 115, Issue 3, 2004, p. 1157-1169.
67. Kessissoglou, N. J. Active attenuation of the wave transmission through an L-plate junction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 110, Issue 1, 2001, p. 267-277.
68. Kessissoglou, N. J.; Pan, J. An analytical investigation of the active attenuation of the plate flexural wave transmission through a reinforcing beam. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 102, Issue 6, 1997, p. 3530-3541.
69. Kihlman, T. Transmission of structure-borne sound in buildings. In: Report 9, National Swedish Institute for Building Research. Stockholm, 1967. 64 p.
70. Kihlman, T.; Pietrzyk, A.; Kropp, W. On the meaning of the sound reduction index at low frequencies. *Acta Acustica*, 1994, Vol 2, p. 379-392.
71. Kim, H.; Kang, H.; Kim, J. Transmission of bending waves in inter-connected rectangular plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 96, Issue 3, 1994, p. 1557-1562.
-

-
72. Kurtze, G.; Tamm, K.; Vogel, S. Modellversuche zur Biegewellendaemmung an Ecken. *Acustica*, 1955, Vol. 5, p. 223-233.
73. Langley, R. S.; Shorter, P. J. The wave transmission coefficients and coupling loss factors of point connected structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 113, Issue 4, 2003, p. 1947–1964.
74. Langley, R. S.; Heron, K. H. Elastic wave transmission through plate/beam junctions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 143, Issue 2, 1990, p. 241-253.
75. Langley, R. S. Elastic wave transmission coefficients and coupling loss factors for structural junctions between curved panels. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 169, Issue 3, 1994, p. 297-317.
76. Leung, R. C.; Pinnington, R. J. Wave propagation through right angled joints with compliance flexural incident wave. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 104, Issue 1, 1990, p. 127-136.
77. Leung, R. C.; Pinnington, R. J. Wave propagation through right-angled joints with compliance: longitudinal incidence wave. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 153, Issue 2, 1992, p. 223-237.
78. Lyon, R. H.; DeJong, R. G. Theory and application of statistical energy analysis. Boston: Butterworth-Heinemann (2nd ed.), 1995. 277 p.
79. Lyon, R. H.; Eichler, E. Random vibrations of connected structures. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 36, Issue 7, 1964, p. 1344-1354.
80. Ljunggren, S. Transmission of structure-borne sound from a beam into an infinite plate. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 100, Issue 3, 1985, p. 309-320.
81. Lohmeyer, G. C. O. Praktische Bauphysik. Berlin: Teubner Verlag, 2001. 712 p.
82. LST EN 12354-1:2001: Statybinė akustika. Projektinis akustinės pastatų kokybės apskaičiavimas remiantis statinio dalių parametrais. 1 dalis. Oro garso tarp patalpų izoliavimas, 63 p.
83. LST EN 12354-1:2001: Statybinė akustika. Projektinis akustinės pastatų kokybės apskaičiavimas remiantis statinio dalių parametrais. 2 dalis. Smūgio garso tarp patalpų izoliavimas, 33 p.
84. Magrans, F. X. Definition and calculation of transmission paths within an S.E.A. framework. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 165, Issue 2, 1993, p. 277-283.
85. McCollum, M. C.; Cuschieri, J. M. Thick plate bending wave transmission using a mobility power flow approach. *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol 88, Issue 3, 1990, p. 1472- 1479.
86. McCollum, M. C.; Cuschieri, J. M. Bending and in-plane wave transmission in thick connected plates using statistical energy analysis. *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol 88, Issue 3, 1990, p. 1480-1495.
-

-
87. Mees, P.; Vermeir, G. Structure-borne sound transmission at elastically connected plates. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 166, Issue 1, 1993, p. 55-76.
 88. Menq, C. H. Modeling and vibration analysis of friction joints. *Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design*, Vol. 111, 1989, p. 71-76.
 89. Moore, J. A. Vibration transmission through frame or beam junctions. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 88, Issue 6, 1990, p. 2766-2776.
 90. Nightingale, T. R. T.; Bosmans, I. Expressions for first-order flanking paths in homogeneous isotropic and lightly damped buildings. *Acta Acustica*, Vol 89, Issue 1, 2003, p. 110-122.
 91. Nightingale, T. R. T.; Halliwell, R. E. Vibration response of building elements in wood frame constructions when excited along an edge. *The Journal of Acoustical Society of America*, Vol 105, Issue 2, 1999, p. 1200-1201.
 92. Orrenius, U.; Finnveden, S. Calculation of wave propagation in rib-stiffened plate structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 198, Issue 2, 1996, p. 203-224.
 93. Osipov, A.; Vermeir, G. Sound transmission in buildings with elastic layers at joints. *Applied Acoustics*, Vol 49, Issue 2, 1996, p. 141-162.
 94. Pedersen, D. B. Estimation of vibration attenuation through junctions of building structures. *Applied Acoustics*, Vol 46, Issue 3, 1995, p. 285-305.
 95. Petersson, B. An approximation for the point mobility at the intersection of two perpendicular plates. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 91, Issue 2, 1983, p. 219-238.
 96. Petersson, B. Structural acoustic power transmission by point moment and force excitation. Part I: beam and frame-like structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 160, Issue 1, 1993, p. 43-66.
 97. Petersson, B. Structural acoustic power transmission by point moment and force excitation. Part II: plate-like structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 160, Issue 1, 1993, p. 67-91.
 98. Rebillard, E.; Guyader, J. L. Vibrational behaviour of a population of coupled plates: hypersensitivity to the connection angle. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 188, Issue 3, 1995, p. 435-454.
 99. Reis, F. Vibration transmission of asymmetric T form junctions, In: Proceedings of 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italy, 2001 September 2-7.
 100. Rindel, J. H. Dispersion and absorption of structure-borne sound in acoustically thick plates. *Applied Acoustics*, Vol 41, Issue 2, 1994, p. 97-111.
 101. Rosenhouse, G. Acoustic wave propagation in bent thin-walled wave guides. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 67, Issue 4, 1970, p. 469-486.

-
102. Sarradj, E. Hochfrequenter Koerperschall im Strukturen. Dissertation Technische Universitaet Dresden, 1998. 115 p, (www.freesea.de).
 103. Sarradj, E. Power transmission coefficients for generic structural junctions, In: Proceedings of CFA/DAGA, 22-25 March 2004, Strasbourg.
 104. Sarradj, E. Calculation of point mobilities at generic multi-plate/beam junctions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 229, Issue 2, 2000, p.411-430.
 105. Schmidt, A. Untersuchungen zur konstruktiven Einflussnahme auf die Koerperschalleitung in ebenen Strukturen, *Konstruktion*, Vol 7-8, 1999, p. 34-39.
 106. Shen, Y.; Gibbs, B. M. An approximate solution for the bending vibration of a combination of rectangular thin plates. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 105, Issue 1, 1986, p. 73-90.
 107. Simmons, C. Structure-borne sound transmission through plate junctions and estimates of sea coupling loss factors using the finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 144, Issue 2, 1991, p. 215-227.
 108. Steel, J. A.; Craik R.J.M. Sound transmission between columns and floors in framed buildings. *Applied Acoustics*, Vol 39, Issue 3, 1993, p. 191-208.
 109. Steel, J. A. Sound transmission between plates in framed structures. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 178, Issue 3, 1994, p. 379-394.
 110. Steel, J. A. Sound transmission between columns and plates. *Canadian Acoustics*, Vol 22, No 3, 1994, p. 25-26.
 111. Steel, J. A.; Craik, R. J. M.; Wilson, R. A study of vibration transmission in a framed building. *Journal of Building Acoustics*, Vol 1, 1994, p. 49-64.
 112. Steel, J. A.; Craik, R. J. M. Statistical energy analysis of structure-borne sound using finite element methods. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 178, Issue 4, 1994, p. 553-561.
 113. Szwer, R. P.; Burroughs, C. B.; Hambric, S. A.; McDevitt, T. E. Power flow in coupled bending and longitudinal waves in beams. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 107, Issue 6, 2000, p. 3186-3195.
 114. Tso, Y. K.; Norwood, C. J. Vibratory power transmission through three-dimensional beam junctions. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 185, Issue 4, 1995, p. 595-607.
 115. Tso, Y. K.; Hansen, C. H. The transmission of vibration through a coupled periodic structure. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 215, Issue 1, 1998, p. 63-79.
 116. Walsh, S.J.; White, R.G. Vibrational power transmission in curved beams. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 233, Issue 3, 2000, p. 455-488.

117. Woehle, W.; Beckmann, T.; Schreckenbach, H. Coupling loss factors for statistical energy analysis of sound transmission at rectangular structural slab joints. Part 1. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 77, Issue 3, 1981, p. 323-334.
118. Woehle, W.; Beckmann, T.; Schreckenbach, H. Coupling loss factors for statistical energy analysis of sound transmission at rectangular structural slab joints. Part 2. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 77, Issue 3, 1981, p. 335-344.
119. Woehle, W. SEA– Computermodele fuer Uebertragung von Schall und Vibrationen in grossen Systemen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universitaet Dresden*, Vol 36, No 3, 1987, 265-268.
120. Woehle, W.; Marx, B. Koerperschalluebertragung in Gebaeuden - Vergleich von Messwerten mit Rechenergebnissen der Statistischen Energieanalyse. *Acustica*, Vol 72, Issue 4, 1990, p. 258-268.
121. Woodhouse, J. An introduction to statistical energy analysis of structural vibration. *Applied Acoustics*, Vol 14, Issue 6, 1981, p. 455-469.
122. Zaborov, V. I. Calculation of sound insulation of barrier constructions in buildings with regard to flanking transmission. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 11, 1970, p. 263-274.
123. Zhang, X. M.; Fatemi, M.; Kinnick, R. R.; Greenleaf, J. F. A model for vibration transmission of light-heavy structures. *Applied Acoustics*, Vol 64, Issue 2, 2003, p. 213-227.
124. The Construction Products Directive. Council Directive 89/106/EEC: <http://europa.eu.int/comm/enterprise/construction/internal/cpd/cpd.htm#a1> (žiūrėta 2005-07-27).
125. Acoustic dictionary: <http://www.eaa-fenestra.org/AD> (žiūrėta 2004-09-27).
126. Lietuvos mokslų akademija. Statybos terminų žodynas. Vilnius: Lietuvos mokslas, 2002. 880 p.
127. Будрин, С. У.; Никифоров, А. С. Прохождение волн через различные соединения пластин. *Акустический журнал*, Вып 9, Но 4, 1964, стр. 333-336.
128. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкции. Москва: Стройиздат, 1969. 180 стр.
129. Ковригин, С. Д.; Стаускис, В. К.; Терзибашьянц, М. С. О влиянии акустических мостиков на звукоизоляцию междуэтажных перекрытий. *Жилищное строительство*, Но 10, 1973.
130. Ковригин, С. Д.; Стаускис, В. К. Исследование влияния акустических мостиков на изоляцию ударного и воздушного шума междуэтажными перекрытиями. Сборник тезисов докладов II Республиканской конференций “Шум и вибрации“, Вильнюс, 1973.

131. Крейтан, В. Г. Особенности передачи структурного шума в жилых домах с железобетонным каркасом. *Жилородое строительство*, Но 2, 1995, стр. 20-22.
132. Крейтан, В. Г. Практические приложения метода расчета звукоизоляций структурного шума соединениями конструкций в узлах зданий. *Архитектурно – строительная акустика*, Вып 1, Но 1, 1992, стр. 42-51.
133. Крейтан, В. Г. Защита от внутренних шумов в жилых домах. Москва: Строииздат, 1990. 260 стр.
134. Стаускис, В. К. Звукоизоляция ограждающих конструкций жилых и общественных зданий и пути ее улучшения. Аналитический обзор. Вильнюс: Лит. НИИНГИ, 1973. 76 стр.
135. Стаускис, В. К.; Терзибашьянц, М. С. Прохождение звуковой энергии через акустические мостики. Рефераты докладов VIII Всесоюзной акустической конференции, Москва, 1973.
136. Стаускис, В. К. Исследование акустических свойств ограждающих конструкций экспериментального крупнопанельного жилого дома 120В. Отчет, Вильнюс, 1975. 68 стр.
137. Стаускис, В. К. Исследование акустических свойств ограждающих конструкций и их узлов жилого дома новой серии 120К и разработка рекомендаций. Отчет, Вильнюс, 1976. 92 стр.