

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Mihael HOLCMAN

AKUSTIČNA ANALIZA ZVOČNIH OMARIC

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

ACOUSTIC ANALYSIS OF SPEAKER ENCLOSURES

GRADUATION THESIS

University Studies

Ljubljana, 2016

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za mehanske obdelovalne tehnologije, Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja imenoval doc. dr. Mirana Merharja, za so mentorja doc. dr. Dominiko Gornik Bučar, za recenzenta prof. dr. Željko Goriška.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Mihael Holcman

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*862:677.017.54
KG	Zvočna omarica/zvok/nihanje/modalna analiza
AV	HOLCMAN, Mihael
SA	MERHAR, Miran (mentor)/GORNIK BUČAR, DOMINIKA (somentor)/GORIŠEK, Željko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, cesta VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	AKUSTIČNA ANALIZA ZVOČNIH OMARIC
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	X, 47 str., 2 pregl., 45 sl., 1 pril., 10 vir.
IJ	Sl
JI	sl/en
AI	V nalogi smo raziskali vpliv MDF ter iverne plošče na akustične lastnosti zvočnih omaric. Najprej smo narejenim vzorcem izmerili dušilne lastnosti materiala, kjer smo raziskali tudi vpliv bitumna. Ugotovili smo, da ima MDF nižje dušenje kot iverna plošča. Nato smo iz obeh materialov izdelali zvočne omarice, kjer smo uporabili plošče debeline 12 mm, 19 mm, 22 mm in 28 mm. Narejenim omaricam smo z modalno analizo določili lastne frekvence stranic omarice. Omarice smo modelirali tudi z metodo končnih elementov in z modalno analizo ravno tako določili lastne frekvence stranic omarice. Ugotovili smo dobro ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi lastnimi frekvencami stranic omarice. Omaricam smo določili tudi prenosne funkcije, kjer smo v omarice vgradili zvočniško enoto, s katero smo vzbujaali stranice omaric. Na podlagi izmerjenih prenosnih funkcij omaric smo ugotovili, da omarica, narejena iz MDF plošče debeline 19 mm ustreza splošnim zahtevam zvočnih omaric in da za omarico takšnih dimenzij ni potrebe po stranicah večjih debelin.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Dn
DC	UDK 630*862:677.017.54
CX	Speaker enclosure/sound/resonance/modal analysis
AU	HOLCMAN, Mihael
AA	MERHAR, Miran (supervisor)/GORNIK BUČAR, Dominika (co-supervisor)/GORIŠEK, Željko (reviewer)
PP	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2016
TI	ACOUSTIC ANALYSIS OF SPEAKER ENCLOSURES
DT	Graduation thesis (University studies)
NO	X, 47 p., 2 tab., 45 fig., 1 ann., 10 ref.
LA	Sl
AL	sl/en
AB	In the thesis the influence of MDF and chipboard material on the acoustic properties of speaker enclosures was studied. First, the damping properties of the material with and without bitumen were measured. It was found out, that MDF has much lower damping values as particle board. Then identical inner volume speaker enclosures from both materials with panel thickness of 12 mm, 19 mm, 22 mm and 28 mm were constructed. The modal analyses of all enclosures were made and the boxes were modelled with the finite element method. The analysis showed very good correlation between the measured and modelled frequencies. The transfer functions of the boxes with the build in speakers were also measured. Based on this measurements it was found out that the enclosure, made from MDF board thickness of 19 mm corresponds well to the general requirements of the loudspeaker boxes and that for the enclosure of such dimensions there is no need for larger thicknesses panel.

KAZALO VSEBINE

Ključna dokumentacijska informacija	III
Key words documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 HIPOTEZE	2
1.3 CILJI	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 VLAKNENE PLOŠČE	3
2.2 IVERNE PLOŠČE	3
2.3 ZVOK	3
2.3.1 Delitev zvočnih valovanj	4
2.3.2 Območje slišnosti ušesa	4
2.3.3 Značilnosti zvočnega valovanja	5
2.3.4 Frekvenca zvočnega valovanja	5
2.3.5 Valovna dolžina	6
2.3.6 Hitrost zvoka	6
2.3.7 Zvočni tlak	7
2.3.8 Zvočna intenzivnost	8
2.3.9 Zvočna moč	8
2.3.10 Prostorska akustika	9
2.4 NIHANJE	11
2.4.1 Lastno dušeno nihanje	11

2.4.2	Vsiljeno dušeno nihanje	15
2.4.3	Nihanje prožnih teles	18
2.4.4	Stoječe valovanje	19
2.5	Hrup	20
2.5.1	Hrup zaradi odboja in vibracij togih struktur	20
2.5.2	Koeficient prepustnosti zvočnega valovanja	21
2.5.3	Izolirnost plošče	21
3	MATERIALI IN METODE	23
3.1	MATERIALI	23
3.2	PRIPRAVA VZORCEV	24
3.3	METODE DELA	25
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	28
4.1	OSNOVNE LASTNOSTI MATERIALA	28
4.2	ANALIZA OHIŠJA 12 MM MDF	32
4.3	MODALNA ANALIZA OHIŠIJ	34
4.4	PRIMERJAVA RAZMERIJ AMPLITUD	36
5	SKLEPI	39
6	POVZETEK	40
7	VIRI	41
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Hitrost zvoka in gostota medija (Čudina, 2014)	7
Preglednica 2: Prikaz vseh izmerjenih in izračunanih podatkov vzorcev uporabljenih debelin in materialov	29

KAZALO SLIK

Slika 1: Longitudinalno in transversalno valovanje (Belšak, Prezelj, 2013)	4
Slika 2: Frekvenčna in jakostna polja spektra slišnega polja (Čudina, 2014)	5
Slika 3: Zvok kot časovna spreminjajoča se tlačna motnja okoli tlaka medija (Belšak, Prezelj, 2013)	7
Slika 4: Neusmerjen zvočni vir (Čudina, 2014)	8
Slika 5: Gledališče v Epidauros (Gledališče..., 2016)	9
Slika 6: a) Optimalni odmevni časi v odvisnosti od prostornine in namena uporabe; b) Priporočeni odmevni časi med 500 in 1000 Hz v odvisnosti od prostornine in namena uporabe (Čudina, 2014)	10
Slika 7: Lastno dušeno nihanje (Belšak, Prezelj, 2013)	11
Slika 8: Lastno nihanje z nadkritičnim dušenjem (Boltežar, 2006)	13
Slika 9: Lastno nihanje s kritičnim dušenjem za tri različne začetne hitrosti (Boltežar, 2006)	13
Slika 10: Lastno dušeno nihanje s podkritičnim dušenjem (Boltežar, 2006)	14
Slika 11: Vsiljeno dušeno nihanje (Belšak, Prezelj, 2013)	15
Slika 12: Dinamični faktor odziva v povezavi z razmerjem frekvenc in razmernikom dušenja (Belšak, Prezelj, 2013)	17
Slika 13: Valovanje strune (Pain, 1993)	19
Slika 14: Stoječe valovanje z vozlišči in hrbti (Strnad, 2010)	19
Slika 15: Deli odbitega (2), absorbiranega (3), prenesenega po strukturi (4) in prepuščenega (5) vpadnega zvočnega valovanja (1) (Čudina, 2014)	20
Slika 16: Potek izolirnosti plošče v odvisnosti od frekvence (Čudina, 2014)	22
Slika 17: Ohišje debeline 12 mm	24
Slika 18: Merjenje iznihavanja 12 mm iverke s prilepljenim bitumnom	25
Slika 19: Modalna analiza na 12 mm MDF omarici.	27
Slika 20: Merjenje prenosne funkcije bočne stene 19 mm debelega MDF ohišja, z induktivnim merilnikom	27
Slika 21: Iznihavanje MDF vzorcev debeline 12 mm, brez in z bitumnom	28
Slika 22: Primerjava modula elastičnosti med surovo iverko in MDF ploščo, v odvisnosti od debeline	30
Slika 23: Primerjava dušilne mere MDF vzorcev brez in z bitumnom, v odvisnosti od debeline	31
Slika 24: Primerjava dušilne mere vzorcev surove iverke brez in z bitumnom, v odvisnosti od debeline	31
Slika 25: Modalna analiza zvočnih omaric MDF 12 mm bočno, zadaj, zgoraj	32
Slika 26: Nihajni načini 12 mm MDF zvočne omarice izračunane z metodo končnih elementov	33

Slika 27: Primerjava modalne analize, mikrofon na razdalji 0,1 m in 1 m in induktivnega merilca na zadnji steni 12 mm MDF ohišja	34
Slika 28: Primerjava modalnih analiz zvočnih omaric surova iverna plošča - bočno	35
Slika 29: Primerjava modalnih analiz zvočnih omaric MDF – bočno	35
Slika 30: Primerjava modalnih analiz zvočnih omaric debeline 19 mm - bočno	36
Slika 31: Prikaz razmerij amplitud nihanj bočnih stranic zvočnih omaric iz ivernih plošč	37
Slika 32: Prikaz amplitud nihanj bočne stranice zvočnih omaric iz MDF plošč	37
Slika 33: Primerjava amplitud nihanj stranic iz MDF in ivernih plošč, debelin 12 mm in 28 mm	38

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016

KAZALO PRILOG

Priloga A: Modalna analiza zvočnih omaric

Priloga B: Nihajni načini 12 mm mdf ohišja

1 UVOD

Kvalitetni avdiofilski zvočniki so objekt, ki združuje najbolj prefinjeno obdelavo lesenih materialov z ostalimi produkti sodobne elektro-akustične industrije. Ohišje zvočnika je potrošnikovo prvo in najpomembnejše doživetje kot celote izdelka v vizualnem in kvalitativnem smislu. V poplavi raznovrstnih cenениh umetnih materialov, ki se vedno bolj uporabljajo v segmentu avdio naprav, materiali na osnovi naravnega lesa zagotavljajo plemenit, dolgotrajen in kvaliteten vtis.

Zvočnik kot celota je v temelju sestavljen iz elektromehaničnih pretvornikov; zvočniških enot, frekvenčne kretnice ter ustreznega ohišja. Navadno je uporabljena kombinacija več zvočniških enot, ki skupno kvalitetno reproducirajo avdio signal v razponu od 20 Hz do 20 kHz. Frekvenčna kretnica razdeli signal iz ojačevalca na ustrezno področje za uporabljene enote. Zvočniška enota kot elektrodinamična naprava s svojim gibanjem povzroča valovanje zraka, posledično pa prihaja do vzbujanja zvočniškega ohišja. V določenih primerih pride do resonančnega nihanja, kar se lahko sliši kot popačenje celotnega zvočnega spektra, najbolj izrazito na področju nizkih frekvenc. Idealno ohišje bi bilo akustično mrtvo, kar bi ohranilo reproduciran zvočni signal zvočnika v popolnosti. Takšna ohišja bi seveda v praksi zahtevala izredno toge in inertne materiale, ki jih je nemogoče uporabiti zaradi ekonomskih razlogov, pa tudi zaradi vprašljive uporabnosti za potrošnika. Zaradi dostopnosti, razširjenosti, cene in lahke obdelave lesa je ta še vedno skoraj izključna osnova za hifi zvočniška ohišja, skupaj s problemom, ki jih les kot material prinaša.

Proizvajalci zvočnikov se s problemom resonančnih nihanj ohišij spoprijemajo na veliko načinov. Kakovostno in togo ohišje se realizira že s pravilno izbiro osnovnega materiala, njegovimi dimenzijami in konstrukcijo. Veliko proizvajalcev se zaradi togosti ohišja odloča za zahtevnejše ovalne oblike s prednapetimi ploščami, saj konstrukcija povečane togosti doprinese tudi k zmanjševanju notranjih odbojev zvoka. Dodatna izboljšanja se dosegajo z notranjimi prekatmi, ki povečajo togost ohišja in zvišajo lastne frekvence na višje vrednosti. Priporočljiv je tudi dodaten notranji dušilni nanos iz materialov z visokim faktorjem dušenja.

Namen te diplomske naloge je primarno razsvetliti problem resonančnih nihanj ohišij v najnižjem slišnem spektru, kjer so ta najbolj izrazita in moteča. V zvočniku nizkotonska enota za svoje delovanje porabi največ moči, do 70% celotnega spektra, pripeljanega iz ojačevalca in posledično največ energije tudi odda v ohišje. Zato bomo meritve opravljali samo z nizkotonsko zvočno enoto, v frekvenčnem področju od 20 Hz do 2000 Hz. Za meritve bomo izdelali in uporabili več ohišij enakih notranjih dimenzij, vendar iz različnih materialov in debelin.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Zvočniška enota, ki je vgrajena v omarico, s svojim gibanjem membrane povzroča valovanje zraka in s tem vzbuja ohišje. V primeru tankih stranic ohišja in materialov z nizkim dušenjem, lahko pride do resonančnih nihanj ohišja. Povečane amplitude sten ohišja pa se zaznajo kot popačenje zvočnega spektra, največkrat na področju nizkih frekvenc. Idealno ohišje bi bilo popolnoma togo, kar pa v praksi ni izvedljivo. Izdelovalci ohišij se tem problemom skušamo izogniti z uporabo različnih materialov in različnimi konstrukcijskimi zasnovami ohišja.

1.2 HIPOTEZE

Predpostavljamo, da imajo zvočniki izdelani iz mdf plošč resonance na višjih frekvencah in posledično tudi nižje amplitude nihanja sten.

Predpostavljamo, da povečanje debeline sten zvočnika zviša togost ohišja in s tem zviša resonančne frekvence in zmanjša amplitudo nihanja.

Predpostavljamo, da hidroizolacijski trak (v nadaljevanju bitumen) izboljša dušilne lastnosti materiala.

Predpostavljamo, da bomo zaznali vpliv nihanja sten zvočnika pri merjenju prenosnih funkcij z mikrofonom v neposredni bližini sten zvočnika, prav tako pa tudi na razdalji 1 metra.

1.3 CILJI

Cilj naloge je ugotoviti vpliv uporabljenih plošč (mdf in iverna plošča) in debeline plošč na resonančne frekvence in amplitude nihanja sten zvočnika. Poizkušali bomo praktično zaznati te vplive na prenosno funkcijo. Ohišja bomo modelirali tudi z metodo končnih elementov in preverili uporabnost metode pri načrtovanju in izdelavi hi fi zvočnih enot.

2 PREGLED OBJAV

2.1 VLAKNENE PLOŠČE

Vlaknene plošče so izdelane iz vlaken lesa ali drugih lignoceluloznih surovin (lan, konoplja, sladkorni trs...), ki jih z dodatkom lepil stisnemo v ploščo. Osnovni gradniki plošč so vlakna, ki jih dobimo z razvlaknjevanjem sekancev. Glede na način proizvodnje jih ločimo na plošče, izdelane po mokrem postopku in plošče izdelane po suhem postopku. Glavna razlika obeh postopkov je, kako vlakna medsebojno povežemo v ploščo. Po gostoti jih ločimo na lahke plošče ($450\text{--}600\text{ kg/m}^3$), plošče s srednjo gostoto, znane kot MDF plošče ($600\text{--}800\text{ kg/m}^3$) in zelo goste plošče (nad 800 kg/m^3) (Čermak, 1998).

2.2 IVERNE PLOŠČE

Iverne plošče so izdelane iz iverja lesa ali drugih lignoceluloznih snovi, ki jih zlepimo v dovolj trdno tvorivo s sintetičnimi lepili, toploto in ustreznim tlakom. Po strukturi ločimo enoslojne plošče, ki so izdelane iz iverja ene velikosti, troslojne plošče, ki imajo zunanja sloja iz drobnejšega iverja, srednji sloj pa iz grobega iverja, in plošče z enakomernim prehodom iverja. Po gostoti ločimo lahke plošče (do 500 kg/m^3), normalne plošče (500 do 800 kg/m^3) in zelo goste plošče (nad 800 kg/m^3) (Čermak, 1998).

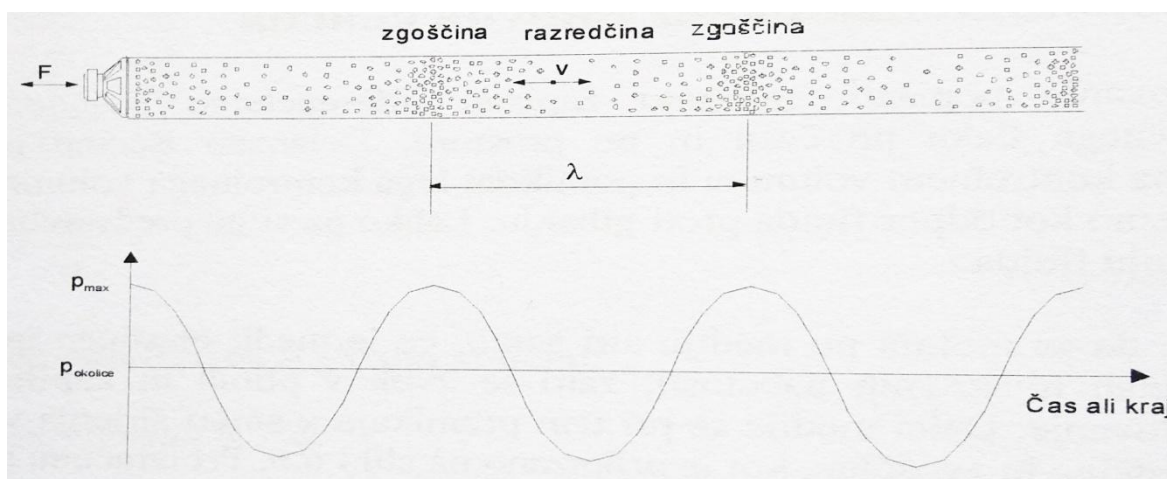
2.3 ZVOK

Zvok, oziroma zvočno valovanje je mehansko nihanje v elastičnem mediju s frekvencami med 20 Hz in 20 kHz (slišno območje). Zaznavamo ga kot časovno spreminjajočo se majhno tlačno motnjo, ki se spreminja okoli ravnotežnega tlaka medija. Glede na medij širjenja ga delimo na aerodinamični zvok, ki se širi v plinih, hidrodinamični zvok, ki se širi v tekočinah in strukturni zvok, ki pa se širi v trdih telesih. V vakuumu pa zvok ne nastaja in se tudi ne širi.

2.3.1 Delitev zvočnih valovanj

Zvočna valovanja delimo glede na smer gibanja materialnih delcev, obliko širjenja, obliko spektra in glede na časovni potek.

Glede na smer gibanja materialnih delcev ločimo longitudinalno (vzdolžno) in transversalno (prečno) zvočno valovanje (slika 1). Pri longitudinalnem valovanju se pojavlja odmik delcev iz ravnovesne lege v smeri potovanja valov, zato se pojavljajo zgoščine in razredčine. Pojavlja se v tekočih in plinskih medijih. Na hitrost širjenja longitudinalnih valov vpliva stisljivost in gostota snovi. Kadar pa prihaja do odmika delcev pravokotno glede na smer gibanja valovanja, govorimo o transversalnem valovanju. Do transversalnega valovanja prihaja v trdih medijih, v tekočih in plinskih pa ne. Govorimo torej o strukturalnem zvoku, ki ga lahko prikažemo s sinusno krivuljo.

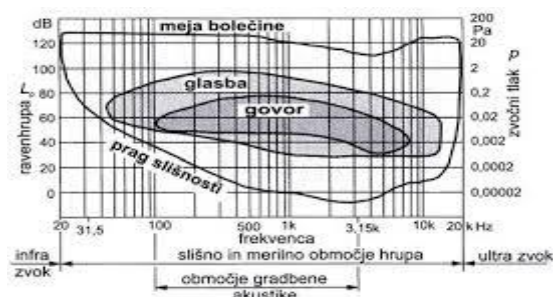


Slika 1: Longitudinalno in transversalno valovanje (Belšak, Prezelj, 2013)

2.3.2 Območje slišnosti ušesa

Človek lahko zaznava tone, zvone, šume in pike samo na določenih frekvencah in višinah zvočnega tlaka in še to se močno spreminja s starostjo in zdravjem poslušalca. Mlad poslušalec lahko sliši frekvence med 20 Hz in 20 kHz. Pod 20 Hz je območje infrazvoka, ki ga več ne slišimo, ga pa mehansko občutimo. Nad 20 kHz pa je območje ultrazvoka, katerega pa zelo dobro zaznavajo in izkoriščajo nekatere živali (npr.: kiti, psi, netopirji...).

Glede na višino zvočnega tlaka pa človek zaznava jakosti med $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, kar predstavlja prag slišnosti, do 20 Pa ali meje bolečine. Torej od 0 do 120 dB, kar je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Frekvenčna in jakostna polja spektra slišnega polja (Čudina, 2014)

2.3.3 Značilnosti zvočnega valovanja

Zvočno valovanje je podano s frekvenco, valovno dolžino in hitrostjo širjenja zvoka.

2.3.4 Frekvenca zvočnega valovanja

Frekvenca zvočnega valovanja je podana s številom polnih nihajev, oziroma tlačnih sprememb v eni sekundi. Podaja se z enoto Hertz (Hz) ali s^{-1} . Frekvenco dobimo iz naslednje zveze (en. 1):

$$\nu = \frac{1}{t} \quad \dots(1)$$

- ν frekvenca (Hz)

- t čas (s)

2.3.5 Valovna dolžina

Valovna dolžina ali perioda definira razdaljo med dvema zaporednima krajevnima točkama. Odvisna je od medija in frekvence zvočnega valovanja. Dobimo jo z razmerjem med hitrostjo in frekvenco zvoka po naslednji zvezi (en. 2) (Čudina, 2014):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = c * t \quad \dots(2)$$

- λ valovna dolžina (m)

- c hitrost zvoka (m/s)

- ν frekvenca (Hz)

- t čas (s)

2.3.6 Hitrost zvoka

Hitrost zvoka predstavlja hitrost, s katero se zvočno valovanje širi v mediju. Zato je odvisna od lastnosti medija po katerem se širi. Najpomembnejši lastnosti sta gostota in stisljivost. Izračunamo jo z naslednjimi enačbami (en. 3 do 5)(Čudina, 2014):

- plini

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa * R * t} \quad \dots(3)$$

- tekočine

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \dots(4)$$

- toga telesa

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots(5)$$

- κ razmerje specifičnih toplot ()

- ρ gostota medija (kg/m³)

- R plinska konstanta (J/kg·K)

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016

- T absolutna temperatura (K)
- p tlak (Pa)
- K stisljivost (Pa)
- E modul elastičnosti (Pa)

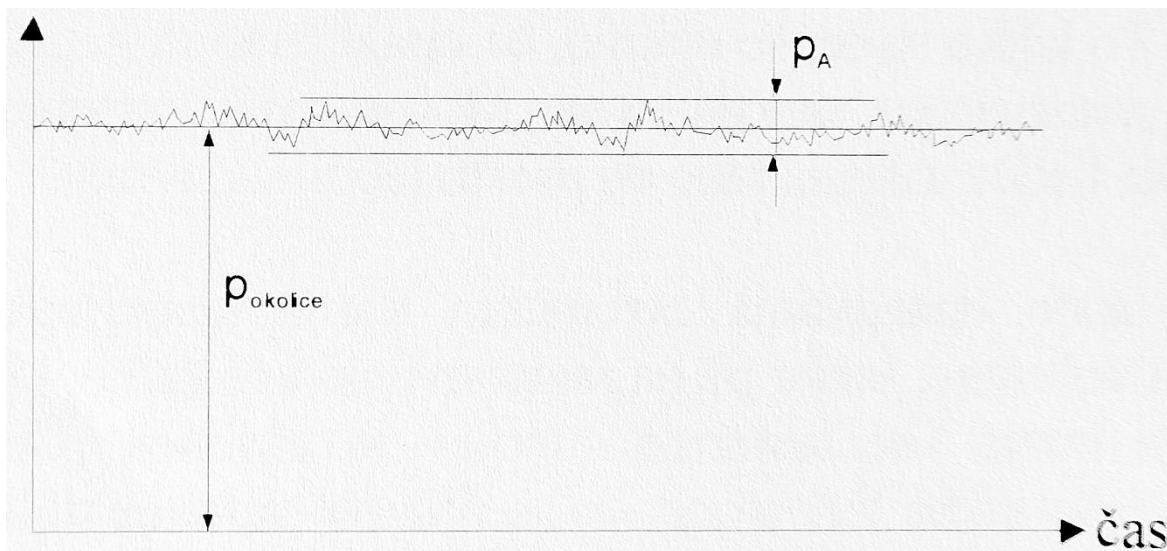
V preglednici 1 so navedene hitrosti zvoka in gostota medija po katerem se zvok širi.

Preglednica 1: Hitrost zvoka in gostota medija (Čudina, 2014)

Snov	jeklo	steklo	beton	opeka	les	voda	pluta	guma	zrak
c m/s	5200	~5000	4000	4300	~4000	1480	500	60÷150	343
ρ kg/m ³	7900	~2700	2000	1500	~500	1000	200	1000÷2000	1,2

2.3.7 Zvočni tlak

Zvočni tlak (p_A) je spreminjajoči se tlak zvočnega valovanja okoli medija. V primeru zvočnega valovanja v zraku je to atmosferski tlak 10^5 Pa (slika 3).



Slika 3: Zvok kot časovna spreminjajoča se tlačna motnja okoli tlaka medija (Belšak, Prezelj, 2013)

2.3.8 Zvočna intenzivnost

Zvočna intenzivnost je energija, ki gre skozi enoto površine v enoti časa. Dobi se iz zvočnega tlaka in hitrosti delcev. Enačba (en. 6) se glasi (Čudina, 2014):

$$I = p \cdot u \quad \dots(6)$$

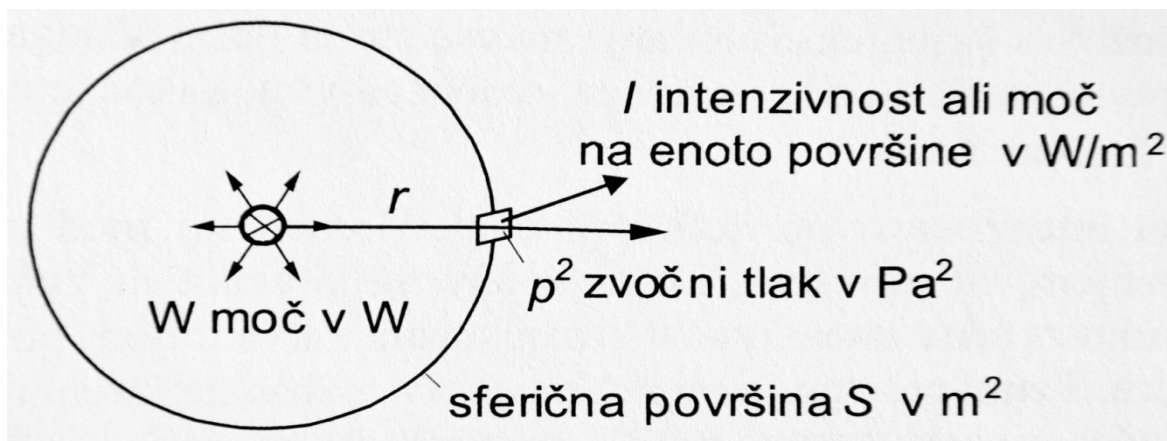
- I zvočna intenzivnost (W/m^2)

- p zvočni tlak (Pa)

- u hitrost delcev (m/s)

2.3.9 Zvočna moč

Zvočna moč je zvočna energija, ki jo proizvaja zvočni vir v obliki zvočnih valov. Valovi se širijo od vira skozi medij, s katerim je obdan vir na vse strani. Zaradi ovir in izgub se moč ne širi enakomerno po vsem mediju. Posledično se manjša z večanjem razdalje med virom in merjeno točko. Slika 4 prikazuje neusmerjen zvočni vir, postavljen v središču površine.



Slika 4: Neusmerjen zvočni vir (Čudina, 2014)

Enačba (en. 7) za zvočno moč se glasi (Čudina, 2014):

$$W = I \cdot S \quad \dots(7)$$

- W zvočna moč (W)

- I zvočna intenzivnost, merjena na razdalji r od vira (W/m^2)

- S površina, ki obdaja zvočni vir (m^2)

2.3.10 Prostorska akustika

Prostorska akustika je ena najstarejših ved na področju akustike. Obravnava obnašanje zvoka v prostoru, saj je kakovost prenosa zvočnih informacij odvisna prav od tega. Prostorska akustika je odvisna od namembnosti prostora. V prostorih kjer se govori, je pomembna dobra slišnost in razumljivost govora, kjer se izvaja glasba je pomembna dobra akustična ureditev, v industriji pa ne sme biti preveč hrupa in odbojni čas mora biti čim krajši. Slika 5 prikazuje gledališče v Epidauros, ki je znamenito zaradi svoje izjemne prostorske akustike, saj se vsak najšibkejši zvok sliši vse do zadnje vrste.



Slika 5: Gledališče v Epidauros (Gledališče..., 2016)

Najprej so za vrednotenje akustike prostora uporabljali samo odmevni čas T_{60} , vendar so kasneje ugotovili, da ta podatek ni dovolj, saj so imele dvorane z enakim odmevnim časom popolnoma drugačno akustiko v smislu dobro in slabo. Zato so se uvedle še druge vrednosti kot so:

- začetni čas reverberacije EDT
- sredinski čas TS
- odziv prostora na akustični impulz IR
- razumljivost govora D_{50}
- stranski odboj zvoka LE
- glasnost G
- poudarjen zvok nizkih frekvenc $BR...$

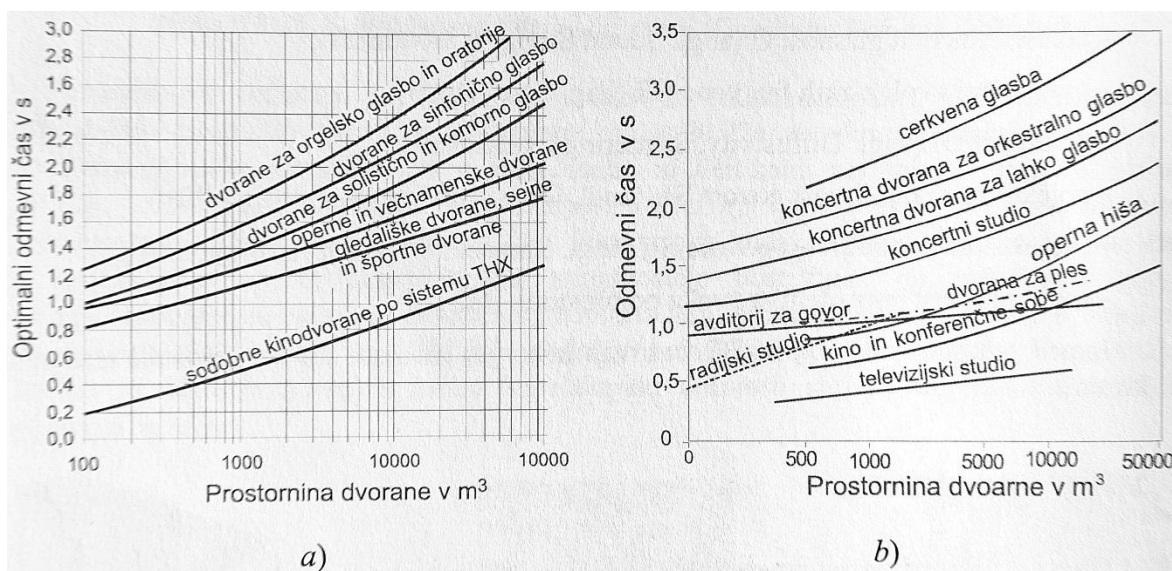
2.3.10.1 Odmevni čas T_{60}

V zaprtih prostorih prihaja do odbijanja zvoka od sten in predmetov, ki so v prostoru, zato zvok slišimo tudi po prenehanju delovanja zvočnega vira. Ta čas se imenuje odmevni čas in je zelo pomemben v prostorski akustiki. Pri odmevnem času T_{60} se meri čas, ki je potreben, da se zvočni tlak zmanjša za 60 dB od svoje prvotne vrednosti, kar pomeni, da pade na eno milijoninko od prvotne vrednosti. Za določanje odmevnega časa je najbolj znana Sabinejeva enačba (en. 8) (Čudina, 2014):

$$t_{60,Sab} = \frac{0,163 \cdot V}{\alpha \cdot S} \quad \dots(8)$$

- $t_{60,Sab}$ odmevni čas (s)
- 0,163 konstanta (s/m)
- V prostornina prostora (m^3)
- α absorpcijski koeficient ()
- S absorpcijska površina (m^2)

Optimalni odmevni čas je odvisen tudi od prostornine in namembnosti dvorane, kar je prikazano na sliki 6.



Slika 6: a) Optimalni odmevni časi v odvisnosti od prostornine in namena uporabe; b) Priporočeni odmevni časi med 500 in 1000 Hz v odvisnosti od prostornine in namena uporabe (Čudina, 2014)

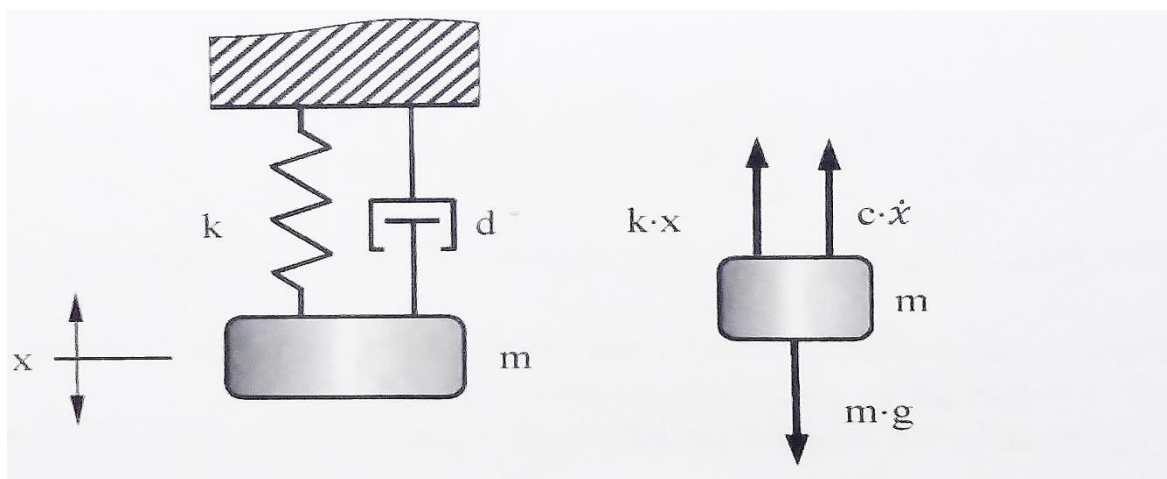
2.4 NIHANJE

Nihanje je vsako časovno periodično gibanje fizikalnih spremenljivk okoli ravnovesne lege. Da sistem zaniha, se morajo poleg začetne vzbujaalne sile, ki ga premakne iz ravnovesne lege, pojaviti še povratne sile, ki pa želijo med nihanjem sistem vrniti v ravnovesno lego. Kadar se pojavita samo ti dve sili, govorimo o nedušenem nihanju, ki predstavlja idealiziran sistem in v realnosti ni mogoč. V realnih sistemih se vedno ponavljajo še dušilne sile, takrat pa govorimo o dušenem nihanju.

Kadar na sistem vplivajo samo povratne in dušilne sile, zunanjih vplivov pa ni, nastopi lastno nihanje sistema. Da pride do lastnega nihanja, moramo najprej sistem vzbuditi, da zapusti statično ravnovesno lego. Kako je sistem vzbujen, podamo z začetnimi oziroma robnimi pogoji. Vsiljeno nihanje pa nastopi, kadar na sistem med nihanjem vpliva tudi vzbujaalna sila.

2.4.1 Lastno dušeno nihanje

Dušeno nihanje nastopi, kadar upoštevamo izgube energije v sistemu. To pomeni, da se amplituda nihanja zmanjšuje in po določenem času se sistem ustavi v svoji ravnovesni legi. Model lastnega dušenega nihanja je viden na sliki 7.



Slika 7: Lastno dušeno nihanje (Belšak, Prezelj, 2013)

Diferencialna enačba za lastno dušeno nihanje se glasi (en. 9)(Belšak, Prezelj, 2013)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (\text{N}) \quad \dots(9)$$

- m masa togega telesa (kg)
- k togostni koeficient vzmeti (N/m)
- $\ddot{x}$ pospešek (m/s^2)
- c koeficient dušenja (Ns/m)

njena rešitev pa je (en. 10)(Čudina, 2014):

$$x = e^{-(c/2m)t} (A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) = C \cdot e^{-(C/2m)t} (\sin \omega_d t + \theta) \quad \dots(10)$$

- ω_d krožna lastna frekvenca dušenih nihanj
- x pomik v navpični smeri (m)
- A in B konstanti podani z začetnimi pogoji
- C srednja vrednost med A in B
- θ fazni kot

Povezava med ω in ω_d je sledeča (en. 11)(Čudina, 2014):

$$\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \omega \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \dots(11)$$

- ζ razmernik dušenja ()

Iz enačbe je razvidno, da je ω enak ω_d v primeru, če je c enak 0.

Kritično dušenje nastopi ob enakih vrednostih izrazov dušenja in togosti sistema (en. 12); Belšak, Prezelj, 2013). Takrat je ω_d enak 0

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m} \quad \dots(12)$$

In iz enačbe dobimo kritični faktor dušenja, ki ga zapišemo (en. 13)(Belšak, Prezelj, 2013):

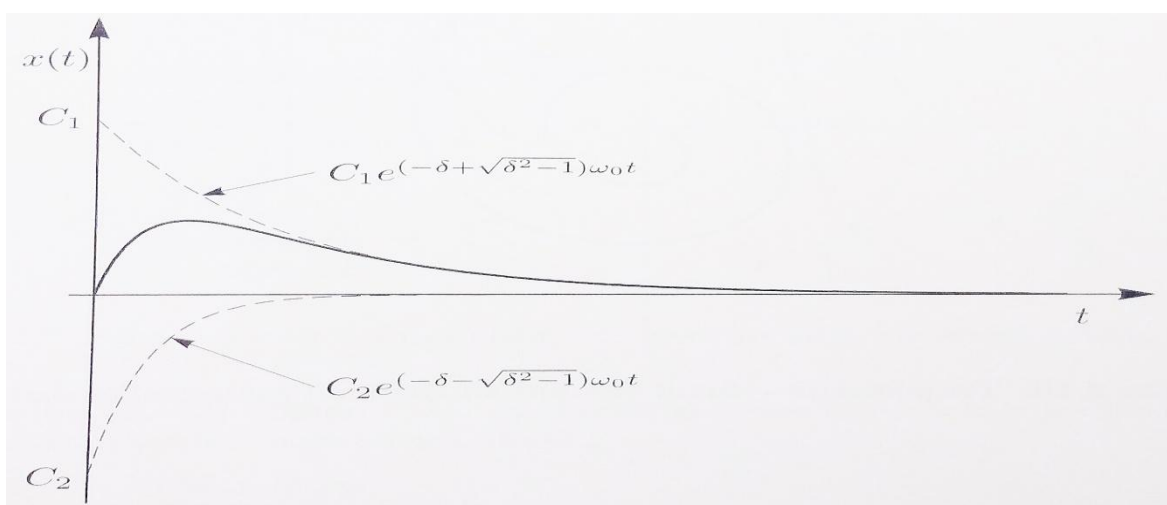
$$c_{kr} = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega \quad \dots(13)$$

Razmerje med dušenjem (c) in kritičnim dušenjem (c_{kr}) nam poda razmernik dušenja (en. 14)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}} \quad \dots(14)$$

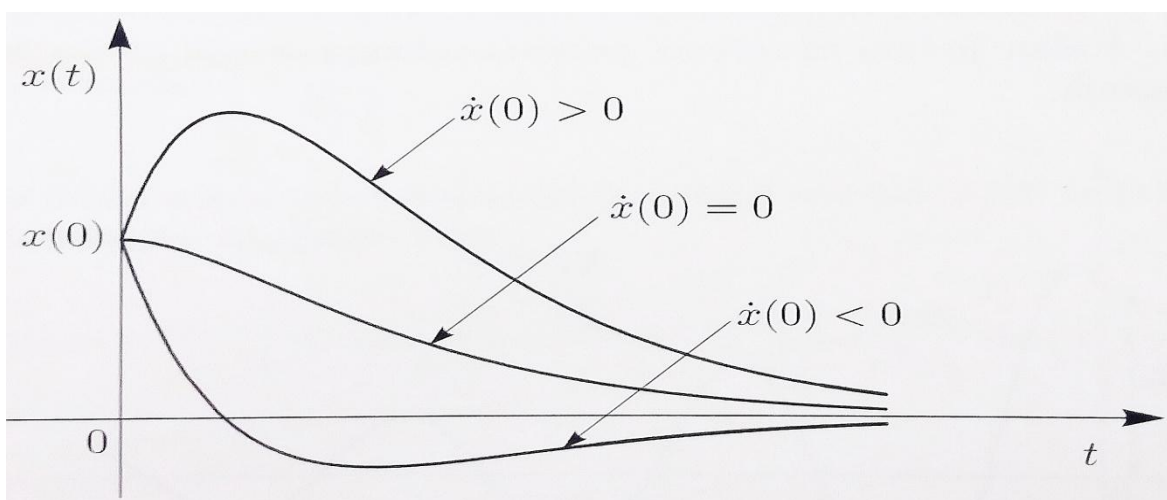
Glede na vrednost razmernika dušenja lahko delimo dušenje na tri področja:

- Nadkritično dušenje (slika 8) nastopi, kadar je razmernik večji od 1, pomeni da je $c > c_{kr}$. V tem primeru nihanje ne nastopi.



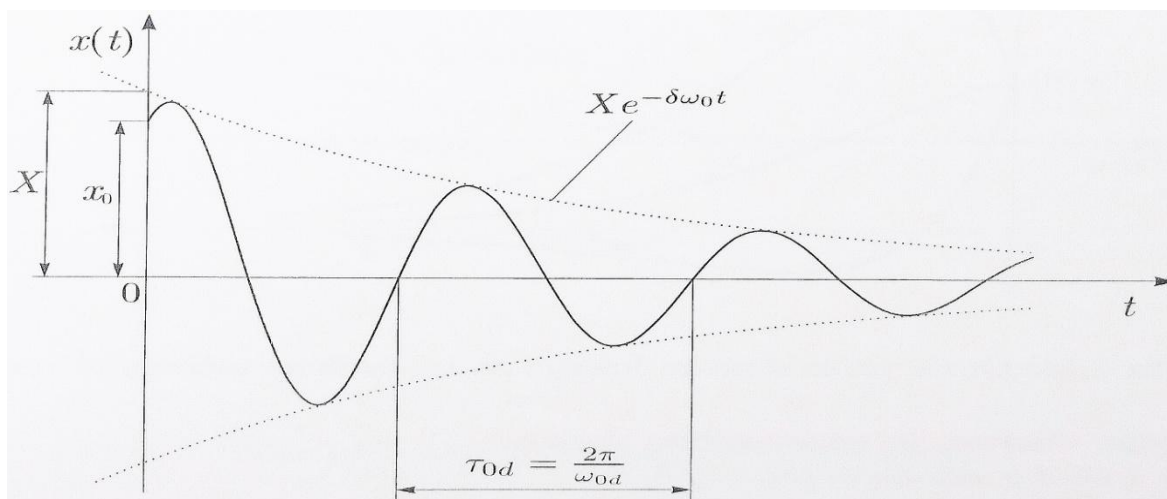
Slika 8: Lastno nihanje z nadkritičnim dušenjem (Boltežar, 2006)

- Kritično dušenje (slika 9) nastopi, kadar je razmernik enak 1. Pomeni, da je $c = c_{kr}$. V tem primeru nihanje ne nastopi in sistem se povrne v ravnovesno lego.



Slika 9: Lastno nihanje s kritičnim dušenjem za tri različne začetne hitrosti (Boltežar, 2006)

- Podkritično dušenje (slika 10) nastopi, kadar je razmernik manjši od 1, oziroma $c < c_{kr}$.



Slika 10: Lastno dušeno nihanje s podkritičnim dušenjem (Boltežar, 2006)

Periodo lastnega dušenega nihanja dobimo iz enačbe (en. 15)(Muršič, 1991):

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{1}{f_d} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{1-\zeta^2}} \quad \dots(15)$$

- τ čas enega nihaja oziroma perioda nihanja (s)

- f_d frekvenca lastnega dušenega nihanja (Hz)

Pomemben pa je tudi podatek o intenzivnosti dušenja, ki ga imenujemo dekrement pomika. Pove nam, kakšno je časovno manjšanje amplitude nihanja. Intenzivnost dušenja dobimo z razmerjem dveh zaporednih amplitud v časovnem intervalu ene periode. Izračunamo ga z enačbo (en. 16)(Muršič, 1991):

$$q = e^{\zeta \omega \tau} = \frac{x(n\tau_d)}{x((n+1)\tau_d)} \quad \dots(16)$$

- q dekrement pomika ()

Zapišemo lahko tudi njegov naravni logaritem, ki ga imenujemo logaritmični dekrement. Ob upoštevanju enačbe 15, je formula sledeča (en. 17)(Muršič, 1991):

$$\ln q = \Delta = \zeta \omega \tau_d = \zeta \omega \frac{2\pi}{\omega \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad \dots(17)$$

- $\ln q = \Delta$ logaritmični dekrement ()

2.4.2 Vsiljeno dušeno nihanje

O vsiljenih nihanjih govorimo, kadar na nihajni sistem stalno vpliva vzbujalna sila, ki je harmonskega značaja in se njena vrednost spreminja s krožno frekvenco. Vzbujalno silo harmonskega značaja podamo z enačbo (en. 18)(Belšak, Prezelj, 2013):

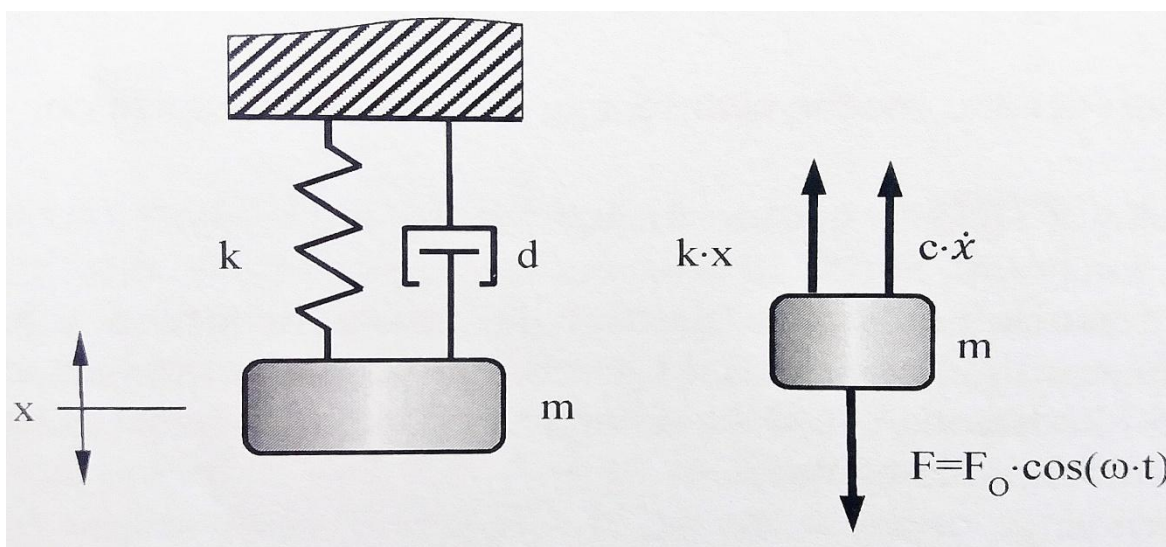
$$F = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \dots(18)$$

- F vzbujalna sila (N)

- F_0 amplituda vzbujalne sile

- ω krožna frekvenca (rad/s)

Dušena vsiljena nihanja dobimo, kadar poleg vzbujalnih sil upoštevamo tudi vse izgube sistema v obliki dušenja. Model vsiljenega dušenega nihanja prikazuje spodnja slika:



Slika 11: Vsiljeno dušeno nihanje (Belšak, Prezelj, 2013)

Diferencialna enačba za nihanje se glasi (en. 19)(Belšak, Prezelj, 2013)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega \cdot t) \quad \dots(19)$$

in po preoblikovanju dobimo splošno obliko (en. 20)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{F_0}{m}\sin(\omega \cdot t) \quad \dots(20)$$

V enačbi upoštevamo lastno krožno frekvenco (en. 21 in 22)(Belšak, Prezelj, 2013)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \dots(21)$$

$$f = \frac{F_0}{m} \quad \dots(22)$$

in dobimo (en. 23)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$\ddot{x} + \omega^2 x + \frac{c}{m} \dot{x} = f \sin(\omega \cdot t) \quad \dots(23)$$

Rešitev diferencialne enačbe lahko zapišemo (en. 24)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$x = x_h + x_p \quad \dots(24)$$

Ker se nihanje sistema pri lastni frekvenci ω_0 zaradi dušenja počasi izniha, lahko homogeni del x_h zanemarimo in dobimo (en. 25)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$x_p = C \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad \dots(25)$$

- φ fazni kot zaostajanja

Konstanta C je določljiva z izrekom (en. 26)(Belšak, Prezelj, 2013)

$$C = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot c}{c_{kr}} \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad \dots(26)$$

fazni kot zaostajanja pa določimo z naslednjo enačbo (en. 27)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$\varphi = \arctan\left(\frac{c \cdot \omega}{k - m \omega^2}\right) \quad \dots(27)$$

Tako dobimo odziv pri stacionarnem stanju pri vzbujačni sili in vsiljeni frekvenci (en. 28)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$x = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot c}{c_{kr}} \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \dots(28)$$

Ob upoštevanju povezave za delno statično deformacijo x_0 in dinamični faktor odziva β (en. 29 in 30)(Belšak, Prezelj, 2013)

$$x_0 = \frac{F_0}{k} \quad \dots(29)$$

$$\beta = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_0} \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad \dots(30)$$

dobimo enačbo odziva v obliki (en. 31)(Belšak, Prezelj, 2013):

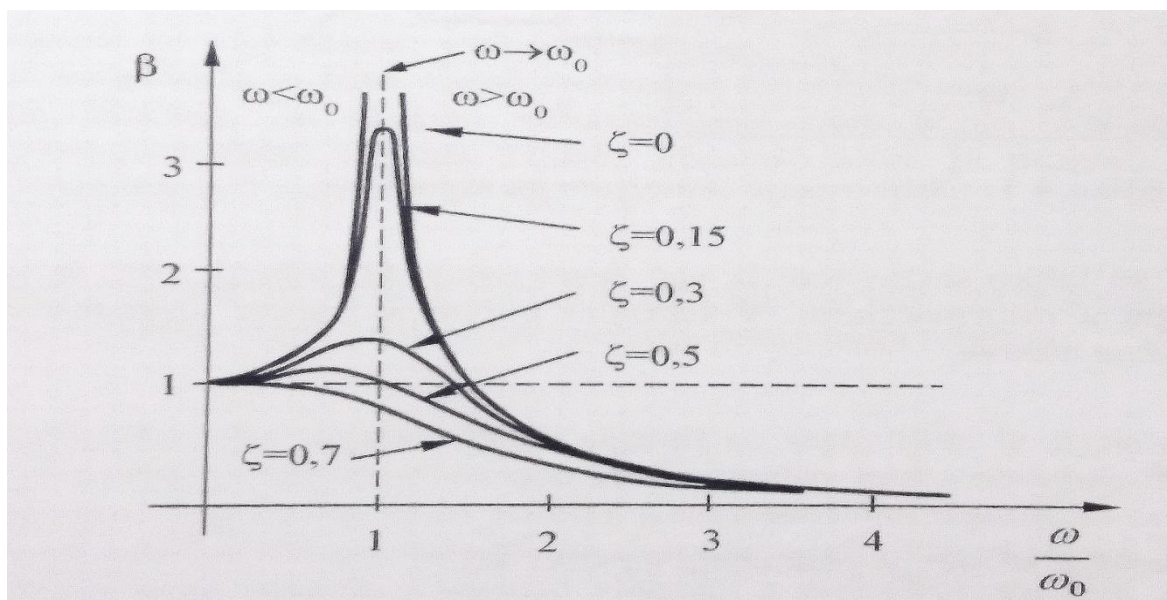
$$x = x_0 \cdot \beta \quad \dots(31)$$

Dinamični faktor odziva ima v enačbi vključen razmernik frekvenc, ki ga dobimo z enačbo (en. 32)(Belšak, Prezelj, 2013):

$$r = \frac{\omega}{\omega_0} \quad \dots(32)$$

- r razmernik frekvenc ()

Kadar je razmernik frekvenc enak 1, pride do kritično neskončnega odziva, oziroma pojavi se resonanca (slika 12).



Slika 12: Dinamični faktor odziva v povezavi z razmerjem frekvenc in razmernikom dušenja (Belšak, Prezelj, 2013)

2.4.3 Nihanje prožnih teles

Sem spadajo nihanja, ki se pojavijo pri vzmeteh, vrvi, palici, stebričku tekočine ali plina... Pri nihanjih prožnih teles se v vpetih krajiščih vedno nahaja vozle, na prostih krajiščih pa najdemo hrbet. Ta podatek o krajiščih nam poda robne pogoje. Z njim in s pomočjo hitrosti valovanja, ugotovimo frekvenco lastnega nihanja.

Oglejmo si primer napete strune:

Kadar imamo struno z gostoto ρ in prerezom S vpeto med dve krajišči na razdalji l in napeto s silo F , po njej potuje valovanje s hitrostjo c (en. 33)(Strnad, 2010).

$$c = \sqrt{\frac{F}{\rho S}} \quad \dots(33)$$

Zaradi pogoja, da se na vpetih krajiščih nahajajo vozli, dobimo povezavo med dolžino strune in valovno dolžino λ (en. 34)(Strnad, 2010).

$$l = n \frac{1}{2} \lambda = n \frac{c}{2\nu_n} \quad \dots(34)$$

- n cela števila

Iz enačbe lahko dobimo enačbo za lastne frekvence (en 35)(Strnad, 2010):

$$\nu_n = n \frac{c}{2l} \quad \dots(35)$$

V enačbi vidimo, da je najnižja možna lastna frekvenca $\nu_1 = c/2l$ oziroma osnovna frekvenca, višje harmonične frekvence pa so njeni celoštevilčni večkratniki.

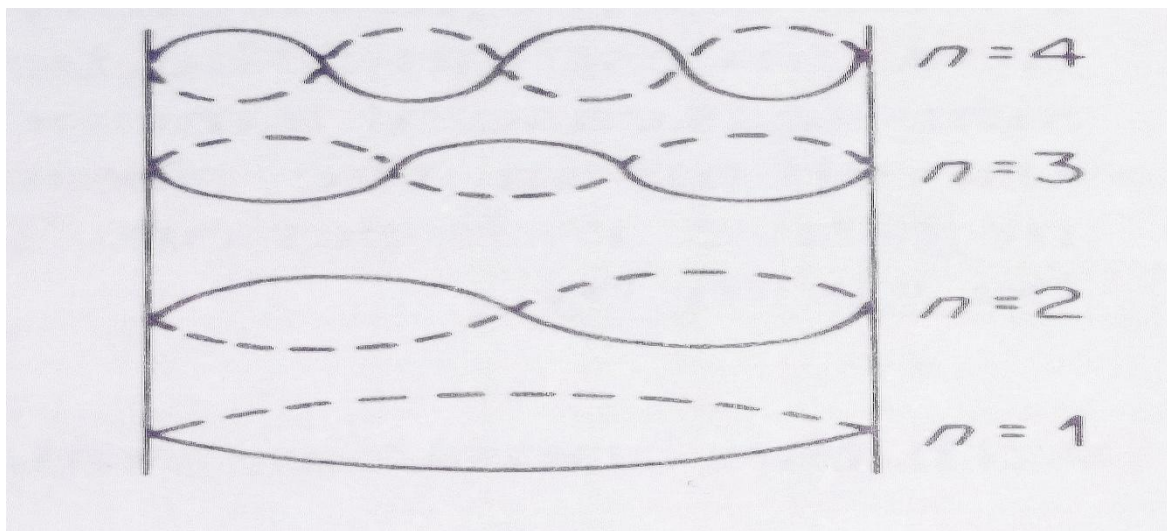
Kadar imamo krajišče na $x=0$ in drugo krajišče na $x=l$, lahko lastno nihanje opišemo z enačbo (en. 36)(Strnad, 2010):

$$s_n(x, t) = s_n \sin n\pi \frac{x}{l} \cdot \cos n\pi \frac{ct}{l} \quad \dots(36)$$

Splošno gibanje strune dobimo s sestavo lastnih nihanj in tako dobimo enačbo (en. 37) (Strnad, 2010):

$$s(x, t) = \sum_{n=1} s_n \sin n\pi \frac{x}{l} \cdot \cos n\pi \frac{ct}{l} \quad \dots(37)$$

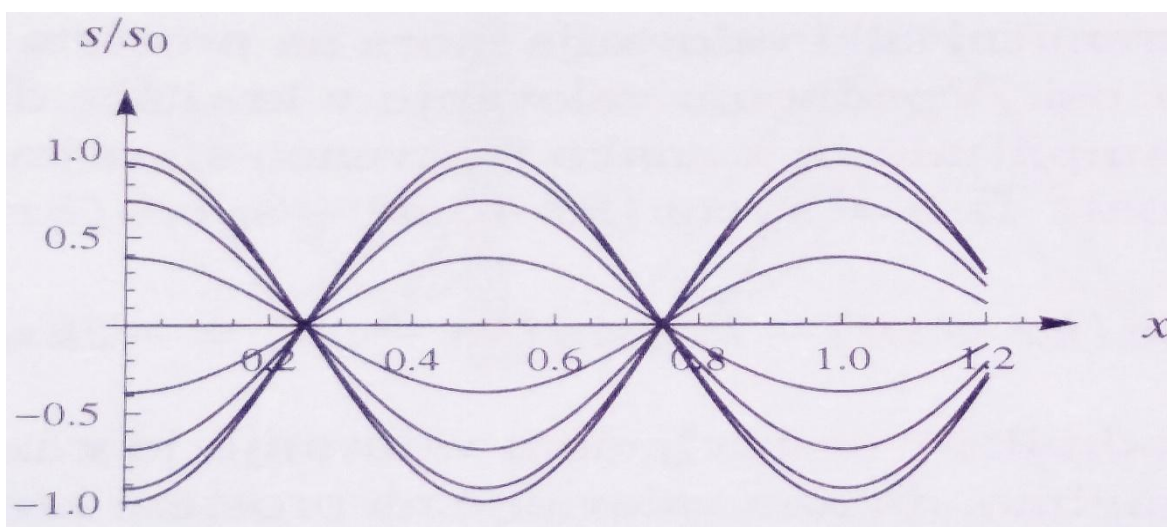
Na sliki 13 so prikazani prvi štiri načini valovanja strune.



Slika 13: Valovanje strune (Pain, 1993)

2.4.4 Stojече valovanje

Kadar se srečata valovanje, ki potuje v dano smer, in valovanje z enako amplitudo in enako krožno frekvenco v nasprotni smeri, dobimo stojече valovanje (slika 14). Pri stojčem valovanju sprememba oblike ne potuje in vsi deli snovi harmonično nihajo z enako krožno frekvenco. Amplituda nihanja se spreminja s krajem. Ponekod je amplituda vedno 0. To so valovni vozli, kjer pa je odmik največji so valovni hrbti.



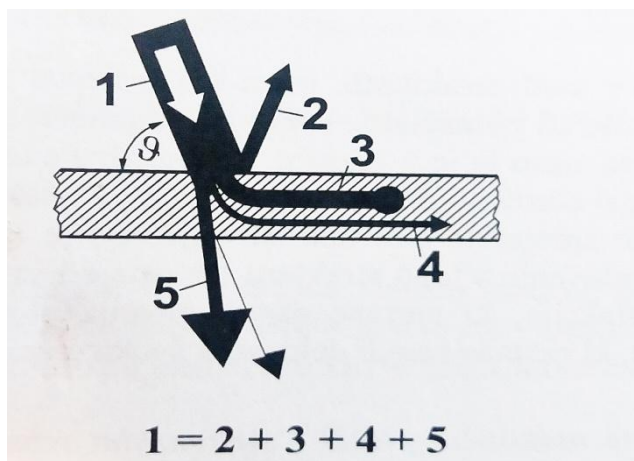
Slika 14: Stojече valovanje z vozlišči in hrbti (Strnad, 2010)

2.5 HRUP

Hrup je ena od nezaželenih oblik zvočnega valovanja. Meri se v decibelih (dB). Pomembna je jakost in trajanje hrupa, prav tako pa poslušalec sam (njegovo razpoloženje, starost, zdravstveno stanje...).

2.5.1 Hrup zaradi odboja in vibracij togih struktur

Kadar zvočno valovanje zadane v togo strukturo, prihaja do odboja zvočnega valovanja, absorpcije zvočnega valovanja, prenosa zvočnega valovanja po steni in prehoda skozi steno, kar je vidno na sliki 15. Kakšni bodo deleži, je odvisno od strukture stene in od zvočnega valovanja samega, predvsem od njegove frekvence. Največ odboja valovanja bomo imeli pri popolnoma togi steni, saj se odbije celotno vpadno zvočno valovanje. Pri bolj poroznih materialih se bo povečal absorbiran del, ker se valovanje spremeni v toploto zaradi viskoznih izgub v porah materiala, še posebej pri visokih frekvencah. Strukturalni hrup pa dobimo pri prenosu valovanja po strukturi stene. Delež prenosa je odvisen od frekvence valovanja, oblike strukture in od lastnosti materiala.



Slika 15: Deli odbitega (2), absorbiranega (3), prenesenega po strukturi (4) in prepuščenega (5) vpadnega zvočnega valovanja (1) (Čudina, 2014)

Pogoj, da se zvočno valovanje lahko širi po togih strukturah, je zmožnost materiala, da lahko shrani kinetično ali potencialno energijo. Kinetična energija se shrani v vse delce, ki se gibajo in imajo maso. Potencialna energija pa se shrani v vseh delcih, ki so bili elastično deformirani. Kadar zvočno valovanje zadane ob togo strukturo, se vzbudijo nova valovanja v strukturi. Ta valovanja so male intenzitete, a kljub temu moteča, saj dodajajo nezaželene zvoke in vibracije.

2.5.2 Koeficient prepustnosti zvočnega valovanja

Koeficient prepustnosti zvočnega valovanja nam poda razmerje med prepuščeno zvočno intenzivnostjo in intenzivnostjo vpadnega valovanja pri danem vpadnem kotu (en. 38 in 39)(Čudina,2014).

$$\tau(\vartheta) = \frac{I_{pren}}{I_{vpad}} = \frac{|p_{pren}^2|}{|p_{vpad}^2|} \quad \dots(38)$$

$$\tau(\vartheta) = \left\{ \left[1 + \eta \left(\frac{\omega \rho_s \cos \vartheta}{2 \rho c} \right) \left(\frac{\omega^2 B \sin^4 \vartheta}{c^4 \rho_s} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\omega \rho_s \cos \vartheta}{2 \rho c} \right) \left(1 - \frac{\omega^2 B \sin^4 \vartheta}{c^4 \rho_s} \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad \dots(39)$$

- τ koeficient prepustnosti ()
- ϑ vpadni kot zvočnega valovanja
- I zvočna intenzivnost (W/m^2)
- p zvočni tlak (Pa)
- B togost plošče (Nm)
- ρ_s površinska gostota plošče (kg/m^2)
- ρc specifična akustična impedanca zraka (Ns/m^3)
- η faktor izgub ()

2.5.3 Izolirnost plošče

Zvočna izolirnost plošče je razlika med vpadno zvočno intenzivnostjo in prepuščeno zvočno intenzivnostjo. Je merilo za prenosne izgube zvoka v plošči in je v povezavi s koeficientom prepustnosti (en. 40)(Čudina,2014).

$$R(\vartheta) = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad \dots(40)$$

- R izolirnost plošče (dB)

Na izolirnost plošče vplivajo upogibna togost, resonanca, masa plošče, koincidenčni efekt, vpadni kot valovanja in frekvenca zvoka. Upogibna togost plošče vpliva na izolirnost predvsem v območju zelo nizkih frekvenc, pod resonančno frekvenco plošče (slika 16, območje a). Na resonančno frekvenco (f_r) plošče lahko vplivamo s pravilno izbiro materiala, z visoko vrednostjo zvočne hitrosti (slika 16, območje b) (en. 41) (Čudina, 2014).

$$c_u = \sqrt{\frac{E}{\rho_w}} \quad \dots(41)$$

- E modul elastičnosti (N/m^2)

- ρ_w gostota plošče (kg/m^3)

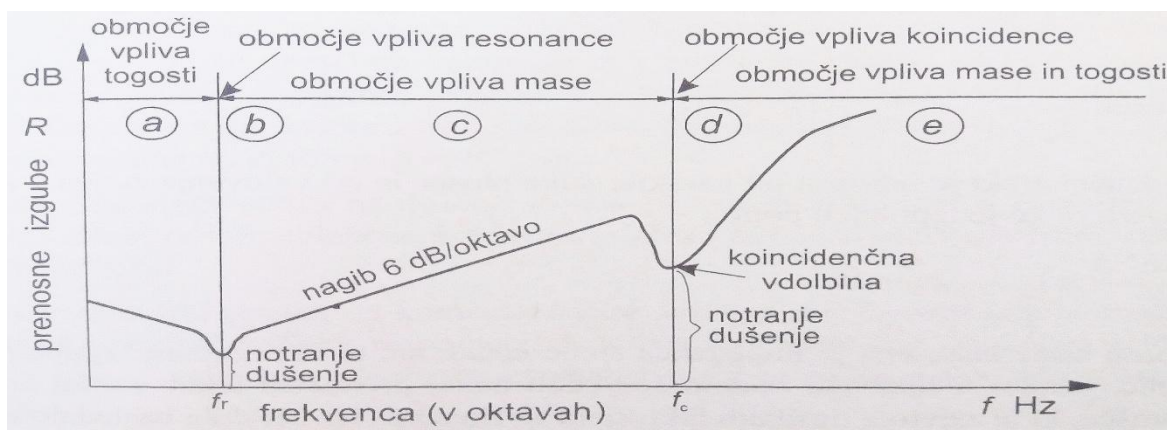
Masa plošče vpliva na izolirnost od resonančne frekvence plošče do kritične koincidenčne frekvence (slika 16, območje c). Koincidenčni efekt se pojavi, ko se frekvenca zvočnega valovanja ujame z valovanjem v plošči pri tej frekvenci. Pri koincidenčnem efektu se izolirnost plošče zmanjša (slika 16, območje d). Nastopi, ko je izpolnjen naslednji pogoj (en. 42) (Čudina, 2014):

$$\vartheta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{\lambda_u}\right) \quad \dots(42)$$

- λ_u valovna dolžina valovanja v plošči (m)

V območju nad koincidenčno frekvenco (f_c) vplivajo na izolirnost masa, togost plošče in koincidenčni efekt (slika 16, območje e).

Vsi ti vplivi nam povedo, da je izolirnost funkcija mase, materiala in oblike. Območje frekvenc, ki jih moramo dušiti, pa nam pogojujejo pravilen izbor materiala.



Slika 16: Potek izolirnosti plošče v odvisnosti od frekvence (Čudina, 2014)

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIALI

V nalogi smo uporabili mdf plošče proizvajalca Kronospan in iverne plošče proizvajalca Pfleiderer. Pri mdf in pri ivernih ploščah smo izbrali enake debeline, zaradi lažjega primerjanja dobljenih rezultatov. Uporabili smo debeline 12 mm, 19 mm, 22 mm in 28 mm.

Uporabljali smo hidroizolacijski trak proizvajalca Fragmat, tip izotem V3. Ima nosilec iz steklenega voala iz obeh strani prekrit z oksidiranim bitumnom. Po proizvajalčevih podatkih naj bi bil izoterm V3 debeline $\geq 2,7$ mm, vendar smo ugotovili, da je bila dejanska debelina uporabljenih vzorcev okoli 2,2 mm (izotem..., 2016).

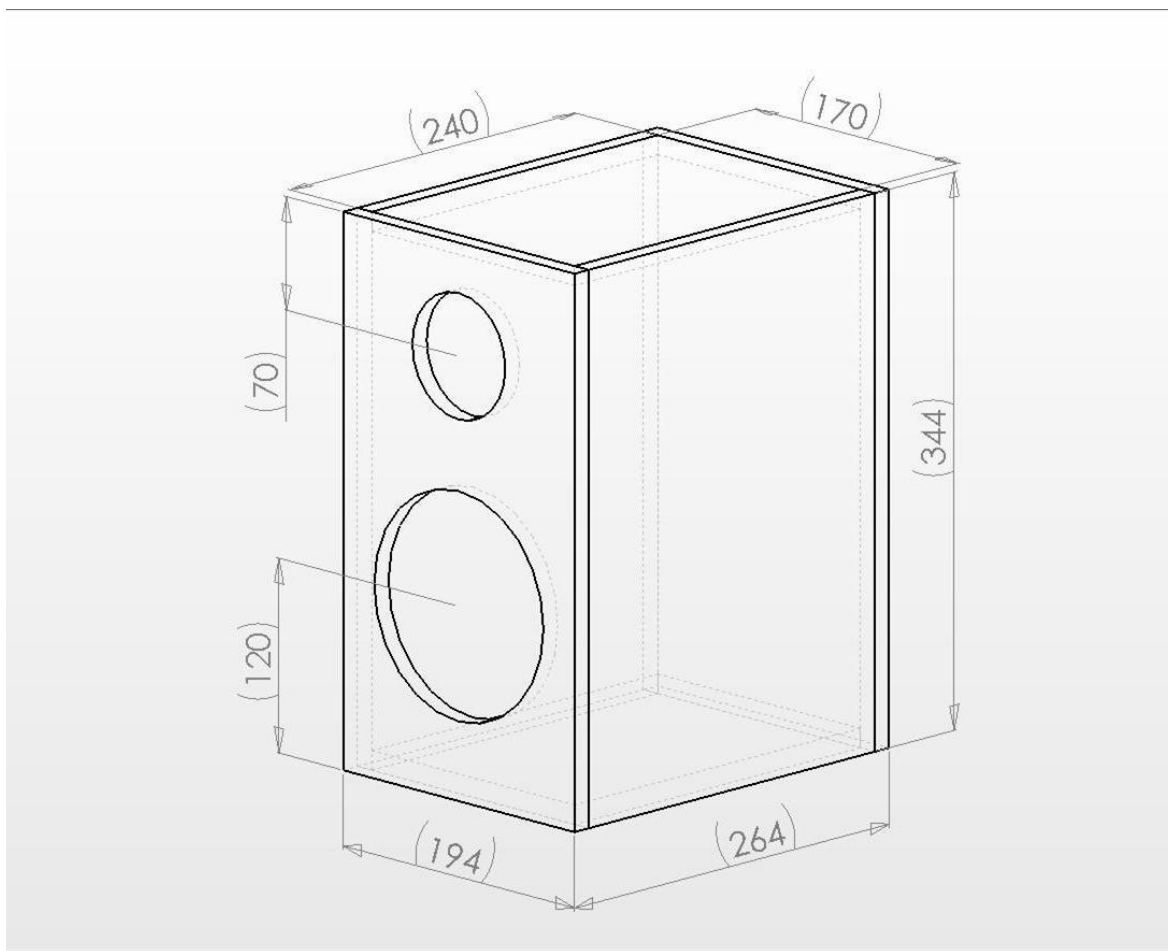
Zvočne enote, ki smo jih uporabljali za vzbujanje sten, so bile znamke Morel. Basovska enota je bila CAW-634, visokotonska enota pa ET 338-110. Ohišja so bila kompresijska in so imela prostornino 13 l. V ohišju ni bilo vgrajene kretnice, saj smo izvajali teste na frekvenčnemu razponu med 20 Hz in 2000 Hz, katerega pokriva basovska enota. Kljub temu smo vgradili visokotonsko enoto, saj bi zaradi svoje togosti in velike mase lahko vpliva na dobljene rezultate.

Pri merjenju prenosne funkcije smo uporabljali induktivni merilnik pomika Carlo Gavazzi tip IA12ASC05AK-K in mikrofoni Bruel&Kjaer tip 4939.

3.2 PRIPRAVA VZORCEV

Za prvi del diplomske naloge, pri katerem smo želeli dobiti osnovne lastnosti mdf in ivernih plošč, smo pripravili vzorce v razmerju debelina : širina : dolžina = 1 : 5 : 35. Za vsako vrsto materiala in vsako debelino smo imeli po tri vzorce. Prav tako pa smo pripravili še po tri enake vzorce oblepljene z bitumnom.

Drugi del meritev smo izvajali na kompresijskih zvočniških ohišjih, ki so imela prostornino 13 l. Izdelali smo po en vzorec za vsako vrsto in debelino materiala. Na sliki 17 je prikazan model ohišja debeline 12 mm.



Slika 17: Ohišje debeline 12 mm

3.3 METODE DELA

Diplomsko nalogo smo razdelili na dva ločena dela. V prvem delu smo želeli pridobiti osnovne lastnosti uporabljenih materialov. Vzorcem, ki smo jih vrezali v razmerju 1: 5: 35 smo najprej premerili točne dimenzije in jih stehali. Tako smo lahko izračunali gostoto in modul elastičnosti materiala. Nato smo jih konzolno vpeli na togo podlago.



Slika 18: Merjenje iznihavanja 12 mm iverke s prilepljenim bitumnom

Na prosti del vzorca smo na zgornji strani namestili aluminijasto folijo, ker smo potrebovali kovinski sloj, ki ga bo zaznal induktivni merilnik pomika (slika 18). Z merilnikom smo merili iznihavanje vzorcev. Izmerjene podatke smo beležili z računalniškim programom LabView, kjer smo si shranili časovno funkcijo in vrhove nihanja. Iz pridobljenih podatkov smo z enačbo 16 izračunali dekrement pomika (q) in z enačbo 17 logaritmični dekrementi (Δ). Dušilno mero (ζ) in modul elastičnosti (E) pa z naslednjimi enačbami (en. 43 do 46):

$$\zeta = \frac{\Delta}{\sqrt{2\pi^2 + \Delta^2}} \quad \dots(43)$$

$$E = \frac{\omega^2 l^4 \rho A}{3516^2 I} \quad \dots(44)$$

- l dolžina nihajočega vzorca (m)

- ρ gostota vzorca (kg/m^3)

- A površina vzorca (m^2)

- I vztrajnostni moment (m^4)

$$A = hb \quad \dots(45)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \dots(46)$$

- h debelina (m)

- b širina (m)

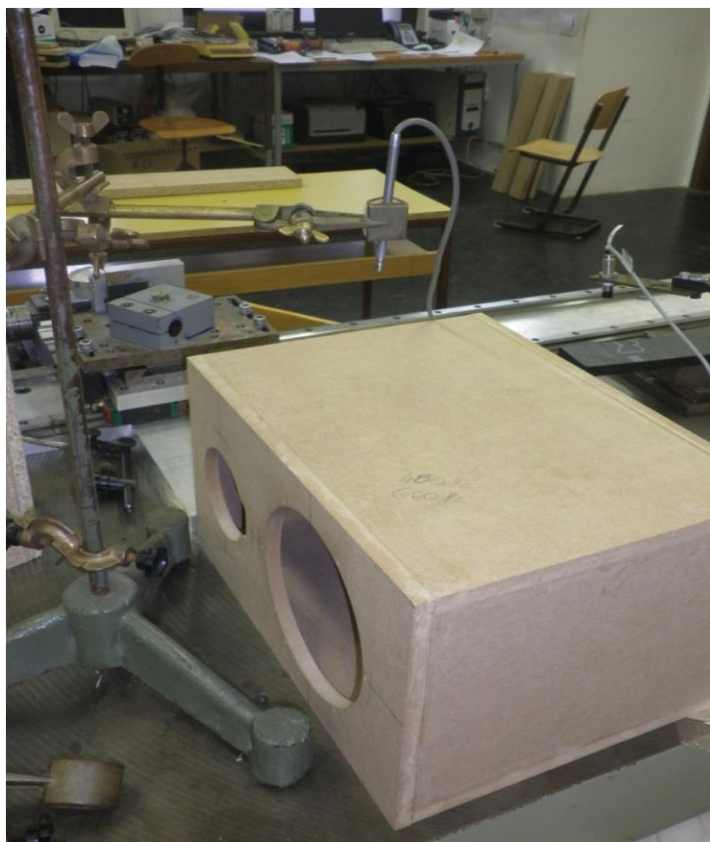
V drugem delu diplomske naloge smo meritve izvajali na samih zvočnih omaricah. Najprej smo naredili modalno analizo (slika 19). Zvočno omarico smo položili na ravno togo podlago in nad njo v oddaljenosti približno 0,15 m namestili mikrofona. Steno omarice smo mehansko vzbudili s tolkalom in nato izmerili odzive. V programu LabView smo iz časovnega posnetka izračunali frekvenčni spekter. Modalno analizo smo naredili na bočni, zadnji in zgornji stranici zvočnika.

Po končani modalni analizi smo z metodo končnih elementov s programom ANSYS zmodelirali ohišje, kjer smo vnesli podatke pridobljene iz prvega dela naloge. To smo storili za zvočnik iz MDF plošč debeline 12 mm. Tako smo pridobili izračun lastnih frekvenc, ki smo jih primerjali s podatki pridobljenimi pri modalni analizi.

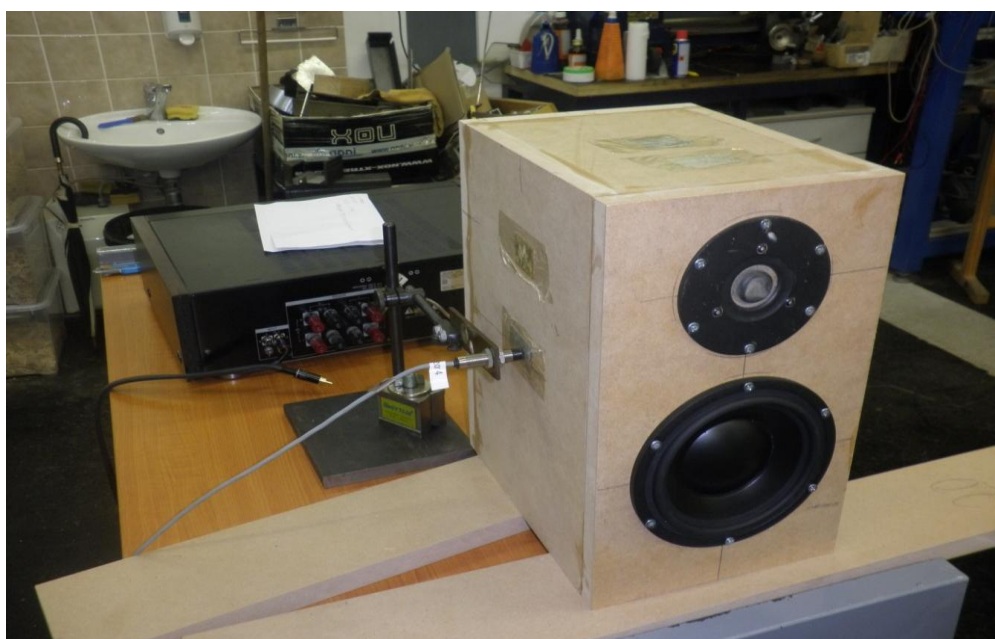
Izmerili smo tudi prenosno funkcijo bočne in zadnje stranice ohišja. Postopek smo izvedli z mikrofonom in induktivnim merilnikom pomika (slika 20). Pri tem smo stene vzbudili s samo zvočno enoto, v katero smo dovajali šum. Signal smo pripravili tako, da smo odstranili frekvence pod 20 Hz in frekvence nad 2000 Hz. Tako pripravljen signal smo ojačali na primerno jakost in ga dovedli v zvočnik. Izhodno napetost merilnika smo zajeli z merilno karto USB 6351 proizvajalca National Instruments, in nato s programsko opremo izračunali prenosno funkcijo. Vsako meritev smo izvajali 40 sekund, tako je bilo dovolj časa, da so se stene vzbudile. Meritve z mikrofonom smo izvedli na razdalji 0,01 m od bočne in zadnje stranice in na razdalji 1m pred sprednjo stranico zvočnika. Na tako pridobljene rezultate ima velik vpliv okolica, kjer se meritve izvajajo. Zato smo meritve ponovili še z induktivnim merilnikom na sredini in tretjini bočnih in zadnjih stranic. Tako pridobljena razmerja amplitud nihanj stranic, lahko primerjamo med seboj.

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016



Slika 19: Modalna analiza na 12 mm mdf omarici.



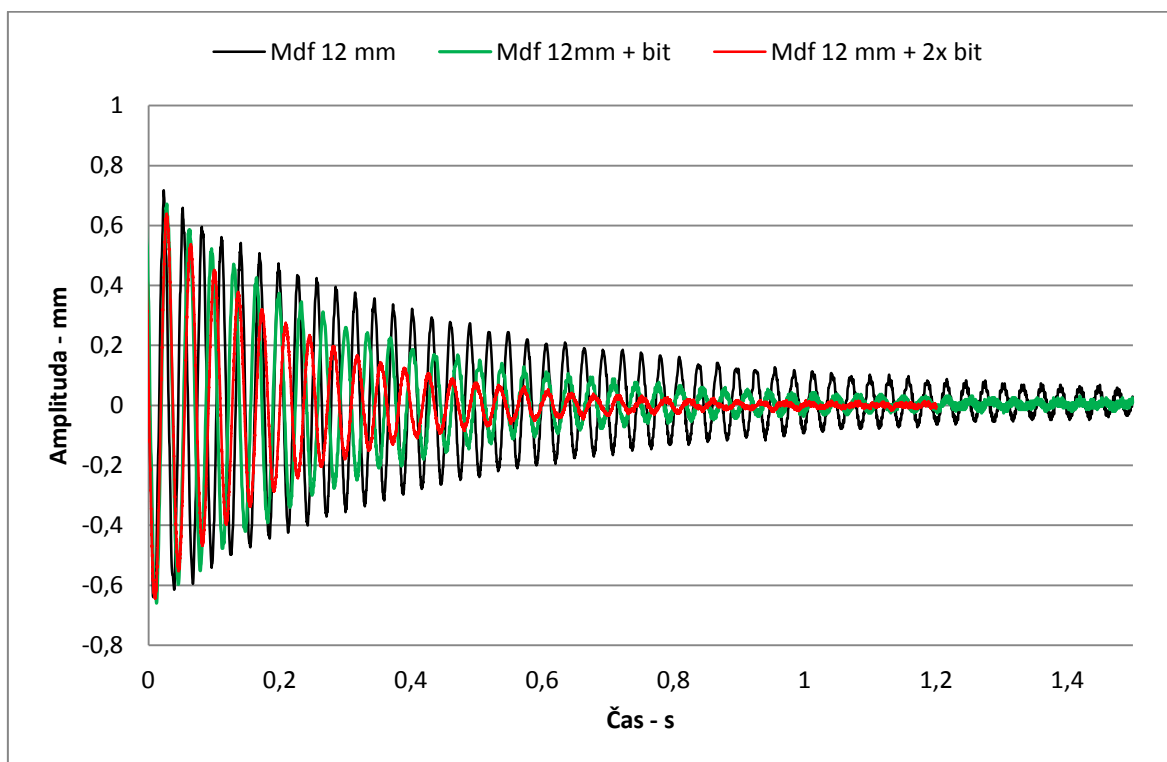
Slika 20: Merjenje prenosne funkcije bočne stene 19 mm debelega mdf ohišja, z induktivnim merilnikom

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 OSNOVNE LASTNOSTI MATERIALA

Pri ugotavljanju osnovnih lastnosti uporabljenih materialov smo izmerili in izračunali gostoto, modul elastičnosti, frekvenco iznihavanja in dušilno mero materiala z in brez bitumna. Dobljene rezultate smo predstavili grafično in v preglednicah.

Slika 21 prikazuje iznihavanje mdf vzorcev debeline 12 mm. Iz slike vidimo, da so se vzorci, ki so bili prelepljeni z dvema slojema bitumna, iznihali najhitreje. To prikazuje rdeča krivulja na grafu. Zelena krivulja prikazuje vzorce, ki so imeli prilepljen en sloj bitumna in vidimo, da je bilo vračanje v izhodiščno lego nekoliko počasnejše. Najpočasneje pa so se iznihali vzorci brez bitumna, kar je prikazano s črno krivuljo. Podobne rezultate smo dobili tudi za vzorce ostalih debelin in materialov. To lahko vidimo v preglednici 2, saj se je dušilna mera z nanosom bitumna povečala pri obeh materialih in pri vseh debelinah.



Slika 21: Iznihavanje mdf vzorcev debeline 12 mm, brez in z bitumnom

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

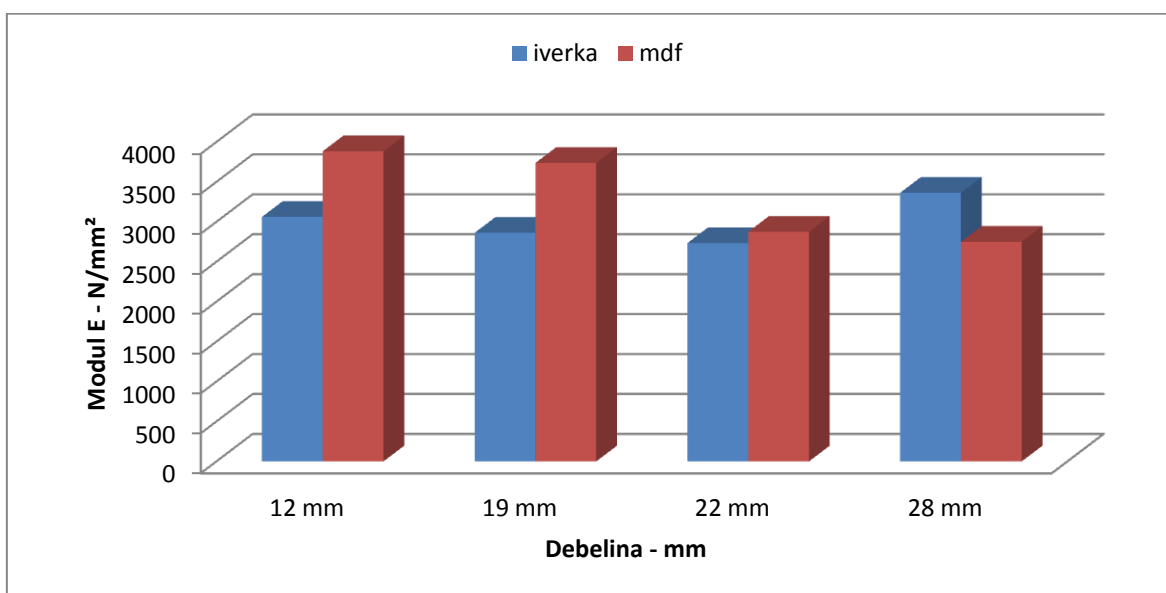
Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016

Preglednica 2: Izmerjene in izračunane vrednosti proučevanih preizkušancev. V preglednici iz leve proti desni si sledijo št. - številka vzorca, *mat/bit* - material (mdf ali iverna plošča) in ali je bil nameščen bitumen, *l* - dolžina (mm), *h* - debelina (mm), *b* - širina (mm), *m* - masa (g), ρ - gostota (kg/m^3), *I* - vztrajnostni moment (kgm^2), *A* - površina (m^2), *l_{vpet}* - prosta dolžina vzorca (mm), *E* - modul elastičnosti (N/mm^2), ν - frekvenca nihanja (Hz), ζ - dušilna mera, AVG povprečne vrednosti, ζ_{2xbit} - vrednost dušilne mere z dvema slojema bitumna.

št	mat/bit	l	h	b	m	ρ	I	A	l _{vpet}	E	ν	ζ	AVG ρ	AVG E	AVG ζ	ζ_{2xbit}
1	ive., ne	976	28	140	2701	705	2,6E-07	0,00392	834	3321	14,1	0,013	706	3364	0,014	
2	ive., ne	976	28	140	2727	712	2,6E-07	0,00392	834	3401	14,2	0,015				
3	ive., ne	976	28	140	2678	699	2,6E-07	0,00392	833	3371	14,3	0,014				
4	ive., da	976		140								0,019			0,019	
5	ive., da	976		140								0,017				
6	ive., da	976		140								0,02				0,025
7	mdf, ne	976	28	140	2708	702	2,6E-07	0,00395	833	2800	13,1	0,014	703	2750	0,014	
8	mdf, ne	976	28	140	2707	700	2,6E-07	0,00396	833	2727	13,0	0,015				
9	mdf, ne	976	28	140	2716	704	2,6E-07	0,00395	833	2723	12,9	0,014				
10	mdf, da	976		140								0,018			0,018	0,023
11	mdf, da	976		140								0,017				
12	mdf, da	976		140								0,018				
13	ive., ne	770	22	110	1173	629	9,8E-08	0,00242	651	2322	16,1	0,014	609	2734	0,015	
14	ive., ne	768	22	110	1079	576	1,0E-07	0,00244	652	2437	17,3	0,015				
15	ive., ne	768	22	110	1168	621	1,0E-07	0,00245	652	3444	19,9	0,015				
16	ive., da	768		110								0,02			0,019	
17	ive., da	768		110								0,019				0,026
18	ive., da	768		110								0,017				
19	mdf, ne	768	22	110	1182	635	9,8E-08	0,00242	652	2852	17,7	0,012	637	2875	0,013	
20	mdf, ne	770	22	110	1195	635	9,8E-08	0,00243	653	2907	17,8	0,013				
21	mdf, ne	768	22	110	1182	634	9,8E-08	0,00243	652	2865	17,8	0,014				
22	mdf, da	768		110								0,022			0,021	
23	mdf, da	768		110								0,022				
24	mdf, da	770		110								0,018				0,026
25	ive., ne	665	19	95	742	621	5,3E-08	0,00179	561	2831	20,7	0,016	626	2863	0,016	
26	ive., ne	665	19	95	742	621	5,3E-08	0,00179	561	2804	20,6	0,016				
27	ive., ne	665	19	95	764	636	5,4E-08	0,00180	561	2953	21,0	0,015				
28	ive., da	664		95								0,02			0,021	0,027
29	ive., da	665		95								0,023				
30	ive., da	665		95								0,019				
31	mdf, ne	665	19	95	864	719	5,4E-08	0,00180	561	3308	20,9	0,013	724	3738	0,012	
32	mdf, ne	665	19	95	870	724	5,4E-08	0,00180	561	3591	21,7	0,012				
33	mdf, ne	665	19	95	876	727	5,5E-08	0,00181	561	4315	23,8	0,011				
34	mdf, da	665		95								0,018			0,018	
35	mdf, da	665		95								0,016				
36	mdf, da	665		95								0,019				0,031
37	ive., ne	419	12	60	207	686	8,6E-09	0,00072	361	3138	31,8	0,016	688	3062	0,016	
38	ive., ne	419	12	60	209	687	8,9E-09	0,00073	361	3032	31,5	0,016				
39	ive., ne	419	12	60	208	689	8,6E-09	0,00072	361	3016	31,1	0,016				
40	ive., da	419		60								0,025			0,026	0,039
41	ive., da	419		60								0,025				
42	ive., da	419		60								0,027				
43	mdf, ne	419	12	60	208	704	8,1E-09	0,000705	360	3887	34,4	0,01	704	3884	0,010	
44	mdf, ne	419	12	60	206	700	8,0E-09	0,000702	361	3897	34,2	0,011				
45	mdf, ne	419	12	60	208	707	8,0E-09	0,000702	360	3869	34,1	0,01				
46	mdf, da	419		60								0,018			0,019	
47	mdf, da	419		60								0,019				
48	mdf, da	419		60								0,02				0,028

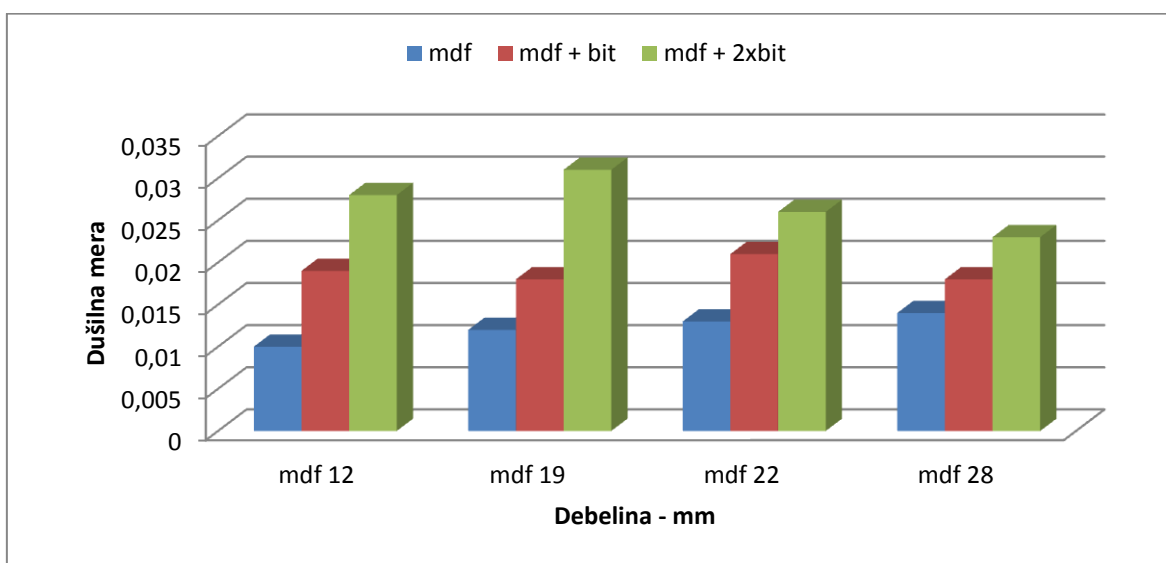
Predvidevali smo padec gostote vzorcev z večanjem debeline. Izračunani podatki kažejo, da je gostota 12 mm in 28 mm debelih vzorcev skoraj identična, gostota 19 mm in 22 mm debelih vzorcev pa je nekoliko nižja (preglednica 2). Primerjava gostot vzorcev iz ivernih plošč in MDF plošč ne kaže velikih razlik z izjemo 19 mm MDF, ki je izstopal in je imel najvišje vrednosti. Iz izračuna gostot je razvidno tudi, da je gostota MDF vzorcev veliko bolj enakomerna med samimi vzorci enakih debelin kot gostota vzorcev iz ivernih plošč.

Moduli elastičnosti so bili pri MDF ploščah višji kot pri ivernih ploščah, izjema so preizkušanci debeline 28 mm. Modul elastičnosti narašča tudi z manjšanjem debeline vzorcev in tudi tukaj izstopajo vzorci iz ivernih plošč debeline 28 mm, saj so imeli najvišje vrednosti (slika 22).

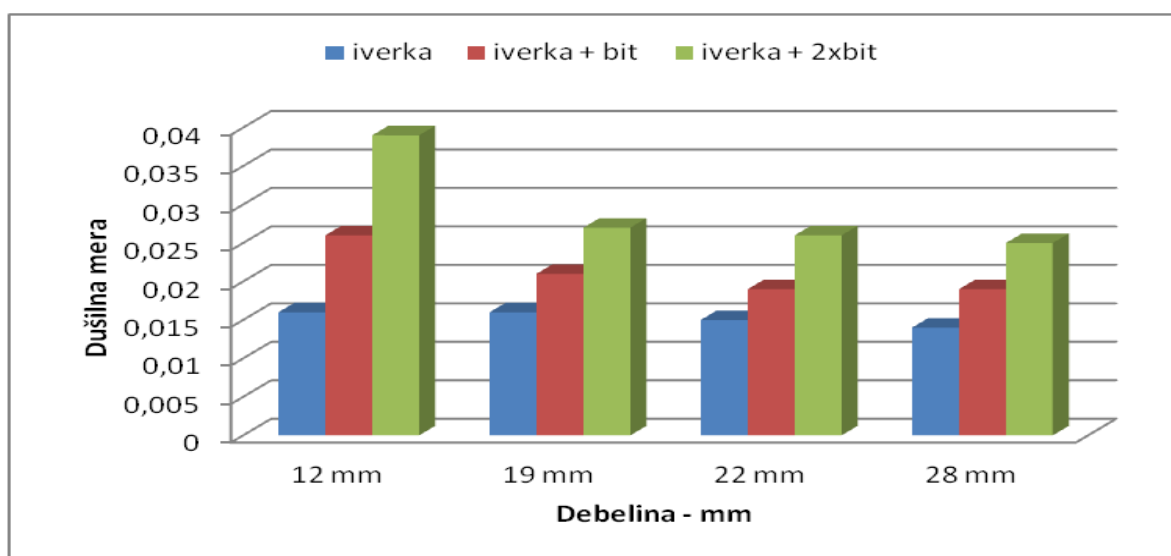


Slika 22: Primerjava modula elastičnosti med surovo iverko in MDF ploščo, v odvisnosti od debeline

Dušilna mera se pri mdf vzorcih z manjšanjem debeline znižuje, pri vzorcih iz iverne plošče pa je trend ravno obraten. Dušilno mero smo izračunali tudi za vzorce vseh debelin za mdf in iverno ploščo, prelepljene z eno plastjo bitumna. Pri vseh vzorcih smo zaznali znatno povečanje dušenja. Nato smo izbrali naključne vzorce za vsako debelino ter za vsak material in jim prilepili še drugi sloj bitumna. Po opravljenih meritvah smo opazili še dodatno povečanje dušenja pri vseh vzorcih (sliki 23 in 24).



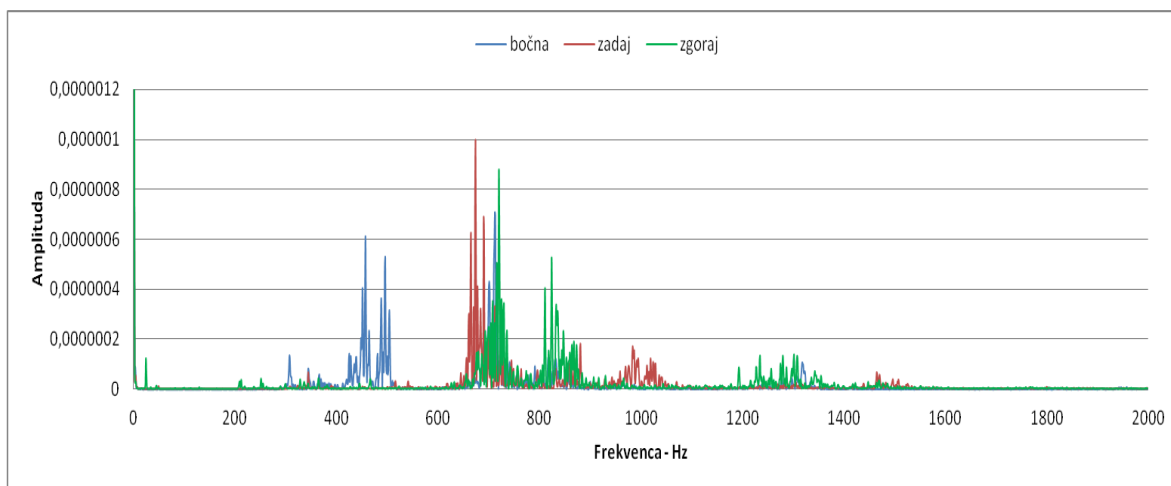
Slika 23: Primerjava dušilne mere mdf vzorcev brez in z bitumnom, v odvisnosti od debeline



Slika 24: Primerjava dušilne mere vzorcev surove iverke brez in z bitumnom, v odvisnosti od debeline

4.2 ANALIZA OHIŠJA 12 MM MDF

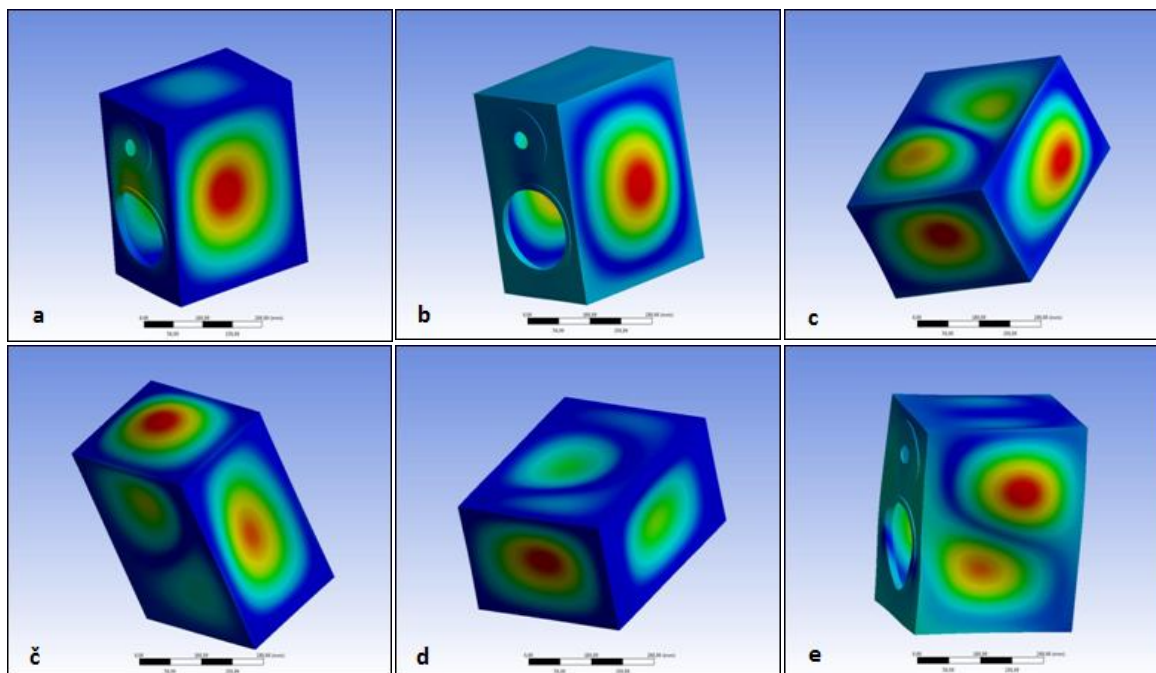
Iz frekvenčnega odziva stranic zvočne omarice (slika 25) smo zaznali resonančne frekvence na bočni stranici pri 456 Hz, 496 Hz in 719 Hz, na zadnji stranici pri 674 Hz, 873 Hz in 982 Hz in na zgornji stranici pri 720 Hz in 824 Hz.



Slika 25: Modalna analiza zvočnih omaric mdf 12 mm bočno, zadaj, zgoraj

Nato smo naredili analizo zvočne omarice z metodo končnih elementov. Po primerjavi izračunanih podatkov s pomočjo programa in podatkov pridobljenih z modalno analizo zvočne omarice, lahko opazimo določena ujemanja. Ugotovili smo, da so se lastne frekvence pri modalni analizi zvočne omarice pojavile pri nižjih vrednostih. Izjema je prva resonančna frekvenca bočne stranice, ki je bila nekoliko višja. Vzrokov za razhajanja izmerjenih in izračunanih frekvenc je lahko več. Modalno analizo smo izvajali na zvočnih omaricah, ki niso imele pritrjenih zvočnih enot, pri metodi končnih elementov pa smo dodali jekleni obroč za basovsko in visokotonsko enoto. Ta dodatek bi lahko vplival na dobljene rezultate, saj smo s tem povečali togost ohišja in zvišali vrednosti izračunanih lastnih frekvenc. Pri izračunu smo upoštevali povprečni modul elastičnosti, ki smo ga dobili iz meritev posameznih vzorcev in nismo upoštevali porazdelitve po debelini vzorca. Na sliki 26 je prikazanih nekaj rezultatov pridobljenih z metodo končnih elementov (vsi rezultati pa v prilogi B). Del a prikazuje prvi nihajni način bočne stranice, ki naj bi se pojavil pri frekvenci 409 Hz. To bi se lahko ujemalo z resonančno frekvenco, ki se je pojavila pri 457 Hz. Del b prikazuje prvi nihajni način bočne stranice, ki naj bi se pojavil pri frekvenci 551 Hz. To bi se lahko ujemalo z resonančno frekvenco, ki se je pojavila pri 495 Hz. Na delu c vidimo prvi nihajni način zadnje stranice, ki naj bi se pojavil pri frekvenci 755 Hz, pri modalni analizi pa smo jo zaznali pri frekvenci 673 Hz. Sledi prvi nihajni način zgornje stranice (del č), ki naj bi se pojavil pri frekvenci 773 Hz, pojavil pa se je pri frekvenci 719 Hz. Del d prikazuje prvi nihajni način zgornje stranice. Z metodo

smo ga predvideli pri frekvenci 884 Hz, pojavil pa se je pri frekvenci 824 Hz. Del e prikazuje drugi nihajni način bočne stranice, ki naj bi se pojavil pri frekvenci 909 Hz. To bi se lahko ujemalo z resonančno frekvenco, ki se je pojavila pri 820 Hz.



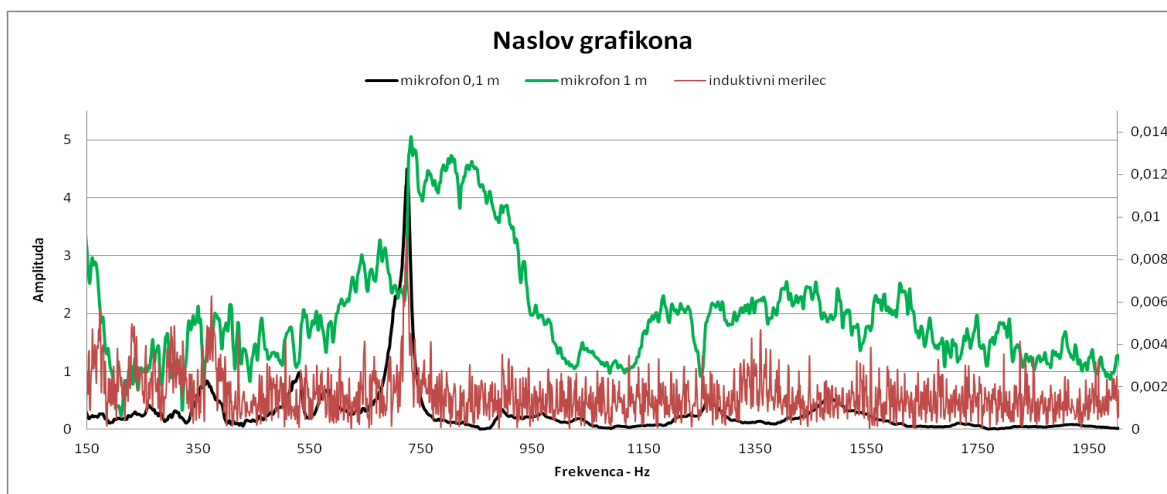
Slika 26: Nihajni načini 12 mm mdf zvočne omarice izračunane z metodo končnih elementov. a) Prvi nihajni način bočne stranice - 409Hz; b) Prvi nihajni način bočne stranice - 551 Hz; c) Prvi nihajni način zadnje stranice - 755 Hz; č) Prvi nihajni način zgornje stranice - 773 Hz; d) Prvi nihajni način zgornje stranice - 884 Hz; e) Drugi nihajni način bočne stranice - 909 Hz

Na koncu diplomske naloge smo želeli zaznati vplive lastnih frekvenc omaric na prenosno funkcijo. Za izvedbo meritev smo uporabili mikrofoni in induktivni merilec pomika. Meritve z mikrofonom se po navadi izvajajo v gluhi sobi, mi pa smo se odločili, da bomo meritve izvajali v samem laboratoriju, saj smo želeli preveriti, ali se ti vplivi lahko zaznajo pri uporabi zvočnikov v vsakdanjem kvazidifuznem prostoru. Pri prvih meritvah smo dobili neuporabne rezultate zaradi prevelikih vplivov same sobe. Zato smo ponovili meritve, pri tem pa smo v sobo vnesli 10 m² absorpcijskega materiala debeline 0,1 m. Dobljeni rezultati so bili nekoliko boljši in pri analizi podatkov smo zasledili povezavo pri najtanjših 12 mm mdf omaricah.

Na sliki 27 je prikazan graf prenosne funkcije izmerjen z mikrofonom na razdalji 0,01 m, graf prenosne funkcije izmerjen z mikrofonom na razdalji 1m in graf prenosne funkcije izmerjene z induktivnim merilcem. Slika prikazuje rezultate pridobljene na zadnji steni ohišja debeline 12 mm izdelane iz mdf plošč. Rdeča linija na sliki nam prikazuje prenosno funkcijo amplitud nihanj. Vidno je, da se amplitude povečajo pri 370 Hz, nato močno pri

730 Hz in nato pri 1358 Hz. Črna linija nam prikazuje prenosno funkcijo na razdalji 0,01 m če si ogledamo prej omenjene frekvence, vidimo, da se je zaznal vpliv povečanih amplitud nihanja zadnje stene na samo prenosno funkcijo pri frekvenci 370 Hz in 730 Hz, ne pa pri frekvenci 1358 Hz. Zelena linija na grafu nam prikazuje prenosno funkcijo merjeno z mikrofonom na razdalji 1 m. Vidimo, da se pri frekvenci 370 Hz ni zaznalo povečano nihanje zadnje stranice. Pri frekvenci 730 Hz pa je povečana amplituda imela vpliv na samo prenosno funkcijo izmerjeno na razdalji 1 m.

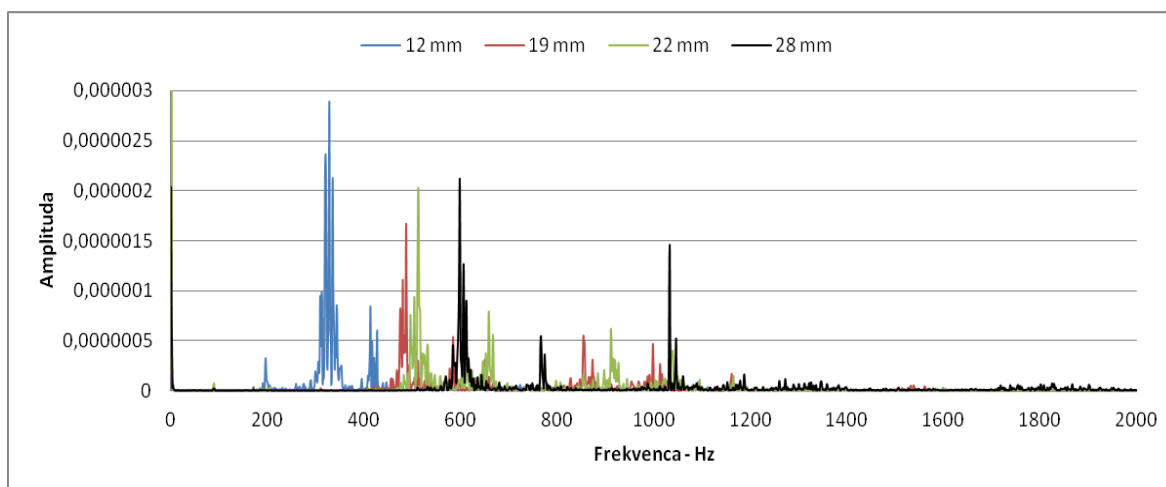
Iz meritev prenosne funkcije, modalne analize (slika 25) ter modalne analize z metodo končnih elementov, lahko sklepamo, da frekvenca 730 Hz predstavlja prvi način nihanja zadnje stranice. Izmerjena frekvenca lastnega nihanja je bila sicer 680 Hz, vendar je bilo takrat ohišje brez zvočniške enote, medtem ko sta bili pri meritvah prenosne funkcije pritrjeni obe zvočniški enoti. Ker sta obe enoti precej togi, lahko sklepamo, da sta enoti povečali togost celotnega ohišja oz. s tem tudi zadnje stranice, ki je imela sedaj višjo frekvenco. Slednje potrjuje tudi modalna analiza, narejena z metodo končnih elementov, kar prikazuje slika 26 del c.



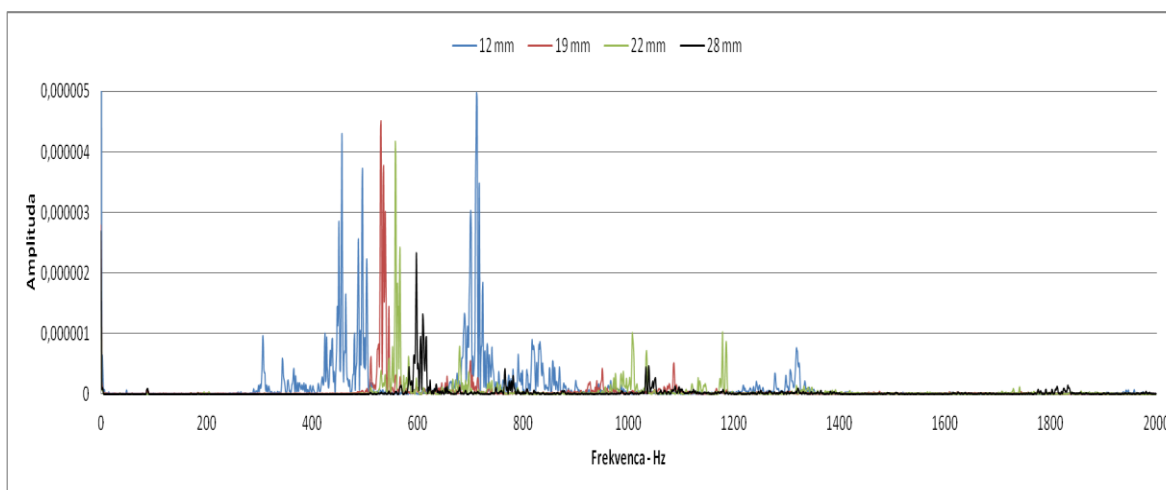
Slika 27: Primerjava modalne analize, mikrofona na razdalji 0,1 m in 1 m in induktivnega merilca na zadnji steni 12 mm MDF ohišja

4.3 MODALNA ANALIZA OHIŠIJ

S primerjavo modalnih analiz zvočnih omaric različnih debelin iz iverne plošče (slika 28) in modalnih analiz zvočnih omaric različnih debelin iz MDF plošč (slika 29) smo ugotovili, da je imelo najnižjo resonančno frekvenco najtanjša (12 mm) ohišje, sledijo ohišja debeline 19 mm, 22 mm in 28 mm. Z večanjem debeline stranic, narašča togost materiala in posledično tudi višina resonančnih frekvenc.

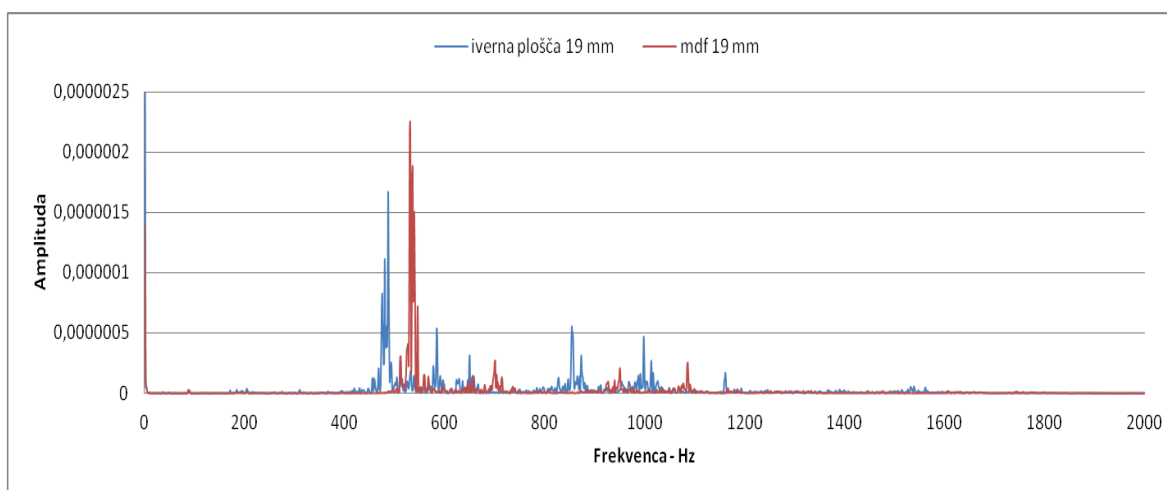


Slika 28: Primerjava modalnih analiz zvočnih omaric surova iverna plošča - bočno



Slika 29: Primerjava modalnih analiz zvočnih omaric mdف – bočno

Modalna analiza zvočnih omaric enakih debelin in različnih materialov, nam kaže razlike v višini resonančnih frekvenc. Resonančne frekvence pri zvočnih omaricah iz ivernih plošč so se pojavile pri nižjih vrednostih, kot pri omaricah iz mdف plošč. Razliko smo zaznali pri ohišju debeline 12 mm, 19 mm in 22 mm. Pri ohišju debeline 28 mm so se resonančne frekvence pojavile pri podobnih vrednostih. Iz ugotovljenega lahko sklepamo, da je togost ivernih plošč nižja od togosti mdف plošč. Na sliki 30 je prikazana primerjava modalne analize omaric iz mdف plošče in iverne plošče debeline 19 mm na bočni stranici.

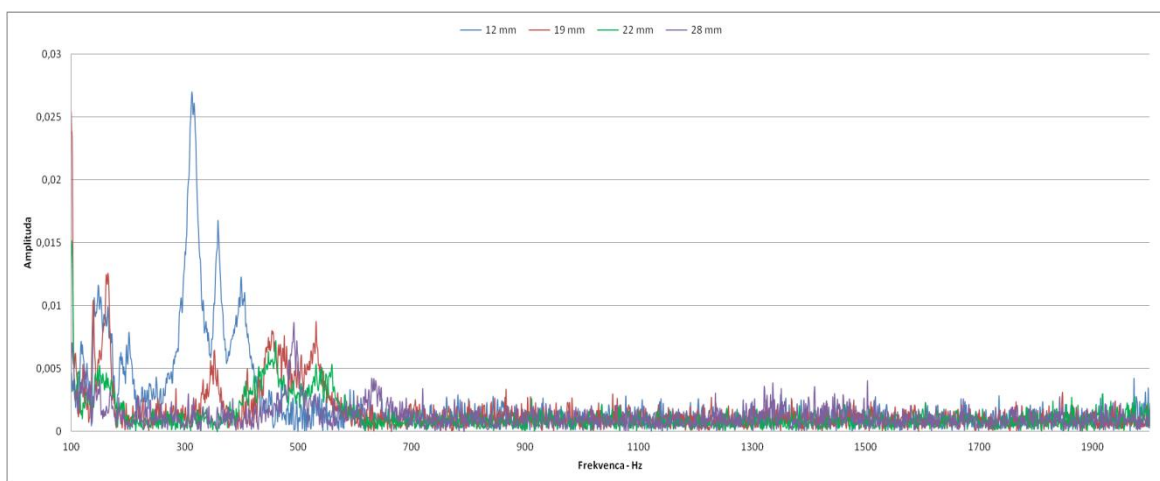


Slika 30: Primerjava modalnih analiz zvočnih omaric debeline 19 mm - bočno

4.4 PRIMERJAVA RAZMERIJ AMPLITUD

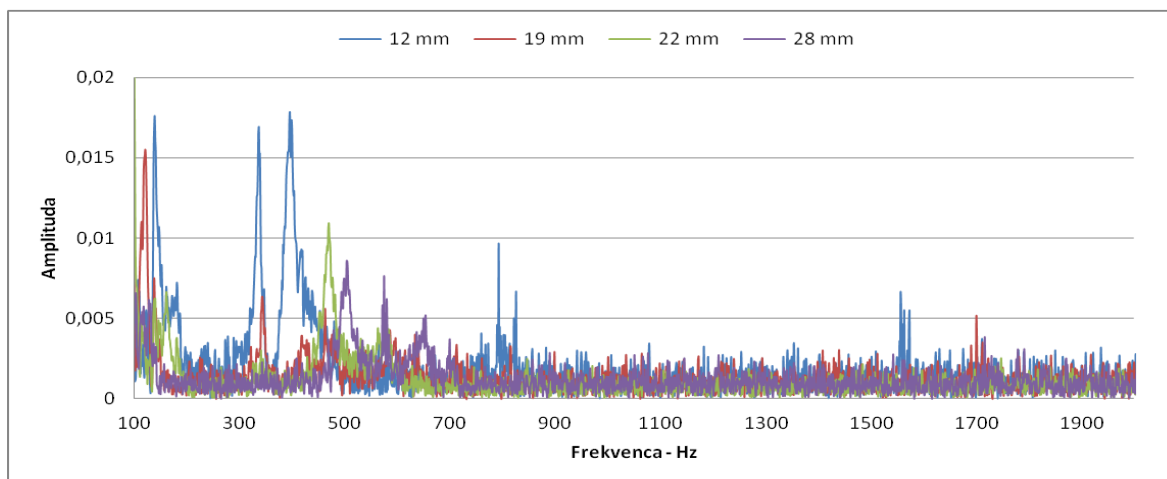
Merjenje razmerij amplitud nihanj stranic zvočnih omaric smo izvedli z induktivnim merilcem pomika na sredini in tretjini vsake stranice. Dvojne meritve smo naredili iz razloga, da bi zaznali tudi nihanja stranic z višjimi nihajnimi načini. Po opravljenih meritvah smo videli, da so se v večini primerov pojavil prvi nihajni način, saj sta bila grafa izmerjena na sredini in na tretjini skoraj identična. Zato so v grafih prikazane samo meritve dobljene na sredini stranic. Meritve smo opravili na bočni, zadnji in zgornji stranici in tudi tukaj se je pokazalo, da so dobljeni rezultati podobni, zato ne bodo prikazali vsi grafi ampak samo grafi bočnih stranic. Pri meritvah nam je prišlo do resoniranja opreme pod 150 Hz, zato dobljeni podatki pri nižjih frekvencah niso uporabni.

Pri analizi podatkov pridobljenih pri merjenju amplitud nihanj bočnih sten zvočnih omaric izdelanih iz ivernih plošč, smo ugotovili, da so bile maksimalne amplitude zabeležene pri ohišju, ki je bilo izdelano iz 12 mm debelih plošč, pri 19 mm, 22 mm in 28 mm debelini sten je amplituda padla za dve tretjini, med samimi debelinami pa ni bilo večjih razlik. Ugotovili smo tudi, da je do največjih nihanj prihajalo pri frekvencah do 600 Hz, pri višjih frekvencah pa ne več. Slika 31 prikazuje amplitude nihanj bočnih sten zvočnih omaric izdelanih iz ivernih plošč.



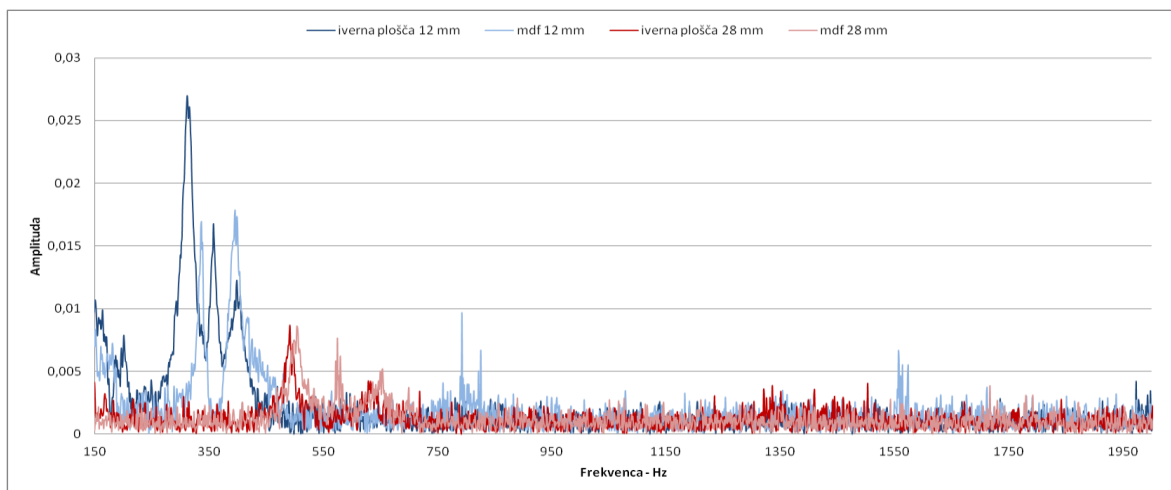
Slika 31: Prikaz razmerij amplitud nihanj bočnih stranic zvočnih omaric iz ivernih plošč

Primerjava podatkov amplitud nihanj bočnih sten zvočnih omaric izdelanih iz mdf plošč, nam kaže, da so bile maksimalne amplitude zabeležene pri ohišju, ki je bilo izdelano iz 12 mm debele plošče, pri 19 mm, 22 mm in 28 mm debelini sten je amplituda padla za polovico, med samimi debelinami pa ni bilo večjih razlik. Pri frekvencah višjih od 650 Hz so amplitude sten pri vseh debelinah enake, razen pri ohišju iz 12 mm debele plošče, kjer se pojavijo povečane amplitude tudi pri 790 Hz in 1560 Hz (slika 32).



Slika 32: Prikaz amplitud nihanj bočne stranice zvočnih omaric iz mdf plošč

Zaznana je bila tudi razlika amplitud nihanj sten omaric enakih debelin in različnih materialov (slika 33). Vidno je, da so razlike nihanj 12 mm debelih sten zelo izrazite, saj ima omarica iz 12 mm debele iverne plošče za skoraj dva krat večje amplitude kot omarica iz 12 mm debele mdf plošče. Ta razlika se z večanjem debeline izničuje, kar je vidno pri debelini 28 mm, kjer so amplitude nihanja med mdf in iverno ploščo enake.



Slika 33: Primerjava amplitud nihanj stranic iz mdf in ivernih plošč, debelin 12 mm in 28 mm

5 SKLEPI

Na podlagi rezultatov iz opravljenih raziskav lahko sprejmemo naslednje sklepe:

Iz analize podatkov pridobljenih pri modalni analizi zvočnih omaric lahko sklepamo, da so zvočne omarice izdelane iz mdf plošč bolj toge, posledično imajo resonance na višjih frekvencah, kot zvočne omarice izdelane iz ivernih plošč. Enak vpliv na togost ohišij ima večanje debeline sten in zmanjšanje površine ploskev zvočnih omaric. Zaradi vpliva velikosti površine stranic je smiselno, da se pri večjih ploskvah v zvočnih omaricah vgradijo prekati, ki razdelijo večje površine na več manjših in s tem znatno zvišajo togost stranice.

Amplituda nihanja sten zvočnih omaric je odvisna od debeline uporabljenega materiala. S prehodom debeline iz 12 mm na 19 mm lahko zmanjšamo amplitude za več kot polovico, s še dodatnim povečanjem debeline, pa samih amplitud ne zmanjšujemo več. Ta sklep velja ob predpostavki, da uporabljamo te ali podobne zvočne enote in zvočne omarice s podobno prostornino.

Bitumen ima velik vpliv na dušilne lastnosti materiala, saj je znatno povečal vrednost dušilne mere (ζ) in s tem zmanjša čas, ki je potreben, da se material izniha.

Pri merjenju prenosne funkcije smo zaznali vpliv nihanja sten na prenosno funkcijo, a samo pri 12 mm debelem mdf ohišju. Sklepamo lahko, da bi v bolj akustično urejenem prostoru zaznali vpliv nihanja sten tudi pri debelejših zvočnih omaricah.

Ob primerjavi rezultatov pridobljenimi z modalno analizo in izračunanimi z metodo končnih elementov, smo opazili ujemanje rezultatov, zato lahko sklepamo, da je metoda končnih elementov dober pripomoček za načrtovanje in izboljšanje hi fi zvočnih omaric.

6 POVZETEK

Namen diplomske naloge je ugotoviti vpliv uporabljenega materiala na mehanske in akustične lastnosti zvočnih omaric.

Za prvi del meritev, pri katerih smo poskušali izmeriti in izračunati osnovne lastnosti materiala in njihove dušilne sposobnosti, smo izdelali vzorce v razmerju 1 : 5 : 35. Vzorcem smo premerili dimenzije, jih stehali in nato konzolno vpeli. Na zgornji strani smo namestili kovinski sloj, ki ga je zaznal induktivni merilnik pomika. Vzorec smo izmaknili iz ravnovesne lege in z induktivnim merilcem beležili iznihavanje vzorca. V programu LabView smo zabeležili vrhe in frekvenco nihanja, s katerima smo izračunali dušilno mero in modul elastičnosti materiala. Rezultate smo podali v razpredelnici, v kateri so vidne vrednosti gostot, modul elastičnosti in dušilnih mer (ζ) ter izboljšanje le te z nanosom ene ali dveh plasti bitumna.

V drugem delu smo izvedli meritve na zvočnih omaricah, ki smo jih izdelali iz MDF plošč in ivernih plošč, debelin 12 mm, 19 mm, 22 mm in 28 mm. Z mikrofonom smo zmerili nihanja in naredili modalno analizo bočne, zadnje in zgornje stene. Rezultate smo prikazali grafih, iz katerih je vidno, da se resonančna frekvenca spreminja z izbiro materiala, debelino materiala in površino merjene stranice. Togost narašča z naraščajočo debelino in s tem tudi resonančna frekvenca. Večanje površine merjenih stranic togost zmanjšuje in s tem pada tudi resonančna frekvenca. Zato je smiselno pri večjih zvočnih omaricah vgraditi pregrade, ki stranico razdelijo na več manjših površin.

Ohišje smo modelirali tudi z metodo končnih elementov, kjer smo rezultate primerjali z meritvami. Primerjavo smo naredili za ohišje iz MDF plošč debeline 12 mm. Pri primerjavi rezultatov smo opazili ujemanje rezultatov obeh metod, prihajalo pa je do manjših razlik v višini resonančnih frekvenc, kar je najverjetneje posledica manjše togosti omarice pri izvajanju modalne analize, saj nismo imeli vgrajenih zvočniških enot. Pri metodi končnih elementov so se zvočne enote upoštevale.

Razmerja amplitud nihanj stranic zvočnih omaric smo izmerili z induktivnim merilcem na sredini in tretjini stranic. Na ta način smo zaznali nihanja prvega nihajnega načina, kot tudi nihanja višjih nihajnih načinov. Ugotovili smo, da so amplitude 12 mm debelih stranic MDF plošč, kot tudi ivernih plošč odstopale, saj so bile vsaj dva krat večje, kot amplitude stranic zvočnih omaric ostalih debelin. Primerjava amplitud nihanj preostalimi debelin ni pokazala večjih razlik.

Poskušali smo zaznati vpliv resonančnih nihanj stranic zvočnih omaric na prenosno funkcijo. Meritve smo izvajali v laboratoriju in zaradi slabe akustične urejenosti prostora, nam je uspelo zaznati vpliv samo pri 12 mm debeli zvočni omarici narejeni iz MDF plošč.

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016

7 VIRI

Belšak A., Prezelj J. 2013. Vibracije in zvok v vzdrževanju. Maribor, fakulteta za strojništvo: 193 str.

Boležar M. 2006. Mehanika nihanja. 1. Del. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo: 199 str.

Čermak M. 1998. Tehnologija lesa 1. Železniki, Pami: 206 str.

Čudina M. 2014. Tehnična akustika. Merjenje, vrednotenje in zmanjševanje hrupa in vibracij. 2. izvod. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo: 332 str.

Fefer D., Jeglič A. 1993. Elektroakustika. Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo: 328 str.

Muršič M. 1991. Osnove tehniške mehanike 3. Dinamika. Ljubljana, Akademsko založba: 294 str.

Pain H. J. 1993. The physics of vibrations and waves. 4. Izvod. Chichester, John Wiley & Sons Ltd: 479 str.

Strnad J. 2010. Svet nihanj in valovanj. Ljubljana, DMFA – založništvo: 197 str.

Izotem V3. Fragmat TIM d.o.o. (19. maj 2016).

<http://www.fragmat.si/si/gradbeni-program/izdelki/hidroizolacija/trakovi-iz-oksidiranega-bitumna/548-izotem-v3>

Gledališče v Epidavru. Wikipedija, prosta enciklopedija (19. mar. 2016).

https://sl.wikipedia.org/wiki/Gr%C5%A1ko_gledali%C5%A1%C4%8De

ZAHVALA

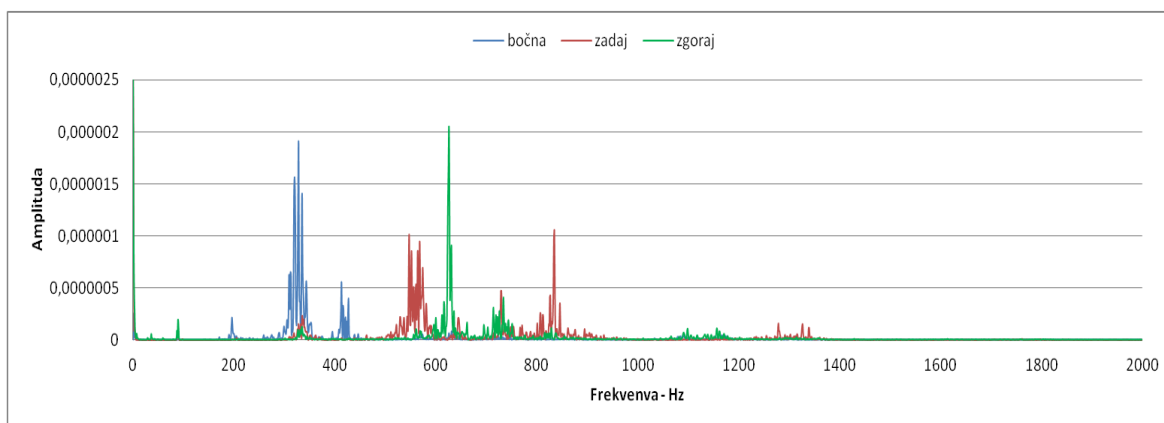
Najprej bi se rad zahvalil doc. dr. Miranu Merharju za pomoč in mentorstvo pri izdelavi diplomske naloge. Zahvalil bi se tudi doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za so mentorstvo in prof. dr. Željku Gorišku za recenzijo. Rad bi se zahvalil tudi ostalim, ki so na kakršenkoli način pripomogli k izdelavi diplomske naloge, pa so ostali neimenovani.

Na koncu bi se rad zahvalil še družini za moralno in gmotno pomoč ter vso podporo v času študija.

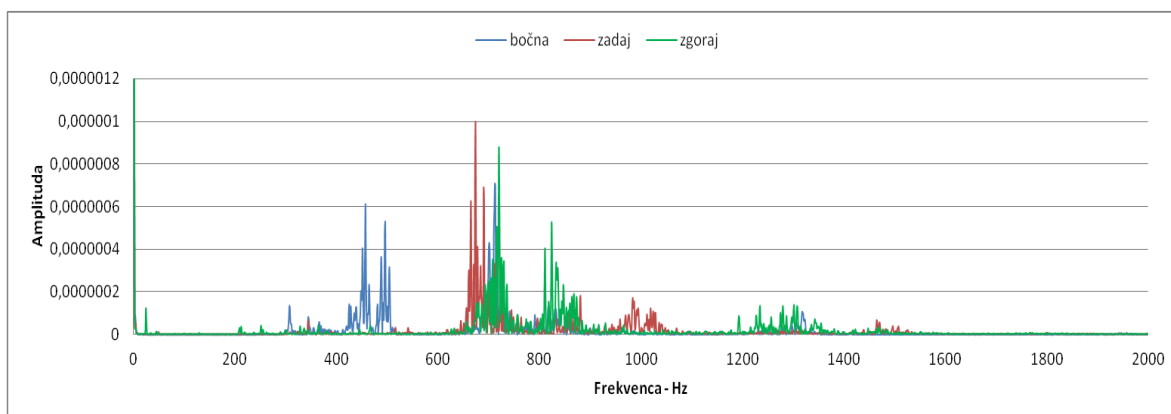
PRILOGE

Priloga A:

Modalna analiza zvočnih omaric



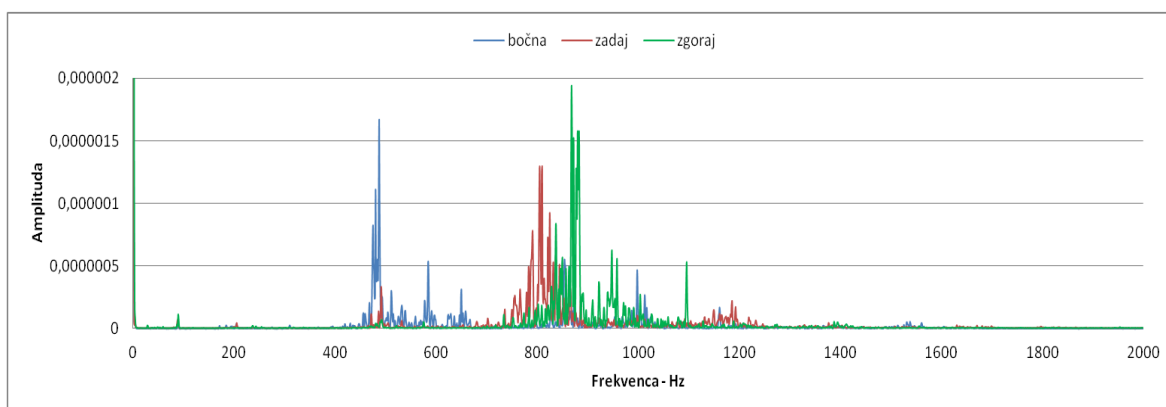
Modalna analiza zvočnih omaric surova iverna plošča 12 mm bočno, zadaj, zgoraj



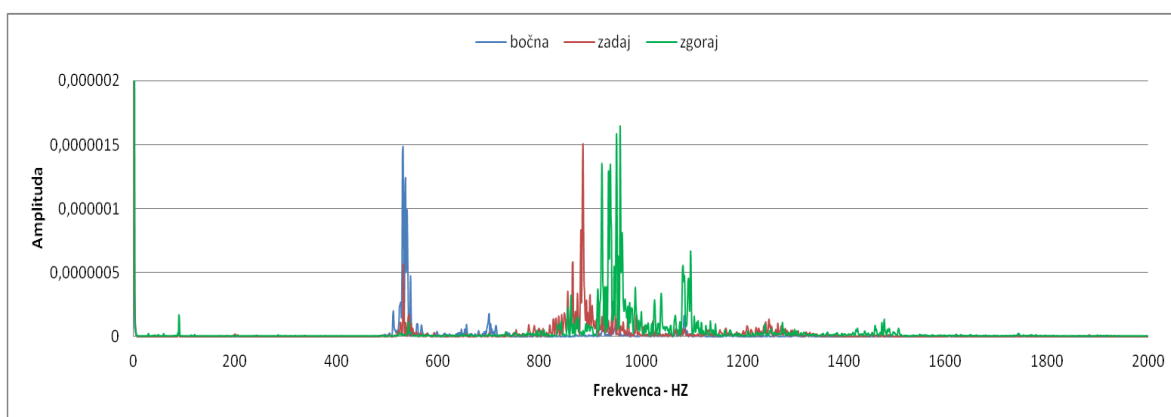
Modalna analiza zvočnih omaric mdf 12 mm bočno, zadaj, zgoraj

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

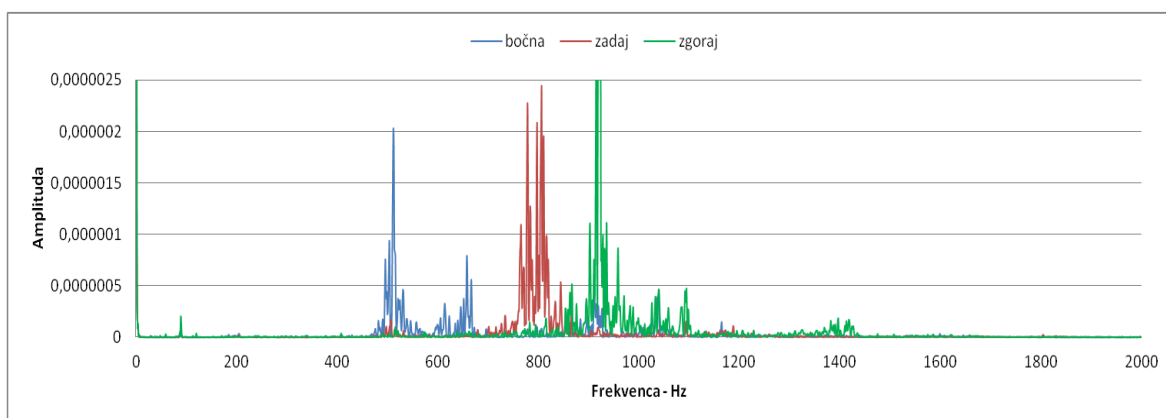
Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016



Modalna analiza zvočnih omaric surova iverna plošča 19 mm bočno, zadaj, zgoraj



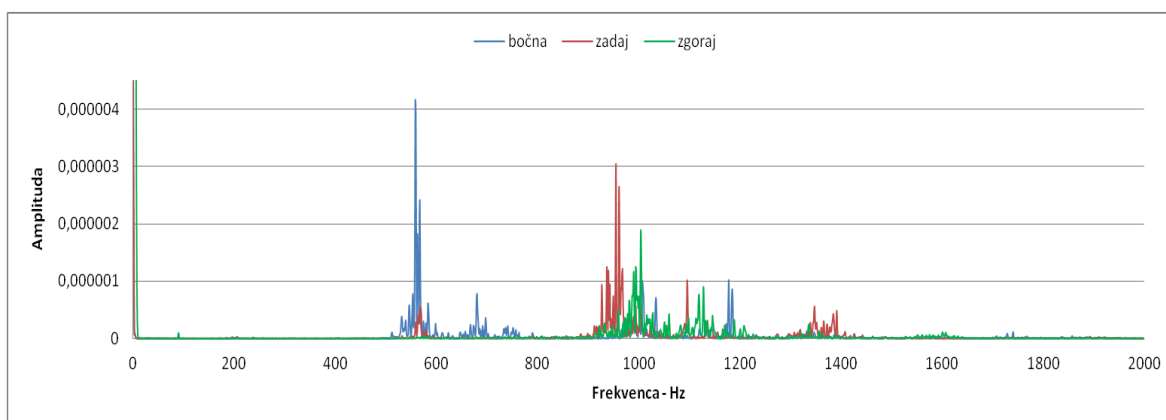
Modalna analiza zvočnih omaric mdf 19 mm bočno, zadaj, zgoraj



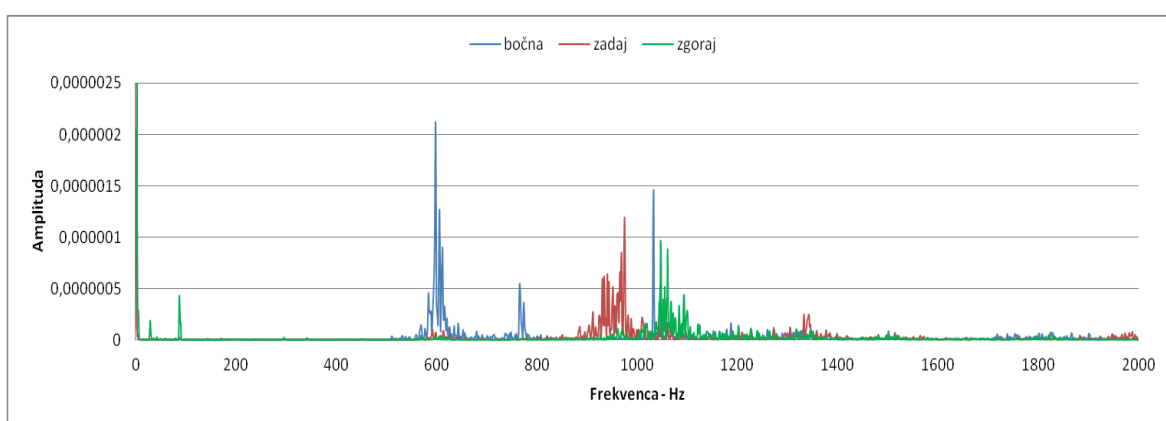
Modalna analiza zvočnih omaric surova iverna plošča 22 mm bočno, zadaj, zgoraj

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

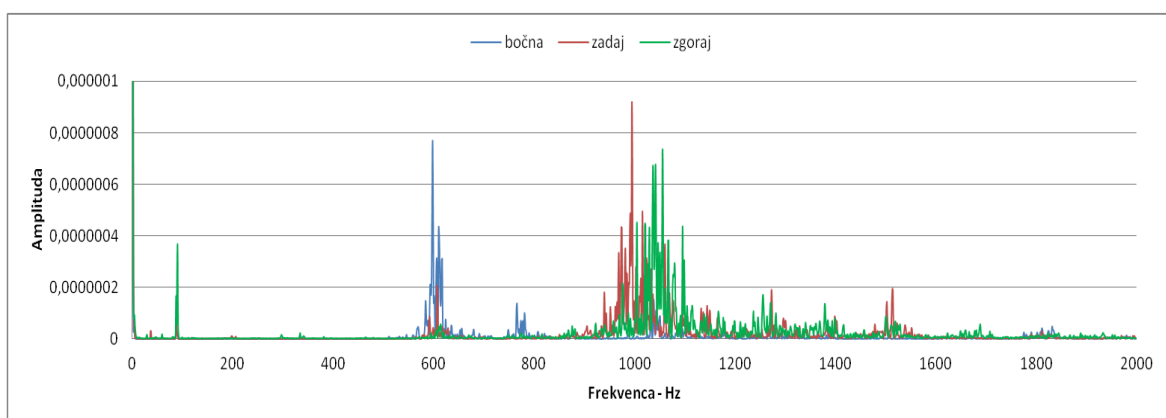
Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016



Modalna analiza zvočnih omaric mdf 22 mm bočno, zadaj, zgoraj



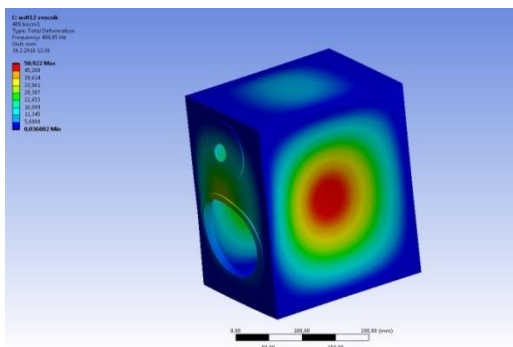
Modalna analiza zvočnih omaric surova iverna plošča 28 mm bočno, zadaj, zgoraj



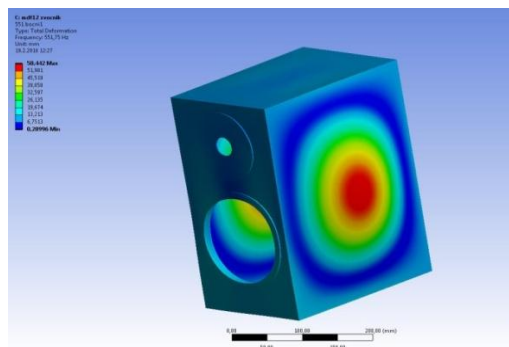
Modalna analiza zvočnih omaric mdf 28 mm bočno, zadaj, zgoraj

Priloga B:

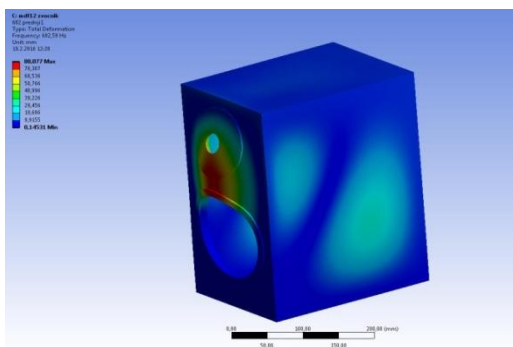
Nihajni načini 12 mm mdf ohišja



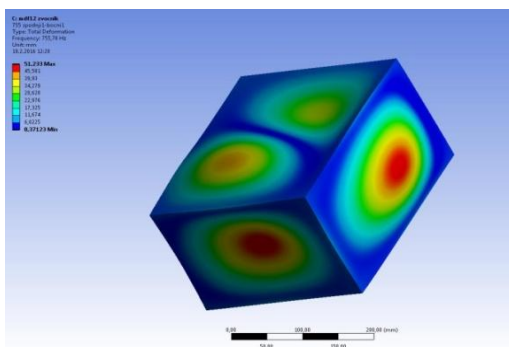
Prvi nihajni način bočne stranice – 409 Hz



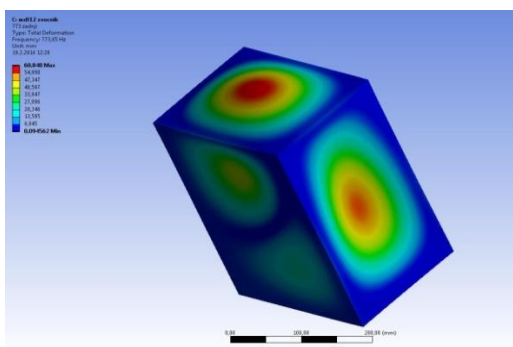
Prvi nihajni način bočne stranice -551 Hz



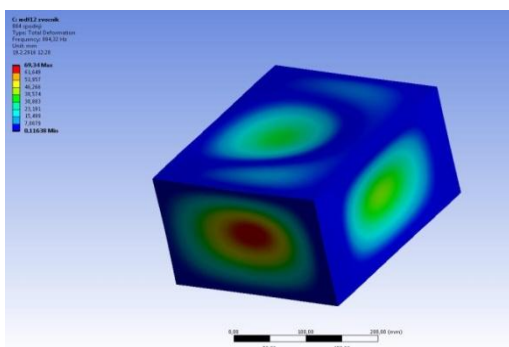
Nihanje prednje stranice – 682 Hz



Prvi nihajni način zadnje stranice – 755 Hz



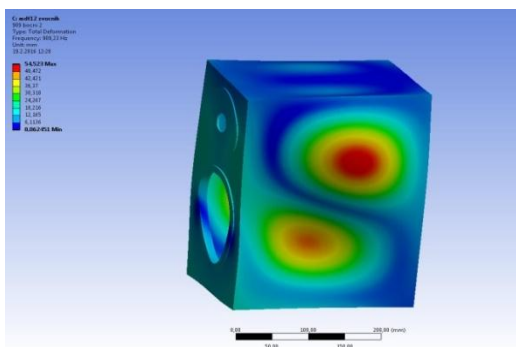
Prvi nihajni način zgornje stranice – 773 Hz



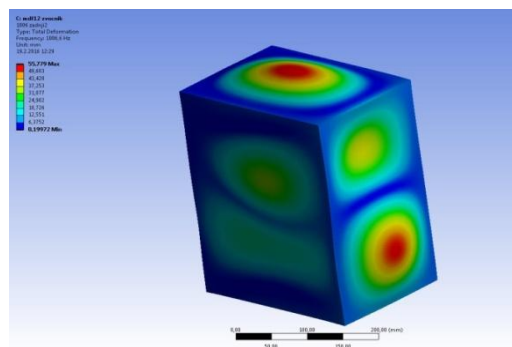
Prvi nihajni način zgornje stranice – 884 Hz

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

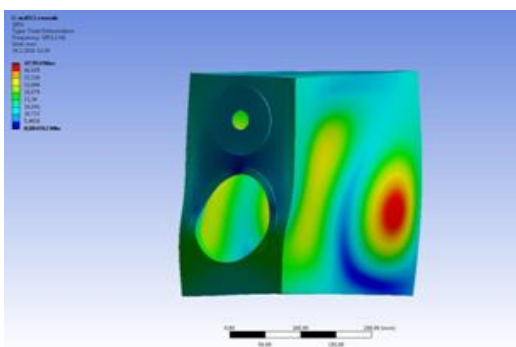
Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016



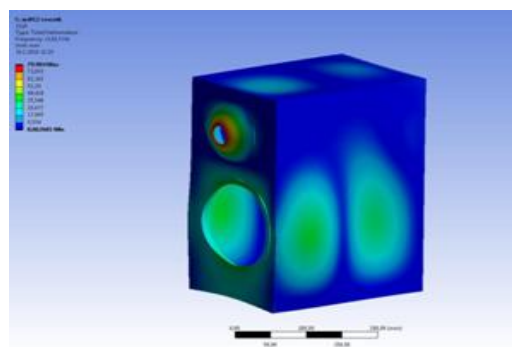
Drugi nihajni način bočne stranice – 909 Hz



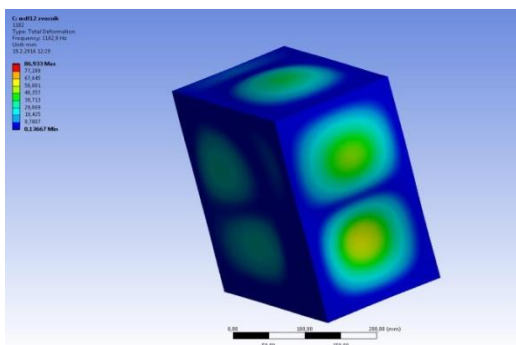
Prvi način zgornje ali drugi zadnje stranice–1006 Hz



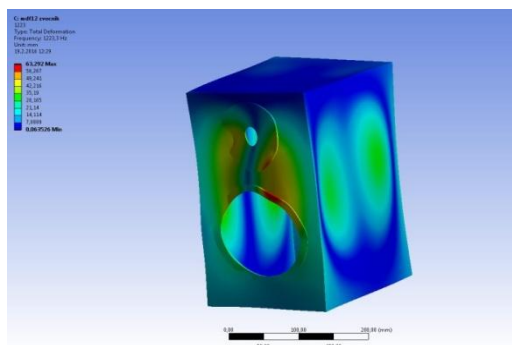
Drugi nihajni način bočne stranice – 1051 Hz



Nihajni način prednje stranice – 1116 Hz



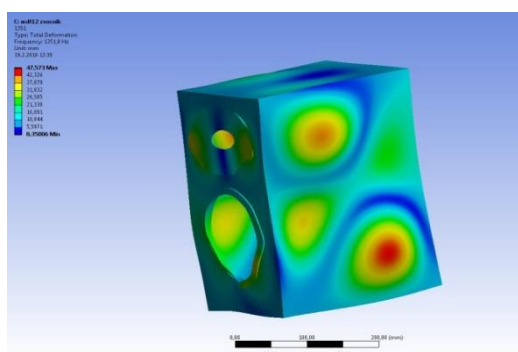
Drugi nihajni način zadnje stranice – 1182 Hz



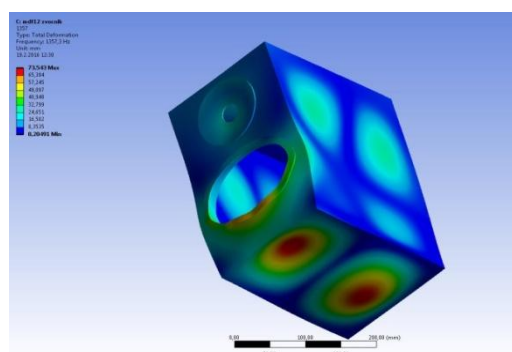
Drugi nihajni način sprednje stranice – 1223 Hz

Holcman M. Akustična analiza zvočnih omaric.

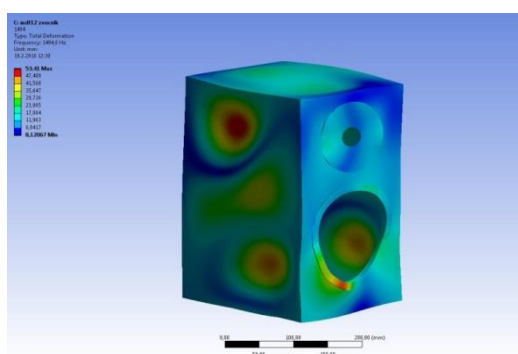
Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2016



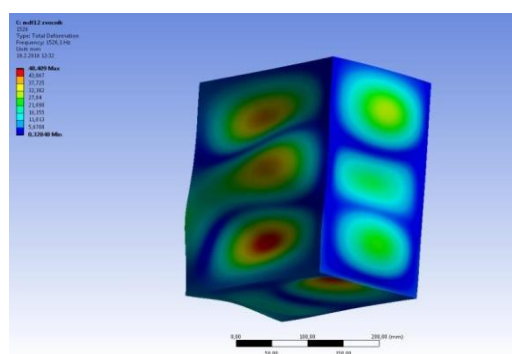
Četrti nihajni način bočne stranice – 1351 Hz



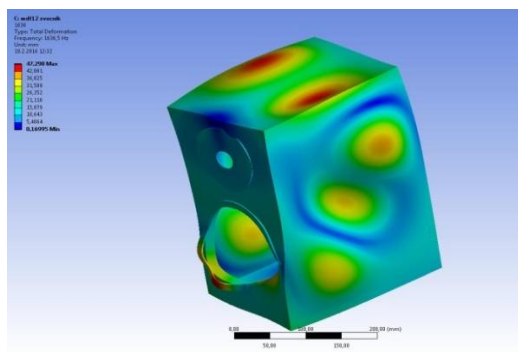
Drugi nihajni način spodnje stranice – 1357 Hz



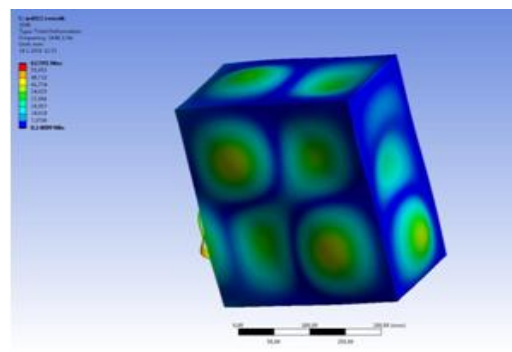
Tretji nihajni način bočne stranice – 1404 Hz



Tretji nihajni način bočne ali zadnje stranice – 1526 Hz



Drugi nihajni način zgornje stranice – 1636 Hz



Drugi način zgornje ali četrti bočne stranice – 1648 Hz

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Mihael HOLCMAN

AKUSTIČNA ANALIZA ZVOČNIH OMARIC

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2016