

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**NUMERICKÝ MODEL AKUSTICKÝCH
VLASTNOSTÍ DĚLÍČÍ KONSTRUKCE
DŘEVOSTAVBY**

Diplomová práce



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: Bc. Samo Štěpánek
Studijní program: Stavby na bázi dřeva
Obor: Stavby na bázi dřeva

Vedoucí práce: Ing. Jan Tippner, Ph.D.
Konzultant: Ing. et Ing. Jan Klepárník

Název práce: **Numerický model akustických vlastností dělicí konstrukce dřevostavby**

Zásady pro vypracování:

1. Cílem práce je simulovat akustické chování vybrané vodorovné a svislé konstrukce dřevostavby pomocí metody konečných prvků. V první části literárního přehledu práce stručně pojedná o problémech stavební akustiky, analýze akustických vlastností dělicích stavebních konstrukcí, využití výpočetních metod v této oblasti, postupně se zaměří na možnosti využití metody konečných prvků k simulování akustického chování desek.
2. V prostředí ANSYS budou sestaveny numerické modely několika typů dělicích konstrukcí a na základě výstupů simulací budou tyto konstrukce porovnány z pohledy frekvenční odezvy a útlumu akustického tlaku, provedena bude pravděpodobnostní citlivostní analýza sledující posouzení vlivu jednotlivých faktorů na chování desky (materiál, skladba, geometrie apod.), výstupy budou diskutovány.
3. Práce bude dodržovat standardní strukturu vědecké práce a respektovat směrnici děkana LDF č. 2/2007 "O úpravě písemných prací a o citaci dokumentů užívaných kvalifikačních prací podávaných na LDF".

Rozsah práce: 60 stran

Literatura:

1. BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. Boca Raton: CRC Press, 1995. 284 s. ISBN 0-8493-4801-3.
2. MECHEL, F. *Formulas of Acoustics*. Berlin: Springer, 2002. 1175 s.
3. FICKER, T. *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting : Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004. 266 s. ISBN 80-214-2670-5.
4. VAVERKA, J. *Akustika. Souhrn kritériálních požadavků a výpočtových metod v oboru : stavební a prostorové akustiky*. Brno: VUT, 1996. 156 s. ISBN 80-214-0743-3.
5. KAŇKA, J. *Akustika stavebních objektů*. 1. vyd. Brno: ERA, 2009. 145 s. ISBN 978-80-7366-140-3.
6. VAVERKA, J. a kol. *Stavební fyzika I*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. Učebnice. ISBN

- 80-214-1283-6.
7. MRLÍK, F. *Stavební tepelná technika a stavební akustika*. 3. vyd. Brno: VUT, 1992. 172 s. ISBN 80-214-0481-7.
 8. MADENCI, E. -- GUVEN, I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer, 2006. 686 s. ISBN 0-387-28289-0.
 9. MOAVENI, S. *Finite element analysis : theory and application with ANSYS*. 3. vyd. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2008. 861 s. ISBN 978-0-13-241651-1.
 10. TOPPING, B H V. *Advances in finite element technology*. Edinburgh: Civil-Comp, 1996. 453 s. ISBN 0948749415.
 11. TOPPING, B H V. -- KUMAR, B. *Developments in analysis and design using finite element methods*. Edinburgh: Civil-Comp, 1999. 282 s. ISBN 0-948749-61-X.
 12. ZIMMERMAN, W B J. *Process modelling and simulation with finite element methods*. Singapore : World Scientific, 2004. 382 s. Series on stability, vibration, and control of systems. ISBN 981-238-793-5.
 13. ZIENKIEWICZ, O. -- TAYLOR, R. *The finite element method : Solid and fluid Mechanics, dynamics and non-linearity . Volume 2*. 4. vyd. Berkshire: McGraw-Hill, 1991. 807 s. ISBN 0-07-084175-6.

Datum zadání: listopad 2013

Datum odevzdání: duben 2015

Bc. Samo Štěpánek
Autor práce

Ing. Jan Tippner, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Ing. Vladimír Gryc, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Dr. Ing. Petr Horáček
Děkan LDF MENDELU

Čestné prehlásenie:

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému: „Numerický model akustických vlastností dělicí konstrukce dřevostavby“ spracoval samostatne a všetky použité pramene a informácie uvádzam v zozname použitej literatúry. Súhlasím, aby moja diplomová práca bola zverejnená v súlade s § 47b Zákona č. 111/1998 Zb., o vysokých školách v znení neskorších predpisov a v súlade s platnou Smernicou o zverejňovaní vysokoškolských záverečných prác.

Som si vedomý, že sa na moju prácu vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzatvorenie licenčnej zmluvy a použitie tejto práce ako školského diela podľa § 60 odst. 1 autorského zákona.

Ďalej sa zaväzujem, že pred spísaním licenčnej zmluvy o využití diela inou osobou (subjektom) si vyžiadam písomné stanovisko univerzity, že predmetná licenčná zmluva nie je v rozpore s oprávnenými záujmami univerzity a zaväzujem sa uhradiť prípadný príspevok na úhradu nákladov spojených so vznikom diela, a to až do ich skutočnej výšky.

V Brne dňa 20.4.2015

podpis študenta:

Bc. Samo Štěpánek

Pod'akovanie:

Na úvod by som sa touto cestou rád poďakoval vedúcemu diplomovej práce Ing. Janovi Tippnerovi, Ph.D., za odbornú spoluprácu, dodanie motivácie, metodické vedenie, pripomienky a námety, ktoré boli pre moju prácu prínosné a v neposlednom rade poskytnutú pomoc pri realizácii tejto práce.

Moje poďakovanie za podporu a motiváciu po celú dobu štúdia patrí predovšetkým mojej rodine a mojej priateľke Nine.

Autor

Bc. Samo Štěpánek

Názov práce

Numerický model akustických vlastností dělicí konstrukce dřevostavby

Abstrakt

Diplomová práce sa zaoberá tvorbou numerického modelu slúžiaceho pre analýzu akustických vlastností deliacej konštrukcie dřevostavby. Práca obsahuje teoretické východiská pre spracovanie témy, pojednáva o nepriezvučnosti deliacich konštrukcií, zameriava sa na dřevostavby, popisuje výpočtové prostredie ANSYS a tvorbu modelu v ňom. Bolo zostavených viac variant modelov, model CLT panelu aj model rámovej konštrukcie. Samotné zostavenie modelu využíva skriptovací jazyk APDL a je popísané v jednotlivých krokoch. Výsledky numerickej simulácie popisujú distribúciu tlaku pred a za deliacou konštrukciou. Z výsledkov sú zostavené grafy a je určená hodnota jednočíselného vyjadrenia váženej vzduchovej nepriezvučnosti. V závere sú výsledky jednotlivých variant modelu porovnané, sú diskutované možnosti spresnenia modelu.

Kľúčové slová

Akustika, akustické vlastnosti dřevostavby, dělicí konstrukce dřevostavby, dřevostavba, CLT, ANSYS, APDL, FSI

Author

Bc. Samo Štěpánek

The title of work

Numerical model of the acoustic properties of separating construction of a wooden structure

Abstract

The Master's thesis deals with the creation of the numerical model that serves to analysis of the acoustic properties of separating construction of a wooden structure. The work includes theoretical basis for solving the subject, it discusses the airborne sound insulation of separating structures, focuses on wooden buildings, describes a computing environment ANSYS and model creation in it. More variants of model were compiled, CLT panel and frame construction. Model itself is using scripting language APDL and each step of creation is described. The results of numerical simulations describe the distribution of pressure in front and behind the separation construction. Results are compiled into graphs and single value of weighted airborne sound insulation is evaluated. In conclusion individual results of model variants are compared, model accuracy improvements are discussed.

Key words

Acoustics, acoustic properties of wooden structure, separating construction of wooden structure, CLT, ANSYS, APDL, FSI

Obsah	
1 ÚVOD.....	1
2 CIEĽ PRÁCE	2
3 LITERÁRNY PREHĽAD	3
3.1 Stavebná akustika.....	3
3.2 Zlepšenie stavebnej akustiky.....	3
3.3 Predikčné metódy	4
3.4 Materiál a jeho zvukovo izolačné vlastnosti	5
3.5 Modelovanie akustiky	6
4 AKUSTIKA STAVEBNÝCH KONŠTRUKCIÍ.....	9
4.1 Vzduchová nepriezvučnosť.....	9
4.2 Delenie konštrukcií	14
4.3 Vzduchová nepriezvučnosť drevostavieb	17
4.3.1 Rezonancia typu hmotnosť-poddajnosť-hmotnosť (Mass-Spring-Mass). 19	
4.3.2 Stojaté vlnenie vo vzduchovej medzere (Standing Waves Region)	20
4.3.3 Vlnová koincidencia	21
4.3.4 Útlm v pružnej vrstve	21
4.3.5 Vplyv nosných stĺpikov a spojov.....	22
4.4 Normatívne požiadavky	23
4.5 Zásady návrhu pre správnu zvukovú izoláciu.....	26
5 MATERIÁL A METODIKA	28
5.1 Metóda konečných prvkov	28
5.2 Akustická analýza v ANSYSe	29
5.2.1 Základné akustické rovnice	29
5.2.2 Proces tvorby akustickej analýzy.....	30
5.2.3 Tlmenie	31
5.3 Použité elementy	33

5.3.1	SOLID185.....	33
5.3.2	FLUID30.....	34
5.4	Výpočtový model.....	36
5.4.1	Výpočet hodnoty útlmu.....	40
5.4.2	Export výsledkov.....	42
5.4.3	Citlivostná analýza.....	43
5.5	Analýza rámovej konštrukcie.....	43
5.6	Analýza panelu CLT.....	46
6	VÝSLEDKY A DISKUSIA.....	50
6.1	Verifikácia.....	50
6.1.1	Rámová konštrukcia.....	50
6.1.2	CLT panel.....	53
6.2	Citlivostná analýza.....	59
6.2.1	Vplyv celkovej hrúbky CLT panelu na výsledný útlm.....	59
6.2.2	Vplyv hrúbky izolácie CLT panelu na výsledný útlm.....	61
6.2.3	Vplyv tlmenia.....	64
6.2.4	Vplyv veľkosti elementu.....	66
7	ZÁVER.....	68
8	SUMMARY.....	70
9	POUŽITÁ LITERATÚRA.....	72
	Zoznam obrázkov.....	75
	Zoznam tabuliek.....	77
	Zoznam príloh.....	78
10	Prílohy.....	79

1 ÚVOD

Vplyvy prostredia v ktorom žijeme, denne sa pohybujeme, majú na ľudský organizmus niekedy aj stresujúci vplyv. Jedným z týchto negatívnych vplyvov je aj nadmerné zaťaženie hlukom z okolitého prostredia. Príliš časté alebo silné, v nevhodnú dobu prípadne na nevhodnom mieste sa vyskytujúce zvuky sú nežiadúce.

V posledných rokoch môžeme pozorovať návrat k prírodným materiálom a k produktom šetrných k nášmu životnému prostrediu. Preto nie je prekvapením, že podiel drevostavieb na trhu sa stále zvyšuje. To prináša aj nové otázky ohľadom druhu takejto výstavby. Verejnosť čoraz viac dáva prednosť pred kvalitou než cenou, požiadavky na výstavbu sa dostali na pomyselný vrchol a preto je dôraz kladený aj na celkový akustický dojem v obytnom priestore vysoký.

V samostatne stojacich domoch, v rámci jednej rodiny problém šíriaceho zvuku napríklad z izby do izby nemusí byť problémom. No súčasný trend výstavby viacpodlažných budov v dôsledku nedostatku pozemkov a neustálemu zvyšovaniu ich cien, prináša potrebu riešenia zvukovej izolácie v komplexnej miere.

2 CIEĽ PRÁCE

Cieľom práce je zostavenie numerického modelu deliacej konštrukcie drevostavby a následná analýza tejto konštrukcie z pohľadu akustických vlastností.

Hlavným cieľom je zostavenie konečne prvkového modelu v prostredí programu ANSYS, pomocou skriptovacieho jazyka APDL. Na zostavenom parametrickom skripte bude urobená pravdepodobnostná citlivostná analýza, ktorá posudzuje viaceré parametre a posudzuje ich vplyv na výsledný útlm.

Výstupom práce bude popis simulácie, charakteristika použitých príkazov programu ANSYS, popis jednotlivých variant modelov a vyhodnotenie výsledkov modelovaných konštrukcií.

3 LITERÁRNY PREHLAD

3.1 Stavebná akustika

Wallace Clement Sabine je považovaný za otca priestorovej akustiky, ktorý ako prvý urobil kvantitatívne merania akustiky miestnosti a vydal knižku *Reverberation* (1900). Revidované vydanie *Collected Papers on Acoustics by Wallace Clement Sabine* (1964) vyšlo neskôr. Samotný autor objavil empirický vzťah tzv. Sabinov vzťah $T = 0.164V/A$, kde T je doba dozvuku v sekundách, V je objem miestnosti v m^3 a A je celková pohltivosť v m^2 , ktorý sa v upravenej forme používa dodnes.

Komplexným a obsiahlym dielom je *Master Handbook of ACOUSTICS* (2001) od F. Alton Everesta popisujúcim fyzikálnu podstatu zvuku, veličiny popisujúce zvuk, hluk, ale aj vnímanie zvukov a hlukov ľudským uchom.

Stavebnej akustike sa venovalo aj niekoľko českých a slovenských autorov. Z rozsiahlejších publikácií to boli *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie* (1985) od M. Halahyja a kolektívu, ďalším obsiahlym dielom je *Stavební fyzika I, urbanistická, stavební a prostorová akustika* od J. Vaverku a kol. (1998), kde rozoberá akustické merania, stručne sa zaoberá normovým požiadavkám, rieši jednotlivé prvky stavebnej akustiky, či už hmotných stien alebo ľahkých stien, jednoduchých alebo násobných stien, kombinovaných priečok, zložených stien a stropov, spolu s niektorými detailmi a príkladmi výpočtov. Tiež sa venuje priestorovej a urbanistickej akustike.

Skriptum zaoberajúce sa šírením zvuku a jeho pohlcovaním hlavne z pohľadu stavebných konštrukcií s množstvom riešených príkladov a ukážok je *Stavební fyzika I - Akustika budov* (2007) od J. Kaňku.

3.2 Zlepšenie stavebnej akustiky

Viacposchodové drevostavby predpokladajú vyšší dôraz na akustické vlastnosti z dôvodu spolunažívania viacerých rodín v rámci jednej stavby. Pre zabezpečenie akustickej pohody v celom objekte je nutné hľadať spôsoby pre zlepšenie stavebnej akustiky.

Klas G. Hagbert a Tommy Persson v článku *Wooden building system with high sound insulation* (2008) navrhujú možné riešenia pre zvýšenie akustických vlastností deliacich konštrukcií. Popisujú priamo návrh Švédskej firmy pre rezidenčné bývanie

s maximálnou výškou objektu do ôsmych poschodí. Realizovanú stavbu následne zmerali a vyhodnotili výsledky. Prístupom bolo pružné zavesenie čo najväčšieho počtu stavebných prvkov, napr. pre uloženie stropov na nosné konštrukcie stien používali kovový „vešiak“ s upevneným tlmiacim materiálom v mieste styku zvislej a vodorovnej konštrukcie. Ďalej poukazujú na požiadavku vysokej presnosti pri výrobe samotných konštrukcií. Problémom naďalej ostáva oblasť nízkych kmitočtov.

Krokom pre dosiahnutie akustickej pohody v drevostavbe je aj samotné spracovanie. Vplyv spracovania na prenos zvuku vzduchom cez steny ľahkých konštrukcií, medzi ktoré patrí aj drevostavba je spracovaný v článku *The effect of workmanship on the transmission of airborne sound through light framed walls* (2006) od autora J. W. Trevanthana.

Možným riešením pre zlepšenie zvukového výkonu vo viacpodlažných budovách z dreva sa v článku *Potential solutions to improved sound performance of volume based lightweight multi-storey timber buildings* (2010) zaoberal F. Ljunggren. Hovorí o budove zloženej z dielcov, kde "volume" v zmysle jedného poschodia (modulu) skladá na seba tak, aby neboli konštrukčne spojené, ale pružne uložené na elastomere (pružný materiál). To zaručuje znížený prenos vibrácií cez konštrukciu.

3.3 Predikčné metódy

V súčasnosti nie je možné, či už z pohľadu ekonomického alebo časového vyhodnocovať akustické vlastnosti konštrukcií pomocou merania. V niektorých prípadoch je to nevyhnutné, no vo väčšine sa postupuje pomocou predikčných metód, najčastejšie výpočtom.

Presnosťou predikčných metód pre určovanie útlmu sa zaoberal aj K. O. Ballagh vo svojej práci *Accuracy of Prediction Methods for sound Transmission Loss*, v ktorej porovnával reálne meranie s výpočtom pri jednoduchej aj dvojitej skladbe steny a to v kmitočte od 50 do 5 000 Hz. Porovnával napríklad homogénne jednoduché panely ako rámovú konštrukciu jednostranne opláštenú sadrokartónom, ale aj 190 mm hrubú betónovú stenu. Pri takýchto konštrukciách neprišiel na rozdiel medzi výpočtom a experimentom. Pri zložitejších dvojitých konštrukciách už rozdiely boli väčšie, ale nie nejaké závažné, že by sa úplne vylučovali. Celkové rozdiely medzi teoretickým výpočtom a experimentom ležali vždy v rozmedzí $\pm 2,5$ dB, v 90% prípadov to bolo do 0,5 dB.

Kolektív autorov David Quirt, Berndt Zeitler, Stefan Schoenwald, Ivan Sabourin a Trevor Nightingale pod záštitou National Research Council Canada zostavili príručku v ktorej na množstve príkladov výpočtu podľa ISO 15712-1 používanej pre Severnú Ameriku. Hovoria o tom, že podľa tejto normy sú výpočty pre betónové podlahy, prípadne murované a betónové steny spoľahlivé, no pre zložitejšie konštrukcie, predovšetkým pre drevené prvky nedostatočné. Preto táto príručka zobrazuje postupy a návrh ako počítať práve v takýchto konštrukciách. V kapitole 3 sa venuje CLT panelom a v kapitole 4 ľahkým konštrukciám s nosnou konštrukciou z dreva alebo ocele. Posudzuje viaceré cesty šírenia zvuku, či už iba podlahou alebo iba stenou, následne ich kombináciou a podobne. Napríklad pri CLT paneloch skúmajú 3 vrstvový panel o hrúbke 78 mm, porovnajú útlm zmeraný a vypočítaný, zahŕňajú niekoľko možných scenárov šírenia zvuku. Nedostatkom je, že uvádzajú len hodnoty a nie samotný postup výpočtu.

3.4 Materiál a jeho zvukovo izolačné vlastnosti

Základným materiálom pre deliace konštrukcie drevostavieb, resp. drevených stavebných prvkov je drevo. Drevo je prírodný heterogénny materiál, tvorený celulóзовými vláknami, hemicelulózami a lignínom. Jeho anizotropné chovanie značne komplikuje popis chovania tohto materiálu. Ako prírodný materiál vykazuje pomerne vysokú variabilitu vlastností. Problematikou fyzikálne mechanických vlastností dreva sa zaoberalo množstvo autorov, ako napr. Požgaj et al. (1997) alebo Bodig et. al (1993).

Akustické vlastnosti dreva obsiahlo popisuje Voichita Bucur v kolekcii od Springeru pod názvom *Acoustics of wood* (2006). Rozoberá základy šírenia zvuku v dreve, vplyv anatomickej štruktúry dreva na zvukovú pohltivosť, popisuje správanie dreva ako akustického „izolantu“, ale aj jeho rezonančné vlastnosti. Celkovo porovnáva aj kvalitu dreva v závislosti od druhov dreva, vplyv na hudobné nástroje a iné. V tejto publikácii nájdeme väčšinu pre akustiku dôležitých materiálových charakteristík rôznych drevín, ako sú hustota, Youngov modul pružnosti, modul pružnosti v šmyku, Poissonové čísla aj rýchlosť šírenia zvuku samozrejme pre rôzne smery.

Pomerne rozširujúcim sa typom nosných stavebných konštrukcií z masívneho dreva sú panely z krížom vrstveného dreva (z angl. Cross Laminated Timber – CLT). Svoje uplatnenie si nachádza nie len v malých stavbách rodinnej zástavby, ale predovšetkým pri viacpodlažných budovách. V článku *Sound insulation performace on Cross*

Laminated Timber Building Systems (2013) sa kolektív autorov okolo Stefana Schoenwalda venuje práve CLT panelom a ich akustickým vlastnostiam. Skúmajú ako vzduchovú nepriezvučnosť, tak kročejovú nepriezvučnosť. Cieľom pre nich bolo zostaviť základné dáta pre architektov a projektantov, ktoré by využili ako podklad pre návrh a predpoklady akustického správania takýchto konštrukcií. V rámci experimentu vyhodnocujú 3 vrstvový (78 mm) a 5 vrstvový (175 mm) CLT panel v tretinooktávovom pásme kmitočtov. Výsledkom je stratový faktor približne 0,05 v nízkych až stredných kmitočtoch, jedine nad hodnotou 2000 Hz je stratový faktor menší a to 0,02. Panel väčšej hrúbky mal aj lepšie zvukovo izolačné vlastnosti, predovšetkým z dôvodu vyššej celkovej hmoty. Rozdiel váženej vzduchovej nepriezvučnosti bol 5 dB v prospech 5 vrstveného panelu. Výsledky tohto experimentu slúžia aj ako verifikácia zostaveného modelu.

CLT Handbook (2013) je príručkou od FPInnovations editovanou E. Karacabeyltom a v súhrnnej forme opisuje CLT ako stavebný materiál. Venuje sa výrobe, konštrukčným riešeniam, požiadavkám na zabudovanie, , možným riešeniam pripojenia, únosnostiam, fyzikálne mechanickým vlastnostiam ale aj požiarou ochranou a akustikou CLT panelov.

Pre docielenie želaných hodnôt zvukového útlmu, či už vzduchovej nepriezvučnosti alebo krokovej nepriezvučnosti je nutné sa zamyslieť nad vhodnou voľbou zvukovo izolačných materiálov. Skúmaním zvukovo izolačných vlastností sadrokartónových a sadrovláknitých dosiek sa vo svojej práci *Sound insulation of gypsum board in practice* (2005) zaoberala dvojica Marco Losso a Elvira Viveiros. Vo svojej práci vyzdvihujú sadrokartónové dosky ako možným riešením pre zvýšenie zvukovo izolačných vlastností, pri pomerne nízkej plošnej hmotnosti. Hovoria o materiáli, ktorý je ľahko skladovateľný, jednoducho prenesený, či už pre svoju nízku váhu alebo objem. Poukazujú na zlepšenie útlmu o približne 8 dB pri použití jednej vrstvy 12,5 mm hrubého sadrokartónu.

3.5 Modelovanie akustiky

V súčasnej počítačovej dobe, kedy sa pomaly vytráca problém výpočtového výkonu si modelovanie nachádza svoje uplatnenie aj v akustike. Merania v reálnom čase, na reálnych stavebných objektoch je nákladnou a časovo náročnou úlohou, čo hrá v prospech rôznych numerických metód.

Prehľad nad štandardnými numerickými metódami a diskusia nad ich presnosťou možno nájsť v článku *Challenges in Technical Acoustics: What Can Be Computed Today* (2008) od autora Otta von Esterffa. Spomínané prístupy riešenia sú MKP – metóda konečných prvkov (z angl. FEM – Finite Element Method), MHP - metóda hraničných prvkov (z angl. BEM - Boundary Element Method) a SEA - štatistická energetická analýza (SEA – Statistical energy analysis). Autor upozorňuje na to, že niektoré metódy a ich prvotná formulácia si vyžaduje viac výpočtového výkonu a tým aj času, a preto je nutné tieto metódy zjednodušovať. Metódy MKP a MHP sa dobre hodia na riešenie komplexných akustickým modelov, ale aj pre problémy vibrácií.

V skripte *Boundary element methods for acoustics* (2007) od dvojice S. Chnadler-Wilde a S. Langdon predstavujú metódu hraničných prvkov a popisujú ako môže byť použitá pre riešenie harmonických akustických problémoch. Poukazujú na ťažkosti spojené s použitím metód a naznačujú ich možné riešenia.

J. Poblet-Puig vo svojej dizertačnej práci na tému *Numerical modelling of sound transmission in lightweight structures* (2008) popisuje modelovanie prenosu zvuku v ľahkých stavbách. Popisuje metódy konečných prvkov a metódy hraničných prvkov, ich použitie a špecifiká pri rôznych frekvenciách, prehľad súčasných metód a pohľad na rozvíjajúce sa.

Jedna zo zahraničných literatúr pod názvom *Vibro – Acoustics of Lightweight Sandwich Structures* od autorov Tianjian Lu a Fengxian Xin popisuje presne deje správania sa prenosu zvuku sendvičovými ľahkými konštrukciami. Zaoberá sa dvojitémi panelmi, formuluje matematické riešenie a následne aj modelovanie.

Vplyv veľkosti elementu a tým aj počet elementov na vlnovú dĺžku je zásadný na výsledky simulácie. Bežne v literatúre sa uvádza 6 až 10 prvkov na vlnovú dĺžku.

Steffen Marburg z technickej univerzity z Nemecka vo svojej práci *Six boundary elements per wavelength: Is that enough?* (2002) pojednáva o tom, aký počet je naozaj potrebný. Popisuje bežne používané pravidlo šiestich lineárnych prvkov pre akustické úlohy. Porovnáva numerické riešenie s analytickým, odhaduje aký počet prvkov na vlnovú dĺžku je potrebný pre dosiahnutie vopred stanovenej hranice chyby. Porovnáva typy prvkov používaných pri diskretizácii, ich výkon a možné nedostatky. Zaujímavým výsledkom bolo, že pri použití 6 elementov na vlnovú dĺžku pri vyšších frekvenciách dochádzalo pri výsledku až k 10% chybe. Jednalo sa o bilinéarne prvky. Pri použití

bikvadratických prvkoch bola chyba menej ako 0,5 dB; čo bolo aj odporúčaním vyplývajúcim zo štúdie, používať bikvadratické alebo prípadne vyššie prvky.

Dickow a kol. v práci *A Parameter Study of Coupling Properties in Finite Element Models of Single-Stud Double-Plate Panels* (2011) teda štúdiu o možnostiach vytvárania vlastností spojov prostredníctvom MKP v rámových konštrukciách prichádzajú k dvom záverom a to, že pre presnosť odhadu prenosu zvuku pri nízkych frekvenciách je nutné experimentálne porovnať niekoľko bežne užívaných spôsobov a následne ich overiť pomocou rôznych modelových prístupov, a že samotné spájanie opláštenia a rámovej konštrukcie má výrazný vplyv na akustické vlastnosti, je teda významným parametrom pre optimalizáciu akustických vlastností. Výsledok taktiež vypovedá o fakte, že voľnejšie upevnenie neznamená zmenšenie prenosu zvuku, ale umožňuje veľkoplošnému materiálu sa viac ohýbať v porovnaní s pevným spojením.

4 AKUSTIKA STAVEBNÝCH KONŠTRUKCIÍ

Stavebné konštrukcie zabezpečujú akustickú pohodu a zvyšujú kvalitu životného prostredia vďaka svojim zvukovoizolačným vlastnostiam. Preto je úloha stavebnej akustiky pre projekčnú, stavebno-konštrukčnú, architektonickú a hygienickú prax nezastupiteľná.

Zvuk sa šíri rôznymi cestami, no najčastejšie dochádza k trom prejavom šírenia zvuku.

- zvuk šíriaci sa vzduchom – vysielanie zo zdroja vo vysielacej miestnosti sa šíri vzduchom, dopadne na stavebnú konštrukciu a je vyžiarená do prijímacej miestnosti, preto sa nazýva vzduchová nepriezvučnosť,
- zvuk vznikajúci nárazom – zvuková energia vzniká v dôsledku mechanického nárazu na stavebnú konštrukciu, nazýva sa kročajová nepriezvučnosť,
- zvuk šíriaci sa stavebnou konštrukciou, ktorý môže nastať aj v prípade, že zdroj zvuku nie je v jeho blízkosti. [1]

Materiálové skladby a rôznorodosť stavebných konštrukcií môže mať pozitívny, ale aj negatívny vplyv na zvukovoizolačné vlastnosti, to znamená, že ich nesprávnu voľbou môžeme značne ovplyvniť akustickú pohodu. [2]

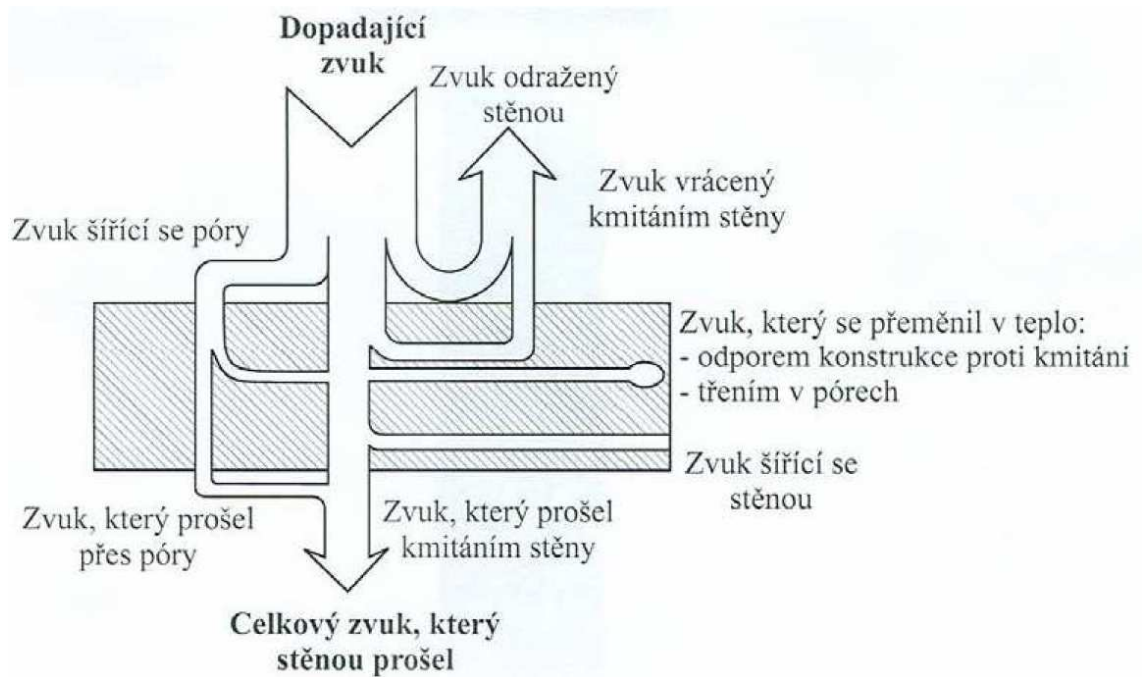
4.1 Vzduchová nepriezvučnosť

Vzduchová nepriezvučnosť je vlastnosť konštrukcie, prejavujúca sa stratou akustického výkonu pri prenose vzduchom prostredníctvom konštrukcie. Praktickým ukazateľnom je veličina nepriezvučnosť R [dB] v kmitočtovom pásme [2]:

$$R = 10 \log\left(\frac{W_t}{W_i}\right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

kde W_i je akustický výkon dopadajúcej zvukovej vlny,

W_t akustický výkon časti vlny prenesenej do susedného (chráneného) priestoru.



Obrázok 1: Schéma rozdelenia zvukovej energie pri jej prestupe cez deliacu konštrukciu.

Prevzaté z [14]

Pomocou nepriezvučnosti je možné stanoviť hladinu akustického tlaku L_2 [dB] v prijímacej miestnosti [3]:

$$L_2 = L_1 - R + 10 \log\left(\frac{S}{A_2}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

kde L_1 je hladina akustického tlaku v prijímacej miestnosti [dB],

L_2 hladina akustického tlaku vo vysielacej miestnosti [dB],

S plocha deliacej konštrukcie [m^2],

A_2 ekvivalentná pohltivá plocha prijímacej miestnosti [m^2].

Celková pohltivosť miestnosti príjmu A_2 sa vypočíta z doby dozvuku T [s] pomocou Sabinovho vzťahu [3]:

$$T = 0,163 * \frac{V}{A} \quad [\text{s}] \quad (3)$$

kde A je ekvivalentná plocha pohlcovania [m^2],

V objem prijímacej miestnosti [m^3],

T doba dozvuku [s].

Úpravou (3):

$$A_2 = 0,163 * \frac{V}{T_2} \quad [\text{m}^2] \quad (4)$$

Nepriezvučnosť je veličina závislá na kmitočte a preto sa meria spravidla šestnásť hodnôt v tretinooktávových pásmach zvukovoizolačnej kmitočtovej oblasti, tj. v tretinooktávových pásmach 100 až 3 150 Hz. Pri podrobnejšom hodnotení sa používa rozšírené pásmo 50 až 5 000 Hz. Vzduchová nepriezvučnosť sa hodnotí u priečok, stropov, obvodových stien a u výplní stavebných otvorov (okien, dverí, vrát). [4]

Jedným zo základných pojmov je hladina akustického tlaku, ktorá sa vypočíta zo vzťahu:

$$L = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

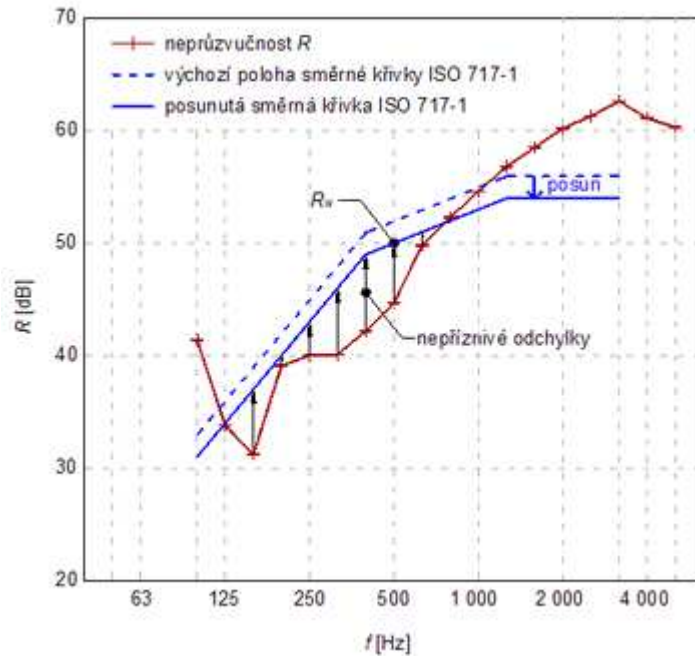
kde p je akustický tlak [Pa],

p_0 referenčná hodnota akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa].

Požiadavky na vzduchovú nepriezvučnosť sa vyjadrujú jednočíselným ukazateľnom, tzv. váženou vzduchovou nepriezvučnosťou R_w , resp. stavebnou váženou nepriezvučnosťou R'_w [dB]. Takýto údaj dovoľuje veľmi operatívne a rýchle porovnávať vzduchovú nepriezvučnosť stavebných konštrukcií, no nevypovedá o priebehu pri rôznych kmitočtoch. Zmerané resp. vypočítané hodnoty vázenej vzduchovej nepriezvučnosti s presnosťou na jedno desatinné miesto sa tabuľkovo alebo graficky znázornia v podobe kmitočtovej charakteristiky. Pri grafickom znázornení sa na vodorovnú os diagramu vynáša frekvencia v logaritmickom tvare a na zvislú os nepriezvučnosť R . Následne sa takto vynesené hodnoty porovnajú s referenčnými hodnotami stupňa vzduchovej nepriezvučnosti smernej krivky. [3]

Porovnaním sa myslí zistenie odchýlok hodnôt kmitočtovej charakteristiky R [dB] od referenčných hodnôt smernej krivky R_{ref} [dB] v jednotlivých tretinooktávových pásmach, pričom platí že ak je $R_{ref} - R$ je viac ako 0, tak je odchýlka záporná. Smerná krivka sa posúva o 1 dB (tz. vertikálne), až sa stredná hodnota záporných odchýlok, teda súčet záporných odchýlok pre určitú polohu smernej krivky sa najviac priblíži zdola hodnote 32 dB. Tým je zaručené, že výsledná hodnota je ohraničená, pretože by sa posunom smernej krivky dala výsledná hodnota R_w umelo vylepšovať. Ku kladným

hodnotám sa neprihliada. Hodnota váženej nepriezvučnosti R_w sa potom odčíta na smernej krivke v pásme 500 Hz. [3] Tento postup je detailne popísaný v norme ČSN EN ISO 717-1: Akustika – Hodnotenie zvukovej izolácie stavebných konštrukcií a v budovách – Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť. [5]



Obrázok 2: Určenie váženej nepriezvučnosti R_w pomocou grafickej metódy porovnávaním so smernou krivkou.

Prevzaté z [6]

Referenčné hodnoty smernej krivky vzduchovej nepriezvučnosti sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1: Referenčné hodnoty smernej krivky vzduchovej nepriezvučnosti

i	f [Hz]	Referenčná hodnota [dB]
1	100	33
2	125	36
3	160	39
4	200	42
5	250	45
6	315	48
7	400	51
8	500	52
9	630	53
10	800	54
11	1000	55
12	1250	56
13	1600	56
14	2000	56
15	2500	56
16	3150	56

Ak je hodnota vzduchovej nepriezvučnosti konštrukcie vyjadrená iba hodnotami R_w , určí sa hodnota R'_w zo vzťahu:

$$R'_w = R_w - C \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

kde C je vypočítaná korelácia [dB], závislá od prenosu zvuku bočnými cestami (pre jednoduché deliace konštrukcie z tradičných materiálov je to približne 2 až 3 dB, pre obvodové konštrukcie 0 dB). [2]

Nepriezvučnosť, či už vzduchovú alebo kročajovú môžeme získať rôznymi spôsobmi:

- výpočtovými modelmi,
- laboratórnym meraním,
- meraní priamo v budovách.

Laboratórnym meraním môžeme získať pomerne presné informácie o zvukovoizolačných vlastnostiach stavebných konštrukcií, ktoré môžu byť použité pre návrh pri projektovaní. Laboratórne meranie potlačuje prenos zvuku vedľajšími

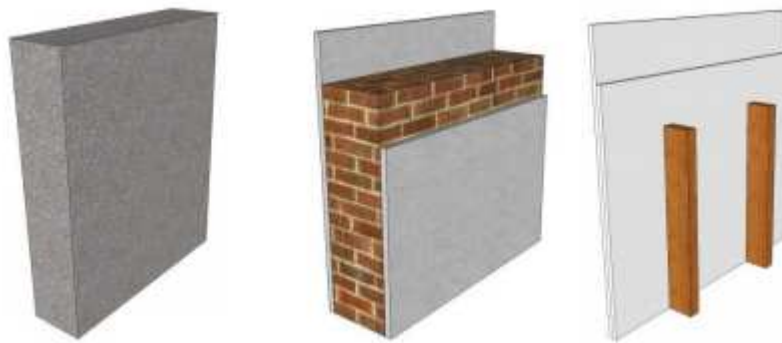
prenosovými cestami, no meranie na stavbe tieto vedľajšie cesty samotnú nepriezvučnosť ovplyvňujú. Ďalej ju ovplyvňuje napríklad kvalita remeselnej práce.

Z informácií získaných meraním je možné sa zaoberať výpočtovými modelmi. Problémy týchto modelov spočívajú vo voľbe vhodného modelu, vstupných parametroch, okrajových podmienkach, no aj na spôsobe začlenenia prvku do konštrukčného systému. Výsledky získane z týchto modelov vykazujú nezanedbateľné rozdiely.

4.2 Delenie konštrukcií

Všeobecne môžeme deliace konštrukcie z akustického hľadiska rozdeliť na jednoduché, viacvrstevné, násobné (tzv. dvojité steny) a zložené (stavebná konštrukcia s oknom, dverami, vetracími otvormi a podobne).

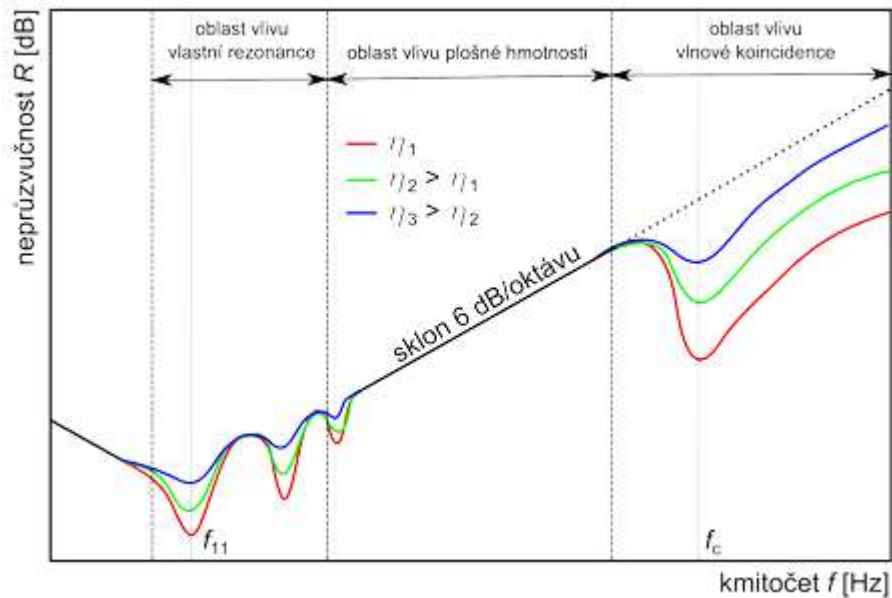
Akusticky jednoduché konštrukcie sú zložené z tuhých materiálov usporiadaných v jednej alebo viacerých vrstvách rovnakého charakteru, čiže sa jedná o homogénne konštrukcie. Príkladom je napríklad murivo na pórobetónovej alebo keramickej báze s obojstrannou omietkou, ale aj medzibytové deliace steny obvykle zo silikátových materiálov ako železobetón, pórobetón, tehly, prípadne zvukovoizolačné dierované tehly. [7]



Obrázok 3: Schematické naznačenie príkladov jednoduchých konštrukcií. Zľava: betónová stena, murovaná stena s omietkou, jednostranne opláštená priečka.

Prevzaté z [8]

Nepriezvučnosť jednoduchých stavebných prvkov je ovplyvnená ako vlastnosťami zvukového poľa, ktoré na konštrukciu pôsobí zo strany miestnosti zdroja, tak materiálými a konštrukčnými parametrami stavebného prvku. Teoretický priebeh nepriezvučnosti homogénneho jednoduchého stavebného prvku pre dopad zvuku v závislosti na kmitočte je na Obrázku 3. [7]



Obrázok 4: Teoretický priebeh nepriezvučnosti jednoduchého stavebného prvku v závislosti na kmitočte.

Prevzaté z [9]

Pre nepriezvučnosť sú najdôležitejšie tri kmitočtové oblasti. Prvou je oblasť vplyvu vlastnej frekvencie (rezonancie), ktorá je ovplyvnená súborom lokálnych poklesov. Tie odpovedajú polohám jednotlivých vlastných rezonančných kmitočtov doskového prvku. Nepriezvučnosť v tejto oblasti závisí na rozmeroch a ohybovej tuhosti stavebného prvku. Veľkosť poklesov je daná predovšetkým tlmením prvku, charakterizovaného hodnotami stratového činiteľa η . [9]

V oblasti vplyvu plošnej hmotnosti (oblasť platnosti zákona hmotnosti) je efektívne využitá plošná hmotnosť prvku. Nepriezvučnosť v tejto oblasti rastie 6 dB na oktávu. Priebeh krivky býva hladký, nepriezvučnosť tu dosahuje teda teoretického maxima. [7]

V poslednej oblasti, teda oblasti vplyvu koincidencie dochádza k výraznému poklesu nepriezvučnosti v dôsledku koincidencie medzi vynútenou ohybovou vlnou a voľnou ohybovou vlnou v konštrukcii. Hĺbka poklesu je daná tlmením prvku, teda stratovým činiteľom. Pre väčšinu ťažkých jednoduchých stavebných prvkov je oblasť vplyvu vlnovej koincidencie prevládajúca v prakticky celom zvukovo izolačnom pásme. [7]

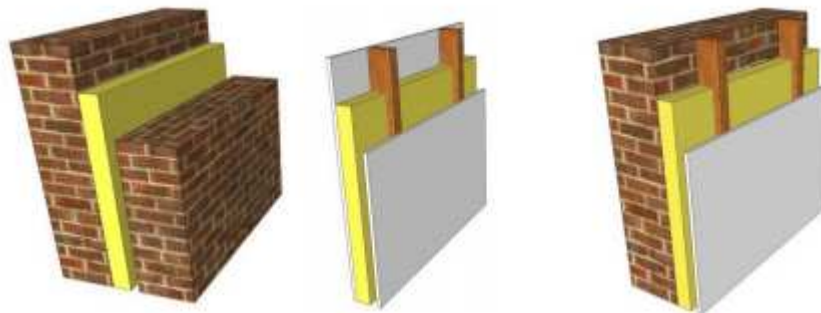
Nepriezvučnosť konštrukcií, ktoré majú významne rozdielnu ohybovú tuhosť v dvoch navzájom kolmých smeroch, teda prvkov s ortotropným charakterom, má za následok vznik dvoch kritických kmitočtov. Kmitočtová oblasť vplyvu vlnovej

koincidencie ortotropných prvkov v zrovnaní s izotropnými prvkami býva širšia a je charakterizovaná výraznejším poklesom nepriezvučnosti. Zanedbanie ortotropie napríklad pri výpočte, môže viesť k chybnému výsledku nepriezvučnosti. [10]

Akusticky viacvrstvové konštrukcie sa skladajú z dvoch čiastkových vrstiev spojených pevným jadrom (polystyrén, voština). Z dôvodu tuhého spojenia sa preto viacvrstvové konštrukcie správajú viac ako jednoduché. Nepriezvučnosť viacvrstvových konštrukcií sa zisťuje iba meraním.

Nepriezvučnosť dvojitéh stavebných prvkov, teda deliace stavebné konštrukcie pozostávajúce z dvoch jednoduchých prvkov vzájomne oddelených pružnou vrstvou. Táto pružná vrstva môže byť vyplnená ľahkým materiálom, napríklad minerálnymi vláknami, ktoré nebránia čiastkovým konštrukciám v samostatnom kmitaní. [1]

Tento typ konštrukcie vedie k zvýšeniu nepriezvučnosti v porovnaní s jednoduchými konštrukciami, resp. s konštrukciami bez pružnej vrstvy. Veľkosť zlepšenia akustických vlastností závisí na kmitočte aj na materiálových a konštrukčných parametroch dvojitého prvku.



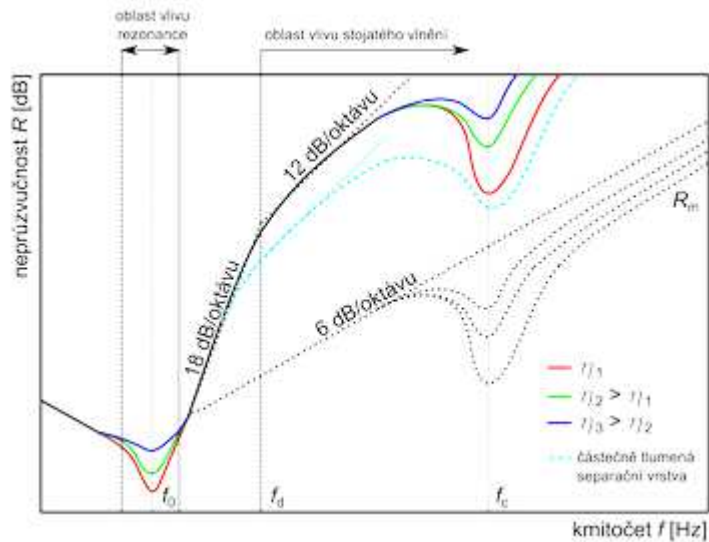
Obrázok 5: Schematické naznačenie príkladov dvojitéh konštrukcií. Zľava: konštrukcia ohybovo tuhých prvkov, konštrukcia z ohybovo poddajných prvkov, konštrukcie kombinované.

Prevzaté z [8]

Kritériom ohybovej poddajnosti jednoduchých prvkov môže byť:

- plošná hmotnosť $m' \leq m'_c$ (prednostné kritérium),
- kritický kmitočet $f_c > 3\ 150$ Hz (pomocné kritérium),
- hrúbka konštrukcie $d < 0,01$ až $0,02$ m (približné kritérium).

Konštrukcie neodpovedajúce týmto kritériám bývajú považované za ohybovo polotuhé alebo tuhé.



Obrázok 6: Teoretický priebeh nepriezvučnosti dvojitého stavebného prvku v závislosti na kmitočte.

Prevzaté z [11]

Správanie akusticky dvojitej konštrukcie nastáva až od rezonančného kmitočtu f_0 , na ktorom sa mení sklon rastu nepriezvučnosti z 6 dB na oktávu až na 18 dB na oktávu. Ak by sa jednalo o dvojitý prvok bez akustických mostov a s tlmením vzduchovou medzerou, potom by nepriezvučnosť rástla až do oblasti vplyvu stojateho vlnenia., približne do kmitočtu f_d . Tento priebeh odpovedá ideálnemu dvojitému prvku. Obvykle býva nepriezvučnosť ale nižšia, predovšetkým vplyvom nedokonalého tlmenia vzduchovej medzery a vplyvom mechanický spojov medzi prvkami. [11]

Pri dvojprvkových konštrukciách sa okrem vplyvov špecifických pre jednoduché konštrukcie (vlastná rezonancia, zákon hmotnosti, vlnová koincidencia) uplatňujú aj ďalšie javy, ktoré sú typické výlučne pre konštrukcie dvojprvkové. Sú nimi rezonancia typu hmotnosť – poddajnosť – hmotnosť, vplyv zvukovej pohltivosti separačnej vrstvy a vplyv stojateho vlnenia v pružnej vrstve. [7]

4.3 Vzduchová nepriezvučnosť drevostavieb

Drevené konštrukcie z pohľadu akustiky odlišujú od murovaných konštrukcií predovšetkým nižšia hmotnosť a často aj viacnásobný charakter konštrukcie. Všeobecne sa udáva, že čím vyššia je hmotnosť deliacej konštrukcie, tým vyššej nepriezvučnosti takáto konštrukcia dosahuje. V prípade viacprvkových konštrukcií, medzi ktoré sa drevostavby často radia, nepriezvučnosť podstatne ovplyvňuje viacprvková rezonancia

a útlm zvuku vrátane stojatého vlnenia vo vzduchovej medzere. Vplyv viacprvkovej rezonancie na nepriezvučnosť je pomocou výpočtu náročne predpovedať.

Drevené deliace konštrukcie môžeme z pohľadu akustiky rozčleniť na niekoľko typov:

- s tuhým jadrom (masívna konštrukcia) – zrubové steny, steny z plnostenných panelov,
- s voštinou – skôr historické konštrukcie, obojstranne opláštená voština,
- s poddajným jadrom dvojité – rámová konštrukcia,
- s poddajným jadrom viacnásobné – dvojitá rámová konštrukcia.

Masívne systémy drevostavieb môžeme z pohľadu akustiky chápať ako jednoduché konštrukcie, buď jednovrstevné alebo viacvrstevné. Ak nie je masívna konštrukcia kombinovaná s ohybne poddajnou konštrukciou, napríklad so sadrokartónovou pred stenou, nejedná sa o viacprvkovú konštrukciu. Masívne konštrukčné systémy drevostavieb majú vyššiu plošnú hmotnosť v porovnaní s rámovými, resp. skeletovými systémami, no oproti konštrukciám na silikátovej alebo tehlovej báze sa jedná o pomerne ľahké konštrukcie.

Oproti tradičným konštrukciám majú masívne drevené konštrukcie problém s bočným prenosom zvuku, ktorý závisí na kvalite návrhu a samotnom zabudovaní. Hodnoty o ktoré sa môže líšiť je v rozmedzí 0 až 10 dB. [12]

Hodnoty vázenej nepriezvučnosti sa preto môžu značne líšiť. Akustické vlastnosti ďalej môže ovplyvniť aj spôsob spojenia masívnych dosiek, či lepením alebo klincovým spojom. Lepením sa zvyšuje tuhosť konštrukcie, čím sa znižuje nepriezvučnosť konštrukcie. [13]

Rámové systémy drevostavieb majú oproti jednoduchým silikátovým stenám výhodu v tlmiacej vrstve, ktorá je tvorená aspoň jednou vzduchovou medzerou. Vzduchovú medzeru sa z hľadiska nepriezvučnosti odporúča maximálne do hrúbky 200 mm, pretože pri jej ďalšom zväčšovaní už útlm výrazne nenarastá. Medzeru, ktorá vznikne medzi jednotlivými plášťami sa odporúča vyplniť materiálom pohlcujúcim zvuk a to najmenej do polovice hrúbky tejto medzery. Vďaka tomuto opatreniu sa efektívne eliminuje stojaté vlnenie.

Významnými parametrami materiálov pohlcujúcich zvuk, ktoré sú použité ako výplň vzduchovej medzery, je objemová hmotnosť a hrúbka tohto materiálu. Príkladom je

minerálna, sklenená alebo kamenná vlákna. V oblasti vysokých kmitočtov sú závislosti na týchto materiálových vlastnostiach najvýraznejšie. Nepriezvučnosť poklesne na všetkých kmitočtoch, ak nebude použitý materiál eliminujúce stojaté vlnenie. [13]

Rovnako ako pri masívnych konštrukciách je dôležité pre zaistenie vysokej nepriezvučnosti samotná kvalita výroby a zabudovania. Slabinou rámových konštrukcií je oblasť práve nízkych frekvencií, hlavne frekvencií nižších než 100 Hz (tretinooktávové pásma 50 Hz, 63 Hz a 80 Hz).

Pri navrhovaní a hodnotení vzduchovej nepriezvučnosti prvkov na báze dreva je potrebné postupovať komplexne, pretože mechanizmus prenosu zvuku pri dvojitých a viacnásobných konštrukciách je známy len do určitej miery. Zložitejšia konštrukcia je tvorená prvkami s rôznymi akustickými vlastnosťami a preto je náročnejšie ju predpovedať.

4.3.1 Rezonancia typu hmotnosť-poddajnosť-hmotnosť (Mass-Spring-Mass)

Rezonancia typu hmotnosť-poddajnosť-hmotnosť je spôsobená „pružinovým“ efektom elastickej separačnej vrstvy medzi dvoma hmotnými prvkami. Pre kolmý dopad zvukovej vlny je určená rezonančným kmitočtom f_r , pre ktorý platí vzťah:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

kde s' je dynamická tuhosť medzivrstvy,

m'_1 plošná hmotnosť 1. prvku,

m'_2 plošná hmotnosť 2. prvku.

Pre vzduchovú vrstvu môžeme vzťah zjednodušiť do tvaru:

$$f_r \cong 60 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (8)$$

kde d je hrúbka vzduchovej medzery.

Pre kmitočty nižšie než f_r sa dvojitý prvok chová ako jednoduchý s rovnakou plošnou hmotnosťou, ktorého nepriezvučnosť je daná vzťahom:

$$R = 10 \log(10^{\frac{R_1}{20}} + 10^{\frac{R_2}{20}}) \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

kde R_1 resp. R_2 je nepriezvučnosť 1. resp. 2. prvku.

V okolí rezonančného kmitočtu navyše obvykle dochádza k poklesu nepriezvučnosti oproti jednoduchému prvku. Z hľadiska nepriezvučnosti je teda vhodné zaistiť, aby sa rezonančný kmitočet f_r nachádzal mimo zvukovo izolačné pole. Vzhľadom na tretinooktávové pásmo od 100 Hz do 3 150 Hz sa odporúča hodnota f_r menšia ako 70 Hz. S ohľadom na rozšírenie kmitočtového pásma a zahrnutie nižších frekvencií je predpokladá, že stavebné prvky bude potrebné navrhovať s rezonančným kmitočtom f_r menším ako 50 Hz. Zo vzťahu (8) sa dá predpokladať, že riešením bude zväčšovanie hrúbky medzery a/alebo použitie ťažšieho opláštenia konštrukcie. Tomuto nasvedčuje aj trend výroby doskových (veľkoplošných) materiálov s vyššou objemovou hmotnosťou.

Nad rezonančným kmitočtom sa prvok chová ako akusticky dvojitý, čo sa prejavuje zmenou sklonu z 6 dB na oktávu na 18 dB na oktávu.

4.3.2 Stojaté vlnenie vo vzduchovej medzere (Standing Waves Region)

V dôsledku rozdielnych vlnových odporov na rozhraní vzduchovej medzery a vnútorných povrchov doskových prvkov dochádza k spätnému odrazu prestupujúcich zvukových vln. V prípade ak je polovica vlnovej dĺžky prechádzajúceho zvuku porovnateľná s hrúbkou vrstvy, dochádza k vzniku tzv. stojateho vlnenia. Pre difúzny dopad zvukovej vlny dochádza k zmene sklonu rastu nepriezvučnosti z 18 dB na oktávu na 12 dB na oktávu. Vplyv stojateho vlnenia sa pre prvky so vzduchovou medzerou vyplnenou poréznym materiálom uplatňuje od kmitočtu f_d , zadaného vzťahom:

$$f_d \cong \frac{55}{d} \quad [\text{Hz}] \quad (10)$$

4.3.3 Vlnová koincidencia

Vlnová koincidencia je jav, ktorý sa spája s jednoduchými doskovými prvkami, teda s opláštením dvojitej konštrukcie. Pri dopade zvukovej vlny v prvku vzniká ohybové vlnenie. V prípade ak je priemet vlnovej dĺžky zvuku vo vzduchu do roviny prvku rovný vlnovej dĺžky voľnej ohybovej vlny, dochádza k vlnovej koincidencii, dá sa povedať, že k spájaniu vln. Tento jav vedie k zvýšenému prenosu zvuku a teda k poklesu nepriezvučnosti. Vplyv vlnovej koincidencie sa prejavuje od kritického kmitočtu f_{cr} , pre ktorý platí:

$$f_{cr} \cong \frac{c_0^2}{1,8 \times c_L h} \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

kde c_0 je rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu [m/s],

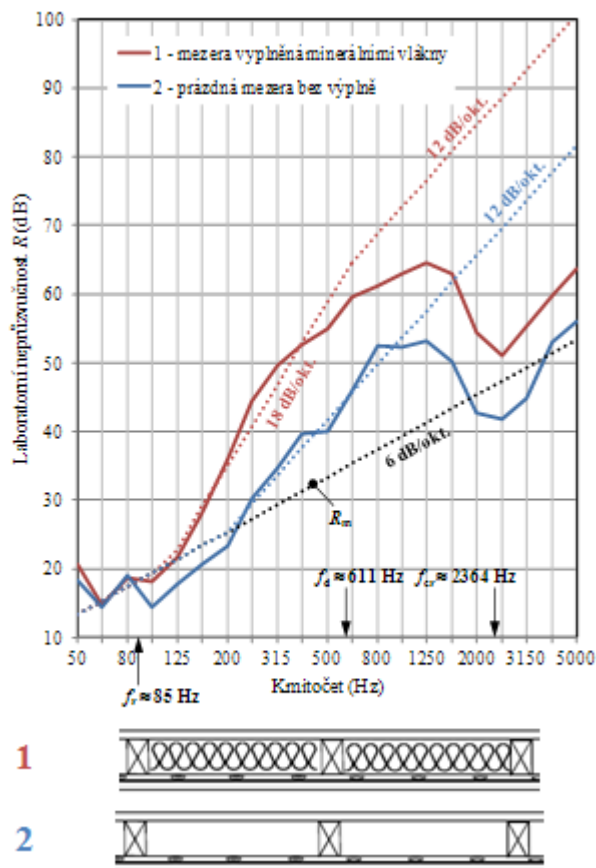
c_L rýchlosť šírenia pozdĺžnych zvukových vln v materiáli doskového prvku [m/s],

h hrúbka prvku [m].

Kritický kmitočtet väčšiny bežne používaných doskových prvkov sa nachádza v oblasti vyšších kmitočtov, v okolí hornej hranice zvukovo izolačného pásma. Prejavuje sa výrazným poklesom nepriezvučnosti. Zo vzťahu (11) vyplýva, že hrúbka opláštenia by mala byť čo najmenšia. Samozrejme pre statické účely nie je možné používať hrúbky menšie ako je rozumný priemer a to 12,5 mm. Vždy je vhodnejšie voľne vrstviť viac tenkostenných doskových prvkov namiesto zväčšovania hrúbky jedného prvku. Toto pravidlo neplatí pre ohybovo tuhé jednoduché prvky s nízkym kritickým kmitočtom. [15]

4.3.4 Útlm v pružnej vrstve

Prítomnosť zvukového pohlcovača vo vzduchovej medzere eliminuje vplyv stojatého vlnenia. Rozhodujúcim parametrom pre útlm zvuku a účinnosť pohlcovača je odpor proti prúdeniu vzduchu. Vyplnenie medzery by malo byť najmenej z jednej polovice, pri úplnom vyplnení je potrebné dbať na to, aby nedochádzalo na mechanické prepojenie doskových prvkov prostredníctvom výplne. Obrázok 7 znázorňuje priebeh vzduchovej nepriezvučnosti dvojitého prvku so vzduchovou medzerou vyplneného minerálnymi vláknami a bez výplne. Je vidieť, že vplyv výplne má pozitívne účinky na celkovú nepriezvučnosť. [1,7]

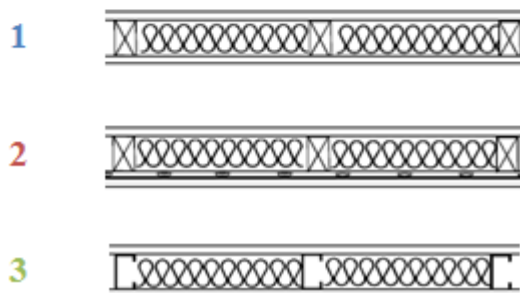
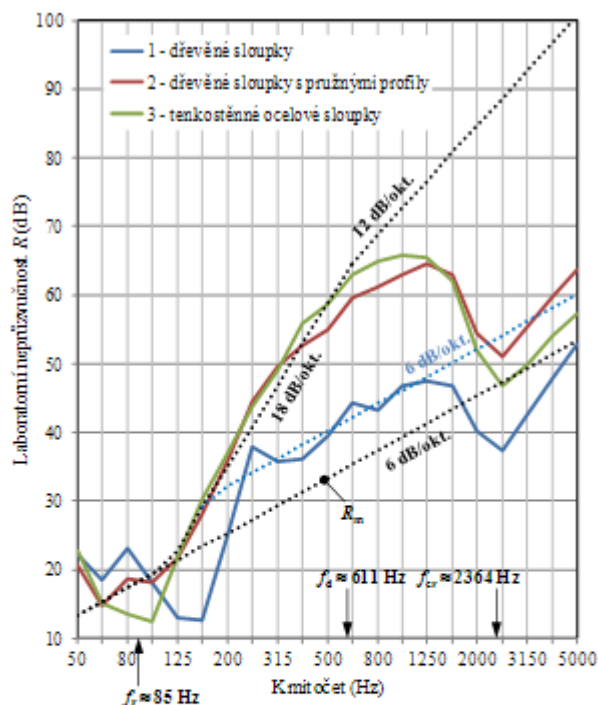


Obrázok 7: Vplyv výplne vzduchovej medzery na vzduchovú nepriezvučnosť.

Prevzaté z [15]

4.3.5 Vplyv nosných stĺpikov a spojov

Vplyv nosných stĺpikov na nepriezvučnosť ľahkých dvojitých prvkov býva niekedy podceňovaný. Z priebehu nepriezvučnosti na Obrázku 8 je zrejmé, že vplyv typu stĺpiku a spôsobu jeho opláštenia je zásadný. Drevený stĺpiky sa správajú v porovnaní s tenkostennými kovovými profilmi ako tuhé, vytvárajú líniové akustické mosty. To sa prejavuje výrazným poklesom nepriezvučnosti. Preto je dôležité zamyslieť sa nad spôsobom opláštenia, napríklad použitím pružných profilov, ktoré vykazujú lepšie akustické vlastnosti. Keďže stĺpik predstavuje akustický most je vhodné sa zamyslieť aj nad osovou vzdialenosťou jednotlivých stĺpikov. [15]



Obrázok 8: Vplyv typu stĺpikov na vzduchovú nepriezvučnosť.

Prevzaté z [15]

Riešením pre prvky s požiadavkou na vysokú nepriezvučnosťou je použitie dvoch radov samostatných stĺpikov, ktoré sa nedotýkajú, resp. dotýkajú len prostredníctvom izolácie.

4.4 Normatívne požiadavky

Pre posudzovanie zvukovoizolačných vlastností stavebných konštrukcií bola v praxi zavedené z hľadiska vzduchovej nepriezvučnosti jednočíselná veličina vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w [dB], vážená laboratórna nepriezvučnosť R_w [dB] a vážený normalizovaný rozdiel hladín $D_{nT,w}$ [dB]. Z hľadiska kročajovej nepriezvučnosti je to vážená normalizovaná hladina akustického tlaku kročajového zvuku $L'_{n,w}$ [dB], $L_{n,w}$

[dB] pre miestnosti so spoločnou plochou stropu so skúšanou podlahou a vážená normalizovaná hladina akustického tlaku kročajového zvuku $L'_{nT,w}$ [dB] pre miestnosti, kde skúšaná podlaha nie je súčasťou spoločného stropu.

Meranie v tretinooktávových pásmach sa riadi podľa noriem ČSN EN ISO 140 – Akustika – Meranie zvukovej izolácie stavebných konštrukcií a v budovách, časti 4: Meranie vzduchovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami v budovách, a časti 7: Meranie kročajovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií v budovách.

Pre určenie a vyhodnotenie jednočíselných veličín slúžia normy ČSN EN ISO 717 – Akustika – Hodnotenie zvukovej izolácie stavebných konštrukcií a v budovách, časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť, a časť 2: Kročajová nepriezvučnosť.

Požiadavky na zvukovú izoláciu deliacich stavebných konštrukcií stanovuje norma ČSN 73 0532 – Akustika – Ochrana proti hluku v budovách a posudzovanie akustických vlastností stavebných výrobkov – Požiadavky. Požiadavky sú uvedené v Tabuľke 2.

Vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w a vážený normalizovaný rozdiel hladín $D_{nT,w}$ pre steny a stropy nesmie byť nižšia než hodnoty považované podľa ČSN 73 0532. Konštrukcie stropov a stien medzi miestnosťami v budovách musia vyhovovať minimálnym požadovaným hodnotám R'_w , $D_{nT,w}$.

Vážená normalizovaná hladina akustického tlaku kročajového zvuku $L'_{n,w}$, $L'_{nT,w}$ nesmie byť vyššia než požadované hodnoty podľa ČSN 73 0532.

Tabuľka 2: Požiadavky na zvukovú izoláciu medzi miestnosťami v budovách.

Prevzaté z [16]

Chránený priestor (miestnosť príjmu zvuku)					
řádka	Hlučný priestor (miestnosť zdroje zvuku)	Požiadavky na zvukovú izoláciu			
		Stropy		Stěny	Dveře
		$R'_{w, D_{STW}}$ dB	$L'_{n,w}, L'_{STW}$ dB	$R'_{w, D_{STW}}$ dB	R_w dB
A. Bytové domy, rodinné domy – nejméně jedna obytná místnost bytu					
1	Všechny ostatní obytné místnosti téhož bytu	47	63	42	27
B. Bytové domy – obytné místnosti bytu					
2	Všechny místnosti druhých bytů, včetně příslušenství	53 52	55 58	53 52	-
3	Společné prostory domu (schodiště, terasy, kočárkárny, sušárny, sklípky apod.)	52	55	52	32 37
4	Průjezdy, podjezdy, garáže, průchody, podchody	57	48	57	-
5	Místnosti s technickým zařízením domu (výměňkové stanice, kotelny, strojovny vřtahů, strojovny VZT, řádělny apod.) s hlukem: $L_{A,max} \leq 80$ dB 80 dB < $L_{A,max} \leq 85$ dB	57 62	48 48	57 62	-
6	Provozovny s hlukem $L_{A,max} \leq 85$ dB s provozem nejvýše do 22:00 s provozem i po 22:00 h	57 62	53 48	57 62	-
7	Provozovny s hlukem 85 dB < $L_{A,max} \leq 95$ dB s provozem i po 22:00 h	72	38	-	-
C. Terasové nebo řádové rodinné domy a dvojdomy – obytné místnosti bytu					
8	Všechny místnosti v sousedním domě	57	48	57	-
D. Hotely a zařízení pro přechodné ubytování – ložnicový prostor ubytovací jednotky					
9	Všechny místnosti druhých jednotek	52	58	47	42
10	Společně užívané prostory (chodby, schodiště)	52	58	45	32 27
11	Restaurace a jiné provozovny s provozem do 22:00 h	57	53	57	-
12	Restaurace a jiné provozovny s provozem i po 22:00 h ($L_{A,max} \leq 85$ dB)	62	48	62	-
E. Nemocnice, zdravotnická zařízení – lůžkové pokoje, ordinace, pokoje lékařů, operační sály apod.					
13	Lůžkové pokoje, ordinace, ošetřovny, operační sály, komunikační a pomocné prostory (chodby, schodiště, haly)	52	58	47	27
14	Hlučné prostory (kuchyně, technická zařízení budovy) $L_{A,max} \leq 85$ dB	62	48	62	-
F. Školy a vzdělávací instituce – učebny, výukové prostory					
15	Učebny, výukové prostory	52	58	47	-
16	Společné prostory, chodby, schodiště	52	58	47	32 27
17	Hlučné prostory (dílny, jídelny) $L_{A,max} \leq 85$ dB	55	48	52	-
18	Velmi hlučné prostory (hudební učebny, dílny, tělocvičny) $L_{A,max} \leq 90$ dB	60	48	57	-
G. Administrativní a správní budovy, firmy – kanceláře a pracovny					
19	Kanceláře a pracovny s běžnou administrativní činností, chodby, pomocné prostory	47	63	37	27
20	Kanceláře a pracovny se zvýšenými nároky, pracovny vedoucích pracovníků	52	58	45	32
21	Kanceláře a pracovny pro důvěrná jednání nebo jiné činnosti vyžadující vysokou ochranu před hlukem	52	58	50	37

4.5 Zásady návrhu pre správnu zvukovú izoláciu

Zabezpečenie dostatočnej hmoty, vzájomné oddelenie stavebných prvkov budovy a ich prerušenie, sú základnými princípmi pre správne navrhovanie stavebnej nepriezvučnosti konštrukcie. Hlavné faktory ovplyvňujúce vzduchovú nepriezvučnosť stenových a stropných konštrukcií sú:






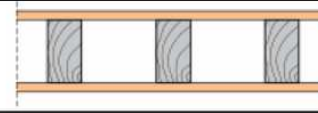



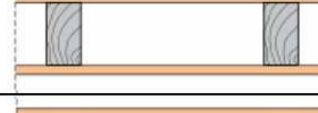
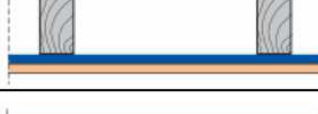



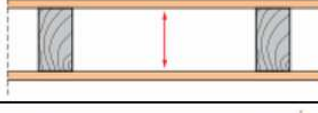

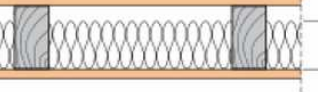

- celková jednotková plošná hmotnosť: čím väčšia je, tým lepšia je zvuková izolácia, obzvlášť pri nízkych frekvenciách zvuku,
- zvuková pohltivosť: zvukovo pohltivý materiál vo vzduchovej medzere alebo dutine medzi jednotlivými vrstvami je prospešný,
- tuhosť: vo všeobecnosti pre „ťažké“ monolitické konštrukcie ako napríklad CLT, betón, atď., čím tuhšia je zostava, tým lepšia je zvuková izolácia. Bohužiaľ, tento predpoklad nemôže byť zovšeobecňovaný pre ľahké konštrukcie. Bolo vyzorované, že veľmi tuhé drevené trámové stropy s malým rozpätím majú slabé výsledky kročajovej nepriezvučnosti pri nízkych frekvenciách, tak ako aj tuhé konštrukcie stien s malou roztečou stĺpikov majú nízke hodnoty zvukového útlmu,
- styk medzi vrstvami: čím jemnejší je kontakt, tým lepšia je zvuková izolácia,
- materiálová pórovitosť: čím menšia pórovitosť, tým lepšia zvuková izolácia,
- viac vrstiev so vzduchovou medzerou: čím väčšia vzduchová medzera, tým lepšia zvuková izolácia,
- tvrdosť povrchu podlahy: čím tvrdší je povrch podlahy, tým horšia je kročajová izolácia takejto konštrukcie, najmä pre vyššie frekvencie.

Vo všeobecnosti kroky pre zabezpečenie akceptovateľného zvukového útlmu by mali byť:

- prerušenie priameho prenosu konštrukciou,
- zaručenie pomerne vysokej plošnej hmotnosti,
- použite mäkkých materiálov pre podlahy alebo medzi spoje jednotlivých konštrukcií pre tlmenie zvuku,
- použitím tzv. „staggering studs“, čiže rámovej konštrukcii s pravidelne sa striedajúcimi stĺpikmi tak, aby sa vzájomne nedotýkali, čím sa obmedzí priamy prenos zvuku cez samotné stĺpiky,

- zamedzenie priamemu šíreniu hluku z jednej miestnosti do susednej plánovaním umiestnenia prepojení týchto miestností (dvere), ale aj rôzne druhy inštalácií a vzormi komunikácie medzi nimi. [20]

Niektoré prípady konštrukčných vplyvov sú zobrazené na Obrázku 9.

	<i>Lepší</i>	<i>Horší</i>	
<i>Dvojité opláštění</i>			<i>Jednovrstvé opláštění</i>
<i>Ohybové měkké přitížení</i>			<i>Bez přitížení</i>
<i>Zvětšení osové vzdálenosti</i>			<i>Malá osová vzdálenost</i>
<i>Vložené izolační pásky</i>			<i>Přímé upevnění</i>
<i>Bodové spojení přes laťování</i>			<i>Přímé upevnění</i>
<i>Pružné zavěšení</i>			<i>Laťování</i>
<i>Kovová spodní konstrukce (u nenosných stěn)</i>			<i>Dřevěná spodní konstrukce</i>
<i>Tloušťka stěny</i>			<i>Malá tloušťka stěny</i>
<i>Dutinová izolace</i>			<i>Málo dutinové izolace</i>

Obrázok 9: Konštrukčné vplyvy na akustiku drevostavieb.

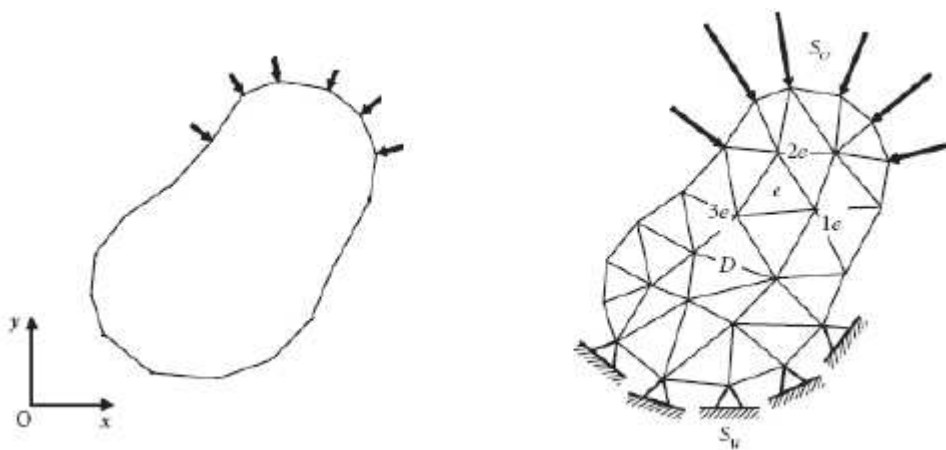
Prevzaté z [21]

5 MATERIÁL A METODIKA

5.1 Metóda konečných prvkov

Metóda konečných prvkov – MKP (z angl. Finite element method - FEM) predstavuje moderný, vysoko efektívnu numerickú metódu pre riešenie technický a vedeckých úloh. V súčasnosti je považovaná za jednu z najúčinnějších približných metód pre riešenie problémov popísaných diferenciálnymi rovnicami. Prvé zmienky o metóde konečných prvkov sú z roku 1943 z práce R. Couranta. Ďalší rozvoj MKP bol obmedzený vývojom efektívneho softvéru a hardvéru. Zhruba o desať rokov neskôr bola táto metóda využitá inžiniermi na pevnostné výpočty v leteckom priemysle. V rokoch 1960 – 1980 vznikajú veľké programové balíky ako ANSYS, ADYNA a ABAQUS, pre lineárnu aj nelineárnu analýzu konštrukcií a materiálov. Metóda vznikla pre potreby výpočtu konštrukcií v leteckom, kozmickom, jadrovom a vojenskom priemysle, odkiaľ sa rozšírila do akademického prostredia a neskôr do priemyslovej praxe.

Podstatou metódy konečných prvkov je rozdelenie (diskretizácia) konštrukcie, resp. riešenej oblasti na konečný počet podoblastí – prvkov (Obrázok 10). Pre každý typ prvku je okrem dimenzie a tvaru charakteristický aj počet a poloha jeho uzlov. Uzly sú body v nich hľadáme neznáme parametre riešenia, napríklad posuvy a natočenie. Výsledky sú ovplyvnené hustotou, ktorá ovplyvňuje kapacitu potrebnú pre riešenie.



Obrázok 10: Rozdelenie oblasti na konečné prvky.

Prevzaté z [22]

Výhodou numerických metód akou je aj MKP je možnosť riešiť zložitejšie telesá v porovnaní s analytickým prístupom. Nevýhodou je, že pri zmene vstupného parametru akým je napríklad zaťaženie, je nutné úlohu vyriešiť znova. Túto nevýhodu je možné čiastočne vyvážiť možnosťou automatizácie výpočtového procesu. S tým je spojená aj časová a hardvérová náročnosť.

„Proces výpočtu v MKP je možné rozdeliť do piatich krokov:

1. Diskretizácia konštrukcie na konečný počet prvkov
2. Aproximácia deformačných alebo silových veličín na každom prvku zvlášť
3. Integrácia konečných prvkov v celok pri zachovaní spojitosti deformácií
4. Minimalizácia energie – riešenie podmienkových rovníc a určenie neznámych uzlových parametrov
5. Determinácia neznámych po prvkoch – výpočet vnútorných síl na jednotlivých prvkoch.“ [22,s. 11]

5.2 Akustická analýza v ANSYS

Akustické analýzy sú dostupné pre produkty ANSYS Multiphysics a ANSYS Mechanical. Tento typ analýzy simuluje generovanie a šírenia buď v interakcii štruktúra tekutina alebo ako šírenie čiste akustickej vlny.

5.2.1 Základné akustické rovnice

Pri akustických analýzach je riešená jedna z nasledujúcich matíc. Pre čiste akustické javy, rieši program konečne prvkovou dynamickú maticu:

$$[M_F]\{\ddot{p}_e\} + [C_F]\{\dot{p}_e\} + [K_F]\{p_e\} = \{f_F\} \quad (12)$$

kde $[M_F]$ je matica hmotnosti,

$[C_F]$ matica tlmenia,

$[K_F]$ matica tuhosti,

$\{f_F\}$ externý budiaci vektor v akustickej tekutine [23].

Pri analýze interakcie štruktúry a tekutiny (FSI - Fluid) program rieši plne spojené konečne prvkové dynamické matice:

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \overline{\rho_0}[R]^T & [M_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{p_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_S \\ f_F \end{Bmatrix} \quad (13)$$

kde $[M_S]$ je matica hmotnosti,

$[C_S]$ matica tlmenia,

$[K_S]$ matica tuhosti,

$\{f_S\}$ externý vektor sily v štruktúre,

$[R]$ matica spojenia, reprezentujúca podmienky spojenia medzi akustickou kvapalinou a štruktúrou [23].

5.2.2 Proces tvorby akustickej analýzy

Akustická analýza zahŕňa väčšinu krokov ako ktorákoľvek analýza, líši sa v niektorých špecifikách a používaných príkazoch.

Tabuľka 3: Kroky akustickej analýzy.

Prevzaté z [23]

Krok	Úloha	Popis
1.	Tvorba modelu	Akustický model sa skladá z tekutinového prostredia, štruktúrnych častí, FSI rozhrania a zvukového budenia.
2.	Nastavenie prostredia modelu	Akustická analýza je podporovaná niekoľkými typmi elementov: FLUID29, FLUID30, FLUID220 a FLUID221.
3.	Definovanie materiálových vlastností	Tu nie je žiadny rozdiel oproti ostatným analýzám. Nadefinovanie napr. hustoty, rýchlosti šírenia zvuku materiálom, modulu pružnosti a iných.
4.	Sieťovanie modelu	Niektoré časti modelu si vyžadujú detailnejšie sieťovanie. Pre zabezpečenie spoľahlivého riešenia sa odporúča použiť 10 prvkov na vlnovú dĺžku pri low-order prvkoch, alebo 5 prvkov na vlnovú dĺžku pri high-order prvkoch
5.	Definovanie okrajových podmienok	Tak ako pri iných analýzách. Napríklad zamedzenie posunutia v rôznych smeroch.
6.	Definovanie zaťaženia	Definovanie zaťaženia na uzly, napríklad budenie tlakom.

7.	Rozhranie FSI	Pri FSI analýze, teda analýze štruktúra-tekutina, je nutné označiť rozhranie medzi štruktúrou a tekutinou.
8.	Riešenie modelu	Modálna, harmonická alebo tranzientná analýza
9.	Postprocessing akustickej analýzy	Zobrazenie výsledkov, v akustických analýzach predovšetkým tlakov alebo hladín akustického tlaku (SPL).

Typy elementov sa líšia v vlastnostiach, či sa jedná o typ pre 2D úlohu, resp. pre 3D, ďalej v okrajových podmienkach, ktoré sa na daný typ môžu uplatniť, či už je to posun v smeroch X, Y, Z alebo zadanie tlaku. [23]

5.2.3 Tlmenie

Reálne kmitanie sústav je vždy sprevádzané tlmením. Amplitúda kmitania sa vplyvom vnútorného a vonkajšieho tlmenia postupne znižuje. Maticu proporcionálne viskózneho útlmu v dynamických rovniciach je možné obecné uvažovať v tvare:

$$[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K] + \sum_{j=1}^{NMAT} \beta_j [K]_j + \sum_{j=1}^{NMAT} [C]_k + [C]_{\xi} \quad (14)$$

kde α, β sú konštantné súčinitele globálnych matíc hmotnosti a matice tuhosti odpovedajú modelu Raylieghovho útlmu,

β_j konštantný súčiniteľ matice tuhosti podľa rôznych typov materiálov,

C_k matica útlmu po prvkoch,

C_{ξ} frekvenčne závislá matica útlmu [24].

Raylieghov model útlmu vychádza z definovania úmernosti k matici tuhosti a hmotnosti v tvare:

$$[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K] \quad (15)$$

Vo výpočtovom prostredí ANSYS parametre α a β Rayleighova útlmu vystupujú pri zostavení matice tlmenia $[C]$ ako multiplikátory matice hmotnosti $[M]$ a matice tuhosti $[K]$, pričom hodnoty týchto parametrov nie sú pre rôzne prípady všeobecne známe, vypočítavajú sa z pomerového útlmu módu ξ_i . Tento útlm je možné vyjadriť ako

pomer okamžitého útlmu k útlmu kritickému a to pre príslušný mód kmitania. Pre danú frekvenciu ω_i módu i je potom možné ju vyjadriť rovnicou [24]:

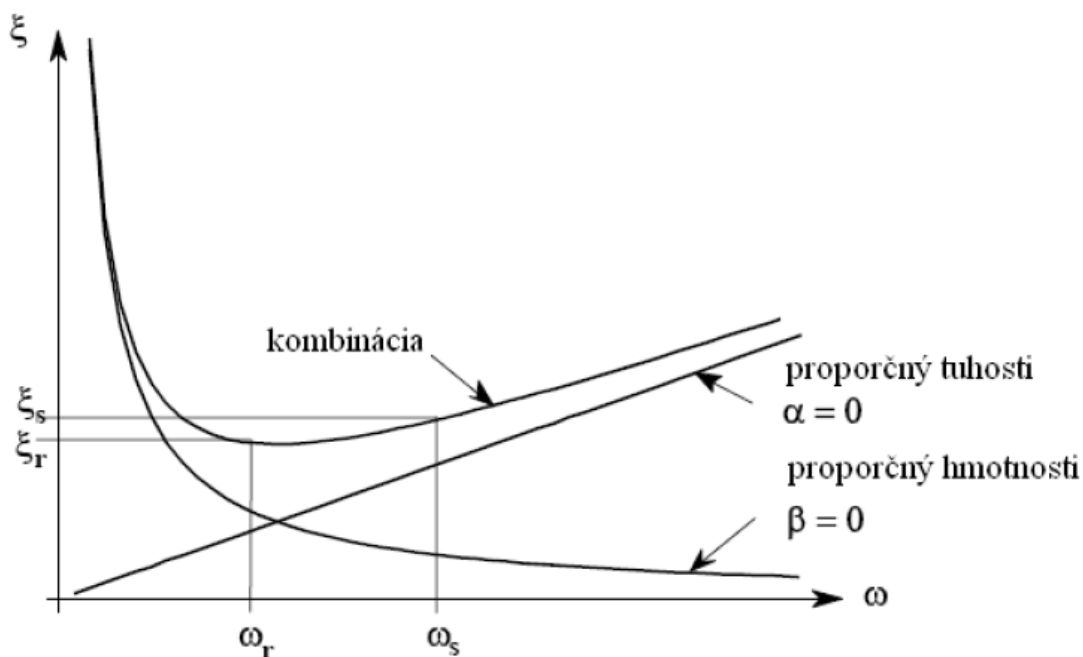
$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (16)$$

kde ξ_i je konštantný pomerný útlm,
 ω_i vlastná kruhová frekvencia.

Pri úlohách, kde je možné vplyv útlmu pri nižších frekvenciách vylúčiť je α zanedbaná a β môže byť vypočítaná na základe známej hodnoty pomerného útlmu ξ a vlastnej kruhovej frekvencie ω vlastného tvaru [24]:

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega} \quad (17)$$

Závislosť útlmu na frekvenciách podľa Rayleighova útlm je zobrazená na Obrázku 11.



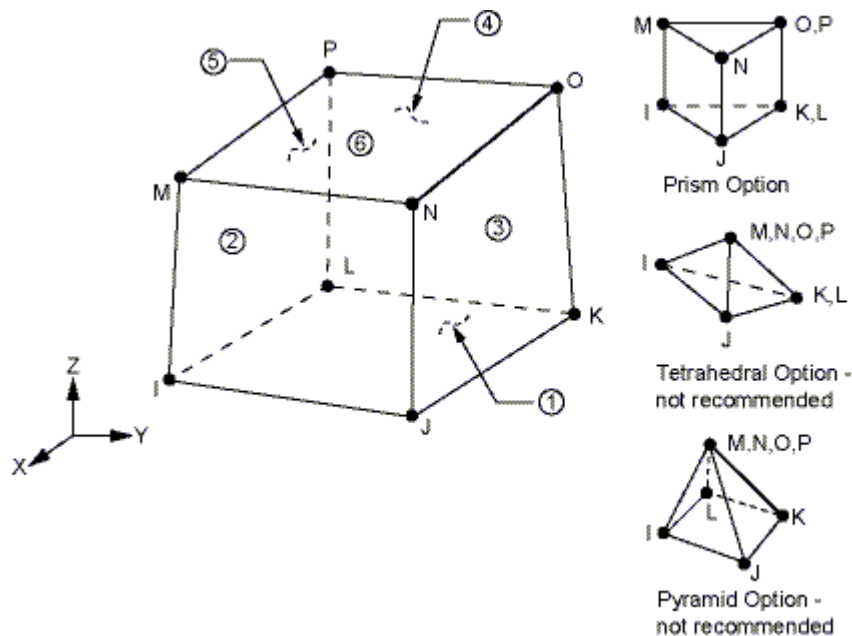
Obrázok 11: Závislosť útlmu na frekvenciách – Rayleighov útlm.

5.3 Použité elementy

V modeloch boli použité dva základné typy elementov, FLUID30 pre simuláciu vzduchových priestorov pred a za deliacou konštrukciou, SOLID185 pre simuláciu samotnej deliacej konštrukcie.

5.3.1 SOLID185

Je 3-D element pre modelovanie pevných štruktúr, v našom prípade vyšetrovanej konštrukcie. Prvok je definovaný ôsmymi uzlami v priestore a v každom tomto uzle môžu byť viazané tri stupne voľnosti UX, UY, UZ. Má ortotropný charakter a môžeme definovať predovšetkým hustotu, modul pružnosti a Poissonové číslo. Prvok je navrhnutý pre namáhanie elastické, plastické, zmršťovanie, dotvarovaním, veľký priehyb a veľké deformácie. Zaťaženie môžeme definovať na všetkých šiestich plochách.



Obrázok 12: Geometria SOLID185 elementu

Prevzaté z [24]

Vstupné dáta:

- uzly: I, J, K, L, M, N, O, P

- stupne voľnosti: UX, UY, UZ
- reálne konštanty: HGSTF (iba v prípade KEYOPT(2) = 1)
- materiálové charakteristiky: EX, EY, EZ, (PRXY, PRYZ, PRZX, alebo NUXY, NUYZ, NUZX), ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GYZ, GZX, ALPD, BETD

EX, EY, EZ - moduly pružnosti, NUXY, NUYZ, NUZX - Poissonové konštanty, ALPX, ALPY, ALPZ - súčinitele tepelnej rozťažnosti, DENS - hustota, GXY, GYZ, GZX - šmykové moduly, ALPD a BETD - alfa a beta útlm

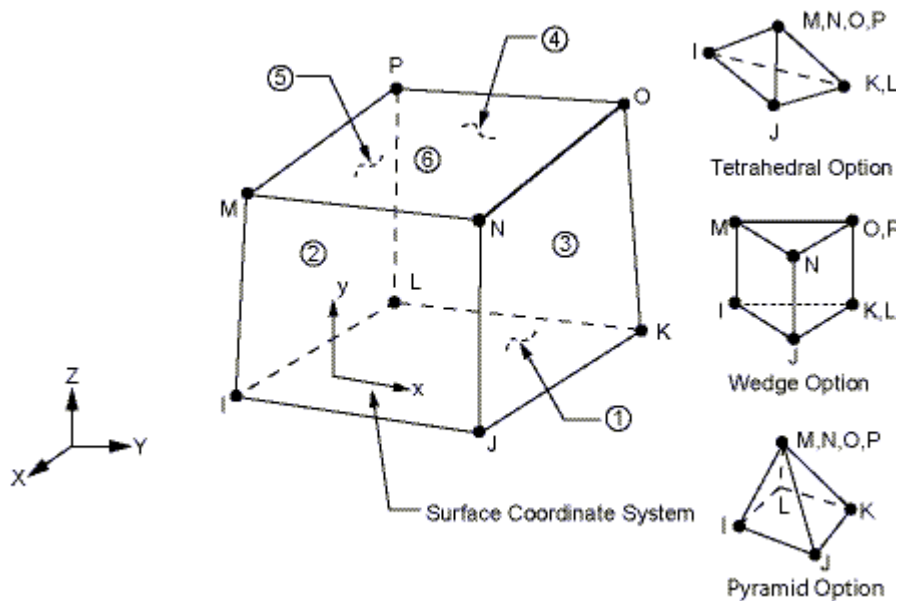
- podmienky na plochu: Pressures (face 1-6) - tlaky na všetky plochy (1-6)
- podmienky na objem: teploty (T(I-P)) a toky (FL(I-P)) - na všetky uzly

Výstupné dáta:

Výstup riešenia spojeného s elementom sú uzlové posuny. Ďalšie výstupy ako sú napríklad tlak, teplota, šmyk, napätie, vnútorné sily a iné možno získať z tabuľky elementu. [24]

5.3.2 FLUID30

FLUID30 alebo 3-D akustická kvapalina sa používa pre modelovanie kvapalín a ako medzičlánok v problémoch interakcie kvapalina/pevná látka. Typickou aplikáciou je propagácia zvukovej vlny. Prvok je definovaný ôsmymi uzlami v rohoch a referenčným tlakom. Každý uzol má štyri stupne voľnosti, UX, UY, UZ a tlak. Prvok má schopnosť zahrnúť tlmenie zvuku pohlcujúcim materiálom na rozhraní ako aj tlmenie v kvapaline. Môže byť použitý s ďalším 3-D štruktúrnym prvkom pre vyriešenie metódy nesymetrickej alebo tlmenej modálnej analýzy, metód plnej harmonickej a plnej tranzientnej analýzy. [24]



Obrázok 13: Geometria FLUID30 elementu

Prevzaté z [24]

Vstupné dáta:

- uzly: I, J, K, L, M, N, O, P
- stupne voľnosti: UX, UY, UZ, PRES
- reálne konštanty: PREF, PSREF
- materiálové charakteristiky: DENS, SONC, VISC, KXX, C, CVH, PERF

PREF - referenčný tlak, PSREF - referenčný statický tlak, DENS - hustota, SONC - rýchlosť zvuku v kvapaline, VISC - viskozita, KXX - tepelná vodivosť, C - teplota, CVH - teplotný koeficient pri konštantnom objeme na jednotku hmotnosti, PERF - definovanie ekvivalentnej kvapaliny perforovaného materiálu pomocou Johnson - Champoux - Allard modelu

- podmienky na plochu: FSI, IMPD, SHLD, FREE, MXWF, INF, CONV
- podmienky na objem: JS, CHRGD, IMPD, TEMP, EF

FSI - upozornenie na interakciu kvapalina/štruktúra, IMPD - impedancia, SHLD - normálna rýchlosť a zrýchlenie, MXWF - ekvivalentná zdrojová plocha.

Výstupné dáta:

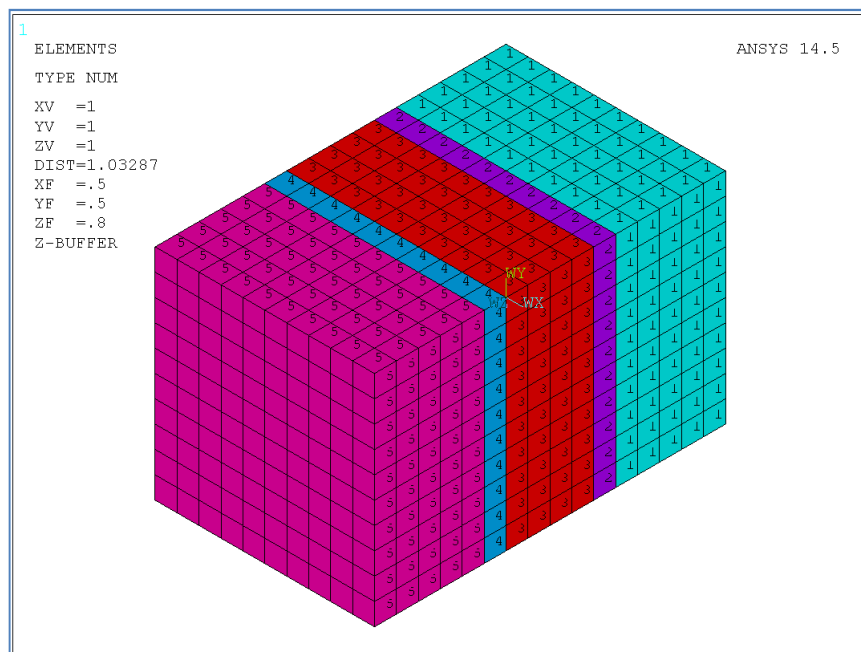
Výstup riešenia spojeného s elementom sú uzlové posuny. Ďalšie výstupy ako sú napríklad tlak, teplota, šmyk, napätie, vnútorné sily a iné možno získať z tabuľky elementu. [24]

Pre numerický model interakcie kvapalina/štruktúra je dôležitým vstupom KEYOPT (2), ktorý je vlastnosťou typu prvku. Pre správne fungovanie takéhoto modelu musí byť využitý. Ak KEYOPT (2) = 0, teda štandardné nastavenie, tak je FSI rozhranie zapnuté ako nesymetrická matica prvkov. V prípade KEYOPT (2) = 1, tak sa jedná o akustickú analýzu bez FSI rozhrania ako symetrická matica prvkov. [23]

5.4 Výpočtový model

Táto kapitola popisuje parametrický model vytvorený v jazyku APDL, jednotlivé parametre, tvorbu geometrie, priradovanie materiálových vlastností, tvorbu okrajových podmienok a riešenie konečne-prvkového modelu.

Obrázok 14 zobrazuje podstatu akustickej analýzy interakcie štruktúry a kvapaliny, kde 1 je označená kvapalina a zobrazuje vysielací objem, červená 3 je štruktúra, v našom prípade deliaca konštrukcia, 5 je prijímací objem, 2 a 4 naznačujú kvapalinové prvky, ktoré sú priamo v styku so štruktúrou aj kvapalinou, majú teda spoločné uzly a je nutné označiť ich ako rozhranie FSI.



Obrázok 14: Podstata interakcie medzi štruktúrou a kvapalinou (FSI).

Prevzaté z [25]

Skript začína definovaním vstupných parametrov pre vzduchové objemy pred a za konštrukciou, ich veľkosti ako dĺžka, šírka a výška. Ďalej definuje veľkosť elementu, aj veľkosť pomocného objemu v styku kvapalina/štruktúra, taktiež aj vstupný tlak a pozíciu jeho zadania. Veľkosť pomocného objemu, teda objemu rozhrania FSI je definovaná ako veľkosť jedného elementu.

Podkapitolou je výpočet výsledného útlmu, exportovanie výsledkov, či už do textového súboru alebo obrazovej podoby.

```
l_in=5/2           ! length of input volume [m]
l_out=6/2          ! length of output volume [m]
w_inout=3.6       ! width of the volumes [m]
h_inout=2.4       ! height of the volumes [m]
in_pres=1         ! input volume pressure 1 [Pa]
pos_pres=0.5      ! Pressure load position z=pos_pres [m]
e_size=0.1        ! element size [m]
th_ly=e_size      ! thickness of helping volume [m]
```

Parametricky sú zadané aj vlastnosti pre harmonickú analýzu.

```
My_Fmin = 0       ! [Hz] Lowest freq for Harmonic analysis
My_Fmax = 3200    ! [Hz] Highest freq for Harmonic analysis
My_Fstep = 64     ! Number of freq steps for Harmonic analysis
```

Pre 3-D akustické elementy modelu boli priradené celkovo štyri rozličné typy prvkov. Jedná sa o ten istý typ elementu, len s rozdielnymi vlastnosťami, vždy dva pre objem pred a dva pre objem za konštrukciou. Pre tie akustické elementy v styku v konštrukciou je potrebná FSI rozhranie, to je štandardne zapnuté, preto pri ostatných elementoch ho pomocou KEYOPT vypínam.

```
ET,1,FLUID30,,1   ! KEYOPT(2)=1, without FSI interface
ET,2,FLUID30      ! with FSI interface
ET,5,FLUID30      ! with FSI interface
ET,6,FLUID30,,1   ! KEYOPT(2)=1, without FSI interface
```

Následne boli zadané materiálové vlastnosti jednotlivých objemov. Taktiež pre všetky akustické elementy bola zadaná reálna konštanta referenčný tlak. Napríklad takto pre vzduchový objem:

```
ET,1,FLUID30,,1   ! KEYOPT(2)=1, without FSI interface
R,1,20e-6          ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,1,1.21     ! Density of the air [kg/m^3]
```

```

MP,SONC,1,344      ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,6,0.00      ! Define the boundary admittance

```

Elementy na začiatku vysielacieho objemu a na konci prijímacieho objemu mali zmenené materiálové vlastnosti takto:

```

R,7,20e-6         ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,7,1.21    ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,7,344    ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,7,1        ! Define the boundary admittance

```

MP,MU,7,1 definuje 100% trenie ako vlastnosť materiálu, takže na koncoch dochádza k pohlteniu zvukovej vlny.

Nasledujúce príkazy vyberajú určitú časť modelu, konkrétne vysielací objem a pomocný objem. Napriek tomu, že ich materiálové vlastnosti sú totožné, tak je nutné priradiť im iný typ elementu, pre následné zavedenie FSI rozhrania medzi tento pomocný objem a štruktúru. Ostatné objemy sú definované analogicky.

```

VSEL,S,LOC,z,0.00,l_in      ! picking sending volume
VATT,1,1,1                  ! assigning material prop., real constant and
element type
VSEL,S,LOC,z,l_in,l_in+th_ly ! picking assistant volume
VATT,2,2,2                  ! assigning material prop., real constant and
element type

```

Vysielací a prijímací objem nezdieľajú žiadne spoločné uzly. Preto sú tieto dve sekcie štruktúrne aj akusticky oddelené. Vysielacie akustické elementy sú typu 1 a typu 2 pre styk štruktúra/kvapalina. Prijímacie akustické elementy sú typu 6 a typu 5 pre styk štruktúra/kvapalina. Rozhranie štruktúra/kvapalina je priradená iba akustickým elementom, ktoré nie sú v styku so štruktúrou. Pre zavedenie rozhrania FSI je nutné definovať tzv. FSI flag. To sa deje vybratím uzlov a elementov v kontakte so štruktúrou nasledovne:

```

ESEL,S,TYPE,,3      ! Selecting solid elements
NELEM               ! Selecting nodes attached to elements
ESEL,R,TYPE,,2     ! Reselecting type 2 (acoustic) elements
TYPE,2
REAL,2
MAT,2
EMODIF,all         ! Modifying elements properties

```

```
SF,ALL,FSI ! FSI flag
```

Akustické elementy, ktoré nie sú v kontakte so štruktúrou, majú definované podmienky posunutia vo všetkých ($u_x, u_y, u_z = 0$) smeroch ako nulové, čiže sa jedná o votknutie. V priebehu tvorby modelu som prišiel na zistenie, že bez tejto okrajovej podmienky nefungovalo tlmenie systému.

```
! constrain the displacement DOFs of sending and receiving volume nodes
ESEL,S,TYPE,,1 ! selecting all elements of sending volume
ESEL,A,TYPE,,6 ! adding all elements of receiving volume
NELEM ! selecting nodes attached to elements
D,all,ux ! defining DOF constrains at nodes
D,all,uy
D,all,uz
```

Na začiatok a koniec boli priradené tzv. anechoic konce, čo sú absorpčné alebo nízkoodrazové elementy, ktoré zabezpečia, že sa tlaková vlna neodrazí späť vo významnej miere. Túto operáciu som vykonal pomocou príkazov:

```
NSEL,S,LOC,z,0 ! Selecting nodes at the beginning of volumes
NSEL,A,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_ly+l_out ! Adding nodes from the
end of the volumes
EMODIF,all,MAT,7 ! Modifying material properties
EMODIF,all,REAL,7 ! Modifying real constants
ESLN,S ! Selecting all elements attached to the selected
nodes
SF,ALL,IMPD,1 ! Specify surface loads on nodes, Impedance 100%
```

Amplitúda akustického tlaku bola zvolená 1 Pa, čo zo vzťahu hladiny akustického tlaku (5) odpovedá intenzite zvuku 93,97 dB. V programe ANSYS je hodnota akustického tlaku značená SPL (sound pressure level) a platí, že $L_p = SPL$, teda platí vzorec (5). Výstup SPL funguje len pre elementy typu FLUID29 a FLUID30. Samotné SPL je hodnotou elementu, znamená to, že je to hodnota na element, nie na uzol.

Samotný tlak bol zadaný na všetky uzly v parametricky zadanej polohe. Zadanie tlaku na všetky uzly môže byť ovplyvnené veľkosťou elementu a v niektorých prípadoch nemusia byť vybraté žiadne uzly, pretože pevne zadaná poloha týchto uzlov (na ose $z = \text{pres_pos}$) môže byť presne medzi uzlami. Tento prípad som ošetril odčítaním, resp. pričítaním veľkosti elementu a odčítaním zanedbateľnej hodnoty. Takto je zaručené, že vyberie len jeden „pás“ uzlov.


```
NSEL,S,LOC,z,pos_pres-e_size-0.0001,pos_pres+e_size+0.0001
D,ALL,PRES,in_pres ! Applying loads on all selected nodes
```

Pre samotný výpočet bola použitá harmonická analýza programu ANSYS v. 15.0. Vzduchový priestor (typ elementu FLUID30) bol harmonicky budovaný zmenou akustického tlaku v tvare:

$$p = p_0 \times \sin(\omega t + \varphi) \quad [\text{Pa}] \quad (18)$$

kde p_0 je amplitúda akustického tlaku,

ω uhlová frekvencia,

t čas,

φ počiatočná fáza.

Rozsah harmonickej analýzy je zadávaný parametrami (My_Fmin, My_Fmax), ktoré sú definované na začiatku skriptu, tak ako aj počet krokov v samotnom rozsahu. V tejto časti je zadávané tlmenie a to tlmenie celého systému, pomocou príkazov ALPHAD a BETAD. Pre vyvolanie harmonickej analýzy boli použité príkazy:

```
ALLSEL,ALL ! Selecting everything
ANTYPE,HARMIC ! Harmonic analysis
HROPT,FULL ! Full solution method
HROUT,ON ! Harmonic analysis output option
LUMPM,0 ! Use the element-dependent default mass matrix
formulation
EQSLV,,1e-08
PSTRES,0

NSUBST,My_Fstep ! Intervals within freq. range
HARFRQ,My_Fmin,My_Fmax ! Frequency range from My_Fmin to My_Fmax Hz
KBC,1 ! Stepped load

ALPHAD,30000 ! Alpha damping
BETAD,0.05 ! Beta damping

SOLVE ! Solve
```

5.4.1 Výpočet hodnoty útlmu

Celý výpočet hodnoty útlmu konštrukcie prebieha v skripte a je vyvolaný samostatným makrom, tl.mac. Základom je získavanie hodnôt SPL (sound pressure

level) na všetkých uzloch vo vysielacom objeme a následne na uzloch v prijímacom objeme. Rozdielom priemerných hodnôt v týchto objemoch dostávame celkový útlm konštrukcie.

Samotný výpočet sa deje v cykle a závisí na vstupnom parametre `My_Fstep`, čo je počet krokov harmonickej analýzy. Cyklus začína vybratím uzlov v príslušnom objeme, následným získaním najmenšieho čísla uzlu v tomto objeme a zapísanie príslušnej hodnoty SPL do parametru `_SPL_NODE1`, teda do prvého uzlu. Následne do parametru `_NOD_COUNT` uložíme hodnotu počtu všetkých uzlov vo vybranom objeme. To je dôležité, pre určenie počtu opakovaní v nasledujúcom cykle, ktorý spočítava hodnoty SPL ďalších uzlov pomocou atribútu `NXTH` príkazu `*GET`. Tento atribút zabezpečuje načítavanie hodnoty SPL ďalšieho uzlu. Výsledkom je suma hodnôt SPL všetkých uzlov vybraného objemu. Jednoduchým vydelením tejto sumy a počtu uzlov získavame priemernú hodnotu akustického tlaku v tomto objeme.

```

SET,FIRST                                ! Reading first results of the solution
*DO,j,1,My_Fstep
  NSEL,S,LOC,z,pos_pres+2*e_size,l_in-2*e_size ! Selecting nodes of
sending room
  *GET,_NODE_1,NODE,0,NUM,MIN              ! Getting min node from selected nodes
  *GET,_SPL_NOD1,NODE,_NODE_1,SPL        ! Obtaining SPL of that node and saving
that value [dB] to the first node under SPL_NOD1
  *GET,_NOD_COUNT,NODE,0,COUNT            ! Getting node count of selected nodes

  *DO,i,2,_NOD_COUNT                      ! Starting cycle from 2nd node to the
last node (node count)
    *GET,_NODE_%i%,NODE,_NODE_%i-1%,NXTH ! Getting next node
    *GET,_SPL_NOD%i%,NODE,_NODE_%i%,SPL   ! Obtaining SPL of next node
      _SPL_NOD%i%=_SPL_NOD%(i-1)%+_SPL_NOD%i% ! Sum of SPL values
  *ENDDO

SPL_AVG_SEN%j%=_SPL_NOD%_NOD_COUNT%/_NOD_COUNT ! Average SPL of
sending volume

```

Analogicky potom pre prijímací objem spočítame priemernú hodnotu akustického tlaku na všetkých uzloch. Rozdielom takto získaných hodnôt dostávame výsledný útlm konštrukcie v dB.

```

SPL_AVG_REC%j%=_SPL_NOD%_NOD_COUNT%/_NOD_COUNT ! Average SPL of
receiving volume

TL%j%=SPL_AVG_SEN%j%-SPL_AVG_REC%j%           ! Transmission loss [dB]

```

Upraveným výstupom je parameter TL v dB pri príslušnej frekvencii, napr. TL_100Hz=32.

```
_fрек=_FREQ%j%
TL_%_fрек%Hz=TL%j%      ! Saving TL value to parameter TL with current
frequency value
```

5.4.2 Export výsledkov

Pre lepšiu prácu s výsledkami skript zapisuje hodnoty útlmu pri frekvencii do poľa, tvoreného dvoma stĺpcami (hodnota útlmu, frekvencia) a počtom riadkov rovnajúcim sa počtu krokov harmonickej analýzy. Takto získané pole je jednoducho exportovateľné do textového súboru a pridáva možnosť ľahšieho spracovania v tabuľkovom editore.

```
*DIM,graf,ARRAY,My_Fstep,2
graf(j,1)=TL%j%          ! Writing value of transmission loss
into array
*GET,_FREQ%j%,ACTIVE,0,SET,FREQ      ! Getting active set frequency value
graf(j,2)=_FREQ%j%      ! Writing current frequency into array
```

Vykreslenie obrázkov je voliteľnou možnosťou skriptu a tak ako aj export sa spúšťa cez samostatné makro, vyvolaním príkazu `exp.mac`. Výstupom je obrázok vo formáte .png, pre lepšiu orientáciu premenovaný na CLT_xxxHz.png, kde xxx je hodnota frekvencii aktuálneho súboru výsledkov.

```
SET,FIRST,,AMPL          ! Read first set of results
*DO,i,1,My_Fstep
  ALLSEL,ALL             ! Selecting all for plotting
  PLNSOL,SPL             ! Plot the sound pressure level
  /REPLOT
  /SHOW,PNG,,0
  PNGR,COMP,1,-1
  PNGR,ORIENT,HORIZ
  PNGR,COLOR,2
  PNGR,TMOD,1
  /GFILE,800,
  /RGB,INDEX,100,100,100,0
  /RGB,INDEX,0,0,0,15
  /REPLOT
  /SHOW,CLOSE
  /DEVICE,VECTOR,0
  /WAIT,1                ! Waiting 1 seconds wait for saving
image
  *GET,file_name,ACTIVE,0,SET,FREQ    ! Getting frequency of current set
  /RENAME,model000.png,,CLT_%file_name%Hz.png,      ! Rename of picture to
CLT_XXX_Hz (Hz value of current set)
  SET,NEXT,,AMPL        ! Reading next set of results
*ENDDO
```

5.4.3 Citlivostná analýza

Zostavené modely boli ďalej využívané pre citlivostnú analýzu. Úlohou citlivostnej analýzy je zistiť aký vplyv majú vstupné parametre na výstupné veličiny. Program ANSYS obsahuje vnútorný nástroj tzv. Pravdepodobnostný návrhový systém (z angl. Probabilistic Design System – PDS). Vstupnými parametrami môžu byť geometria, materiálové vlastnosti, ale aj okrajové podmienky, ktoré sú definované v modeli. Samotná PDS potom náhodne mení vopred definované vstupné parametre a výsledkom je závislosť vstupných parametrov na výstupnom. V mojom prípade bol výstupným parametrom útlm (označ. ako TL), vstupnými parametrami napríklad celková hrúbka CLT panelu alebo hrúbka izolácie CLT panelu. Výstupom z tohto nástroja je správa obsahujúca niekoľko výstupov, ako deterministický model, náhodné vstupné veličiny, korelácia medzi nimi, sady výsledkov každej pravdepodobnostnej analýzy, rôzne grafy závislostí a iné.

```
! Citlivostná analýza (PDS) - zistenie vplyvu hrúbky izolácie CLT

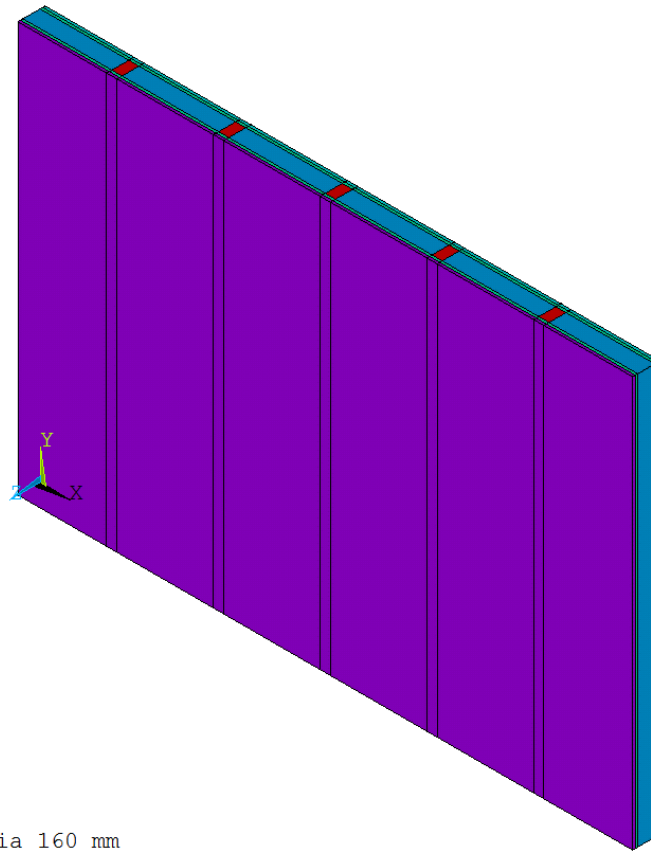
/inp,model,mac          ! macro input file
/pds                    ! switching to "probabilistic design systemu"
!
pdanl,model,mac        ! defines analysis file to be in PDS loop
!
pdvar,th_insCLT,unif,0.01,0.6 ! defines uniform distributed random variable
!
pdvar,TL_50Hz,resp     ! specify parameter to be treated as PDS parameter
pdvar,TL_100Hz,resp
!
...
!
pdmeth,mcs,dir         ! specify PDS method to Monte Carlo Simulation
pddmcs,100,none,all,,,123457 ! specifies number of loops of the analysis
with initial seed 123457
pdexe,model            ! starting analysis
!
pdsens,model,TL_500Hz,both,rank,0.025      ! plot PDS sensitivities
!
/eof
```

5.5 Analýza rámovej konštrukcie

Skriptovacím jazykom APDL bol vytvorený parametrický model pre automatickú tvorbu numerického modelu rámovej konštrukcie. Vstupnými parametrami je plocha

stĺpiku (a_rea), šírka stĺpiku (w_col) a osová vzdialenosť stredov stĺpikov (w_ins). Rozmery ako hrúbka stĺpika je automaticky dopyčítaná, taktiež aj celková hrúbka steny (konštrukcie).

```
1
VOLUMES
TYPE NUM
```



Rámová konštrukcia 160 mm

Obrázok 15: Model rámovej konštrukcie.

Samotná tvorba geometrie je rozdelená do viacerých krokov. Konštrukcia sa vytvára objem po objeme, resp. vrstva po vrstve. Nasledujúcim krokom je delenie objemu, resp. všetkých objemov a to z dôvodu zachovania pravidelnej siete. Cieľom je sieťovať model mapovane, čo znamená tak, aby sieť bola pravidelná, čo je pre akustiku dôležité. Takáto sieť je najkvalitnejšia, pretože v 3D využíva výhradne šesťsteny. Delenie objemu prebieha za pomoci pracovnej roviny (workplane).

```
WPOFFS,w_inout/2      ! nastavenie na stred v smere x
WPOFFS,-w_col/2       ! posunutie v smere x o polovicu šírky stĺpika
WPRO,,,90             ! natočenie pracovnej roviny o 90 stupňov
VSBW,all,,,          ! delenie objemu touto pracovnou rovinou
WPRO,,, -90           ! natočenie späť
WPOFFS,w_col          ! posunutie v smere x o celú šírku stĺpika
WPRO,,,90             ! znova natočenie
VSBW,all,,,          ! delenie
```

```

WPRO,,, -90          ! natočenie späť
WPOFFS, -w_col/2    ! posun späť do stredu stĺpika

```

Týmito príkazmi som vytvoril stredový stĺpik, resp. predelil všetky objemy šírkou tohto stĺpika. Analogicky prebieha delenie aj pri ďalších stĺpikoch, ktoré sa deje v cykle. Najprv presuním pracovnú rovinu do stredu a v cykle delím objemy vľavo a vpravo od stredu. Cyklus je ohraničený polovicou vopred vypočítaného počtu symetricky sa opakujúcich panelov (polovičná šírka izolácie – šírka stĺpika – polovičná šírka izolácie).

```

WPAVE, w_inout/2, 0, 0      ! posun pracovnej roviny do bodu (stred)
*DO, i, 1, NINT(cnt)/2     ! cyklus ďalšieho delenia pracovnou rovinou
    analogicky posun pracovnou rovinou, natočenie a delenie takto natočenou
    rovinou
*ENDDO                     ! koniec cyklu

```

Priradovanie typov elementov, materiálových vlastností a reálnych konštánt sa vo vysielacom a prijímacom objeme nelíši (je popísaný na začiatku kapitoly). Pri rámovej skladbe konštrukcie je rozdiel v tom, že v prvom kroku vyberiem celý objem, priradím vlastnosti izolácie a potom v cykle pomocou posunu pracovnej roviny vyberám stĺpiky (objemy na pozícii stĺpikov), ktorým priradujem odpovedajúce vlastnosti. Ortotropné materiálové vlastnosti pre konečne-prvkový model smrekových stĺpikov sú uvedené v Tabuľke 4.

```

VSEL, S, LOC, z, 0, th_col  ! vybratie objemu stĺpikov a izolácie
VATT, 4, 4, 4              ! priradenie vlastností izolácie celému
objemu
WPOFFS, w_inout/2, 0, 0    ! posun pracovnej roviny do bodu (stred)

*DO, i, 1, (NINT(cnt)/2)+1 ! začiatok cyklu
    CSYS, WP                ! aktivácia pracovnej roviny
    VSEL, S, LOC, x, -w_col/2, w_col/2 ! výber objemu v šírke stĺpika
    VSEL, R, LOC, z, 0, th_col ! výber z už vybraného objemu, vybratie
len stĺpikov
    VATT, 3, 3, 3          ! priradenie typu elementu, mat. vlastností a
reálnej konštanty
    WPOFFS, w_ins         ! posun pracovnej roviny v smere x o osovú
vzdialenosť
*ENDDO                    ! koniec cyklu

WPCSYS, -1, 0            ! zarovnanie pracovnej roviny s globálnym
súr. sys.

```

Tabuľka 4: Ortotropné materiálové vlastnosti pre KP model stĺpikov rámovej konštrukcie a panelu CLT.

Drevina	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}
smrek	15900	690	390	770	36	750	0.47	0.013	0.028

E_L, E_R, E_T - normálové moduly pružnosti [MPa]; G_{LR}, G_{LT}, G_{RT} – šmykové moduly pružnosti [MPa]; $\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ – Poissonove čísla [-]

Tabuľka 5: Materiálové vlastnosti pre sádrokartón a minerálnu vlnu. [26], [27]

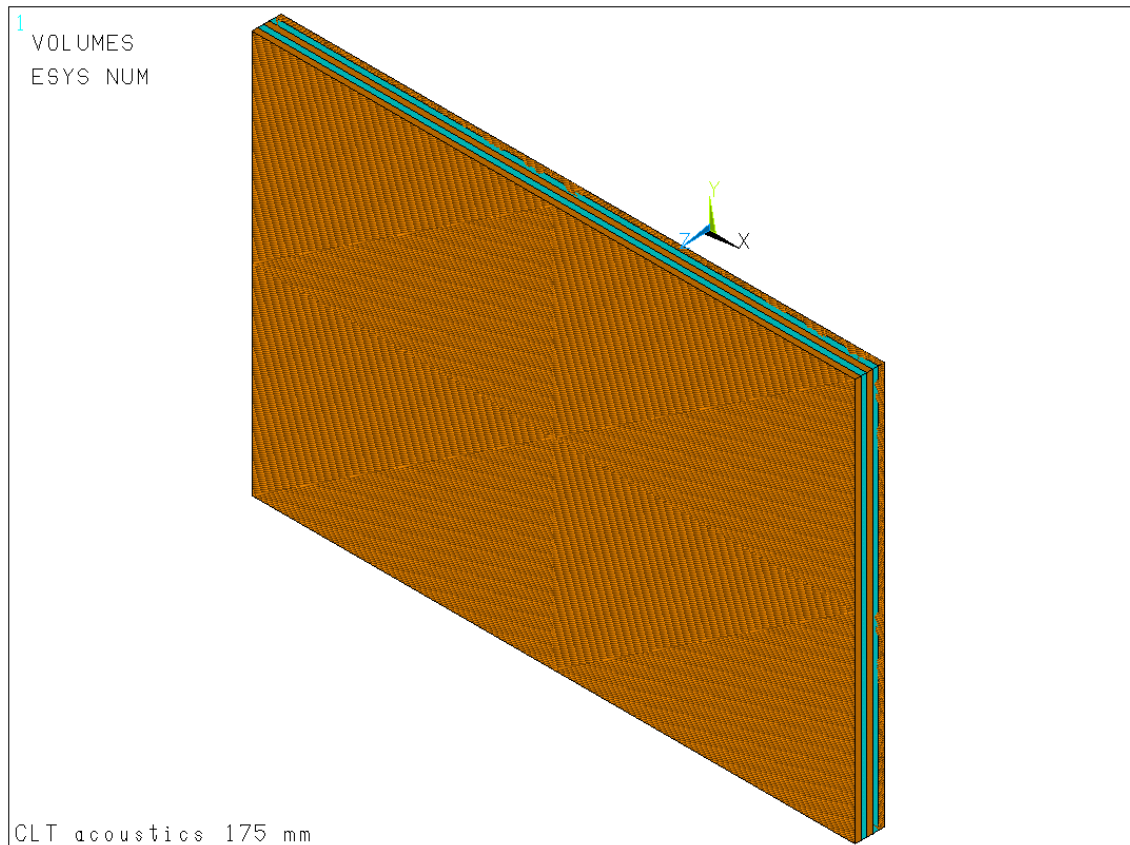
Materiál	ρ	c	ν
sádrokartón	1 200	1 500	0.028
minerálna vlna	30	180	0.001

c – rýchlosť šírenia zvuku [m/s]; ρ - hustota [kg/m^3]; ν – Poissonové číslo [-]

5.6 Analýza panelu CLT

V jazyku APDL bol vytvorený parametrický skript pre automatickú tvorbu numerického modelu panelu CLT. Vstupnými parametrami je počet vrstiev v tomto CLT paneli (obvykle 3,5,7), hrúbka jednej vrstvy, ďalším parametrom je prítomnosť izolácie v konštrukcii a hrúbka tejto izolácie.

Model je idealizovaný v zmysle, že neuvažuje medzeru medzi doskami v rámci vrstvy a nie je tvorený doskou po doske, sú vytvorené vrstvy a fyzikálnu podstatu, teda kolmosť jednotlivých vrstiev v CLT paneli som docielil otočením ortotropného materiálového modelu o 90° .



Obrázok 16: Model konštrukcie 5 vrstvového CLT panelu.

Materiálom pre výpočet bol smrek a jeho materiálové vlastnosti pre KP model panelu CLT sú v Tabuľke 4.

Tak ako aj pri rámovej konštrukcii bol pre výpočet použitý konečný prvok SOLID185, popísaný v kapitole 5.3.

Tvorba CLT pevnej časti prebieha v cykle, vrstva po vrstve, podľa parametru počet vrstiev CLT (`num_CLT`). Teoreticky je preto možné, že sa vytvorí len jedna vrstva alebo aj párný počet vrstiev, čo nie je pre CLT panely obvyklé. Model počíta aj s parametrizáciou prítomnosti izolácie na panely CLT aj s hrúbkou tejto izolácie. Zadaním parametru `ins_CLT=1` pre prítomnosť izolácie alebo `=0` pre absenciu, skript automaticky pridá izoláciu parametricky stanovenej hrúbky (`th_insCLT`).

```
*DO,i,1,num_CLT
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+(i-1)*th_CLT,l_in+th_ly+i*th_CLT,
    ! CLT layer/s
*ENDDO

*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
```



```

BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+th_wall,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT,
    ! CLT insulation
*ENDIF

```

Pre zabezpečenie kolmosti jednotlivých vrstiev a zmenu materiálových vlastností bolo nutné vytvoriť lokálny súradnicový systém, ktorý bol otočený o 90 stupňov oproti globálnemu súradnicovému systému. Takto vytvorený systém má označenie 11.

```

! Creating local coordinate system for assigning material properties to layer
of board rotated 90 degrees
WPROTA,0,0,90      ! Rotation of working plane about Y axis
CSWPLA,11,0       ! Local system 11, rotated 90 degrees from global
coordinate system
WPCSYS,,1         ! Definition of working plane location
CSYS,0           ! Activating previously defined Cartesian coordinate system

```

Priradenie materiálových vlastností preto tiež prebieha v cykle, aby som zaručil priradenie rozdielnych materiálových vlastností na navzájom kolmé vrstvy CLT. Využívam k tomu predtým vytvorený lokálny súradnicový systém pomocou atribútu **ESYS** príkazu **VATT,MAT,REAL,TYPE,ESYS**. Samotnému priradeniu predchádza podmienka, ktorá určí či sa jedná o vrstvu s nepárnym resp. párnym poradovým číslom.

```

*DO,i,1,num_CLT
    VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+(i-1)*th_CLT,l_in+th_ly+(i)*th_CLT      ! Picking CLT
layer one by one
    *IF,NINT(i/2),eq,i/2,THEN      ! Deciding whether is it odd or even number
of layer
        VATT,3,3,3                ! If it is odd number of layer, then material
prop., real constant and element type in global coordinate system
    *ELSE
        VATT,3,3,3,11            ! If it is even number of layer, then material
prop., real constant and element type in local coordinate system, rotated 90
degrees
    *ENDIF
*ENDDO

```

Materiálový model izolácie CLT, ktorú som zvolil ako stredne tvrdú drevovláknitú dosku (MDF) sa nachádza v Tabuľke 6.

Tabuľka 6: Ortotropné materiálové vlastnosti pre KP model MDF izolácie panelu CLT.

Prevzaté z [28]

Materiál	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}
drevovláknitá doska	2000	200	200	550	200	200	0.25	0.2	0.2

E_L, E_R, E_T - normálové moduly pružnosti [MPa]; G_{LR}, G_{LT}, G_{RT} – šmykové moduly pružnosti [MPa]; $\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}$ – Poissonove čísla [-]

Pre úplne nadefinovanie materiálových vlastností drevovláknitej dosky je nutné zadať hustotu a rýchlosť šírenia zvuku v materiáli. Hustota bola zadaná ako 210 kg/m^3 a rýchlosť šírenia ako 2600 m/s . Pri drevovláknitej doske nie je tak markantný rozdiel medzi rýchlosťou šírenia pozdĺžne a priečne ako to je pri dreve. Preto je jednoduchšie vybrať jednu hodnotu a nenastáva prípad ako pri smreku, kde som práve hodnotu rýchlosti šírenia zvuku musel priemerovať. Hodnoty šírenia zvuku pri rôznych frekvenciách sa menia v rádoch jednotiek. [29]

6 VÝSLEDKY A DISKUSIA

6.1 Verifikácia

Overenie správnosti modelu bolo urobené na dvoch typoch deliacich konštrukcií, masívnej v podobe CLT panelu a ľahčenej v podobe rámovej konštrukcie. Prvou bola rámová konštrukcia hrúbky 160 mm a druhou CLT panel hrúbky 175 mm vo variante bez resp. s tlmením. Vyhodnotenie výsledkov prebehlo pomocou tabuľkového procesoru MS Excel, v ktorom bola určená jednočíselná veličina podľa ČSN EN ISO 717-1, vážená vzduchová nepriezvučnosť R_w a tieto hodnoty boli porovnané.

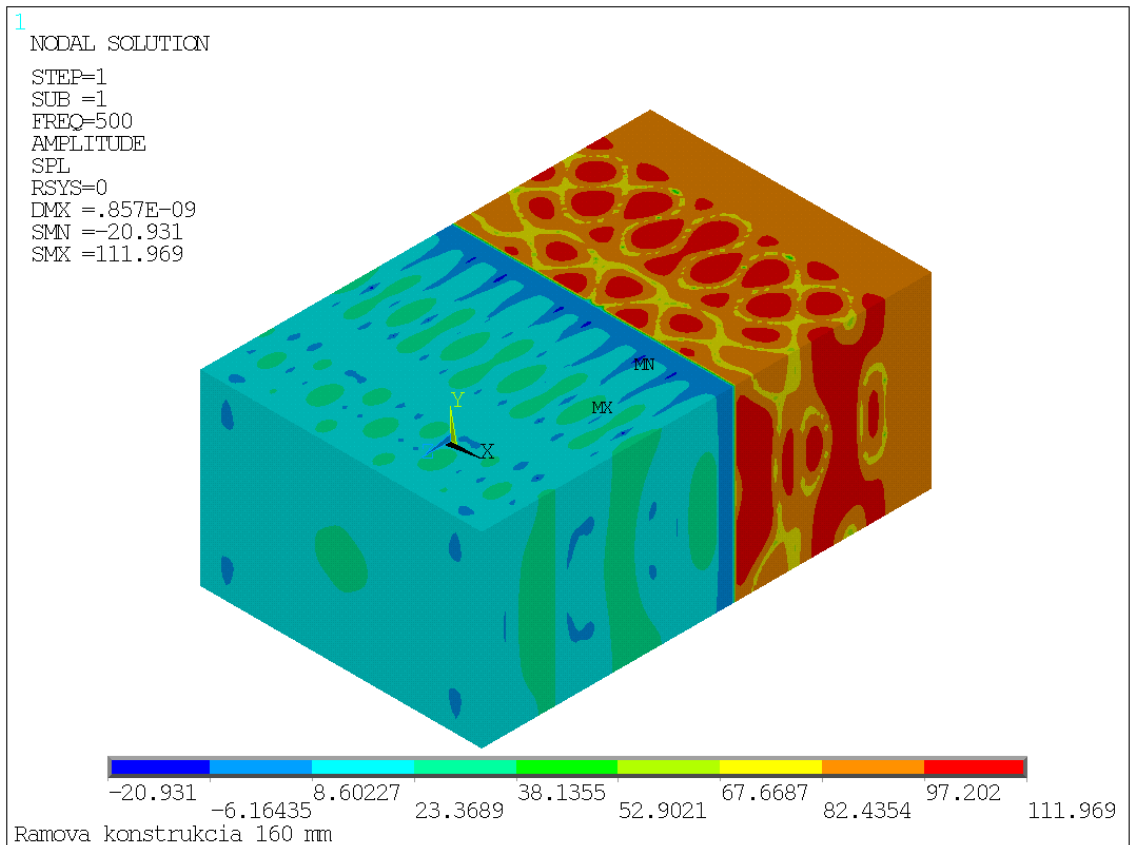
6.1.1 Rámová konštrukcia

Verifikácia rámovej konštrukcie prebehla zostavením modelu podľa dátových listov spoločnosti FERMACELL (Obrázok 17), dodržaním všetkých rozmerov a materiálových charakteristík. Jednalo sa o obojstranne opláštenú rámovú konštrukciu dvojicou sádrovláknitých dosiek FERMACELL hrúbky 15 mm, nosných drevených stĺpikov priečneho rozmeru 60 x 100 mm a minerálnej izolácie hrúbky 100 mm. Celková hrúbka konštrukcie je preto 160 mm.

Označení	Schéma	Nosná konštrukcia ²³					Zvuková izolácia		
		Tloušťka stěny [mm]	sloupky [mm]	žebra [mm]	Opláštění FERMACELL jedna strana [mm]	Minerální izolace ²³ tloušťka/obj. hmotnost [mm] / [kg/m ³]	Plošná hmotnost [kg/m ²]	R_w ²³ podle ČSN EN ISO 717-1 [dB]	$R_{w,v}$ ²³ podle DIN 4109 [dB]
1 HT 31		160	60/100	60/100	15 + 15	100/30	84	≥ 49	

Obrázok 17: Výber z tabuľky „Nosné stěny FERMACELL s dřevěnou konstrukcí“.

Prevzaté z [21]



Obrázok 18: Rozloženie tlakov rámovej konštrukcie pri frekvencii 500 Hz.

Obrázok 18 zobrazuje rozloženie tlakov pred a za deliacou konštrukciou pri frekvencii 500 Hz. Vo vysielacej oblasti (pred konštrukciou) dochádza k nahusteniu, je tu tlak vyšší ako v prijímacej miestnosti, čo naznačuje pokles tlaku, tým pádom aj zvukový útlm. Farby blížiac sa červenému odtieňu zobrazujú vyššie tlaky, zelená až modrá nižšie.

Rozloženie tlakov pred a za deliacou rámovou konštrukciou v tretinooktávovom kmitočtovom pásme je súčasťou Prílohy 6.

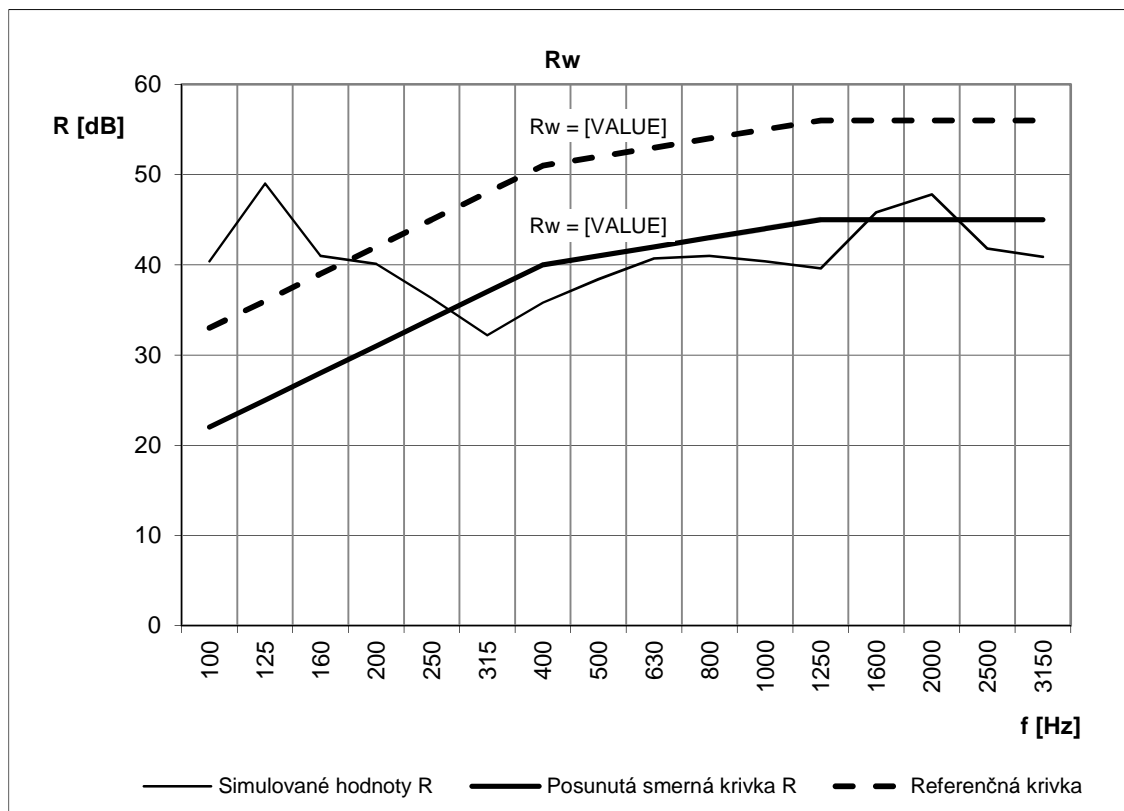
Hodnoty nepriezvučnosti pri rôznych kmitočtoch sú uvedené v Tabuľke 7. Súčet nepriaznivých odchýlok bol 31,2 dB. Grafické znázornenie smernej krivky nepriezvučnosti s hodnotami výsledkov simulácie sú uvedené v grafe.

Tabuľka 7: Nepriezvučnosť R pri rôznych kmitočtoch, výsledný rozdiel nepriaznivých odchýlok.

f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]	f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]
100	33	40,4	0	630	53	40,7	1,3
125	36	49,0	0	800	54	41,0	2
160	39	41,0	0	1000	55	40,4	3,6
200	42	40,1	0	1250	56	39,6	5,4
250	45	36,3	0	1600	56	45,8	0
315	48	32,2	4,8	2000	56	47,8	0
400	51	35,8	4,2	2500	56	41,8	3,2
500	52	38,4	2,6	3150	56	40,9	4,1

31,2 dB

Hodnota váženej nepriezvučnosti R_w podľa FERMACELL bola viac ako 49 dB, výsledná hodnota podľa simulácie bola 41 dB, čo je rozdiel 8 dB, resp. – 19,5 %. Môžeme teda povedať, že model sa približuje na cca 80 % reálnym podmienkam.



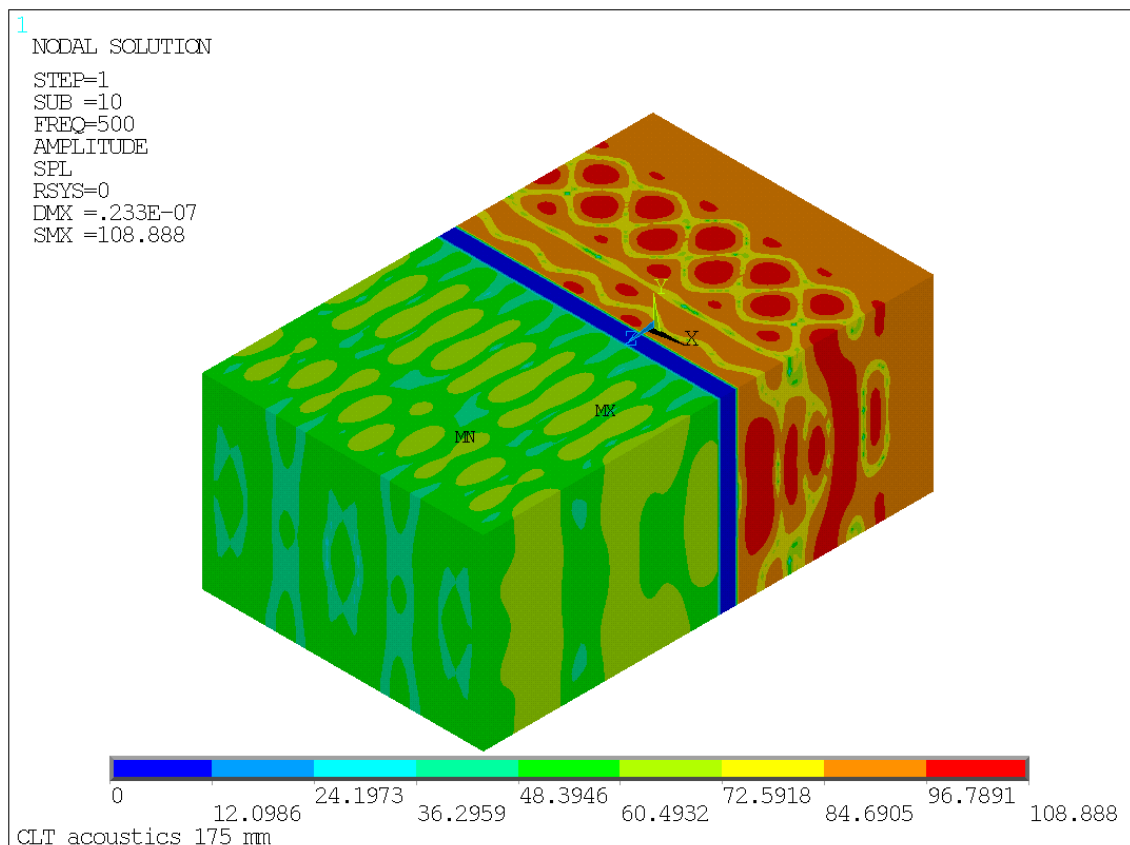
Obrázok 19: Graf váženej nepriezvučnosti simulovanej rámovej konštrukcie. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].

6.1.2 CLT panel

Dimenzie panelu vychádzali z experimentu. [30] Jednalo sa o 3,6 m široký a 2,4 m vysoký CLT panel, skladajúci sa z 5 vrstiev, každá 35 mm hrubá, teda celková hrúbka panelu 175 mm. Takto zostavený model bol testovaný najprv bez tlmenia celého systému a potom s tlmením.

CLT panel 175 mm bez tlmenia:

Obrázok 20 zobrazuje rozloženie tlakov pred a za deliacou konštrukciou pri frekvencii 500 Hz. Vo vysielacej oblasti (pred konštrukciou) dochádza k nahusteniu, je tu tlak vyšší ako v prijímacej miestnosti, čo naznačuje pokles tlaku, tým pádom aj zvukový útlm. Farby blížiacie sa červenému od tieňu zobrazujú vyššie tlaky, zelená až modrá nižšie. Ďalšie grafické výstupy simulácie v tretinooktávovom pásme sú súčasťou Prílohy 7.



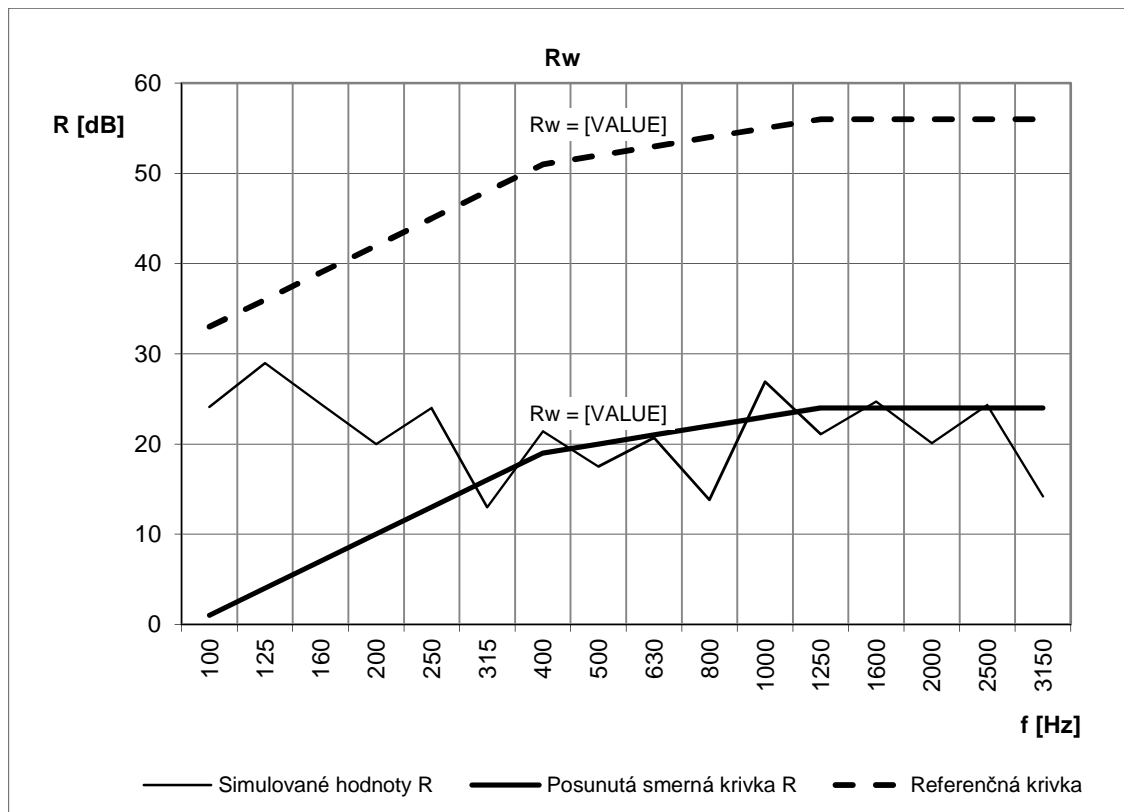
Obrázok 20: Rozloženie tlakov pri frekvencii 500 Hz CLT panelu bez tlmenia.

Nepriezvučnosť pri frekvenciách tretinooktávového pásma je v Tabuľke 8 spolu s nepriaznivými odchýlkami referenčnej krivky od smernej krivky. Súčet nepriaznivých odchýlok bol 30,6 dB.

Tabuľka 8: Nepriezvučnosť v tretinooktávovom pásme pre CLT panel 175 mm bez tlmenia.

f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]	f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]
100	33	24,1	0	630	53	20,7	0,3
125	36	29,0	0	800	54	13,8	8,2
160	39	24,5	0	1000	55	26,9	0
200	42	20,0	0	1250	56	21,1	2,9
250	45	24,0	0	1600	56	24,7	0
315	48	13,0	3	2000	56	20,1	3,9
400	51	21,4	0	2500	56	24,3	0
500	52	17,5	2,5	3150	56	14,2	9,8
							30,6 dB

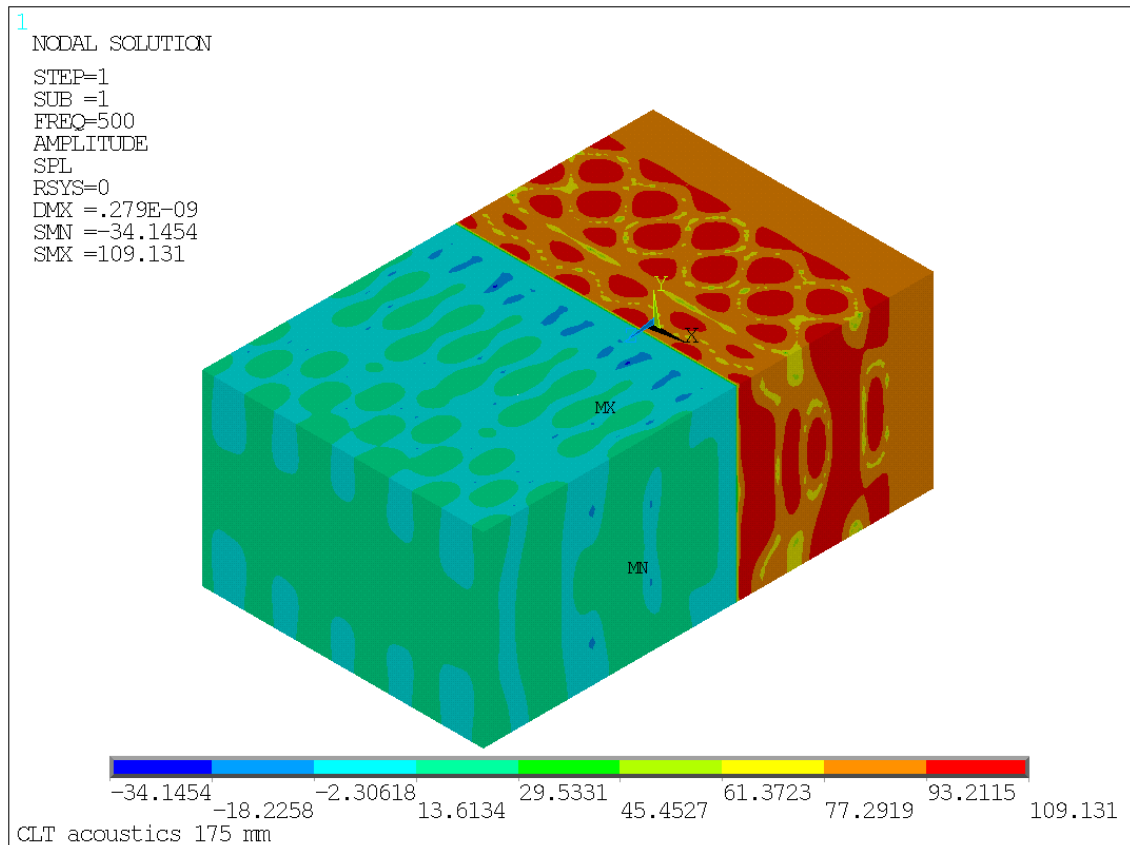
Hodnota váženej nepriezvučnosti R_w podľa experimentu [30] bola v prípade 5 vrstvého CLT panelu celkovej hrúbky 175 mm 41 dB, výsledná hodnota podľa simulácie takéhoto panelu bez použitia tlmenia systému bola len 20 dB, čo je rozdiel až 21 dB. Tento výsledok nemožno považovať za približujúci sa reálnemu experimentu, pretože sa jedná o rozdiel viac ako 50 %. V grafe pod textom je zobrazená referenčná krivka spolu s posunutou smernou krivkou, odčítaná hodnota R_w pri frekvencii 500 Hz.



Obrázok 21: Graf váženej vzduchovej nepriezvučnosti simulovaného CLT panelu. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].

CLT panel 175 mm s tlmením:

Jedná sa o ten istý model len so zavedením systémového tlmenia popísaného v Kap. 5.2.3. Hodnota váženej nepriezvučnosti R_w podľa experimentu [30] bola v prípade 5 vrstvého CLT panelu celkovej hrúbky 175 mm 41 dB, výsledná hodnota podľa simulácie takéhoto panelu s použitím tlmenia systému bola 43 dB, čo je rozdiel iba 2 dB. Tento výsledok je viac než akceptovateľný, jedná sa o približne 4,6 % väčší útlm konštrukcie ako v prípade experimentu.

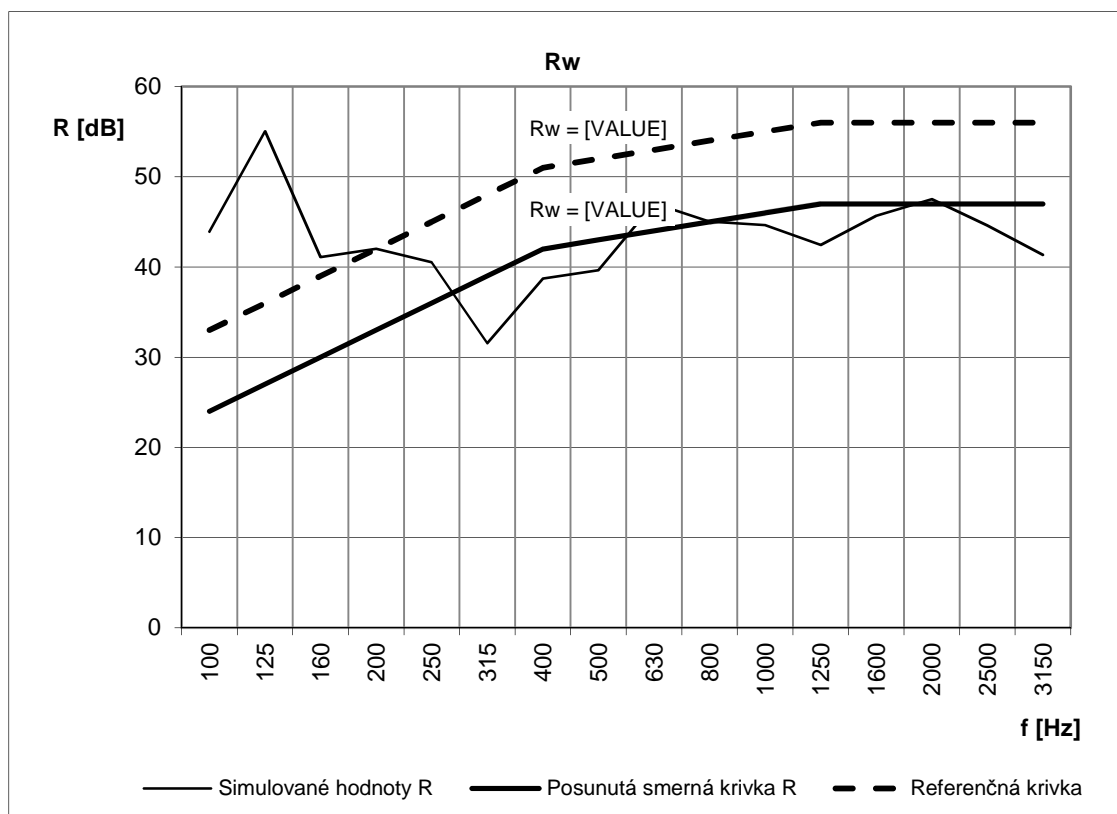


Obrázok 22: Rozloženie tlakov pri frekvencii 500 Hz CLT panelu 175 mm s tlmením.

Nepriezvučnosť pri frekvenciách tretinooktávového pásma je v Tabuľke 9 spolu s nepriaznivými odchýlkami referenčnej krivky od smernej krivky. Súčet nepriaznivých odchýlok bol 29,5 dB.

Tabuľka 9: Nepriezvučnosť v tretinooktávovom pásme pre CLT panel 175 mm s použitím tlmenia.

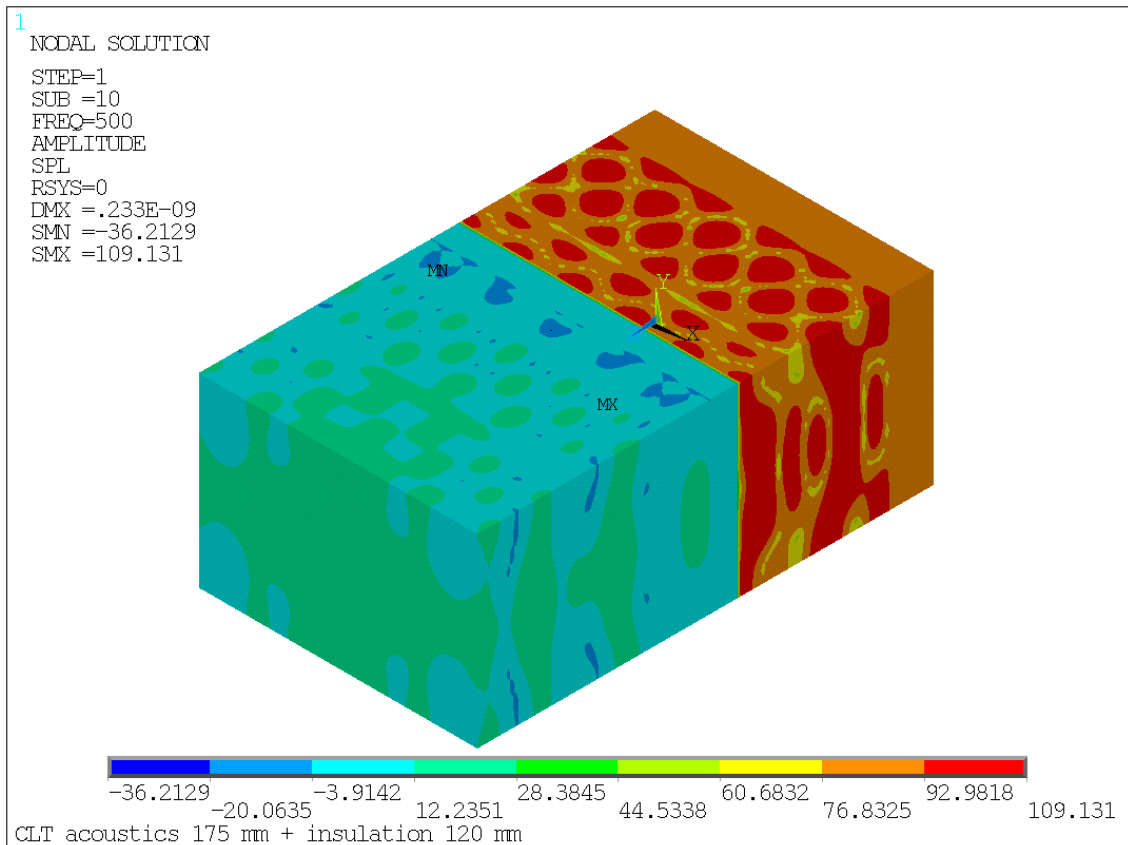
f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]	f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]
100	33	43,91	0	630	53	47,0	0
125	36	55,1	0	800	54	45,0	0
160	39	41,1	0	1000	55	44,6	1,4
200	42	42,0	0	1250	56	42,5	4,5
250	45	40,5	0	1600	56	45,7	1,3
315	48	31,5	7,5	2000	56	47,5	0
400	51	38,7	3,3	2500	56	44,6	2,4
500	52	39,6	3,4	3150	56	41,4	5,7
							29,5 dB



Obrázok 23: Graf váženej vzduchovej nepriezvučnosti simulovaného CLT panelu. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].

CLT panel 175 mm + izolácia 120 mm s tlmením:

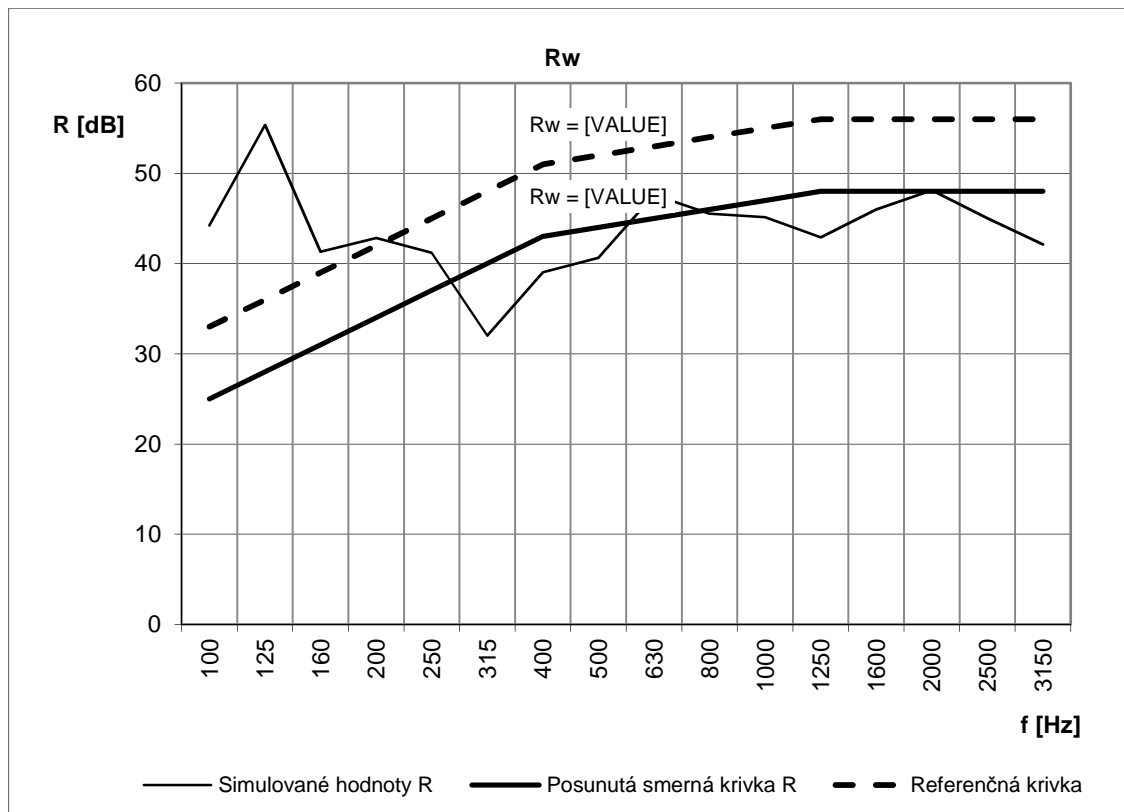
Ďalší model bol zostavený pridaním 120 mm hrubej izolácie na CLT panel hrúbky 175 mm, čím sa vytvorila deliaca konštrukcia o celkovej hrúbke 295 mm. Výsledná hodnota váženej vzduchovej nepriezvučnosti R_w bola 44 dB. Pridaním izolácie sa zlepšili akustické vlastnosti iba o 1 dB. Táto hodnota asi nie je správna, podobné konštrukcie vykazovali vyššie hladiny váženej vzduchovej nepriezvučnosti. Súčet nepriaznivých odchýlok bol 31,9 dB.



Obrázok 24: Rozloženie tlakov pri frekvencii 500 Hz CLT panelu 175 mm + izolácie 120 mm s tmením.

Tabuľka 10: Nepriezvučnosť v tretinooktávovom pásme pre CLT panel 175 mm + izolácia 120 mm s použitím tmenia.

f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]	f [Hz]	Rref [dB]	R [dB]	Nepriaznivé odchýlky [dB]
100	33	44,2	0	630	53	47,6	0
125	36	55,4	0	800	54	45,5	0,5
160	39	41,3	0	1000	55	45,1	1,9
200	42	42,8	0	1250	56	42,9	5,1
250	45	41,2	0	1600	56	46,0	2
315	48	32,0	6,5	2000	56	48,1	0
400	51	39,1	4	2500	56	45,1	3
500	52	40,6	3,4	3150	56	42,1	5,5
							31,9 dB



Obrázok 25: Graf váženej vzduchovej nepriezvučnosti simulovaného CLT panelu. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].

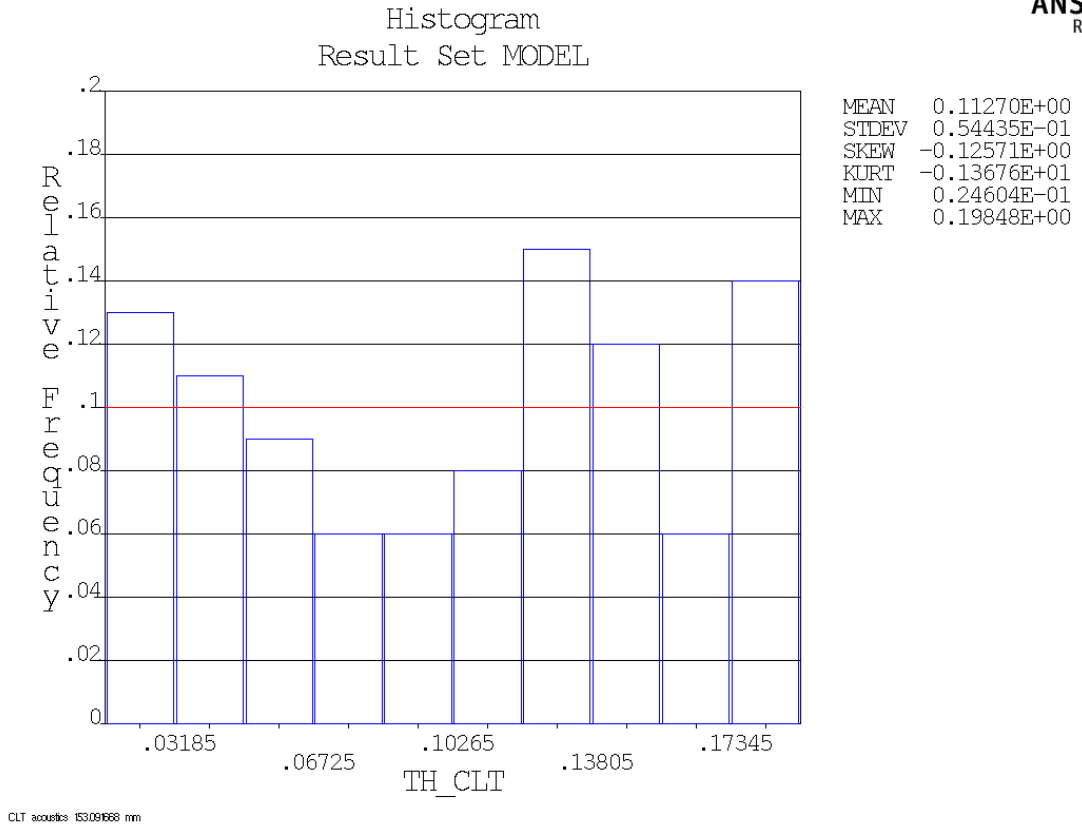
6.2 Citlivostná analýza

Citlivostná analýza bola vykonaná pomocou nástroja programu ANSYS, tzv. PDS (kap. 5.4.3). Skúmala výsledný útlm v tretinooktávovom pásme od 100 Hz až po 3150 Hz s počtom opakovaní 100. Vo všetkých prípadoch je použité pseudonáhodné generovanie čísel Monte Carlo metódou. Pre vstupné parametre (hrúbky) je použité rovnomerné, obdĺžnikové rozloženie, teda je zadaná spodná a horná hranica hodnôt.

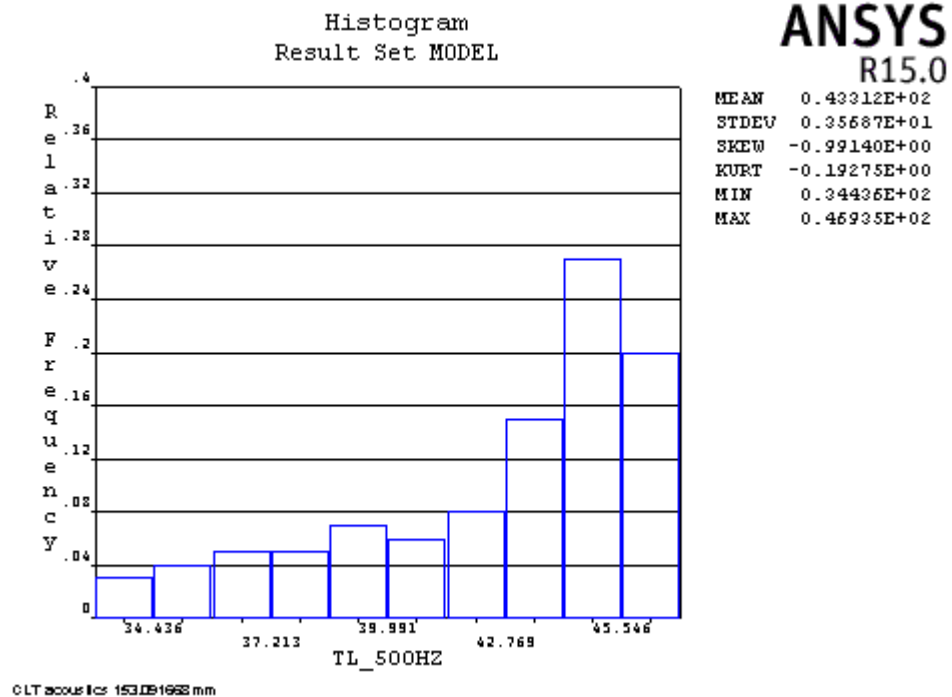
6.2.1 Vplyv celkovej hrúbky CLT panelu na výsledný útlm

Vstupným parametrom pre citlivostnú analýzu bola hrúbka jednej vrstvy v CLT paneli. Išlo o 5 vrstvý panel, kde sa menila hrúbka jednej vrstvy (parameter th_{CLT}) náhodne od 23 mm po 200 mm. Celkovo teda mohol vzniknúť panel hrúbky až 1 m, čo je nereálne pre prax, ale pre potreby simulácie možné.

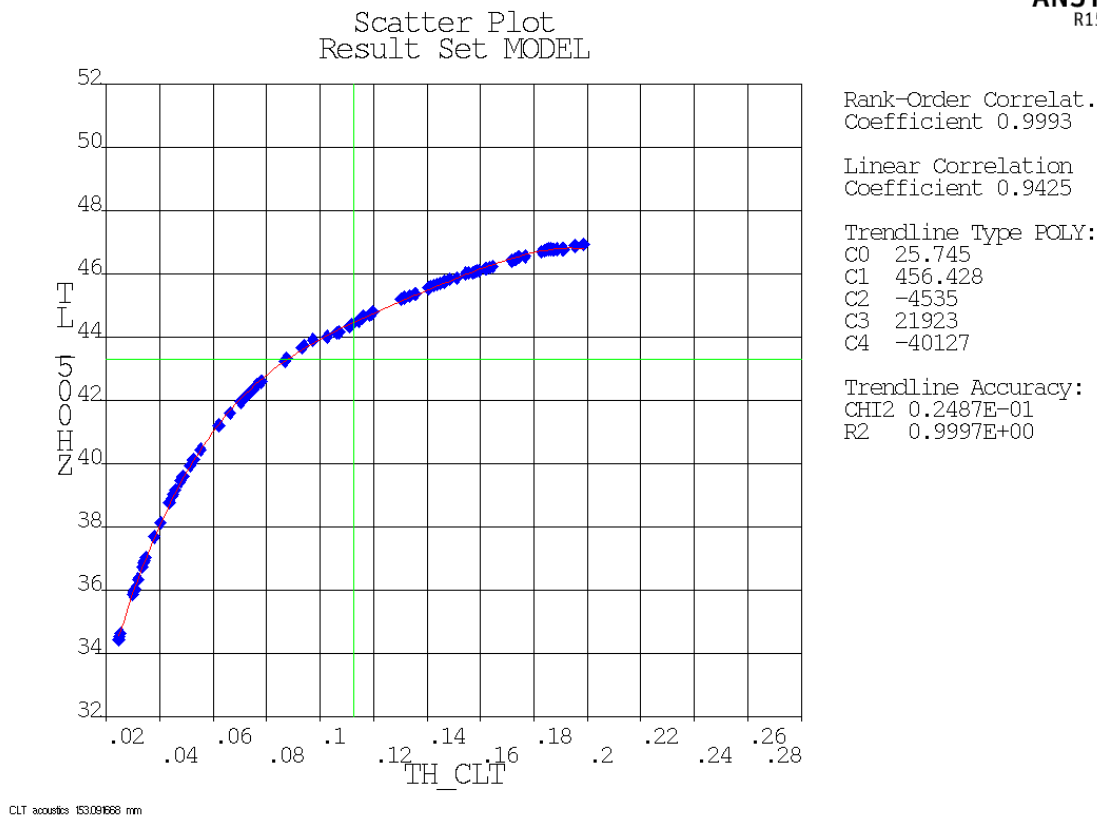
Náhodné generovanie hrúbky izolácie je zobrazené v histograme (Obrázok 26).



Obrázok 26: Histogram generovania hrúbky izolácie.



Obrázok 27: Histogram výsledného útlmu pri frekvencii 500 Hz.

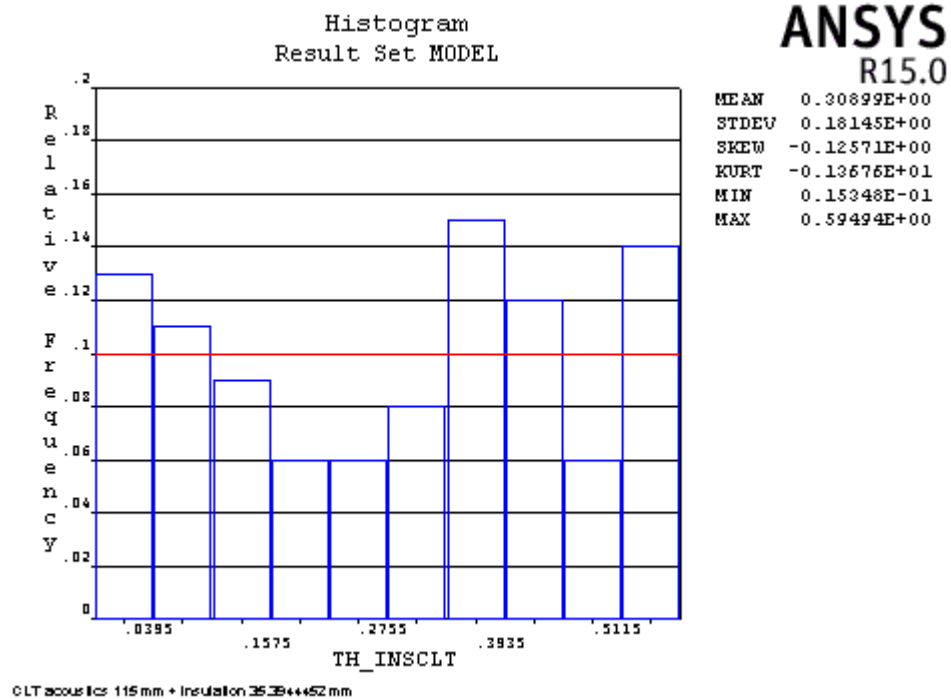


Obrázok 28: Vplyv hrúbky CLT panelu na výsledný útlm pri frekvencii 500 Hz.

So zvyšujúcou sa celkovou hrúbkou CLT panelu sa zvyšuje aj celkový útlm. Obrázok 28 zobrazuje tento vplyv pri frekvencii 500 Hz.

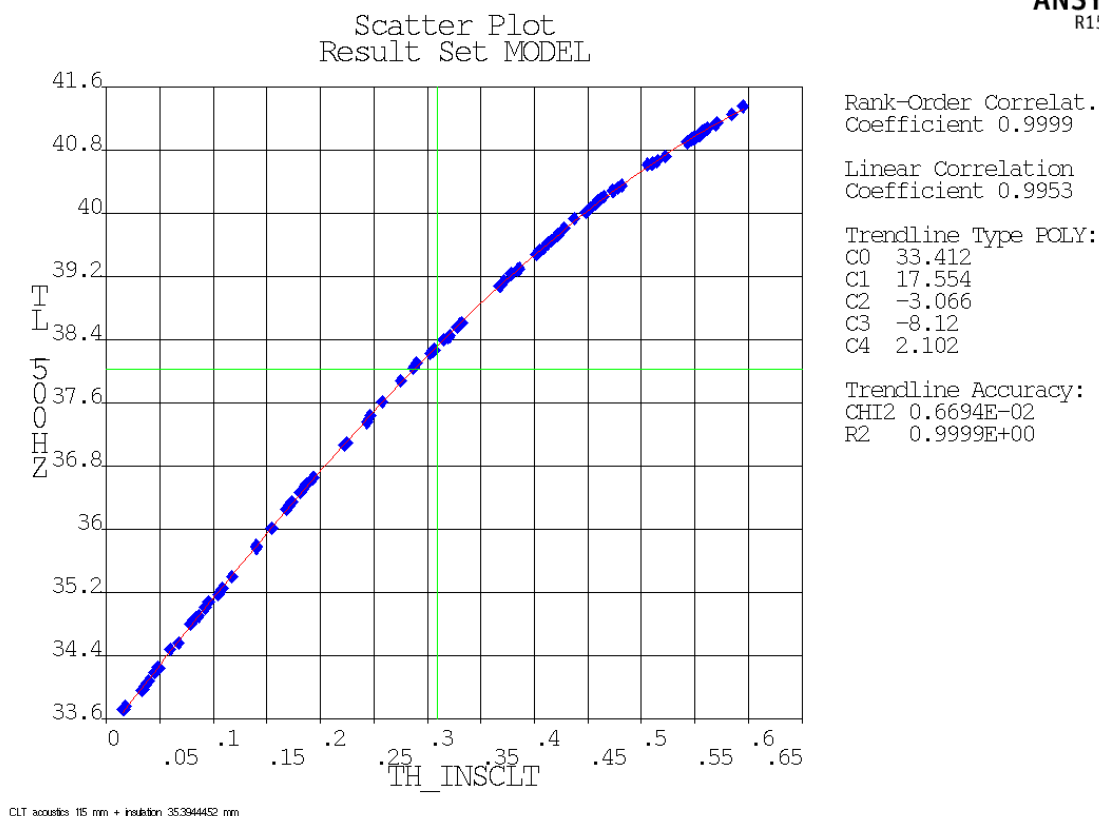
6.2.2 Vplyv hrúbky izolácie CLT panelu na výsledný útlm

Vstupným parametrom pre citlivosťnú analýzu bola hrúbka izolácie (parameter `th_insCLT`), ktorá sa náhodne generovala od 0,01 m až po 0,6 m čo predstavuje z pohľadu praxe asi nereálnu hodnotu. Na obrázku pod textom je vidieť histogram vstupných hodnôt.



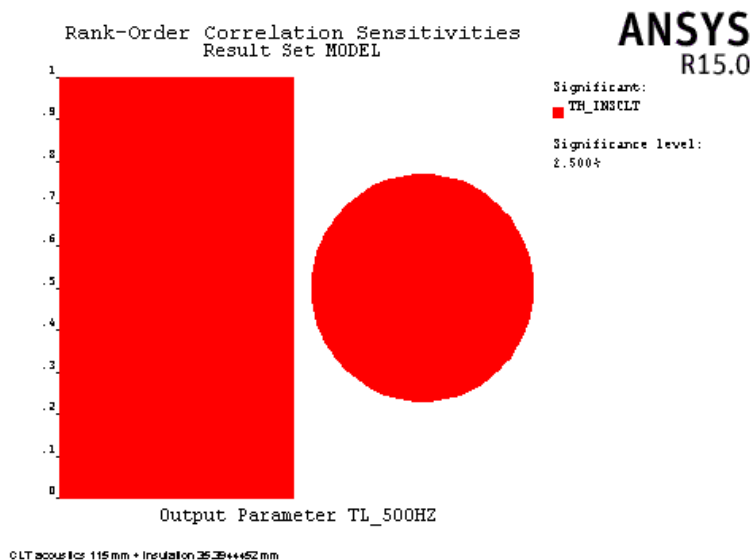
Obrázok 29: Histogram rozloženia vstupných hodnôt.

Závislosť hrúbky izolácie (vodorovná os grafu) a výsledný útlm (zvislá os grafu) pri frekvencii 500 Hz je zobrazená na Obrázku 30. Z grafu závislosti je vidieť, že čím hrubšia je izolácia, tým väčší je útlm takejto konštrukcie.



Obrázok 30: Graf závislosti hrúbky izolácie (os x) a útlmu (os y).

Keďže vstupným parametrom bola len hrúbka izolácie, tak Obrázok 31 vypovedá o tom, že tento parameter má vysoký vplyv. V prípade, ak by bolo menených a sledovaných viac vstupných parametrov, získali by sme podiely vplyvu.



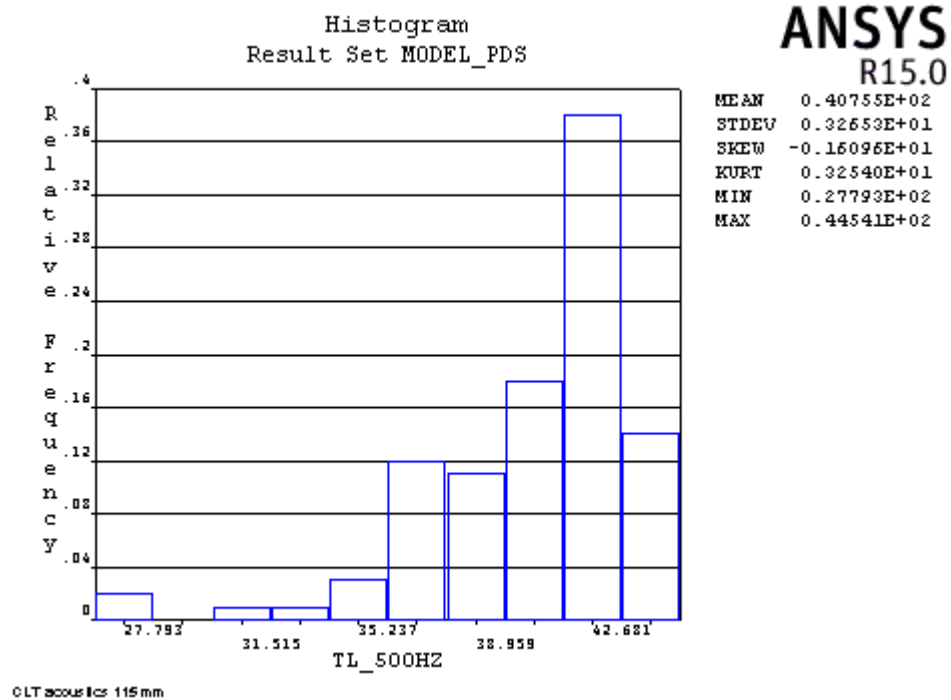
Obrázok 31: Citlivosť modelu CLT panelu pri kmitočte 500 Hz.

Predložené výsledky sú iba vzorkou z urobených analýz, podobne by sa dalo opisovať aj celé tretinooktávové pásmo kmitočtov.

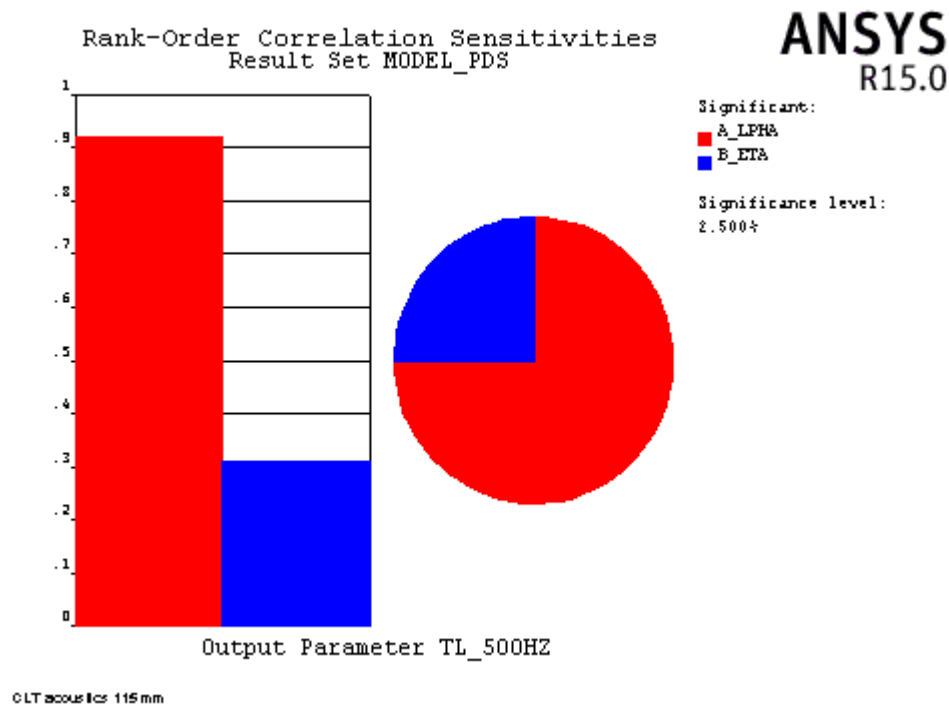
6.2.3 Vplyv tlmenia

Sledovanými vstupnými parametrami boli multiplikátory matice hmotnosti a matice tuhosti, α a β . V prostredí ANSYS je možné zadať tlmenie buď na celý systém príkazmi **ALPHAD** a **BETAD**, alebo ako materiálovú vlastnosť prostredníctvom príkazu **MP,ALPD** resp. **MP,BETD**. Multiplikátor matice hmotnosti bol generovaný náhodne od 300 do 300 000, multiplikátor matice tuhosti od 0,0005 po 0,1.

Jednalo sa o model 5 vrstvového CLT panelu o celkovej hrúbke 115 mm. Veľkosť elementu bola zvolená na 0,1 m a výpočet prebiehal 100 krát v kmitočtovom pásme od 50 Hz do 1000 Hz.



Obrázok 32: Histogram hodnôt výsledného útlmu.



Obrázok 33: Citlivosť výstupu na vstupné parametre pri frekvencii 500 Hz.

Z grafu citlivosti vstupných parametrov, v našom prípade koeficientov Rayleighova tlmenia, je zrejmé, že pri frekvencii 500 Hz má multiplikátor matice hmotnosti asi trojnásobne väčší vplyv ako multiplikátor matice tuhosti.

V Tabuľke 11 je vidieť Spearmanovú koreláciu medzi jednotlivými koeficientami tlmenia a ich vplyv pri rozličnej frekvencii. Najväčší vplyv α je pri nižších frekvenciách a najmenší pri vysokých, pri β je to naopak.

Tabuľka 11: Spearmanova korelácia medzi vstupom a výstupom.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
α	0,984	0,986	0,989	0,882	0,985	0,987	0,819	0,977	0,920	0,918
β	0,115	0,112	0,088	0,376	0,109	0,100	0,483	0,151	0,308	0,309
f [Hz]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
α	0,798	0,919	0,939	0,825	0,973	0,865	0,593	0,894	0,335	0,370
β	0,530	0,305	0,263	0,436	0,165	0,428	0,727	0,358	0,902	0,883

6.2.4 Vplyv veľkosti elementu

Podľa [23,24] je spoľahlivý výsledok akustickej analýzy ovplyvnený veľkosťou elementu. Počet elementov na vlnovú dĺžku podľa [23,24] je 5-10. Vzťah pre výpočet vlnovej dĺžky:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [\text{m}] \quad (19)$$

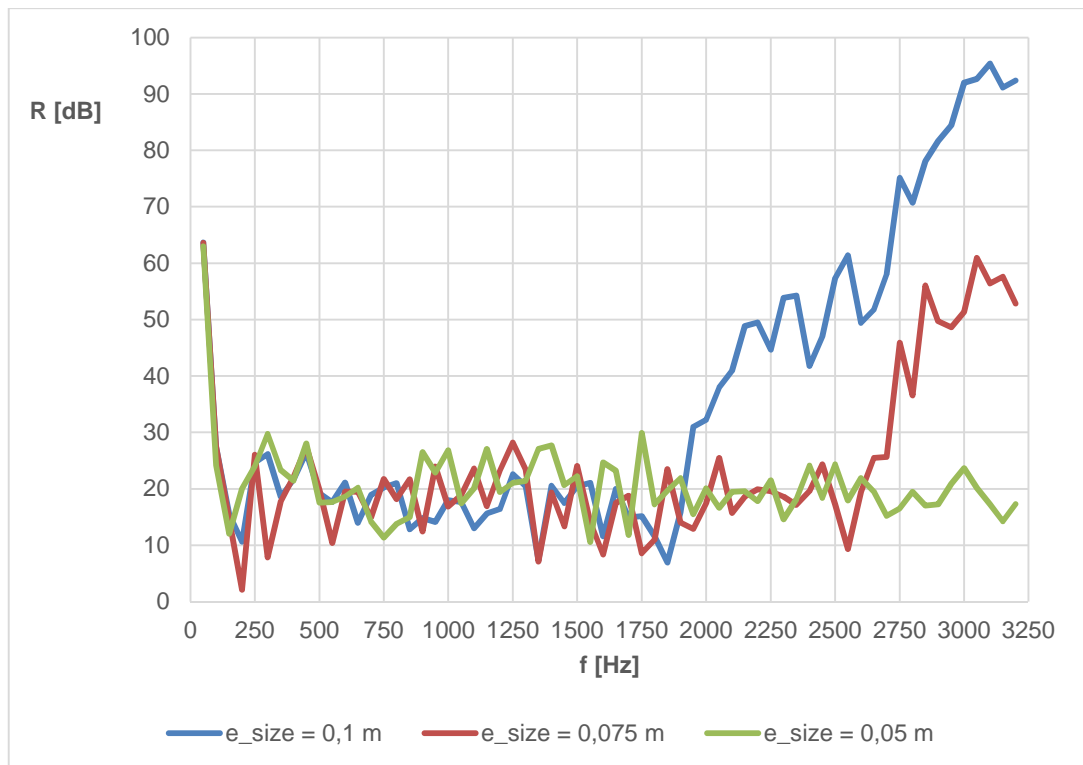
kde λ je vlnová dĺžka [m],

v rýchlosť šírenia vlny [m/s],

f frekvencia vlnenia [Hz].

Dosadením do vzťahu (19) teda pre vzduch ($v=344$ m/s) pri frekvencii maxima tretinookvávového pásma (3 150 Hz) dostávame vlnovú dĺžku približne 0,109 m. Pri počte minima 5 elementov na vlnovú dĺžku by veľkosť elementu mala byť 0,021 m.

Porovnanie som urobil na modeli s CLT panelom, hrúbky 175 mm s tromi rozdielnymi veľkosťami elementov: 0,1 m; 0,075 m a 0,05 m; v kmitočtovom pásme od 50 Hz do 3200 Hz. V tomto prípade sa nejednalo o analýzu PDS, ale o tri samostatné výpočty a následné porovnanie ich výsledkov. Takéto riešenie som zvolil predovšetkým pre vysokú časovú náročnosť PDS analýzy. Grafické znázornenie výsledkov je pod textom.



Obrázok 34: Vplyv veľkosti elementu na nepriezvučnosť R.

Vplyv veľkosti elementu na výsledný útlm v závislosti od frekvencie je zásadný a súvisí s vlnovou dĺžkou, modelovaním a veľkosťou siete. Môžeme povedať ale, že v kmitočtovom pásme od 350 Hz do 1800 Hz sa hodnoty nelíšia výrazne. Pri vyšších frekvenciách je potrebné použiť najmenšiu veľkosť elementu.

Model ako je zostavený pri jemnejšej sieti vyžaduje veľký časový fond pre výpočet. Čas potrebný na výpočet pri jemnejšej sieti sa dá ušetriť aj menším rozsahom kmitočtu. Riešením by mohlo byť výpočet len pri konkrétnych frekvenciách, či už pri tretinooktávovom pásme alebo jednom z rozšírených pásiem.

7 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá numerickým modelovaním vybraných deliacich konštrukcií na báze dreva a ich následnou akustickou analýzou. Boli analyzované akustické vlastnosti masívnej konštrukcie CLT panelu a ľahká rámovou konštrukcia, v niekoľkých variantoch a výsledky boli porovnané.

Po krátkom literárnom prehľade sa práca zameriava na akustiku stavebných konštrukcií, predovšetkým na vzduchovú nepriezvučnosť, postupne rozoberá správanie rôznych typov konštrukcií v kmitočtovom pásme a v krátkosti popíše aj všeobecné zásady pre správnu zvukovú izoláciu.

V ďalšej časti práca popisuje metódu konečných prvkov, akustickú analýzu v prostredí ANSYS a samotnú tvorbu modelu. Detailne sa zameriava na výstavbu modelu, krok po kroku, tak ako prebieha samotný skript. Zvlášť rozoberá rozdiely medzi tvorbou CLT panelu a rámovej konštrukcie. Samostatnou podkapitolou je výpočet hodnoty útlmu vysielacieho objemu a prijímacieho objemu, export výsledkov aj citlivostná analýza.

Analyzovaná bola rámová konštrukcia celkovej hrúbky 160 mm zostavená podľa dátových listov spoločnosti Fermacell, následne boli výsledky vyhodnotené jednočíselným ukazovateľom váženej vzduchovej nepriezvučnosti R_w s výslednou hodnotou útlmu 41 dB, čo bolo oproti skutočnosti o 8 dB menej. Model rámovej konštrukcie sa približoval na cca 80 % reálnym podmienkam.

Pri analýze CLT panelu, išlo o viac variant, či už bez zavedenia systémového tlmenia, resp. so zavedeným systémovým tlmením, alebo s či bez použitia izolačného materiálu. Jednalo sa o 5 vrstvový CLT panel celkovej hrúbky 175 mm. Bez použitia tlmenia boli výsledky viac než nedostatočné, pretože hodnotám reálneho experimentu sa priblížili len na 50 %. Následne experiment s tlmením sa hodnotou váženej vzduchovej nepriezvučnosti 41 dB priblížil oproti experimentálnym 43 dB na rozdiel 2 dB, čo je približne 4,6 %. Tento výsledok považujem za dostatočný. Posledným modelom bol CLT panel so 120 mm izoláciou zo stredne tvrdej vláknovej dosky, kde vďaka izolácii prišlo na zlepšenie zvukovoizolačných vlastností v jednočíselnom vyjadrení len o 1 dB. Rozdiely pri overení jednotlivých modelov mohli byť spôsobené voľbou veľkosti elementov, resp. nesprávne nastavenie systémového tlmenia, ktoré má výrazný vplyv na výsledok.

Posledným krokom bola citlivostná analýza pomocou nástroja programu Ansys, tzv. PDS. Skúmal som v nej vplyv celkovej hrúbky CLT panelu na výsledný útlm, vplyv hrúbky izolácie na výsledný útlm a porovnával som vplyvy systémového tlmenia zadávaného pomocou multiplikátorov matice hmotnosti a tuhosti α a β , v celkom spektre tretinooktávového pásma. Výsledkom bolo porovnanie pri frekvencii 500 Hz z ktorého vyplynulo, že zvyšujúcou sa hrúbkou CLT panelu sa zvyšuje aj celkový útlm, taktiež so zvyšujúcou sa hrúbkou izolácie sa zvyšuje celkový útlm a že na výsledný útlm má multiplikátor α väčší vplyv pri nízkych frekvenciách a multiplikátor β vo vyšších. V rámci overenia vplyvu veľkosti elementu som prišiel k záveru, že pri vysokých frekvenciách je veľkosť elementu rozhodujúcim faktorom na výsledný útlm.

Vhodným krokom pre ďalšiu prácu by bolo vytvorenie sólo skriptu pre tvorbu len samotnej konštrukcie, bez vysielacích a prijímacích objemov. Týmto by sa zabezpečila pomerne jednoduchá možnosť pre variabilitu skúmaných konštrukcií.

Ďalším krokom ako posunúť samotný model by bolo vytvorenie dvojitej analýzy tekutina-štruktúra (FSI), využitie interakcie dvoch pružných dosiek so vzduchovou medzerou, resp. dvoch sólo konštrukcií so vzduchovou medzerou a ich vzájomné ovplyvňovanie.

8 SUMMARY

This master thesis deals with the numerical modeling of selected wood-based separating structures and subsequent acoustic analysis. Acoustic properties of massive construction of CLT panel and light frame construction were analyzed, in several variants and results were compared.

After a brief literature review, the work focuses on the acoustics of building structures, especially the airborne sound insulation, analyzes the behavior of different types of structures in the frequency band and briefly describe the general principles of sound insulation.

The next section describes finite elements method, acoustic analysis in ANSYS and the actual creation of the model, focuses in detail on the construction of the model, step by step, as the script is executed. In particular, it analyzes the differences between the CLT panel and the frame construction creation. Separate section is for transmission loss calculation in sending and receiving volume, for exporting of results and probabilistic design system analysis.

Frame construction of total thickness of 160 mm, created according to data sheets of Fermacell was analyzed and results were evaluated by a single number indicator of weighted airborne sound insulation R_w , resulting in transmission loss of 41 dB, which was 8 dB less. Model of frame construction was approximately 80 % true to the real terms.

CLT panel was analyzed with more options, either with damping system or without, with or without usage of insulation. The panel consists of 5 layers of total thickness of the panel of 175 mm. Without usage of system damping the result was more than inadequate because the value was only on 50 % of the real experiment. The simulation with damping resulted in weighed airborne insulation value of 41 dB, which was only 2 dB under the experimental results. The last model was CLT panel with 120 mm thick insulation of medium fiberboard, which improved sound insulation only by 1 dB. Differences in the verification of the models could be attributed to a choice of element size, or improper adjustment of the damping system, which has a significant impact on the results.

The final step was a sensitivity analysis using ANSYS so called PDS. Total thickness of CLT panel impact on transmission loss, thickness of insulation impact on

transmission and impact of multiplier of mass matrix α and stiffness matrix β of system damping on transmission loss were studied. The result was compared at a frequency of 500 Hz which showed that increasing the thickness of the CLT panel has also increased transmission loss, also with increasing the insulation thickness the transmission loss increases. Multiplier of mass matrix has greater effect on lower frequencies and multiplier of stiffness matrix has greater effect on higher frequencies. As part of the verification of the effect of the element size, I came to the conclusion that at high frequencies, the size of the element has large impact on the results.

An appropriate step for next work would be to create a solo script for creation of only structure, without sending and receiving volumes. This would provide a relatively simple possibility for the variability of the investigated structures.

The next step how to move the model forward would be to create a double analysis of fluid-structure analysis (FSI), using the elastic interaction of two plates with and air gap, or two constructions with air gap and their interaction.

9 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] KAŇKA, J., 2007. Stavební fyzika 1 - Akustika budov. Praha, České vysoké učení technické, Nakladatelství ČVUT, 120 s. ISBN 978-80-01-03664-8.
- [2] ČECHURA, J., 1997. Stavební fyzika 1 – Akustika stavebních konstrukcí. Praha, České vysoké učení technické, Vydavatelství ČVUT, 173 s. ISBN 8001015939.
- [3] TOMAŠOVIČ, P. et al., 2014. Akustika budov II – Laboratórna nepriezvučnosť stavebných konštrukcií a prvkov. Bratislava, Slovenská technická univerzita, Nakladateľstvo STU, 184 s. ISBN 978-80-227-4145-3.
- [4] VAVERKA, J. a kol., 1998. Stavební fyzika 1 - urbanistická, stavební a prostorová akustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [5] ČSN EN ISO 717-1: Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost, 2013.
- [6] NOVÁČEK, J., Vážená neprůzvučnost [online] citované 1. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/185-vazena-nepruzvucnost>>.
- [7] TOMAŠOVIČ, P. et al., 2009. Akustika budov – Stavebná a urbanistická akustika. Bratislava, Slovenská technická univerzita, Nakladateľstvo STU, 398 s. ISBN 978-80-227-3019-8.
- [8] DEKSOFT. AKUSTIKA – Základy práce s aplikací [online] citované 3. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://stavebni-fyzika.cz/programy/akustika/vyukove-materialy>>.
- [9] NOVÁČEK, J., Neprůzvučnost homogenních a izotropních jednoduchých stavebních prvků [online] citované 9. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/180-nepruzvucnost-homogennich-a-izotropnich-jednoduchych-stavebnich-prvku>>.
- [10] NOVÁČEK, J., Neprůzvučnost ortotropních jednoduchých stavebních prvků [online] citované 10. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/181-nepruzvucnost-ortotropnich-jednoduchych-stavebnich-prvku>>.

- [11] NOVÁČEK, J., Neprůzvučnost dvojitých stavebních prvků [online] citované 10. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/182-nepruzvucnost-dvojitych-stavebnich-prvku>>.
- [12] VYCHYTIL, J. Stanovení neprůzvučnosti konstrukcí ve zvláštních případech: Vývoj výpočtové metodiky sloužící k predikci zvukové izolace konstrukcí na bázi dřeva a konstrukcí s násypy. 2012. Praha, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [13] Acoustics in wooden buildings – State of the art 2008. Stockholm: Technical Research Institute of Sweden, 2008. ISBN 978-91-85829-31-6. Dostupné z WWW: <https://pure.ltu.se/portal/files/3049164/2008_16_kompr.pdf>.
- [14] DONAŤÁKOVÁ, D. 2007. Stavební akustika a denní osvětlení - stavební akustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 138 s.
- [15] NOVÁČEK, J. et al., Vzduchová neprůzvučnost stavebních prvků na bázi dřeva [online] citované 15. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/12436-vzduchova-nepruzvucnost-stavebnich-prvku-na-bazi-dreva>>.
- [16] ČSN 73 0532: Akustika. Ochrana proti hluku v budovách a související akustické vlastnosti stavebních výrobků – Požadavky, 2010.
- [17] ČSN EN ISO 140-4: Akustika – Měření zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 4: Měření vzduchové neprůzvučnosti mezi místnostmi v budovách, 2000.
- [18] ČSN EN ISO 140-7: Akustika – Měření zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 7: Měření kročejové neprůzvučnosti stropních konstrukcí v budovách, 2000.
- [19] ČSN EN ISO 717-2: Akustika – Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 2: Korčejová neprůzvučnost, 1998.
- [20] FPINNOVATIONS, Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada [online] citované 20. marca 2015, Dostupné z WWW: <www.ghl.ca/shared/Tall_Wood_Building_Technical_Guide.pdf>.
- [21] FERMACELL, Požární a akustický katalog [online] citované 16. apríla 2015. Dostupné z WWW: <www.fermacell.cz>.

- [22] KRÁLIK, J. 2009. Modelovanie konštrukcií v metóde konečných prvkov: Systém ANSYS [online] citované 10. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://mpm.svf.stuba.sk/~xtunega/MKP.pdf>>.
- [23] ANSYS, 2013. ANSYS Mechanical APDL Acoustic Analysis Guide, Canonsburgh, PA, ANSYS, Inc., 94 s.
- [24] KOHNKE, P., 1999. ANSYS Theory Reference: Release 5.6. Canonsburg, PA, USA, ANSYS, Inc., 1285 s.
- [25] ŠTĚPÁNEK, S., 2013. Analýza akustických vlastností dělicích konstrukcí bytového domu, Brno, 46 s.
- [26] ROCKWOOL TECHNICAL INSULATION, 2012. Acoustic Manual [online] citované 6. apríla 2015. Dostupné z WWW: <http://rwiumbracortiny-rmo.inforce.dk/media/711462/acoustic%20manual_web.pdf>.
- [27] HALAHYJA, M. et al., 1985. Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie, Bratislava a Praha, Alfa a SNTL, 748 s.
- [28] KOŇAS, P., 2005. Konečně-prvkový model lehátka [online] citované 6. apríla 2015. Dostupné z WWW: <<http://acta.mendelu.cz/pdf/actaun200654020067.pdf>>.
- [29] BEHKTA, P., NIEMZ, P., KUCERA, L., 2000. The study of sound propagation in the wood-based composite materials [online] citované 10. apríla 2015. Dostupné z WWW: <http://www.researchgate.net/publication/267025160_The_study_of_sound_propagation_in_the_wood-based_composite_materials>.
- [30] SCHOENWALD, S. et al., 2013. Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems [online] citované 18. apríla 2015. Dostupné z WWW: <http://www.researchgate.net/publication/258987891_Sound_insulation_performance_of_Cross_Laminated_Timber_Building_Systems>.

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Schéma rozdelenia zvukovej energie pri jej prestupe cez deliacu konštrukciu.....	10
Obrázok 2: Určenie váženej nepriezvučnosti R_w pomocou grafickej metódy	12
Obrázok 3: Schematické naznačenie príkladov jednoduchých konštrukcií. Zľava: betónová stena, murovaná stena s omietkou, jednostranne opláštená priečka.	14
Obrázok 4: Teoretický priebeh nepriezvučnosti jednoduchého stavebného.....	15
Obrázok 5: Schematické naznačenie príkladov dvojitých konštrukcií. Zľava: konštrukcia ohybovo tuhých prvkov, konštrukcia z ohybovo poddajných prvkov, konštrukcie kombinované. Prevzaté z [8].....	16
Obrázok 6: Teoretický priebeh nepriezvučnosti dvojitého stavebného	17
Obrázok 7: Vplyv výplne vzduchovej medzery na vzduchovú nepriezvučnosť.....	22
Obrázok 8: Vplyv typu stĺpikov na vzduchovú nepriezvučnosť.....	23
Obrázok 9: Konštrukčné vplyvy na akustiku drevostavieb.....	27
Obrázok 10: Rozdelenie oblasti na konečné prvky.....	28
Obrázok 11: Závislosť útlmu na frekvenciách – Rayleighov útlm.	32
Obrázok 12: Geometria SOLID185 elementu.....	33
Obrázok 13: Geometria FLUID30 elementu.....	35
Obrázok 14: Podstata interakcie medzi štruktúrou a kvapalinou (FSI).	36
Obrázok 15: Model rámovej konštrukcie.....	44
Obrázok 16: Model konštrukcie 5 vrstvového CLT panelu.....	47
Obrázok 17: Výber z tabuľky „Nosné stěny FERMACELL s dřevěnou konstrukcí“.	50
Obrázok 18: Rozloženie tlakov rámovej konštrukcie pri frekvencii 500 Hz.....	51
Obrázok 19: Graf váženej nepriezvučnosti simulovanej rámovej konštrukcie. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].	52
Obrázok 20: Rozloženie tlakov pri frekvencii 500 Hz CLT panelu bez tlmenia.....	53
Obrázok 21: Graf váženej vzduchovej nepriezvučnosti simulovaného CLT panelu. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].	55

Obrázok 22: Rozloženie tlakov pri frekvencii 500 Hz CLT panelu 175 mm s tlmením.	56
Obrázok 23: Graf váženej vzduchovej nepriezvučnosti simulovaného CLT panelu. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].	57
Obrázok 24: Rozloženie tlakov pri frekvencii 500 Hz CLT panelu 175 mm + izolácie 120 mm s tlmením.	58
Obrázok 25: Graf váženej vzduchovej nepriezvučnosti simulovaného CLT panelu. Určenie váženej nepriezvučnosti R_w [dB], pomocou smernej krivky podľa simulovaných hodnôt R [dB].	59
Obrázok 26: Histogram generovania hrúbky izolácie.	60
Obrázok 27: Histogram výsledného útlmu pri frekvencii 500 Hz.	60
Obrázok 28: Vplyv hrúbky CLT panelu na výsledný útlm pri frekvencii 500 Hz. ...	61
Obrázok 29: Histogram rozloženia vstupných hodnôt.	62
Obrázok 30: Graf závislosti hrúbky izolácie (os x) a útlmu (os y).	63
Obrázok 31: Citlivosť modelu CLT panelu pri kmitočte 500 Hz.	63
Obrázok 32: Histogram hodnôt výsledného útlmu.	64
Obrázok 33: Citlivosť výstupu na vstupné parametre pri frekvencii 500 Hz.	65
Obrázok 34: Vplyv veľkosti elementu na nepriezvučnosť R	67

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Referenčné hodnoty smernej krivky vzduchovej nepriezvučnosti.....	13
Tabuľka 2: Požiadavky na zvukovú izoláciu medzi miestnosťami v budovách.....	25
Tabuľka 3: Kroky akustickej analýzy.....	30
Tabuľka 4: Ortotropné materiálové vlastnosti pre KP model stĺpikov rámovej konštrukcie a panelu CLT.....	46
Tabuľka 5: Materiálové vlastnosti pre sádkartón a minerálnu vlnu. [26], [27].....	46
Tabuľka 6: Ortotropné materiálové vlastnosti pre KP model MDF izolácie panelu CLT. Prevzaté z [28].....	49
Tabuľka 7: Nepriezvučnosť R pri rôznych kmitočtoch, výsledný rozdiel nepriaznivých odchýlok.....	52
Tabuľka 8: Nepriezvučnosť v tretinooktávovom pásme pre CLT panel 175 mm bez tlmenia.....	54
Tabuľka 9: Nepriezvučnosť v tretinooktávovom pásme pre CLT panel 175 mm s použitím tlmenia.....	56
Tabuľka 10: Nepriezvučnosť v tretinooktávovom pásme pre CLT panel 175 mm + izolácia 120 mm s použitím tlmenia.....	58
Tabuľka 11: Spearmanova korelácia medzi vstupom a výstupom.....	65

Zoznam príloh

Príloha 1: Model rámovej konštrukcie (ram.mac)

Príloha 2: Skript pre výpočet útlmu a export pre rámovú konštrukciu (tl_ram.mac, exp_ram.mac)

Príloha 3: Model CLT panelu (CLT.mac)

Príloha 4: Skript pre výpočet útlmu a export pre CLT panel (tl.mac, exp.mac)

Príloha 5: Skript pre PDS analýzu

Príloha 6: Grafické výstupy z riešenia rámovej konštrukcie

Príloha 7: Grafické výstupy z riešenia CLT panelu bez tlmenia

Príloha 8: Grafické výstupy z riešenia CLT panelu s tlmením

Príloha 9: Grafické výstupy z riešenia CLT panelu s izoláciou

10 Prílohy

Príloha 1: Model rámovej konštrukcie

ram.mac

```
!! Rámová konštrukcia
/CLEAR ! Clear the database

! -----
! Predefine Parameters
! -----

! Parameters for PDS

a_lpha=30000
b_eta=0.05

! Input and output pressure room properties

l_in=5/2           ! length of input volume [m]
l_out=6/2          ! length of output volume [m]
w_inout=3.6        ! width of the volumes [m]
h_inout=2.4        ! height of the volumes [m]
in_pres=1          ! input volume pressure 1 Pa = 93.97 dB [Pa]
e_size=0.1         ! element size [m]
th_ly=e_size       ! thickness of helping volume [m]
pos_pres=l_in+th_ly-0.5 ! Pressure load position z=pos_pres [m]

! Analysis options

My_Fmin = 0        ! [Hz] Lowest freq for Harmonic analysis
My_Fmax = 3200     ! [Hz] Highest freq for Harmonic analysis
My_Fstep = 64      ! Number of freq steps for Harmonic analysis

/TITLE,Rámová konštrukcia %th_wall*1000% mm

! -----
! Enter pre-processor to define model
! -----

/PREP7

! Define element type
! Fluid and related properties (noFSI)
ET,1,FLUID30,,1
MP,DENS,1,1.21      ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,1,344       ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,1,0.00        ! Define the boundary admittance
R,1,20e-6           ! Reference pressure [Pa]
```



```

! Fluid and related properties (FSI)
ET,2,FLUID30
MP,DENS,2,1.21      ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,2,344      ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,2,1E-4       ! Define the boundary admittance
R,2,20e-6          ! Reference pressure [Pa]

! Material properties of solid columns
ET,3,SOLID185
MP,EX,3,690e6
MP,EY,3,15900e6
MP,EZ,3,390e6
MP,NUXZ,3,0.47
MP,NUYZ,3,0.013
MP,NUXY,3,0.028
MP,GXZ,3,36e6
MP,GYZ,3,770e6
MP,GXY,3,750e6
MP,DENS,3,450
MP,SONC,3,(4500+1500)/2 ! average of 4500 + 1500

! Material properties of OSB3 boards
ET,11,SOLID185
MP,EX,11,2000e6
MP,NUXY,11,0.028
MP,DENS,11,1200
MP,SONC,11,1500
!MP,EX,11,789e6      ! Modulus of elasticity
!MP,EY,11,13650e6
!MP,EZ,11,289e6
!MP,NUXZ,11,0.489
!MP,NUYZ,11,0.014
!MP,NUXY,11,0.687
!MP,GXZ,11,53e6
!MP,GYZ,11,573e6
!MP,GXY,11,474e6
!MP,DENS,11,650
!MP,SONC,11,(4500+1500)/2

! Material properties of gypsum board
ET,12,SOLID185
MP,EX,12,2000e6
MP,NUXY,12,0.028
MP,DENS,12,1200
MP,SONC,12,1500

! Material properties of gypsum board Rigidur
ET,13,SOLID185
MP,EX,13,2000e6
MP,NUXY,13,0.028
MP,DENS,13,1200
MP,SONC,13,1500

! Material properties of insulation between columns - wool
ET,4,SOLID185
MP,EX,4,2000

```

```

MP,NUXY,4,0.001
MP,DENS,4,30
MP,SONC,4,180

ET,5,FLUID30
R,5,20e-6      ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,5,1.21 ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,5,344  ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,5,1E-4   ! Define the boundary admittance

ET,6,FLUID30,,1
R,6,20e-6      ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,6,1.21 ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,6,344  ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,6,0.00   ! Define the boundary admittance

R,7,20e-6      ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,7,1.21 ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,7,344  ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,7,1      ! Define the boundary admittance

! Generate the model and the mesh

a_rea=0.006     ! [m2]
w_col=0.06      ! [m]
th_col=a_rea/w_col ! [m]
w_ins=0.625
cnt=w_inout/(w_ins+w_col) ! panels count
th_wall=th_col+2*(0.015+0.015)

BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,-0.015-0.015-th_ly,-0.015-0.015-th_ly-l_in, !
create a block of input volume -z
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,-0.015-0.015,-0.015-0.015-th_ly,
! support volume with different keyopt -z
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,-0.015,-0.015-0.015,
! SDK 15 mm
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,0.00,-0.015,
! SDK 15 mm
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,0,th_col
! create a block of wooden construcion with insulation
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,th_col,th_col+0.015,
! SDK 15 mm
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,th_col+0.015,th_col+0.015+0.015,
! SDK 15 mm
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,th_col+0.015+0.015,th_col+0.015+0.015+th_ly,
! support volume with different keyopt
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,th_col+0.015+0.015+th_ly,th_col+0.015+0.015+th_ly+
l_out, ! output volume

WPOFFS,w_inout/2      ! nastavenie na stred
WPOFFS,-w_col/2       ! posunutie v smere x o polovicu sirky stlpika
WPRO,,,90             ! natocenie o 90 stupnov
VSBW,all,,,          ! delenie objemu
WPRO,,, -90           ! natocenie spat
WPOFFS,w_col          ! posunutie v smere x o celu sirku stlpika
WPRO,,,90             ! znova natocenie
VSBW,all,,,          ! delenie

```

```

WPRO,,, -90          ! natocenie spat
WPOFFS,-w_col/2     ! posun spat do stredu stlpika

*DO,i,1,NINT(cnt)/2
  WPOFFS,w_ins
  WPOFFS,-w_col/2
  WPRO,,,90
  VSBW,all,,,
  WPRO,,, -90
  WPOFFS,w_col
  WPRO,,,90
  VSBW,all,,,
  WPRO,,, -90
  WPOFFS,-w_col/2
*ENDDO

WPAVE,w_inout/2,0,0          ! posun pracovnej roviny do bodu (stredu)

*DO,i,1,NINT(cnt)/2
  WPOFFS,-w_ins
  WPOFFS,-w_col/2
  WPRO,,,90
  VSBW,all,,,
  WPRO,,, -90
  WPOFFS,w_col
  WPRO,,,90
  VSBW,all,,,
  WPRO,,, -90
  WPOFFS,-w_col/2
*ENDDO

VGLUE,ALL              ! gluing of all volumes

WPCSYS,-1,0

VSEL,S,LOC,z,0,th_col
VATT,4,4,4

WPOFFS,w_inout/2,0,0     ! posun pracovnej roviny do bodu
(stredu)

*DO,i,1,(NINT(cnt)/2)+1  ! začiatok cyklu
  CSYS,WP                ! aktivácia pracovnej roviny
  VSEL,S,LOC,x,-w_col/2,w_col/2 ! výber objemu v šírke stlpika
  VSEL,R,LOC,z,0,th_col  ! výber z už vybraného objemu, vybratie
len stlpikov
  VATT,3,3,3              ! priradenie typu elementu, mat.
vlastností a reálnej konštanty
  WPOFFS,w_ins            ! posun pracovnej roviny v smere x o
osovú vzdialenosť stlpikov
*ENDDO                    ! koniec cyklu

WPCSYS,-1,0              ! zarovnanie pracovnej roviny s
globálnym súr. sys.
WPAVE,w_inout/2,0,0

*DO,i,1,NINT(cnt)/2

```

```

        CSYS,WP
        WPOFFS,-w_ins
        VSEL,S,LOC,x,-w_col/2,w_col/2
        VSEL,R,LOC,z,0,th_col
        VATT,3,3,3
    *ENDDO

    ! Assigning material properties and element type volume by volume
    VSEL,S,LOC,z,-0.015-0.015-th_ly,-0.015-0.015-th_ly-l_in,! picking sending
volume
    VATT,1,1,1
        ! assigning material prop., real constant and element type

    VSEL,S,LOC,z,-0.015-0.015,-0.015-0.015-th_ly,      ! picking assistant volume
    VATT,2,2,2
        ! assigning material prop., real constant and element type

    VSEL,S,LOC,z,0,-0.015,                                ! picking OSB3 volume
    VSEL,A,LOC,z,th_col,th_col+0.015,                    ! adding another OSB3
volume
    VATT,11,11,11
        ! assigning material prop., real constant and element type

    VSEL,S,LOC,z,-0.015,-0.015-0.015,                  ! picking SDK volume
    VATT,12,12,12
        ! assigning material prop., real constant and element type
    VSEL,S,LOC,z,th_col+0.015,th_col+0.015+0.015,      ! adding another SDK
volume
    VATT,13,13,13

    VSEL,S,LOC,z,th_col+0.015+0.015,th_col+0.015+0.015+th_ly,      ! picking
assistant volume
    VATT,5,5,5
        ! assigning material prop., real constant and element type

    VSEL,S,LOC,z,th_col+0.015+0.015+th_ly,th_col+0.015+0.015+th_ly+l_out,      !
picking receiving volume
    VATT,6,6,6
        ! assigning material prop., real constant and element type

    ALLSEL,ALL
    VPLOT,ALL

    ! Meshing
    ESIZE,e_size
    VSEL,ALL
    VMESH,ALL

    /VIEW,1,1,1,1
    /ANG,1
    /PNUM,MAT,1
    eplot
    /WAIT,2
    /PNUM,TYPE,1
    eplot

    WPCSYS,-1,0

```

```

! DOF fix - votknutie (solid wall)
ASEL,S,LOC,y,0
ASEL,R,LOC,z,-0.015-0.015,-0.015-0.015+th_wall
CM,spod,AREA
ASEL,S,loc,y,h_inout
ASEL,R,LOC,z,-0.015-0.015,-0.015-0.015+th_wall
CM,vrch,AREA
ASEL,S,loc,x,0
ASEL,R,LOC,z,-0.015-0.015,-0.015-0.015+th_wall
CM,vlavo,AREA
ASEL,S,loc,x,w_inout
ASEL,R,LOC,z,-0.015-0.015,-0.015-0.015+th_wall
CM,vpravo,AREA
CMSEL,S,spod,AREA
CMSEL,A,vrch,AREA
CMSEL,A,vlavo,AREA
CMSEL,A,vpravo,AREA
DA,all,all

! constrain the displacement DOFs on the
ESEL,S,TYPE,,1
ESEL,A,TYPE,,6
NELEM
D,all,ux
D,all,uy
D,all,uz

! Anechoic ends at the beginning and at the end of the volumes (duct)
NSEL,S,LOC,z,-0.015-0.015-th_ly-1_in,
NSEL,A,LOC,z,th_col+0.015+0.015+th_ly+1_out,
EMODIF,all,MAT,7
EMODIF,all,REAL,7
ESLN,S
SF,ALL,IMPD,1

! FSI flag
ESEL,S,TYPE,,12
NELEM
ESEL,R,TYPE,,2
TYPE,2
REAL,2
MAT,2
EMODIF,all
SF,ALL,FSI

ESEL,S,TYPE,,13
NELEM
ESEL,R,TYPE,,5
TYPE,5
REAL,5
MAT,5
EMODIF,ALL
SF,ALL,FSI

!! tlak
NSEL,S,LOC,z,-pos_pres+e_size/2-0.0001,-pos_pres-e_size/2+0.0001
D,ALL,PRES,in_pres

```

```

FINISH

! -----
! Harmonic Analysis
! -----

/SOLU
ALLSEL,ALL      ! Selecting everything
ANTYPE,HARMIC   ! Harmonic analysis
HROPT,FULL      ! Full solution method
HROUT,ON        ! Harmonic analysis output option
LUMPM,0         ! Use the element-dependent default mass matrix formulation
EQLV,,1e-08
PSTRES,0

NSUBST,My_Fstep      ! Intervals within freq. range
HARFRQ,My_Fmin,My_Fmax ! Frequency range from XX to XX Hz
KBC,1              ! Stepped load
ALPHAD,a_alpha
BETAD,b_eta

SOLVE              ! Solve

FINISH              ! Leave Solver

! -----
! View the Sound Pressure Level
! -----

/POST1

/AUTO,1
/REP,FAST

tl_ram.mac          ! Calculate transmission loss
exp_ram.mac         ! Export of current sets
PARSAV,ALL,'RAM',' ',' ' ! Creates output file with parameters and
array

FINISH              ! Leave postprocessor

```

Príloha 2: Skript pre výpočet útlmu a export pre rámovú konštrukciu

tl.ram

```
! Transmission loss
/POST1
SET,FIRST ! Reading first result of solution

*DIM,graf,ARRAY,My_Fstep,2 ! Creating array
*DO,j,1,My_Fstep

! Getting values of sound pressure level (SPL)

      NSEL,S,LOC,z,-pos_pres+e_size,-2*0.0125-e_size ! Selecting nodes
of sending room

      *GET,_NODE_1,NODE,0,NUM,MIN ! Getting min node
from selected nodes
      *GET,_SPL_NOD1,NODE,_NODE_1,SPL ! Obtaining SPL of
that node and saving that value [dB] to the first node under SPL_NOD1
      *GET,_NOD_COUNT,NODE,0,COUNT ! Getting node
count of selected nodes
      *DO,i,2,_NOD_COUNT ! Starting cycle
from 2nd node to the last node (node count)
      *GET,_NODE_%i%,NODE,_NODE_%i-1%,NXTH ! Getting next node
      *GET,_SPL_NOD%i%,NODE,_NODE_%i%,SPL ! Obtaining SPL of
next node
      _SPL_NOD%i%=_SPL_NOD%(i-1)%+_SPL_NOD%i% ! Sum of SPL values
*ENDDO

      SPL_AVG_SEN%j%=_SPL_NOD%_NOD_COUNT%/_NOD_COUNT ! Average sound pressure
level of sending volume

      NSEL,S,LOC,z,2*0.0125+th_ly+e_size,2*0.0125+th_ly+1_out-e_size

      *GET,_NODE_1,NODE,0,NUM,MIN
      *GET,_SPL_NOD1,NODE,_NODE_1,SPL
      *GET,_NOD_COUNT,NODE,0,COUNT
      *DO,i,2,_NOD_COUNT
      *GET,_NODE_%i%,NODE,_NODE_%i-1%,NXTH
      *GET,_SPL_NOD%i%,NODE,_NODE_%i%,SPL
      _SPL_NOD%i%=_SPL_NOD%(i-1)%+_SPL_NOD%i%
*ENDDO

      SPL_AVG_REC%j%=_SPL_NOD%_NOD_COUNT%/_NOD_COUNT ! Average sound pressure
level of receiving volume

      TL%j%=SPL_AVG_SEN%j%-SPL_AVG_REC%j% ! Transmission loss [dB]

      graf(j,1)=TL%j%
      *GET,_FREQ%j%,ACTIVE,0,SET,FREQ
      graf(j,2)=_FREQ%j%
      SET,NEXT ! Read next set of data
      _frek=_FREQ%j%
      TL_%_frek%Hz=TL%j%
*ENDDO
FINISH
```

exp_ram.mac

```
! Setting up document properties
/POST1 ! Starting postprocessor
/UDOC,1,DATE,0
/UDOC,1,TYPE,LEFT
/UDOC,1,DATE,OFF

SET,FIRST,,AMPL ! Read first set of data
*DO,i,1,My_Fstep
  /GLINE,1,-1 ! Turn off element lines so can just see
values
  ALLSEL,ALL ! Selecting all for plotting
  PLNSOL,SPL ! Plot the sound pressure level
  /REPLOT
  /SHOW,PNG,,0
  PNGR,COMP,1,-1
  PNGR,ORIENT,HORIZ
  PNGR,COLOR,2
  PNGR,TMOD,1
  /GFILE,800,
  /CMAP,_TEMPCMAP_,CMP,,SAVE
  /RGB,INDEX,100,100,100,0
  /RGB,INDEX,0,0,0,15
  /REPLOT
  /CMAP,_TEMPCMAP_,CMP
  /DELETE,_TEMPCMAP_,CMP
  /SHOW,CLOSE
  /DEVICE,VECTOR,0
  /WAIT,1 ! 3
seconds wait for saving image
*GET,file_name,ACTIVE,0,SET,FREQ ! Getting frequency of current
set
  /RENAME,model000,png,,RAM_%file_name%Hz,png, ! Rename of picture to
pic_XXX_Hz (Hz value of current set)
  SET,NEXT,,AMPL
*ENDDO
FINISH ! Exiting postprocessing
```


Príloha 3: Model CLT panelu

CLT.mac

```
/CLEAR ! Clear the database

! -----
! Predefine Parameters
! -----

! Parameters of the CLT model (CLT Properties)

th_CLT=0.023      ! CLT thickness (1 layer) [m]
num_CLT=5        ! count of the layers of CLT [-]
ins_CLT=0        ! insulation of CLT 1=yes, 0=no [-]
th_insCLT=0.12   ! thickness of insulation on the CLT wall [m] = 120 mm
insulation
th_wall=th_CLT*num_CLT ! thickness of CLT wall [-]

! Input and output pressure room properties

l_in=5/2          ! length of input volume [m]
l_out=6/2         ! length of output volume [m]
w_inout=3.6      ! width of the volumes [m]
h_inout=2.4      ! height of the volumes [m]
in_pres=1        ! input volume pressure 1 Pa = 93.97 dB [Pa]
pos_pres=0.5     ! Pressure load position z=pos_pres [m]
e_size=0.1       ! element size [m]
th_ly=e_size     ! thickness of helping volume [m]

! Analysis options

My_Fmin = 1000   ! [Hz] Lowest freq for Harmonic analysis
My_Fmax = 1000   ! [Hz] Highest freq for Harmonic analysis
My_Fstep = 1     ! Number of freq steps for Harmonic analysis

*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
  /TITLE,CLT acoustics %th_wall*1000% mm + insulation %th_insCLT*1000% mm
*ELSE
  /TITLE,CLT acoustics %th_wall*1000% mm
*ENDIF

! -----
! Enter pre-processor to define model
! -----

/PREP7

! Define element type
! Fluid and related properties (noFSI)
ET,1,FLUID30,,1      ! KEYOPT(2)=1, without FSI interface
R,1,20e-6            ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,1,1.21      ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,1,344       ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,6,0.00        ! Define the boundary admittance

! Fluid and related properties (FSI)
```

```

ET,2,FLUID30          ! with FSI interface
R,2,20e-6             ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,2,1.21        ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,2,344         ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,5,1E-4         ! Define the boundary admittance

! Material properties of solid structure (wall)
ET,3,SOLID185        ! wall
MP,EX,3,690e6         ! Modulus of elasticity
MP,EY,3,15900e6
MP,EZ,3,390e6
MP,NUXZ,3,0.47
MP,NUYZ,3,0.013
MP,NUXY,3,0.028
MP,GXZ,3,36e6
MP,GYZ,3,770e6
MP,GXY,3,750e6
MP,DENS,3,450
MP,SONC,3,(4500+1500)/2 ! average of 4500 + 1500

! Material properties of insulation
ET,4,SOLID185
MP,EX,4,200e6
MP,EY,4,2000e6
MP,EZ,4,200e6
MP,NUXZ,4,0.2
MP,NUYZ,4,0.2
MP,NUXY,4,0.25
MP,GXZ,4,550e6
MP,GYZ,4,200e6
MP,GXY,4,200e6
MP,DENS,4,210
MP,SONC,4,2600

ET,5,FLUID30
R,5,20e-6             ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,5,1.21        ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,5,344         ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,5,1E-4         ! Define the boundary admittance

ET,6,FLUID30,,1
R,6,20e-6             ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,6,1.21        ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,6,344         ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,6,0.00         ! Define the boundary admittance

R,7,20e-6             ! Reference pressure [Pa]
MP,DENS,7,1.21        ! Density of the air [kg/m^3]
MP,SONC,7,344         ! Speed of sound in the air [m/s]
MP,MU,7,1             ! Define the boundary admittance

! Generate the model and the mesh
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,0.00,l_in,          ! create a block of input volume
BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in,l_in+th_ly,    ! support volume with different
keyopt
! Generate another block volumes depending on parameter num_CLT (count of
CLT layers)

```

```

*DO,i,1,num_CLT                                ! CLT
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+(i-1)*th_CLT,l_in+th_ly+i*th_CLT,
*ENDDO
! Generate of block volumes, whether there is or is not insulation
*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+th_wall,l_in+th_ly+th_wall+th_insCL
T, ! CLT instulation
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT,l_in+th_ly+th_wal
l+th_insCLT+th_ly, ! support volume with different keyopt
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT+th_ly,l_in+th_ly+
th_wall+th_insCLT+th_ly+l_out, ! output volume
*ELSE
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+th_wall,l_in+th_ly+th_wall+th_ly, !
support volume with different keyopt
  BLOCK,0,w_inout,0,h_inout,l_in+th_ly+th_wall+th_ly,l_in+th_ly+th_wall+th
_ly+l_out, ! output volume
*ENDIF

VGLUE,ALL                                     ! gluing of all volumes

! Assigning material properties and element type volume by volume
VSEL,S,LOC,z,0.00,l_in                        ! picking sending volume
VATT,1,1,1                                    ! assigning material prop., real
constant and element type

VSEL,S,LOC,z,l_in,l_in+th_ly                 ! picking assistant volume
VATT,2,2,2                                    ! assigning material prop., real
constant and element type

! Creating local coordinate system for assigning material properties to
layer of board rotated 90 degrees
WPROTA,0,0,90    ! Rotation of working plane about Y axis
CSWPLA,11,0     ! Local system 11, rotated 90 degrees from global
coordinate system
WPCSYS,,1       ! Definition of working plane location
CSYS,0          ! Activating previously defined cartesian coordinate system

! Assigning material properties to CLT layers (num_CLT)
*DO,i,1,num_CLT
  VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+(i-1)*th_CLT,l_in+th_ly+(i)*th_CLT ! Picking CLT
layer one by one
  *IF,NINT(i/2),eq,i/2,THEN                                !
Deciding whether is it odd or even number of layer
    VATT,3,3,3
    ! If it is odd number of layer, then material prop., real constant and
element type in global coordinate system
  *ELSE
    VATT,3,3,3,11                                         ! If
it is even number of layer, then material prop., real constant and element
type in local coordinate system, rotated 90 degrees
  *ENDIF
*ENDDO

*IF,ins_CLT,eq,1,THEN                                ! assigning material prop., real
constant and element type, if insulation is included
  VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT
  VATT,4,4,4

```

```

VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT+t
h_ly
VATT,5,5,5
VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT+th_ly,l_in+th_ly+th_wall+th_in
sCLT+th_ly+l_out
VATT,6,6,6
*ELSE
VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall,l_in+th_ly+th_wall+th_ly
VATT,5,5,5
VSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_ly,l_in+th_ly+th_wall+th_ly+l_out
VATT,6,6,6
*ENDIF

! Meshing
ESIZE,e_size
VSEL,ALL
VMESH,ALL

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/PNUM,MAT,1
eplot
/WAIT,2
/PNUM,TYPE,1
eplot

! DOF fix for solid (wall)

*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
LSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly
LSEL,A,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT
*ELSE
LSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly
LSEL,A,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall
*ENDIF
DL,all,,all,0          ! fix all, all

! constrain the displacement DOFs of sending and receiving volume nodes
ESEL,S,TYPE,,1        ! selecting all elements of sending volume
ESEL,A,TYPE,,6        ! adding all elements of receiving volume
NELEM                 ! selecting nodes attached to elements
D,all,ux              ! defining DOF constrains at nodes
D,all,uy
D,all,uz

! Anechoic ends at the beginning and at the end of the volumes (duct)
NSEL,S,LOC,z,0        ! Selecting nodes at the beginning of volumes
*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
NSEL,A,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_insCLT+th_ly+l_out
*ELSE
NSEL,A,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_ly+l_out
*ENDIF
EMODIF,all,MAT,7      ! Modifying material properties
EMODIF,all,REAL,7! Modifying real constants
ESLN,S                ! Selecting all elements attached to the selected
nodes
SF,ALL,IMPD,1        ! Specify surface loads on nodes, Impedance 100%

```

```

! FSI flag
ESEL,S,TYPE,,3      ! Selecting solid elements
NELEM              ! Selecting nodes attached to elements
ESEL,R,TYPE,,2     ! Reselecting type 2 (acoustic) elements
TYPE,2
REAL,2
MAT,2
EMODIF,all        ! Modifying elements properties
SF,ALL,FSI        ! FSI flag

*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
  ESEL,S,TYPE,,4
  NELEM
  ESEL,R,TYPE,,5
*ELSE
  ESEL,S,TYPE,,3
  NELEM
  ESEL,R,TYPE,,5
*ENDIF

TYPE,5
REAL,5
MAT,5
EMODIF,ALL
SF,ALL,FSI

! Definition of loads
NSEL,S,LOC,z,pos_pres-e_size/2-0.0001,pos_pres+e_size/2-0.0001
D,ALL,PRES,in_pres ! Applying loads on all selected nodes

FINISH

! -----
! Harmonic Analysis
! -----
/SOLU
ALLSEL,ALL ! Selecting everything
ANTYPE,HARMIC ! Harmonic analysis
HROPT,FULL ! Full solution method
HROUT,ON ! Harmonic analysis output option
LUMPM,0 ! Use the element-dependent default mass matrix formulation
EQSLV,,1e-08
PSTRES,0

NSUBST,My_Fstep ! Intervals within freq. range
HARFRQ,My_Fmin,My_Fmax ! Frequency range from My_Fmin to My_Fmax Hz
KBC,1 ! Stepped load

ALPHAD,25000 ! Alpha damping
BETAD,0.05 ! Beta damping

SOLVE ! Solve

FINISH ! Leave Solver

```

```
! -----  
! View the Sound Pressure Level  
! -----  
/POST1  
  
/AUTO,1  
/REP,FAST  
  
tl.mac                ! Calculate transmission loss  
exp.mac              ! Export of current sets  
exp_pres_out.mac     ! Export only pressure of the receiving volume  
PARSAV,ALL,'out',' ',' ' ! Creates output file with parameters  
and array  
  
FINISH                ! Leave postprocessor
```

Príloha 4: Skript pre výpočet útlmu a export pre rámovú konštrukciu

tl.mac

```
/POST1
SET,FIRST

*DIM,graf,ARRAY,My_Fstep,2

*DO,j,1,My_Fstep
! Getting values of sound pressure level (SPL)
  NSEL,S,LOC,z,pos_pres+2*e_size,l_in-2*e_size
! Selecting nodes of sending room

*GET,_NODE_1,NODE,0,NUM,MIN
! Getting min node from selected nodes
  *GET,_SPL_NOD1,NODE,_NODE_1,SPL
! Obtaining SPL of that node and saving that value [dB] to the first node
under SPL_NOD1
  *GET,_NOD_COUNT,NODE,0,COUNT
! Getting node count of selected nodes
  *DO,i,2,_NOD_COUNT
! Starting cycle from 2nd node to the last node (node count)
  *GET,_NODE_%i%,NODE,_NODE_%i-1%,NXTH
! Getting next node
  *GET,_SPL_NOD%i%,NODE,_NODE_%i%,SPL
! Obtainning SPL of next node
  _SPL_NOD%i%=_SPL_NOD%(i-1)%+_SPL_NOD%i%
! Sum of SPL values
  *ENDDO

SPL_AVG_SEN%j%=_SPL_NOD%_NOD_COUNT%/_NOD_COUNT
! Average sound pressure level of sending volume

*IF,ins_CLT,eq,1,THEN

  NSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_insCLT+th_wall+th_ly+2*e_size,l_in+th_ly+th_i
nsCLT+th_wall+th_ly+l_out-2*e_size
  *ELSE

  NSEL,S,LOC,z,l_in+th_ly+th_wall+th_ly+2*e_size,l_in+th_ly+th_wall+th_ly+
l_out-2*e_size
  *ENDIF

*GET,_NODE_1,NODE,0,NUM,MIN
*GET,_SPL_NOD1,NODE,_NODE_1,SPL
*GET,_NOD_COUNT,NODE,0,COUNT
*DO,i,2,_NOD_COUNT
  *GET,_NODE_%i%,NODE,_NODE_%i-1%,NXTH
  *GET,_SPL_NOD%i%,NODE,_NODE_%i%,SPL
  _SPL_NOD%i%=_SPL_NOD%(i-1)%+_SPL_NOD%i%
*ENDDO

SPL_AVG_REC%j%=_SPL_NOD%_NOD_COUNT%/_NOD_COUNT
! Average sound pressure level of receiving volume
```

```

TL%j%=SPL_AVG_SEN%j%-SPL_AVG_REC%j% ! Transmission loss [dB]

graf(j,1)=TL%j% ! Writing value of transmission loss into
array
*GET,_FREQ%j%,ACTIVE,0,SET,FREQ ! Getting active set frequency
value
graf(j,2)=_FREQ%j% ! Writing current frequency into array
SET,NEXT ! Read next set of data
_frek=_FREQ%j%
TL_%_frek%Hz=TL%j% ! Saving transmission loss value to parameter
TL with current frequency value
*ENDDO
FINISH

```

exp.mac

```

! Setting up document properties
/POST1 ! Starting postprocessor
/UDOC,1,DATE,0
/UDOC,1,TYPE,LEFT
/UDOC,1,DATE,OFF

SET,FIRST,,AMPL ! Read first set of data
*DO,i,1,My_Fstep
/GLINE,1,-1 ! Turn off element lines so can just see
values
ALLSEL,ALL ! Selecting all for plotting
PLNSOL,SPL ! Plot the sound pressure level
/REPLOT
/SHOW,PNG,,0
PNGR,COMP,1,-1
PNGR,ORIENT,HORIZ
PNGR,COLOR,2
PNGR,TMOD,1
/GFILE,800,
/CMAP,_TEMPCMAP_,CMP,,SAVE
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/REPLOT
/CMAP,_TEMPCMAP_,CMP
/DELETE,_TEMPCMAP_,CMP
/SHOW,CLOSE
/DEVICE,VECTOR,0
/WAIT,1 ! 1 second wait for saving image
*GET,file_name,ACTIVE,0,SET,FREQ
! Getting frequency of current set
*IF,ins_CLT,eq,1,THEN
/RENAME,model000,png,,CLTins_%file_name%Hz,png,
! Rename of picture to pic_XXX_Hz (Hz value of current set)
*ELSE
/RENAME,model000,png,,CLT_%file_name%Hz,png,
! Rename of picture to pic_XXX_Hz (Hz value of current set)
*ENDIF
SET,NEXT,,AMPL
*ENDDO
FINISH ! Exiting postprocessing

```


Príloha 5: Skript pre PDS analýzu

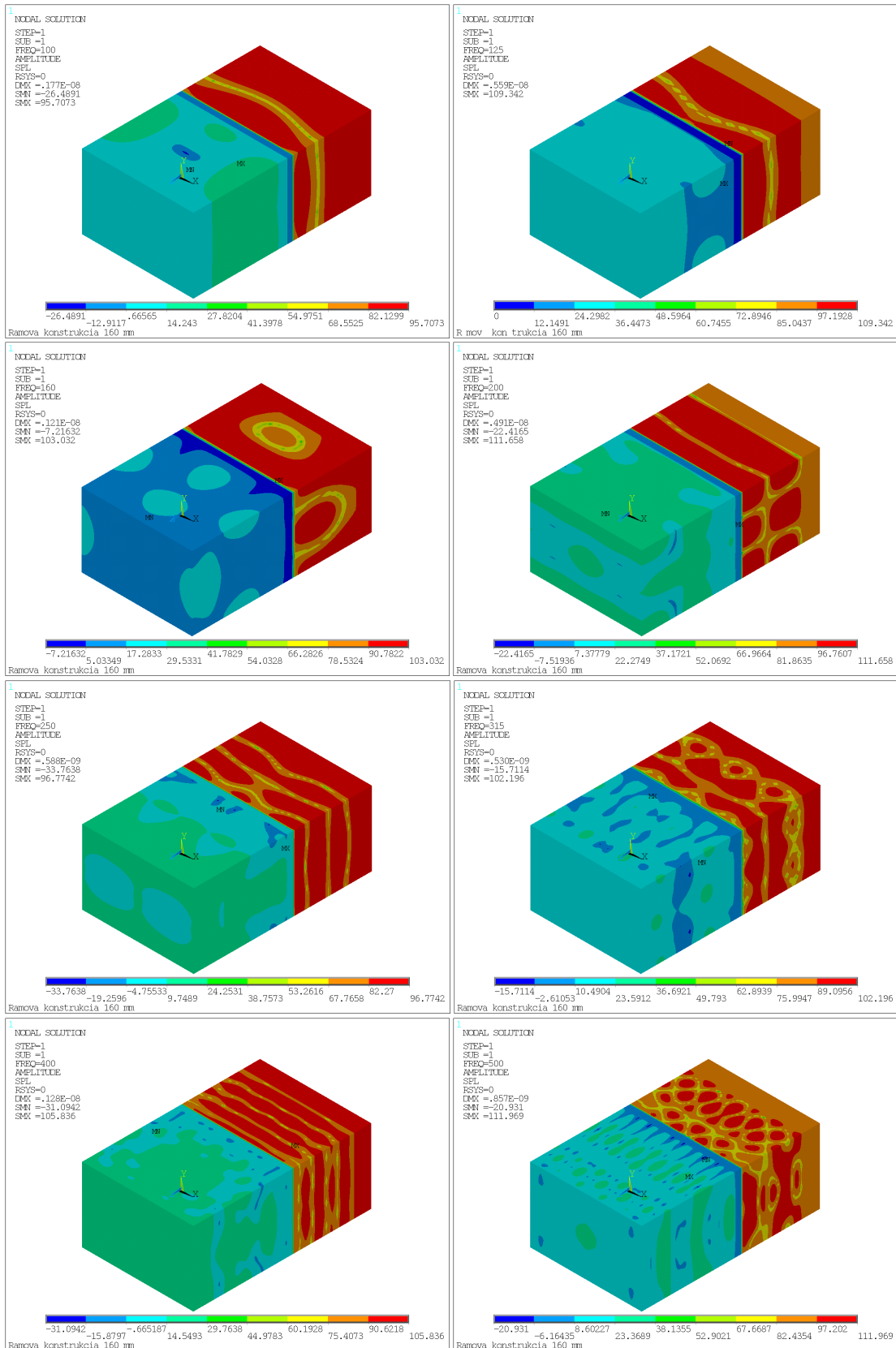
pds.mac

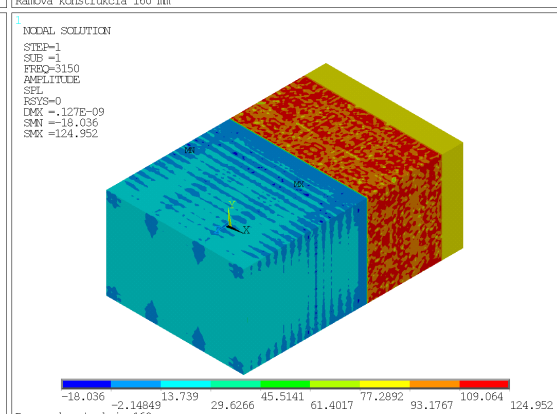
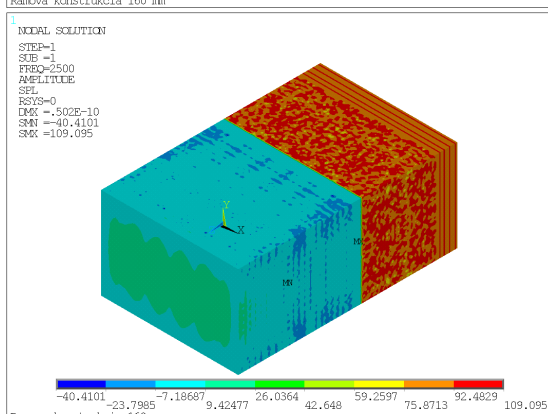
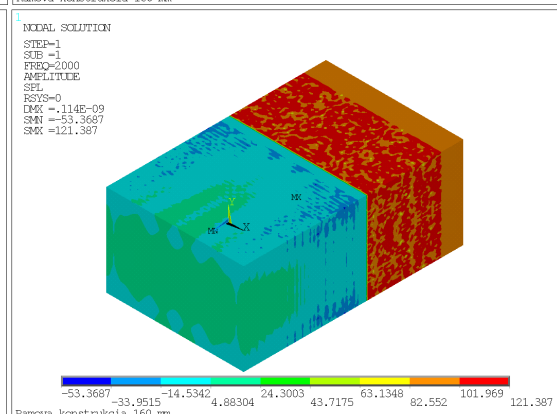
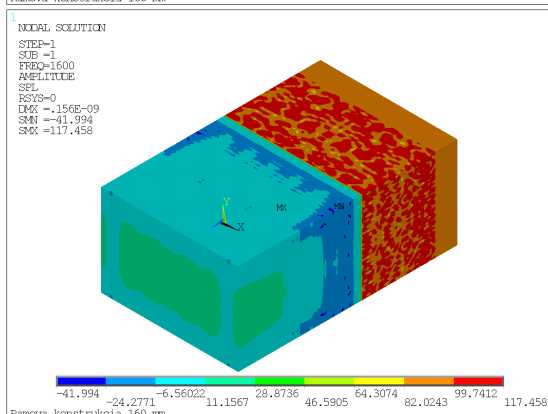
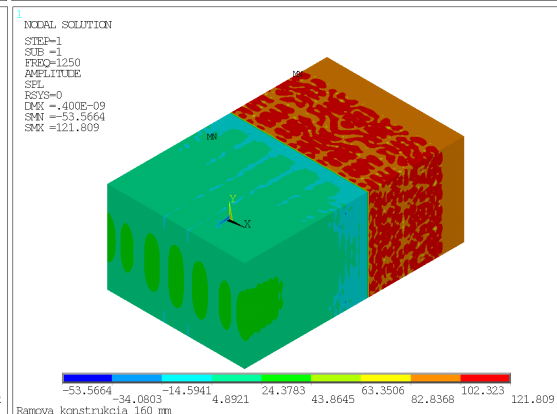
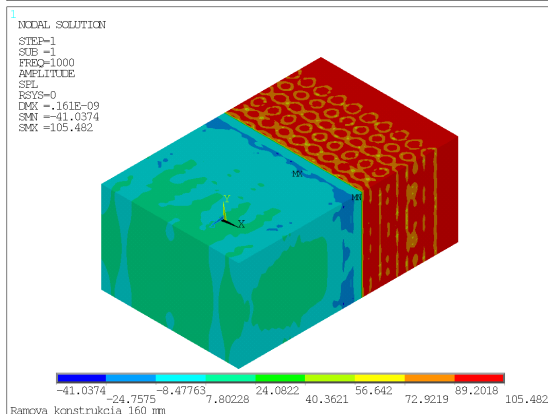
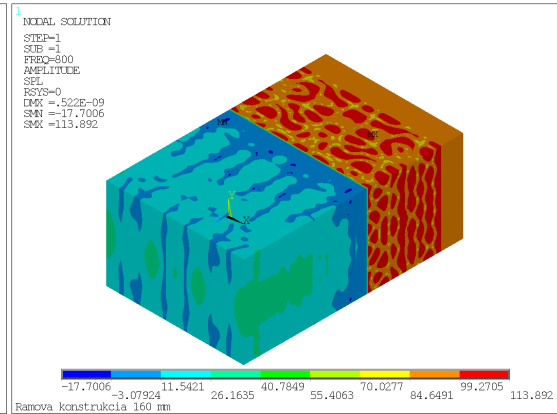
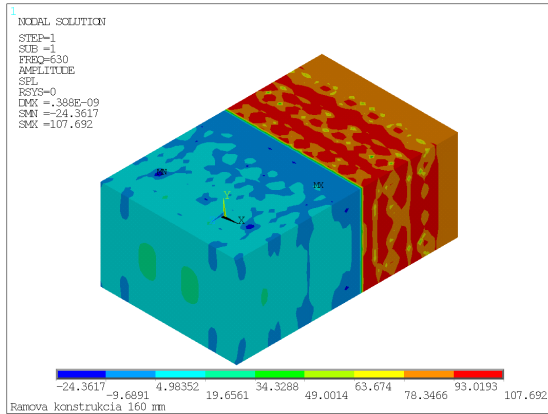
```
! Citlivostná analýza (PDS) - zistenie vplyvu hrúbky izolácie CLT

/inp,model,mac           ! macro input file
/pds                     ! switching to "probabilistic design systemu"
!
pdanl,model,mac         ! defines analysis file to be in PDS loop
!
pdvar,th_insCLT,unif,0.01,0.6 ! defines uniform distributed random variable
!
pdvar,TL_50Hz,resp      ! specify parameter to be treated as PDS parameter
pdvar,TL_100Hz,resp
pdvar,TL_150Hz,resp
pdvar,TL_200Hz,resp
pdvar,TL_250Hz,resp
pdvar,TL_300Hz,resp
pdvar,TL_350Hz,resp
pdvar,TL_400Hz,resp
pdvar,TL_450Hz,resp
pdvar,TL_500Hz,resp
pdvar,TL_550Hz,resp
pdvar,TL_600Hz,resp
pdvar,TL_650Hz,resp
pdvar,TL_700Hz,resp
pdvar,TL_750Hz,resp
pdvar,TL_800Hz,resp
pdvar,TL_850Hz,resp
pdvar,TL_900Hz,resp
pdvar,TL_950Hz,resp
pdvar,TL_1000Hz,resp
pdvar,TL_1050Hz,resp
pdvar,TL_1100Hz,resp
pdvar,TL_1150Hz,resp
pdvar,TL_1200Hz,resp
pdvar,TL_1250Hz,resp
pdvar,TL_1300Hz,resp
pdvar,TL_1350Hz,resp
pdvar,TL_1400Hz,resp
pdvar,TL_1450Hz,resp
pdvar,TL_1500Hz,resp
pdvar,TL_1550Hz,resp
pdvar,TL_1600Hz,resp
pdvar,TL_1650Hz,resp
pdvar,TL_1700Hz,resp
pdvar,TL_1750Hz,resp
pdvar,TL_1800Hz,resp
pdvar,TL_1850Hz,resp
pdvar,TL_1900Hz,resp
pdvar,TL_1950Hz,resp
pdvar,TL_2000Hz,resp
pdvar,TL_2050Hz,resp
pdvar,TL_2100Hz,resp
pdvar,TL_2150Hz,resp
pdvar,TL_2200Hz,resp
```

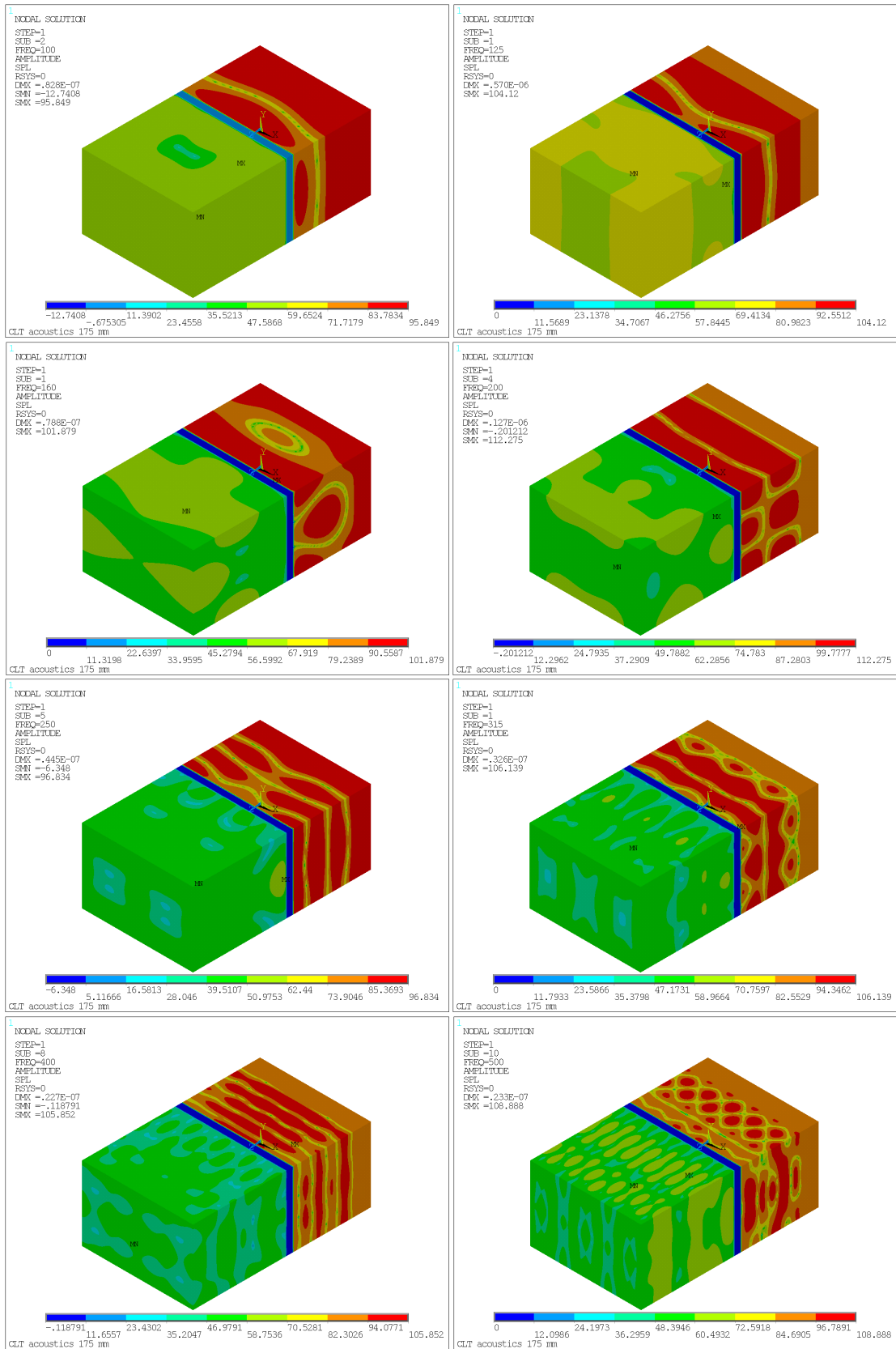
```
pdvar,TL_2250Hz,resp
pdvar,TL_2300Hz,resp
pdvar,TL_2350Hz,resp
pdvar,TL_2400Hz,resp
pdvar,TL_2450Hz,resp
pdvar,TL_2500Hz,resp
pdvar,TL_2550Hz,resp
pdvar,TL_2600Hz,resp
pdvar,TL_2650Hz,resp
pdvar,TL_2700Hz,resp
pdvar,TL_2750Hz,resp
pdvar,TL_2800Hz,resp
pdvar,TL_2850Hz,resp
pdvar,TL_2900Hz,resp
pdvar,TL_2950Hz,resp
pdvar,TL_3000Hz,resp
pdvar,TL_3050Hz,resp
pdvar,TL_3100Hz,resp
pdvar,TL_3150Hz,resp
pdvar,TL_3200Hz,resp
!
pdmeth,mcs,dir                ! specify PDS method to Monte Carlo
Simulation
pddmcs,100,none,all,,,,123457
    ! specifies number of loops of the analysis with initial seed 123457
pdexe,model                    ! starting analysis
!
pdsens,model,TL_500Hz,both,rank,0.025    ! plot PDS sensitivities
!
```

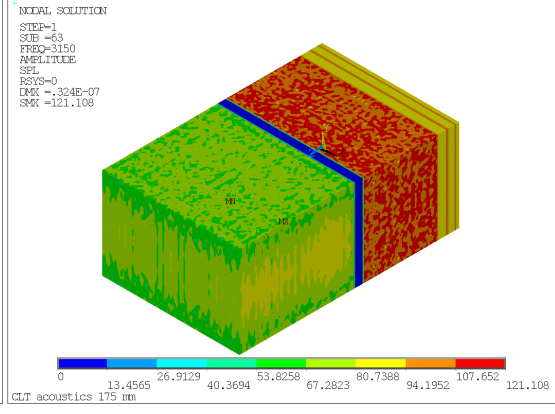
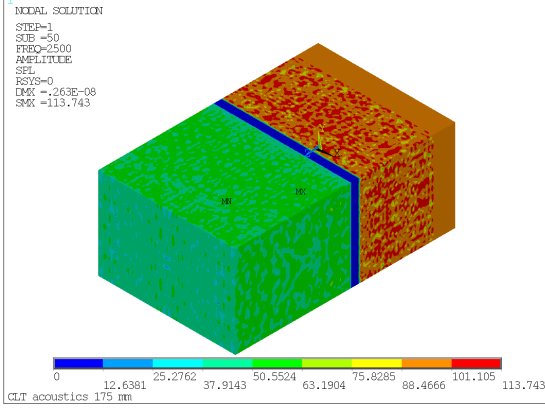
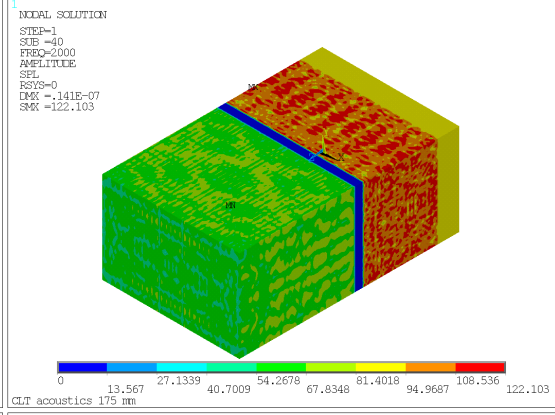
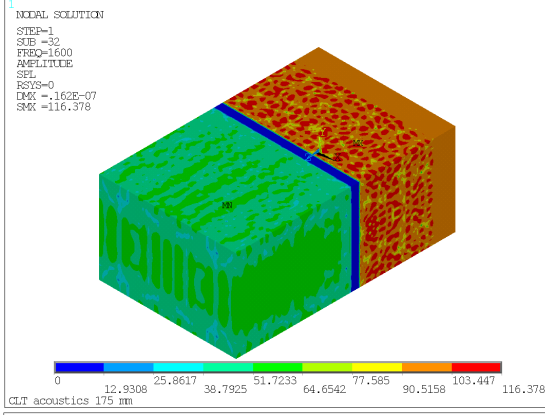
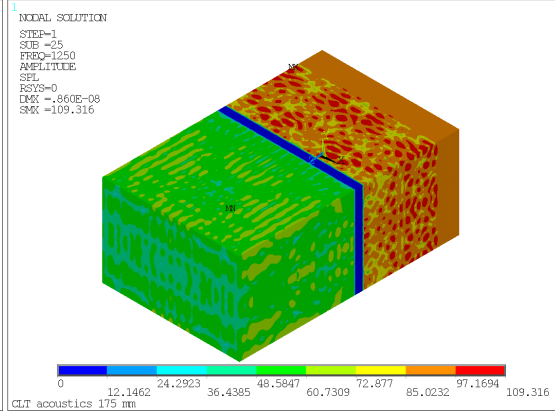
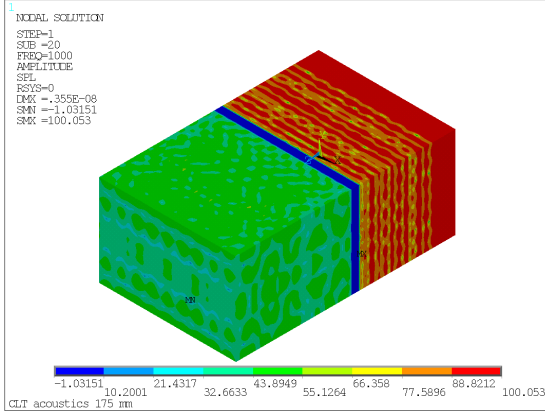
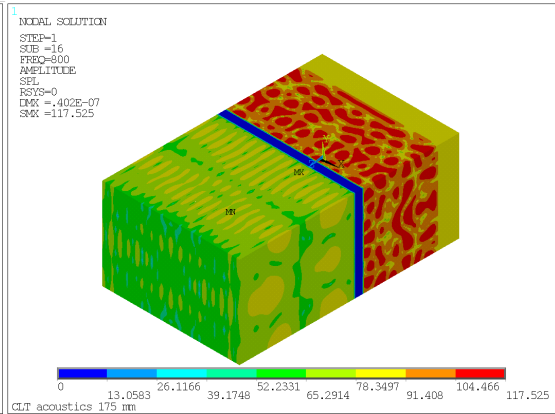
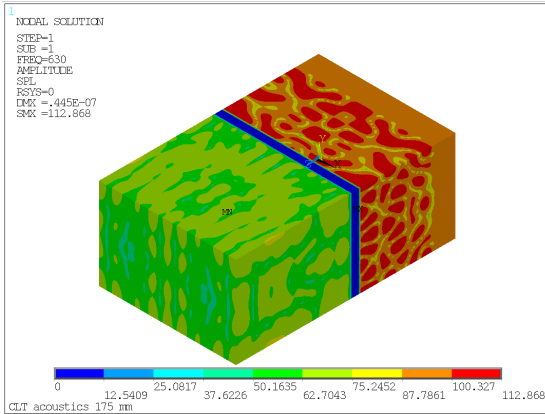
Príloha 6: Grafické výstupy z riešenia rámovej konštrukcie



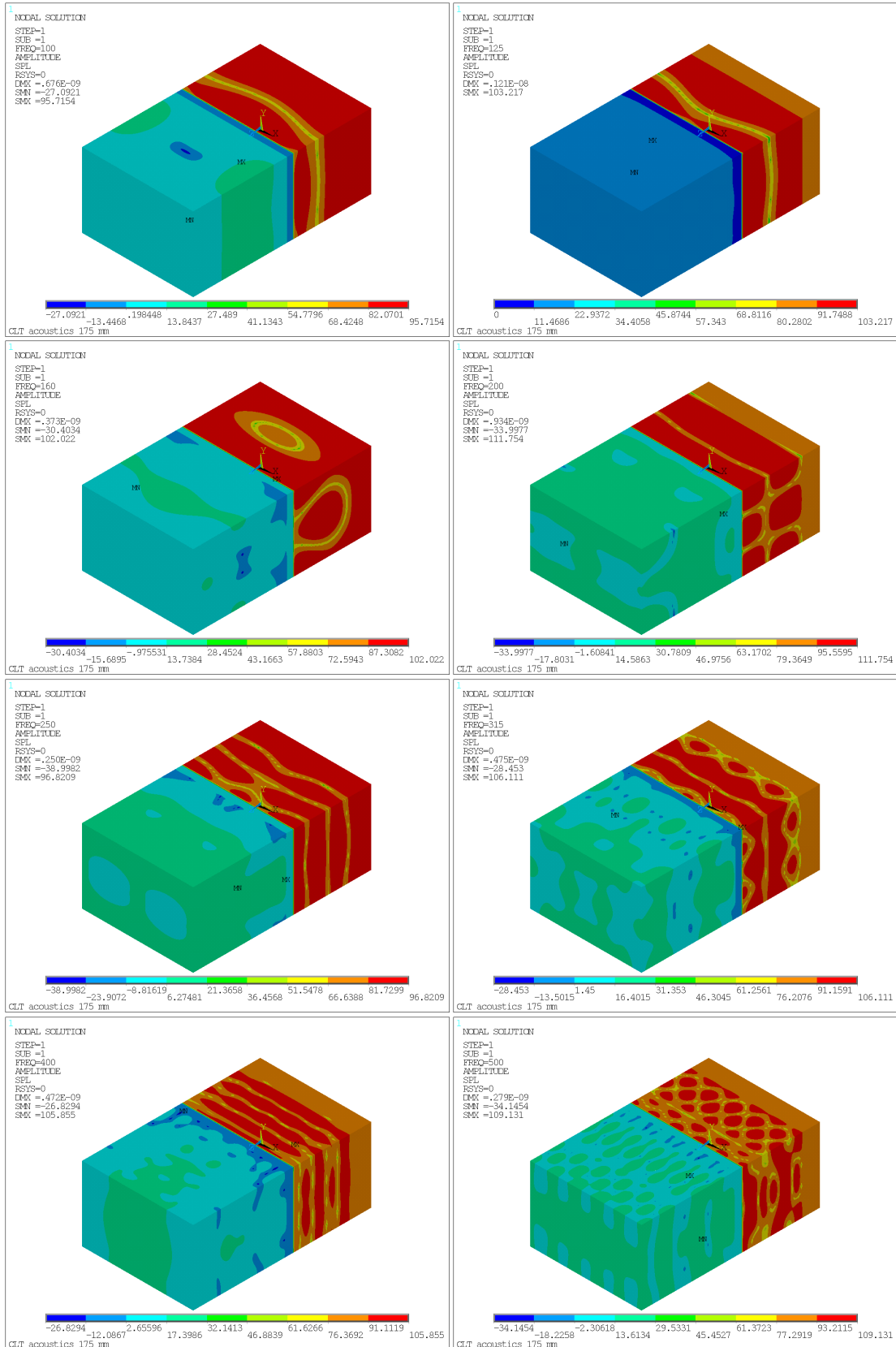


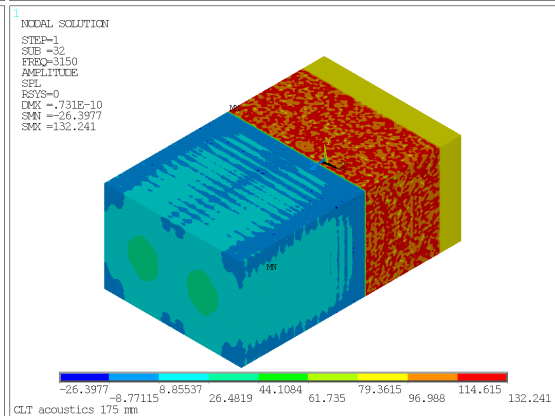
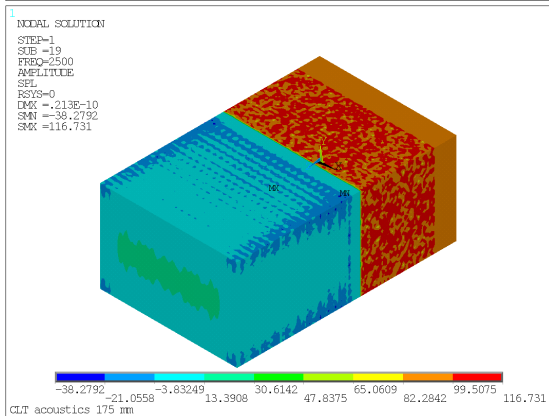
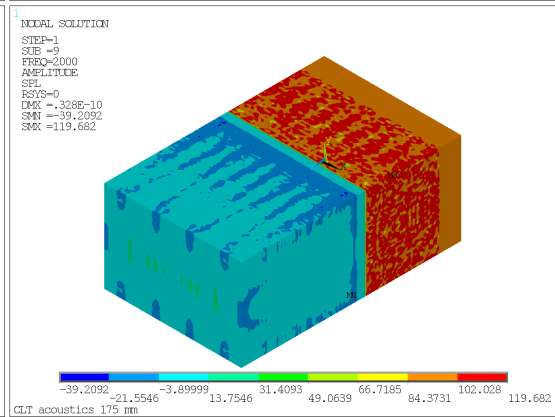
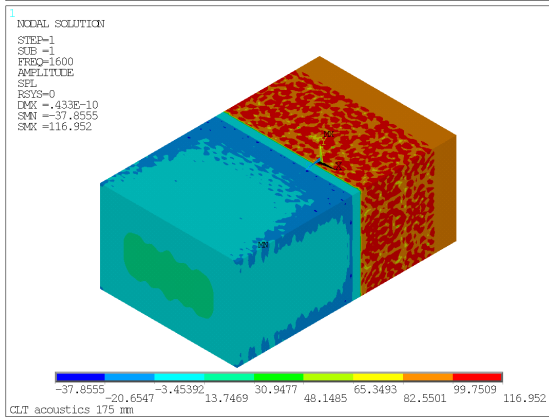
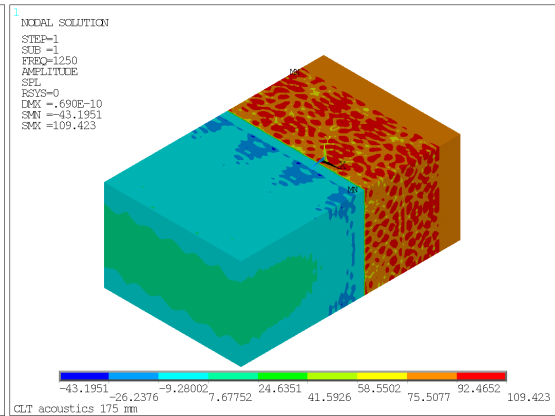
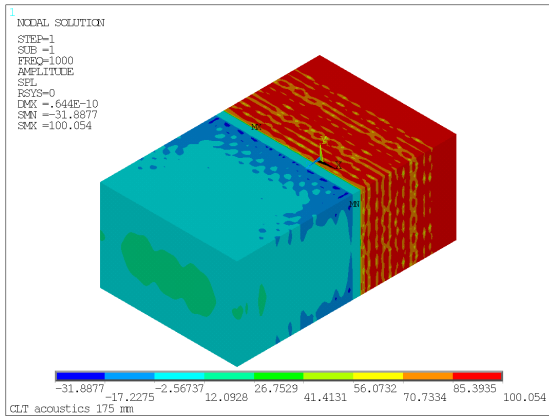
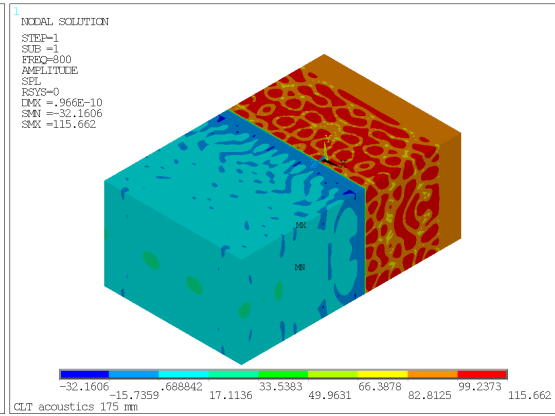
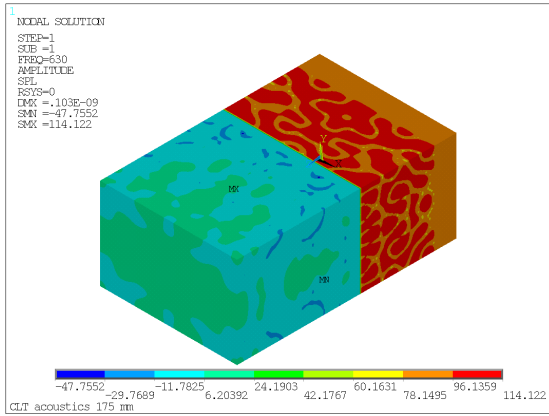
Príloha 7: Grafické výstupy z riešenia CLT panelu bez tlmenia





Príloha 8: Grafické výstupy z riešenia CLT s tlmením





Príloha 9: Grafické výstupy z riešenia CLT panelu s izoláciou

