



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

VÝPOČET AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ MÍSTNOSTI

Bakalářská práce

Studijní program: B2646 – Informační technologie
Studijní obor: 1802R007 – Informační technologie

Autor práce: **Pavel Tuček**
Vedoucí práce: Ing. Petr Fuchs





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

THE CALCULATION OF ROOM ACOUSTIC PARAMETERS

Bachelor thesis

Study programme: B2646 – Information Technology
Study branch: 1802R007 – Information Technology

Author: **Pavel Tuček**
Supervisor: Ing. Petr Fuchs



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Tuček**
Osobní číslo: **M11000130**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Informační technologie**
Název tématu: **Výpočet akustických parametrů místnosti**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

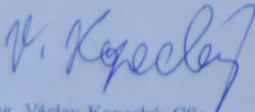
1. Seznamte se se základy stavební akustiky, výpočty akustických polí a měřeními akustických parametrů místnosti.
2. Seznamte se s numerickými metodami výpočtu akustických polí v ustáleném i neustáleném stavu.
3. Vyberte metodu vhodnou pro implementaci ve vlastním výpočetním programu.
4. Povedte simulaci vybraných konfigurací místností a dosažené výsledky zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění 1. vydání. Praha : Nakladatelství Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3
- [2] Aplikační poznámky a návody firmy Brüel & Kjaer.
- [3] Hassall, J.R, Zaverf, K., Phill, M.: Accustic Noise Measurements, June 1988, Denmark, ISBN 87 87355 21 3

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Fuchs
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 15. května 2015


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

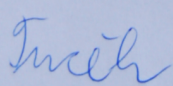
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15.05.2015

Podpis: 

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Fuchsovi, s kterým jsem mohl konzultovat cokoli v ohledně bakalářské práce. Při našich konzultacích pravidelně vznikaly nové nápady, jak tuto práci vylepšit. Také bych chtěl poděkovat mému otci, Ing. Františku Tučkovi, který mě uvedl do základní problematiky v oblasti akustiky, předal mi velké množství zkušeností z praxe a dal mi k dispozici materiály, pomocí kterých jsem se mohl podívat na danou problematiku z praktického pohledu.

Abstrakt CS:

Tato bakalářská práce navazuje na ročníkový projekt "Výpočet akustických parametrů místnosti", který jsem řešil minulý rok v rámci mého studia. Tento projekt používal pro výpočet akustických parametrů místnosti základní vzorečky, které již byly ověřeny pomocí velkého množství měření. Cílem této práce je posunout automatický návrh materiálů pro optimální akustiku místnosti dále. Zvolený problém zde řeším pomocí simulace zvuku. Zvuk zde simuluji pomocí velkého množství paprsků, které generují zdroje zvuku. Pro optimalitu výpočtu paprsky mezi sebou neinteragují.

Pro naprogramování aplikace jsem použil programovací jazyk C++ a vývojové prostředí NetBeans. Cíl se mi povedlo splnit dle mých očekávání. Přesnost výpočtů se v daných praktických úlohách pohybovala od 80 % do 99 % podle kvality modelu místnosti, hustoty paprsků zvuku a přesnosti nastavení zdrojů. Vytvořený software umožňuje dva typy výpočtů, a to buď plně automatizovaný výběr materiálů pro optimální akustické parametry místnosti a nebo výpočet akustických parametrů místnosti s definovaným rozvržením materiálů, které slouží primárně pro účely ladění akustiky místnosti odborníkovi.

Klíčová slova:

simulace zvuku, zvukové vlny, paprsky, doba dozvuku, střední pohltivost, akustika, hladina akustického tlaku, zvuk, audio, automatický výpočet doby dozvuku, optimalizace doby dozvuku místnosti, automatický návrh materiálů, poslechová místnost, zdroj zvuku

Abstrakt EN:

This bachelor project continue on topic from annual project called calculation of acoustic parameters of listening room from last year, this annual project used for calculation of acoustic parameters of listening room basic formulas, which was verified by lot of practical measurement. The main goal of this bachelor project is to improve automatic design of materials for optimal acoustic of room. Chosen problem i solved by sound simulation. I simulate sound by lot of sound rays, which are generated by sources of sound. For optimal calculation sound rays don't interact between themselves.

I programmed this application in programming language C++ and integrated development environment NetBeans. I fullfiled main goal. Accuracy of computation can vary from 80% to 99% depends on quality of room model, density of sound rays and precion of setup of sound sources. Software, which i created have two major types of calculation, first of them is fully automated calculation of ideal materials for optimal acoustic parameters of room and the second one is calculation of acoustic parameters of room with defined materials in room, which is primarily used for tuning acoustic of room by experts.

Keywords:

sound simulation, sound waves, sound rays, reverberation time, medium absorbtion, acoustic, level of acoustic pressure, sound, audio, automatic calculation of reverbation time, optimalization of reverberation time in room, automatic design of materials, listening room, source of sound

Obsah

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Úvod | 12 |
| 2 | Teorie | 15 |
| 3 | Hlavní parametry místnosti..... | 21 |
| 4 | Návrh algoritmizace | 25 |
| 5 | Ovládání programu | 29 |
| 6 | Praktické ukázky výpočtů | 33 |
| | 6.1 Situace A | 33 |
| | 6.2 Situace B | 35 |
| | 6.3 Situace C | 37 |
| | 6.4 Situace D | 39 |
| 7 | Zhodnocení výsledků..... | 41 |
| 8 | Automatický návrh vs. optimum..... | 42 |
| 9 | Porovnání výpočtu s výsledky výpočtu pomocí Sabineho vzorce | 44 |
| 10 | Možnosti dalšího vývoje a vylepšení programu: | 45 |
| | Modul pro export místnosti z 3DS Max | 45 |
| | Webový portál pro výpočet akustiky | 45 |
| | Zvětšení databáze materiálů | 45 |
| | Modul pro export animace simulace do 3DS Max | 46 |
| | Modul pro akceleraci výpočtu na grafické kartě | 46 |
| 11 | Hodnocení práce: | 47 |
| 12 | Zdroje: | 48 |

Seznam Grafů

| | |
|--|----|
| Graf 1: Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu na teplotě | 15 |
| Graf 2: Pohltivost vzduchu ve volném akustickém poli | 16 |
| Graf 3: Vliv věku na prahovou frekvenci | 17 |
| Graf 4: Doba dozvuku v prázdné a základně upravené místnosti | 21 |
| Graf 5: Pohltivost materiálů | 23 |
| Graf 6: Vliv odsazení akustického materiálu od stropu | 23 |
| Graf 7: Vliv tloušťky materiálu..... | 24 |
| Graf 8: Vliv pohltivosti vzduchu..... | 27 |
| Graf 9: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích..... | 33 |
| Graf 10: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích..... | 35 |
| Graf 11: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích..... | 37 |
| Graf 12: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích..... | 39 |
| Graf 13: Porovnání simulací | 41 |
| Graf 14: Automatický návrh vs. optimum | 42 |
| Graf 15: Program vs. Sabine | 44 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Formá souboru programSetup..... | 29 |
| Tabulka 2: Formát souboru material.txt..... | 30 |
| Tabulka 3: parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti..... | 33 |
| Tabulka 4: Vypočítané hodnoty..... | 33 |
| Tabulka 5: Parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti..... | 35 |
| Tabulka 6: Vypočítané hodnoty..... | 35 |
| Tabulka 7: Parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti..... | 37 |
| Tabulka 8: Vypočítané hodnoty..... | 37 |
| Tabulka 9: Parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti..... | 39 |
| Tabulka 10: Vypočítané hodnoty..... | 39 |
| Tabulka 11: Navrhnuté materiály..... | 42 |
| Tabulka 12: Vypočítané hodnoty..... | 42 |
| Tabulka 13: Průměrná pohltivost materiálů..... | 44 |
| Tabulka 14: Vypočítané hodnoty podle Sabineho..... | 44 |

Seznam zkratek

| | |
|----------------|---|
| Hz | Hertz, jednotka frekvence |
| dB | Decibel, fyzikálně bezrozměrná poměrová jednotka |
| CD | Compact Disk, datové médium |
| SACD | Super Audio Compact Disk, datové médium |
| Lw | hladina akustického výkonu zdroje zvuku |
| T | doba dozvuku |
| Lp | hladina akustického tlaku |
| Q | činitel směrovosti zdroje zvuku |
| MB | Megabyte, 1 048 576 bytů |
| GB | Gigabyte, 1 073 741 824 bytů |
| GHz | 1 000 000 000 Hz |
| C++ | programovací jazyk |
| X,Y,Z | souřadnice v 3D prostoru |
| GPU | Graphic Processing Unit, čip na grafické kartě |
| m/s | rychlost v metrech za sekundu |
| Kč | Koruna česká |
| s | základní jednotka času v soustavě SI |
| °C | stupeň Celsia, jednotka teploty |
| log | logaritmická funkce, inverzní k exponenciální funkci |
| π | matematická konstanta, má hodnotu 3.14159 |
| CUDA | výpočetní jádro na GPU od firmy NVIDIA |
| FLAC | Free Loss Less Audio Codec |
| MP3 | audio coding formát, který používá ztrátovou kompresi |
| WAV | Waveform Audio File Format, bezztrátový audio formát |
| PC | Personal Computer, osobní počítač |
| m ² | Jednotka plochy, 1 x 1 metr |
| kPa | Jednotka tlaku, 1000 Pa |
| GUI | Graphical user interface, grafické uživatelské rozhraní |

1 Úvod

Jako téma bakalářské práce jsem vymyslel výpočet akustických parametrů místnosti. Bylo to logické vyústění mého ročníkového projektu, kde jsem toto téma zpracovával, a díky tomu, že mě to bavilo, jsem se rozhodl jít více do hloubky. Obecně akustika mě zajímá, protože mým hlavním koníčkem je poslech kvalitní hudby, a dobrá akustika je nedílnou součástí domácího audio systému.

Mezi audiofily se vedou pře, jestli je slyšitelný rozdíl mezi FLAC, WAV a nebo MP3 formátem, ale minimum z nich skutečně jde do hloubky a přemýšlí o vlivu akustických úprav na kvalitu poslechu. Mnoho z nich považuje za kvalitní komponenty pro poslech muziky jen filtr sítě, výkonový zesilovač, předzesilovač, CD/SACD přehrávač, gramofon a reproduktorové soustavy. Jsou ochotni do každé z těchto komponent investovat i částku přes 100 tisíc Kč, avšak akustika místnosti jim nic neříká. Pak se nakonec díví, že když si byli vybírat audio sestavu u autorizovaného distributora, tak tam ta jejich oblíbená muzika zněla úžasně, ale doma v obýváku, který je akusticky neupraven, stejná soustava zní příliš ploše, bez jiskry.

Při důkladné rozvaze jsem s překvapením zjistil, že možnost aplikace dobré akustiky je ve velkém množství míst, například kvalitní poslechová místnost, pracovna, pracovní kóje, v učebnách, v rehabilitačních centrech, nemocnicích, kavárnách, hospůdkách a mnoha dalších místech, kde by to člověk moc nečekal. Samozřejmě, že každý máme své priority a akustika asi není ta absolutně první. V první řadě chceme mít kde bydlet, poté mít dobrou pokojovou teplotu, příjemné místo k posezení, kvalitní elektroniku a až potom možná začneme přemýšlet nad akustikou. Prakticky ještě v 70. letech minulého století lidé pracovali mnohdy ve velmi hlučném prostředí a neuvědomovali si devastační účinky na svůj sluch. Tyto změny se totiž projeví až po třiceti letech, kdy už bylo pozdě.

Při řešení ročníkového projektu minulý rok jsem přišel na několik nedostatků při výpočtech akustických parametrů místnosti, a protože tyto nedostatky byly nad rámec rozsahu ročníkového projektu, rozhodl jsem se pokračovat v tomto tématu i v bakalářské práci. Jednalo se zejména o problematiku používání pouze základních vzorečků pro výpočet doby dozvuku a hladiny akustického tlaku. Tyto vzorečky mi neposkytly moc veliký prostor pro další vylepšení a optimalizaci automatického návrhu rozložení akustických materiálů v upravované místnosti. Výstupem vzorečku pro dobu dozvuku byl například pouze čas doby dozvuku, avšak jsem nevěděl, v jakých místech docházelo k největším útlumům, a tudíž jsem neměl dostatek informací, kde se vyplatí aplikovat

kvalitnější a kde naopak méně kvalitní materiály.

Další mojí motivací, proč se zabývat tímto tématem, jsou reálné trendy, které pozorují již delší dobu. Ve velkých městech se hustota osídlení obyvatel zvyšuje, s kupní silou obyvatel rostou i ceny nemovitostí na m² a lidé pracují čím dál více abstraktně, tudíž potřebují více času na regeneraci a odpočinek po práci. Díky vyšší hustotě zástavby je pak velmi důležité dbát na dobrou akustickou úpravu, například mezibytových stěn a bytových příček, aby lidé měli doma větší klid a dostatečnou míru soukromí. Mnoho mladých rodin se v dnešní době setkává s tím, že je lepší koupit si byt ve starší zástavbě. Někteří developeři přikročili v rámci úsporných opatření k tomu, že se nejenom projektují menší byty, ale že se mezibytové stěny i bytové příčky staví na samotné hranici požadavků norem. A potom například při dalším zeslabení těchto konstrukcí v důsledku instalace elektrických rozvodů dochází k tomu, že slyšíte i to, když vašemu sousedovi spadne lžička na zem.

Závažným problémem velkých měst je intenzita místní a zejména pak tranzitní dopravy.

Za posledních 20 let se v České republice několikanásobně zvýšil počet osobních i nákladních vozidel i objem přepravovaného nákladu a zboží po silnici. Více cestujeme ve volném čase, více cestujeme za prací a díky nárůstu dopravy se na mnohých místech zvýšil i hluk z dopravy.

Sám žiji na poměry České republiky v jednom z největších měst, v panelové zástavbě, kde se již vystřídala řada sousedů. Když se vám do sousedního bytu nastěhuje soused, který dělá hluk, tak to je velmi nepříjemné, a proti tomu se lze jen velmi těžko bránit. Na druhou stranu, když si chci pustit ve večerních hodinách kvalitní muziku, tak jsem velmi omezen tím, abych nerušil sousedy. Takže to také není ono.

Díky zvyšující se kupní síle obyvatel ve velkých městech také očekávám větší zájem široké veřejnosti o akustické studie, potažmo akustické úpravy jejich bytů. Jen provedu základní úvahu. Celkem slušně zařízený byt 3+1 v centru Prahy se dnes sežene okolo 6,5 - 12 milionů korun českých. Kvalitní akustická úprava, která by ochránila tento byt před nežádoucím hlukem od sousedů, hlukem z dopravy a nebo umožnila kvalitní akustický poslech muziky bez obav, že rušíme sousedy, by přišla přibližně na 500 - 850 tisíc Kč.

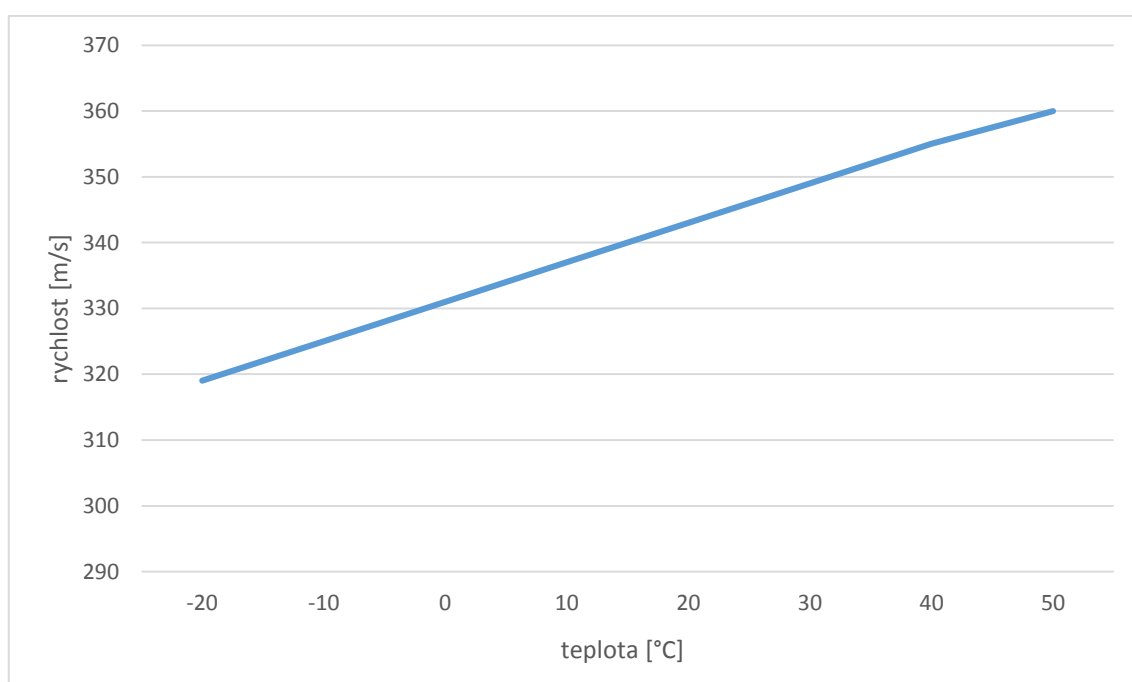
Možná si to moc neuvědomujeme, ale klid má veliké léčebné účinky. Lidský organismus mnohem lépe regeneruje, a to jak po psychické, tak i fyzické stránce. Tomu, kdo nemá klid na odpočinek, pak hrozí mnohem častější přejídání, s tím spojená nadváha, chronická

únava, a může to vyústit až ke kardiovaskulárním problémům.

Další možnost aplikace tohoto softwaru vidím v místech, kde se setkává velké množství lidí, jako například kavárny a restaurace. Určitě každý již mnohokrát zažil situaci, kdy šel s kamarádem na kávu, a najednou díky špatné akustice prostoru místo normálního mluveného slova musel používat k dorozumívání jakýsi polokřik. Po chvíli strávené v takovém prostoru se nám to zdá celkem normální, ale jakmile vyjdeme, tak najednou ucítíme, jak máme zalehlé uši, protože tam každý křičel, a úplně vymluvený hlas.

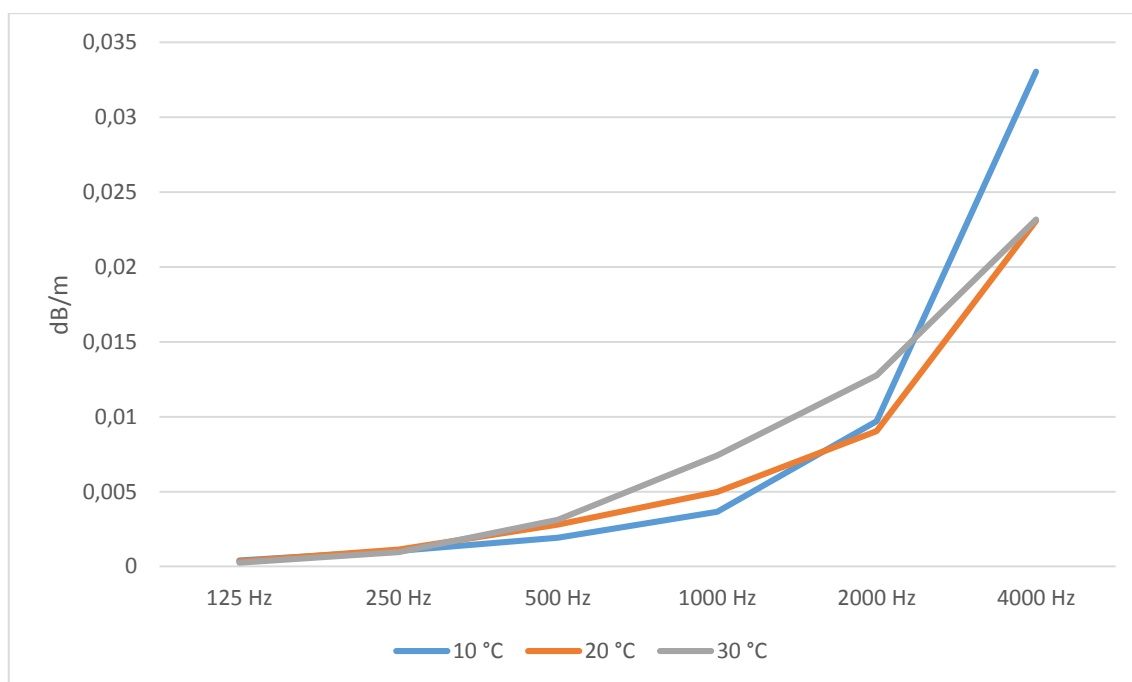
2 Teorie

Fyzikální podstata zvuku je vlnění v látkovém prostředí. Ve většině místnostech toto prostředí je vzduch o standardní teplotě 20 °C. Rychlost šíření zvuku v takovém prostředí je okolo 330 metrů za sekundu. Při nula stupních celsia se zvuk šíří rychlostí 331 metrů za sekundu, ale při 25 stupních celsia to je již 346 metrů za sekundu. Na druhou stranu například v kovech se zvuk šíří mnohem vyšší rychlostí, například ve stříbře se udává rychlost okolo 2700 metrů za sekundu a v čistém hliníku dokonce lehce přes 6400 metrů za sekundu, což je skoro 20 krát rychleji.



Graf 1: Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu na teplotě

Díky tomu, že se zvuk vlní v látkovém prostředí, tak dochází k tomu, že přichází při pohybu v tomto prostředí o svoji energii. Útlum vzduchu závisí na několika faktorech - na teplotě, tlaku a vlhkosti. Pro potřeby výpočtu uvažují se standardní pokojovou teplotou 20 °C, tlakem 101.325 kPa a vlhkostí 70 %. Pohltivost vzduchu je jiná pro každou z frekvencí 125, 250, 500, 1000, 2000 a 4000 Hz. Z grafu níže je vidět, že pohltivost vzduchu začíná být vyšší až od 2000 Hz. Pohltivost vzduchu lze spočítat dle normy ISO 9613, část 1. Z výpočtů jsem zjistil, že vliv útlumu vzduchu nastává u místnosti s objemem nad 1000 m³ a nebo u místností s velmi nízkou pohltivostí, kde se doba dozvuku pohybuje od 10 s výše.

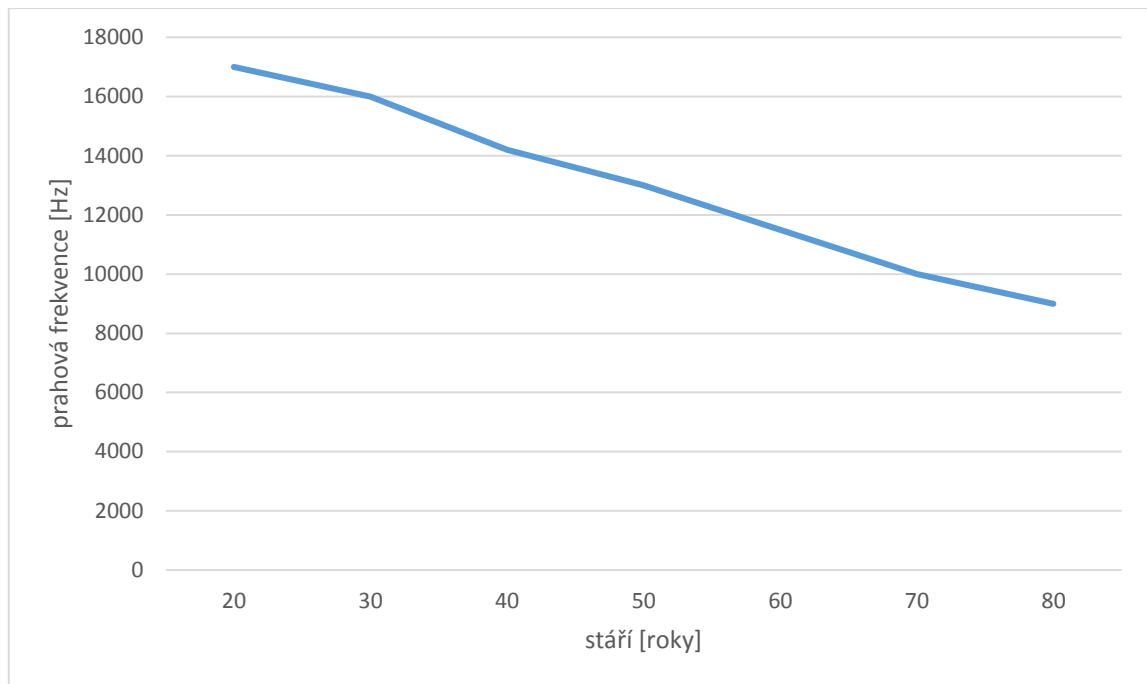


Graf 2: Pohltivost vzduchu ve volném akustickém poli

Každý člověk má unikátní sluch, proto můžeme stejné zvukové podněty každý vnímat trochu jinak. Obecně lze říci, že kvalita sluchu člověka je ovlivněna několika parametry - věkem a prostředím, v jakém žije. Čím je člověk starší, tím má sluch horší, a dokonce někdy může špatný sluch způsobovat bolesti hlavy, protože mozek je mnohem více namáhaný při zpracovávání zvukového vjemu, a tím se mohou projevat i pocity dezorientace.

Velmi důležité je také trvalé životní prostředí člověka, protože je veliký rozdíl mezi tím, jestli daný člověk žije na klidném venkově s nízkou hustotou obydlí a nebo naopak ve velmi vysoce hustě zastavěném městě někde poblíž frekventované silnice.

Frekvenční rozsah referenčního jedince, kterými jsou pro potřebu testování většinou vysokoškolští studenti, je 20 - 20 000 Hz. Dynamický rozsah lidského ucha je úžasných 120 dB. Když si uvědomíme, jak je ucho lidského jedince malý orgán, tak je to velmi zajímavé, jakou dobu vydrží a jaké frekvenční rozsahy dokáže zaznamenat.



Graf 3: Vliv věku na prahovou frekvenci

V této bakalářské práci se chci hlavně zaměřit na tyto akustické parametry místnosti: doba dozvuku, hladina akustického tlaku v určitém místě, střední pohltivost místnosti, místa v místnosti, kde se nacházejí pole přímých a odražených vln, a analýza míst, kde se nejvíce paprsků odráží.

Doba dozvuku je velmi důležitá veličina pro každého akustika. Udává se v sekundách a říká nám například, za jakou dobu dojde po Dirackově impulsu k jeho absolutnímu útlumu. Vypočítávám ji pro každou z frekvencí: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a

4 000 Hz. Další informací, kterou počítám, je maximální a minimální doba dozvuku. Tyto informace nemají příliš vysokou váhu, avšak se hodí pro mé další hlubší pochopení toho, jak zvuk v uzavřeném prostoru se pohybuje a jaký mají vliv akustické úpravy na různých frekvencích.

Střední pohltivost vnitřního prostoru je průměrná pohltivost ploch v daném prostoru. Vypočítávám ji pro každou z frekvencí: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz. Tento parametr udává, jak akustické materiály na daných frekvencích jsou schopny pohlcovat energii zvuku.

Hladina akustického tlaku ve vnitřním prostoru v určitém bodě vyjadřuje hlasitost zvuku, který slyšíme, udává se v bezrozměrné veličině - dB.

Hladina akustického výkonu zdroje zvuku ve vnitřním prostoru charakterizuje mohutnost zdroje zvuku. Udává se v bezrozměrné veličině - dB. Hlavní podstatou jednotky decibel je logaritmický průběh, tedy například pokles o 3 decibely je poloviční hlasitost a nebo nárůst o 9 decibelů je osminásobný nárůst hladiny hlasitosti. Odpovídá to objevu Fechner-Weberova zákonu, že ucho vnímá podněty logaritmicky, to znamená, že na velké podněty okolí reaguje jen malým vnímaným počtkem. Fyziologický nedostatek lidského sluchu spočívá v tom, že dva jednoduché tóny, které mají stejnou intenzitu, ale různé frekvence slyšíme s různou hlasitostí. Pro porovnání dvou zvuků s různou hlasitostí můžeme použít jen veličinu hlasitost zvuku udávanou v sonech, kterou stanovil Fletcher na základě mnoha experimentálních měření.

Na základě níže uvedených vzorců jsem počítal dané akustické parametry vnitřního prostoru v ročníkovém projektu v minulém roce. Tyto vzorce jsem nastudoval z knihy Hluk a chvění, kterou napsal Richard Nový. Pomocí těchto vzorců jsem počítal akustické parametry jak upravené, tak i neupravené místnosti a provedl jsem rozbor rozdílů. V rámci bakalářské práce používám trochu jiné vztahy, avšak pro úplnost zde uvádím i vztahy z ročníkového projektu, s kterým také budu porovnávat mé výsledky výpočtu. Cílem mé finální verze softwaru bude pomocí simulace zvuku přiblížit se při stejném rozložení materiálů co nejvíce realitě a také výsledkům z programu, který počítal akustické parametry místnosti pomocí vztahů uvedených níže. Na druhou stranu hlavní výhodou nové metodiky výpočty bude mnohem vyšší přesnost při automatickém návrhu akustických materiálů pro akustickou úpravu místnosti. Vyšší přesnost je dána tím, že novým výpočtem získávám velmi důležitá data, jako jsou plochy s nejvyšším množstvím odrazů, tudíž plochy s největším potenciálem útlumu při aplikaci kvalitního akustického materiálu.

Program pro bakalářskou práci jsem se rozhodl vyvíjet v programovacím jazyce C++, protože patří k nejrychlejším programovacím jazykům. Je velmi efektivní, a psal jsem v něm již několik časově kritických reálných aplikací, jako je třeba realtime detekce až několika markerů v obraze z webové kamery. Jako vývojové prostředí jsem se rozhodl používat Netbeans, s kterým mám již několikaleté pozitivní zkušenosti.

výpočet α

Alpha vypočítám pomocí vzorce:

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i * S_i}{\sum S_i}$$

(2)

α = střední pohltivost prostoru

α_i = dílčí pohltivost plochy S_i (stěny, strop, podlaha)

S_i = dílčí plocha prostoru (stěny, strop, podlaha)

výpočet T

T vypočítám pomocí Sabineho vzorce:

$$T = \frac{0,163 * V}{\alpha * S}$$

(3)

T = doba dozvuku v oktávě

V = celkový objem prostoru

S = celková plocha prostoru

α = střední pohltivost prostoru

výpočet T optimální

T pro multifunkční prostor vypočítám pomocí vztahu

$$T = 0,3582 * \log V - 0,061$$

(4)

T pro poslechovou místnost vypočítám pomocí vztahu

$$T = 0,3424 * \log V - 0,185$$

(5)

T pro kino vypočítám pomocí vztahu

$$T = 0,1915 * \log V + 0,134$$

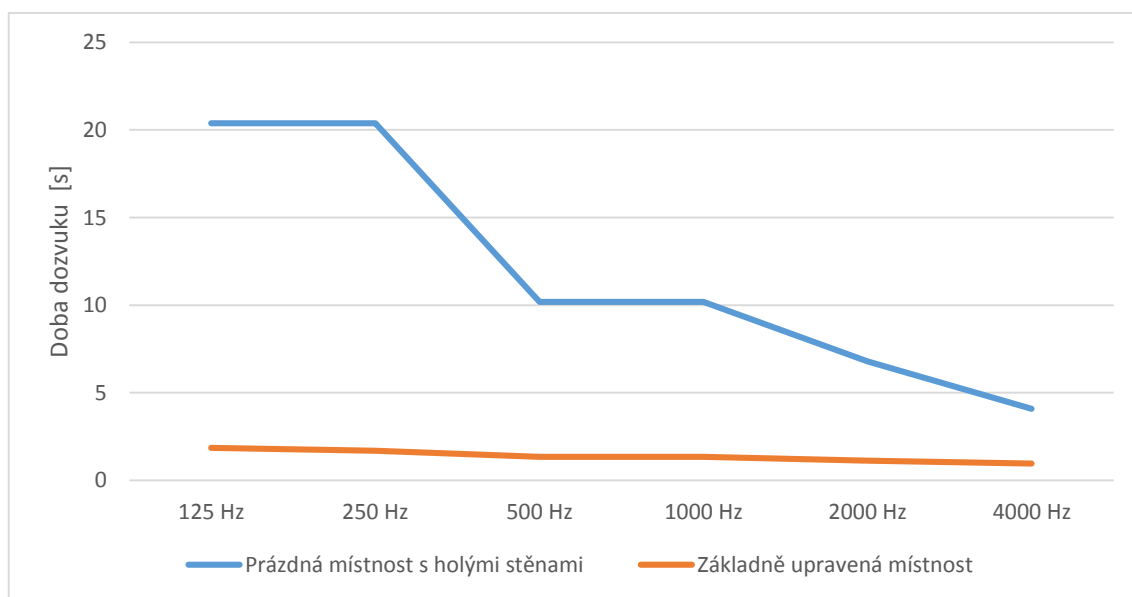
(6)

3 Hlavní parametry místnosti

Nejprve bylo důležité ze všech možných parametrů, které určují kvalitu akustiky vnitřního prostoru, vybrat ty zásadní, nejdůležitější. Po důkladné úvaze a konzultaci jsem dospěl k přesvědčení, že nejvýznamnější parametry jsou doba dozvuku v dané místnosti v kombinaci s rozložením počtu odrazů na jednotlivých plochách a střední pohltivost materiálů, které jsou aplikovány na podlaze, všech stěnách a stropu. Všechny tyto parametry je důležité počítat na frekvencích 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz.

Doba dozvuku nám udává dobu, mezi například Dirackovým impulsem, který vybudí danou místnost, a poklesem hladiny akustického tlaku o 60 decibel. Z praktického hlediska je doba dozvuku velmi důležitá pro prokreslenost, srozumitelnost a rozlišení niancí zvuku ve vnitřním prostoru. Na jedné straně, pokud je doba dozvuku moc dlouhá, člověk slyší nepříjemné ozvěny, zvuk působí rozplizle, nesrozumitelně a ne moc prokresleně.

Základem kvalitní akustiky je mít zaprvé dobu dozvuku co nejvíce vyrovnanou na frekvencích 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz. Zadruhé, aby pohltivost nebyla moc vysoká a ani moc malá. To znamená, aby přímý akustický paprsek, který letí ze zdroje, doletěl k posluchači a na první stěně za ním rozumně utlumil tak, aby posluchač neseděl v poli odražených vln, a tyto odražené vlny se nemíchaly s vlnami přímými.



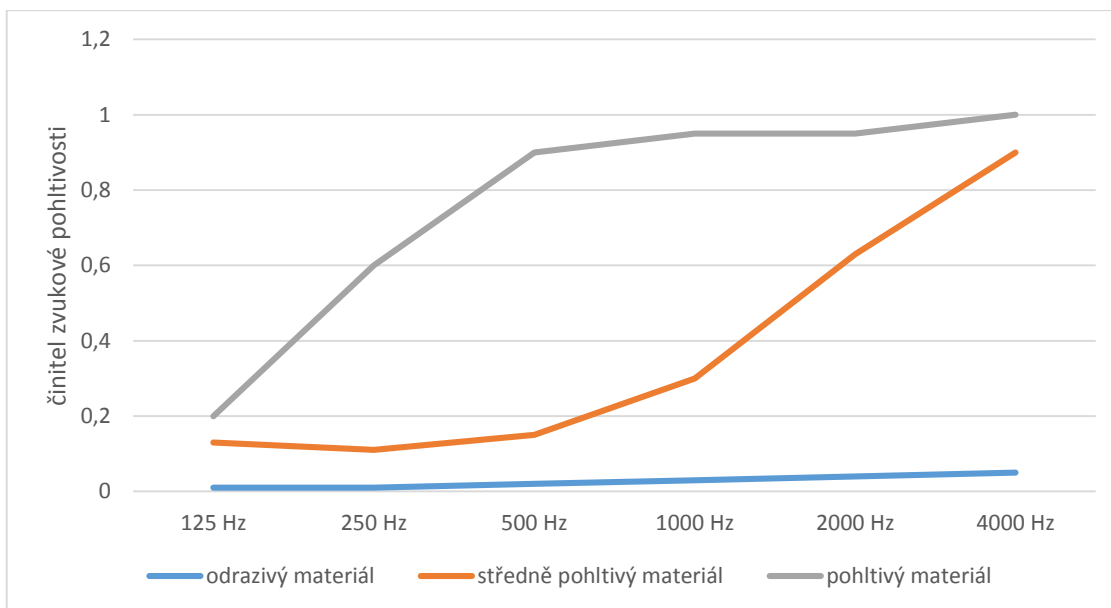
Graf 4: Doba dozvuku v prázdné a základně upravené místnosti

Myslím si, že každý už ve svém životě zažil aspon' jednou například malování pokoje. Když v takovém pokoji někdo něco vysloví, tak zaprvé se dané slovo šíří jako ozvěna, není tolik srozumitelné, a tím vlastně mnohem hůře zpracovatelné lidským mozkiem. Toto je přesně situace, kdy pohltivost daných stěn je velmi nízká. Pokud se jedná o standartní omítku, tak ta má pohltivost na úrovni 0.02, a díky tomu je doba dozvuku velmi dlouhá, protože paprsek, který dopadne na stěnu, se velmi málo pohltí a pokračuje v odrazech dále. Doba dozvuku v takové místnosti může celkem jednoduše překročit i 10 sekund, a za tuto dobu dojde řádově ke stovkám odrazů. Na druhou stranu může být situace, kdy je místnost do jisté míry přetlumená. Každý z nás určitě byl v moderních sálech multikin, kde když šel okolo stěn, které jsou velmi utlumené, tak musel mluvit velmi nahlas, aby vůbec bylo slyšet, co říká. V takových prostorách je naopak doba dozvuku velmi krátká a energie letících paprsků se již při prvním odrazu velmi utlumí.

Vzhledem k tomu, že je důležité mít co nejvíce vyrovnanou křivku doby dozvuku na různých frekvencích, tak prakticky nejtěžší frekvence k odladění bývají nižší frekvence, protože mají větší energii a na jejich útlum bývá zapotřebí až 10 centimetrů tlustý pohltivý materiál.

Optimální dobu dozvuku pro danou místnost si lze celkem snadno dopočítat pomocí Eyringova vztahu, který nám dá optimální dobu dozvuku pro danou místnost a její použití. V praxi je velký rozdíl, jestli se daná místnost bude používat pro poslech hudby, mluvené slovo a nebo jako multifunkční.

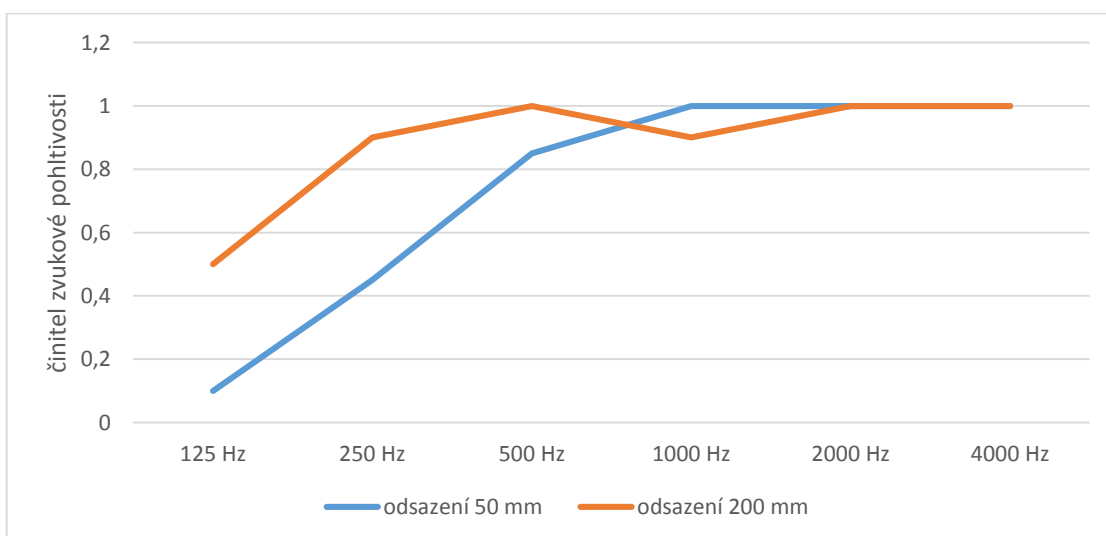
Střední absorpce ploch je parametr, který nám říká, jak na dané frekvenci jsou průměrně plochy pohltivé. Každý akusticky upravený materiál je standartně dodáván výrobcem již s platnou a laboratorně ověřenou hodnotou pohltivosti na frekvencích 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz.



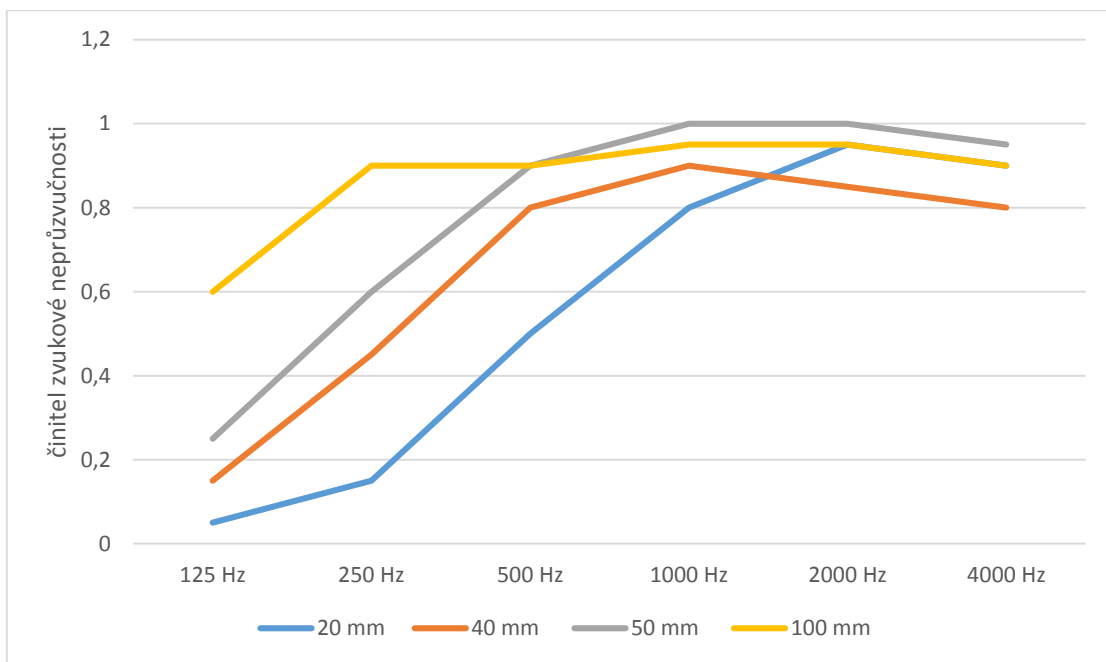
Graf 5: Pohltivost materiálů

Počet odrazů na jednotlivých plochách je důležitá informace hlavně pro automatický návrh akustických materiálů na dané plochy v místnosti. Vzhledem k tomu, že akusticky upravené materiály jsou drahé, tak je potřeba při jejich aplikacích být co nejvíce precizní, tak aby nedocházelo jednak k horší akustice a za druhé ke zbytečným výdajům na finální realizaci.

Další možností jak při stejných nákladech za akustický materiál zvýšit pohltivost je odsadit tento materiál od stropu a nebo o něco dražší varianta je znásobit jejich tloušťku, viz grafy Graf 6: Vliv odsazení akustického materiálu od stropu a Graf 7: Vliv tloušťky materiálu.



Graf 6: Vliv odsazení akustického materiálu od stropu



Graf 7: Vliv tloušťky materiálu

Funkcionalita, která mi udává počet odrazů na daných plochách, označuji za hlavní rozdíl mezi standartním výpočtem pomocí vzorečků a mezi výpočtem pomocí simulace. Díky tomu, že vím, na jakých plochách dochází k největšímu počtu odrazů, tak mohu na tyto plochy aplikovat bez starostí kvalitnější, a tedy i dražší materiály.

4 Návrh algoritmizace

Hlavní motivací této bakalářské práce bylo dokázat odsimulovat chování zvukového signálu o velký kus reálněji, než jsem to dělal v ročníkovém projektu pomocí vzorečků. Lákalo mě na tom pochopení a lepší představa, jak se vlastně zvuk chová v uzavřeném prostoru. Rozhodně to nebyla lehká věc, jak se na první pohled mohlo zdát. Když jsem používal vzorečky, měl jsem velikou výhodu v tom, že jsem přesně věděl, k čemu jaký slouží, a že jsou již dokázány.

Nejprve jsem si prošel několik principů, jak se zvuk chová, a poté jsem několik týdnů před samotným programováním jen přemýšlel nad tím, jaká cesta by byla asi nejvhodnější.

Velkou výhodou byl fakt, že jsem měl k dispozici dobrého konzultanta a výsledky z výpočtu ze softwaru z ročníkového projektu.

Dnešní standartní osobní počítače se zdají být na první pohled velmi výkonné, ale pro simulace opak je pravdou. Čím více bych se snažil přiblížit simulaci k realitě, tím více bych se pak dostával do problémů s výkonností PC. Při návrhu algoritmizace se objevily dva hlavní problémy: první z nich byl, jak co nejvíce reálně simulovat zvuk v uzavřené místnosti, a druhý problém, jak tuto simulaci naprogramovat, aby šla spustit na běžném PC.

První a nejsložitější princip, jak simulovat zvuk, byl princip šíření zvuku takovým způsobem, že od zdroje zvuku se zvuk šíří ve vlnách, a v každém bodě tato vlna je všesměrový zdroj zvuku sama o sobě. Tento princip jsem zavrhl, protože by byl absolutně nepoužitelný na jak co se týká paměťové, tak i výpočetní náročnosti.

První zjednodušení, co mě napadlo, bylo simulovat jen zvuk pomocí pohybujících se bodů, které opisují křivku vlnění zvuku na dané frekvenci, avšak pak jsem došel k zjednodušení, že ani není potřeba simulovat kmitání na frekvencích 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz.

Uvedu jednoduchý příklad pro demonstraci náročnosti základní simulace zvuku, kde dochází k interakcím mezi jednotlivými paprsky zvuku. Pro jednoduchost ho rozdělme na dvě části. Zaprvé na paměťovou náročnost a zadruhé výpočetní náročnost. Pro srovnání uvádím, že dnešní standartní osobní počítač má operační paměť na úrovni 4 - 8

GB a procesor většinou čtyřjádrový s taktovací frekvencí okolo 3,0 - 4,4 GHz.

Představme si situaci, kdy chceme odsimulovat 5s všesměrový signál, který v počátku času 0.0 s bude vybuzen Dirackovým impulsem, s přesností letu paprsku 10 cm. Zvukový signál se za standartních podmínek šíří rychlostí 330 m/s ve vzduchu, tedy 10 centimetrů uletí za pouhých 0.0003 s. Takže musíme každých 0.0003 sekundy vyslat do všech směrů nový signál, tedy během 5 sekund vyšleme 16 650 krát tento všesměrový signál. Pokud bychom zdroj zvuku nasimulovali pomocí všesměrového bodového zdroje a každý 1 stupeň bychom vyslali jeden paprsek, tak tento zdroj by obsahoval 64 800 paprsků.

Zprvé rozeberu paměťovou náročnost tohoto celkem jednoduchého příkladu.

U každého paprsku musím evidovat v operační paměti polohu v osách X, Y, Z, intenzitu zvuku a frekvenci. Všechny tyto hodnoty jsou typu float, který sám o sobě zabírá celkem 4 byty, tudíž celkem se jedná o 20 bytů paměti pro jeden paprsek.

Když si provedeme jednoduchý výpočet, dostáváme se k tomu, že za 5 sekund by bylo v dané místnosti 1,078 miliardy paprsků a pro uložení jen tohoto jediného zdroje by bylo potřeba přibližně 20,09 GB operační paměti.

Zadruhé zde rozeberu výpočetní složitost, kdyby docházelo k interakci mezi paprsky zvuku, tak v čase nula máme v místnosti 64 800 paprsků, v čase 1 s již ale 213 milionů a v čase 5s 1,067 miliardy. Za situace, kdy by toto nebylo optimalizováno, by jen v čase 1s bylo zapotřebí otestovat interakci každého paprsku s každým, tudíž bychom se pohybovali na úrovni čísla 226 845 000 miliard porovnání, což je gigantické číslo. Jen pro představu, kdyby trvalo porovnání, jestli dva paprsky mezi sebou interagují jen 20 procesorových instrukcí, tedy jedno jádro by bylo schopno porovnat 150 milionů porovnání, čtyři jádra 600 milionů porovnání za sekundu, tak by to zabralo 11,98 let. A to je jen výpočet po první sekundě a jeden krok výpočtu, kdy se posuneme o 0.0003 sekundy.

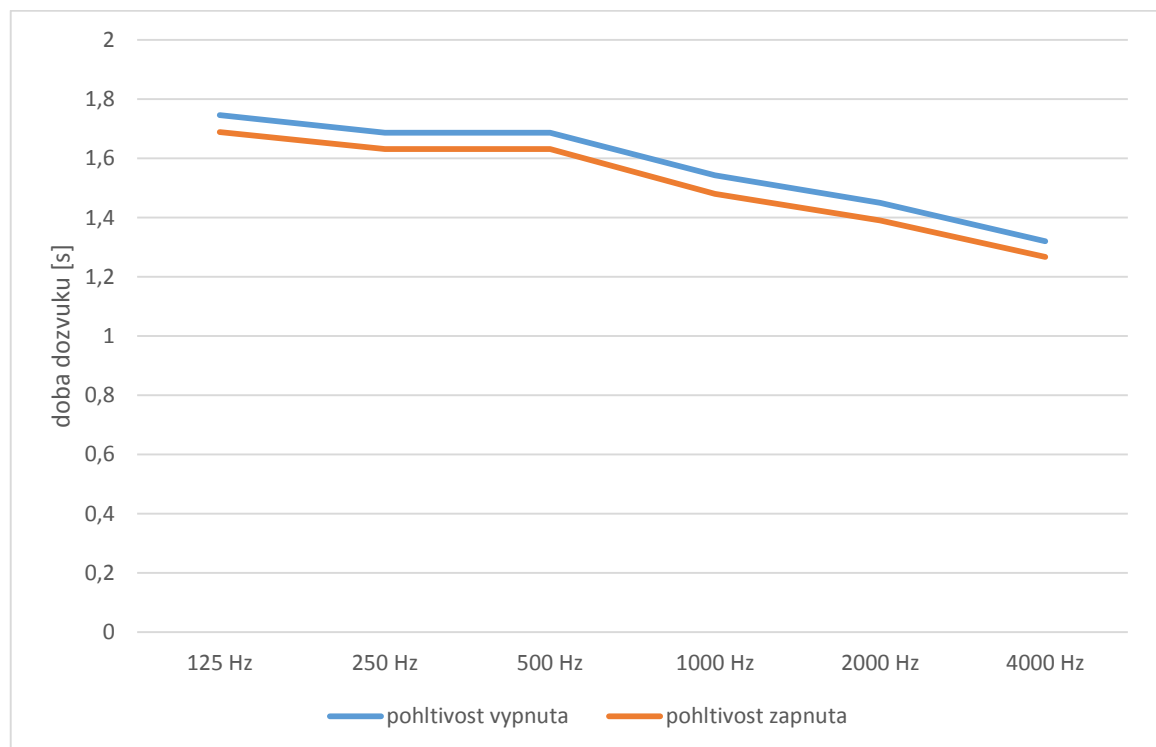
Tato operace by šla celkem elegantně optimalizovat tím, že bych rozložil danou místnost na milion krychlíček a v každé krychličce bych si zaznamenával aktuální paprsky v daný čas uvnitř. Tím za předpokladu rovnoměrné hustoty paprsků v místnosti bychom se dostali na 213 paprsků v každé krychličce, celkem by to bylo 22,79 miliard porovnání a trvalo by to 37,98 s. Zde je na první pohled evidentní, jak jednoduchá úprava výpočtu dokáže 9,94 milionkrát zrychlit výpočet při zachování stejné přesnosti.

Teoreticky by v difuzním poli paprsků nemělo docházet k interakcím, tudíž je nebudu

simulovat, ač se jedná o jeden bod z množiny možných parametrů simulace. Je velmi významný, protože hlavní rozdíl mezi situacemi, kdy mezi sebou paprsky mohou interagovat a situacemi, kdy mezi sebou nemohou interagovat, spočívá v tom, že při vypnutí interakce paprsků ušetřím obrovské množství paměti a gigantické množství výpočetního času procesoru.

Pro ilustraci: při optimalizaci situace bez simulace interakce paprsků potřebuji vždy v jeden čas si pamatovat údaje o 64 800 paprscích, tudíž mi stačí pouze 1,23 MB, což je více jak 16 tisíc krát méně než v případě, kdy interakce simuluju. Mnohem větší je rozdíl u výpočetního času, protože pro odsimulování mi stačí simulovat vždy jen let všech paprsků, tudíž třeba v čase 1 sekunda let 213 milionů paprsků, což je za standardní situace operace trvající méně jak jednu sekundu, čili 152 krát rychlejší. Na první pohled se zdá ten rozdíl nezas tak veliký oproti rozdílu u operační paměti, avšak to je situace v čase jedna sekunda, každou další sekundu se ten rozdíl exponenciálně zvyšuje.

Simulace má možnost vypnout/zapnout vliv útlumu vzduchu, hlavní rozdíl se pak projevuje až u větších místností. Ukázka vlivu pohltivosti vzduchu je vidět na Graf 8: Vliv pohltivosti vzduchu, místnost o objemu 500 metrů krychlových.



Graf 8: Vliv pohltivosti vzduchu

Finální verze funguje tím způsobem, že do prostředka místnosti, která je tvořena pouze materiálem o pohltivosti 0,02, umístím všesměrový zdroj, na tomto zdroji spustím impuls o hladině akustického tlaku 80 dB a sleduji všech 64 800 paprsků, dokud nedojde k poklesu průměrné hodnoty akustického tlaku všech paprsků o 60 dB. Poté se výpočet automaticky zastaví. Díky výpočtu získám informaci o počtu odrazů na jednotlivých plochách v místnosti, tyto plochy seřadím a poté rozdělím do 9 kategorií podle počtu odrazů. Prvních 6 kategorií je vyčleněno pro plochy stěn, stropu a zbylé tři pro podlahu. Poté nastává poslední fáze, a to nalezení nejlepší kombinace materiálů pro tyto skupiny. Na jedné straně díky Eyringovu vzorci přesně vím, jaké doby dozvuku chci dosáhnout, tudíž pak jednoduše vyberu variantu, která je tomuto optimu nejbližší. Tento výpočet pro 14 materiálů na stěny, strop a 6 materiálů na podlahu provede celkem 1 626 379 776 kombinací.

5 Ovládání programu

Program je naprogramován bez GUI, ovládá se tedy z příkazové řádky. Pro spuštění programu musí uživatel spustit soubor roomAcoustic.exe. Po spuštění se otevře příkazová řádka a vyzve uživatele k napsání cesty k souboru s nastavením výpočtu. V mém případě na lokálním počítači je to cesta C:/Users/Forex/Desktop/programSetup.txt. V tomto souboru lze nastavit parametry, viz Tabulka.

Tabulka 1: Formá souboru programSetup

| Pořadí | Rozsah hodnot | Obsah |
|--------|-------------------|---|
| 1 | 0/1 | Útlum vzduchu, 1 Ano, 0 Ne |
| 2 | 0 - 99 | Výchozí materiál pro podlahu |
| 3 | 0 - 99 | Výchozí materiál pro stěny |
| 4 | 0 - 99 | Výchozí materiál pro strop |
| 5 | 1 - 3 | Typ návrhu: 1 - multifunkční prostor, 2 - poslechová místnost, 3 kino |
| 6 | a-z, A-Z, :, /, . | Cesta k souboru s materiály |
| 7 | Integer | Rychlost zvuku |
| 8 | Float | Rozměr místnosti v ose X |
| 9 | Float | Rozměr místnosti v ose Y |
| 10 | Float | Rozměr místnosti v ose Z |
| 11 | Float | Poloha zdroje zvuku v ose X |
| 12 | Float | Poloha zdroje zvuku v ose Y |
| 13 | Float | Poloha zdroje zvuku v ose Z |
| 14 | 0 - 360 | Index Y paprsku, který chceme vypsát |
| 15 | 0 - 90, 270 - 360 | Index Z paprsku, který chceme vypsát |

Po zvolení správného souboru a stisknutí entru se spustí celý výpočet. Informace k aktuální simulaci se v reálném čase vypisují do příkazové řádky a také do souboru log.txt,

který se nachází ve stejném adresáři jako soubor roomAccoustic.exe. Po dokončení výpočtu se výsledky vypíší do souboru results.txt, který se také nachází ve stejné složce jako soubor roomAccoustic.exe.

Abychom mohli přidávat a odebírat materiály, tak zde zmíním také formát tohoto souboru.

Na každý řádek připadá právě jeden materiál. Jednotlivé klíčové informace se oddělují pomocí znaku ; a je důležité dodržovat přesné pořadí zápisu.

Tabulka 2: Formát souboru material.txt

| Pořadí | Rozsah hodnot | Obsah |
|--------|---------------|--|
| 1 | 0 - 99 | Index materiálu, unikátní |
| 2 | a-z, A-Z | Název |
| 3 | 0.000 - 1.000 | Pohltivost materiálu na 125 Hz |
| 4 | 0.000 - 1.000 | Pohltivost materiálu na 250 Hz |
| 5 | 0.000 - 1.000 | Pohltivost materiálu na 500 Hz |
| 6 | 0.000 - 1.000 | Pohltivost materiálu na 1 000 Hz |
| 7 | 0.000 - 1.000 | Pohltivost materiálu na 2 000 Hz |
| 8 | 0.000 - 1.000 | Pohltivost materiálu na 4 000 Hz |
| 9 | 1 - 3 | Aplikovatelnost materiálu: 1 - podlaha, strop i stěny, 2 strop i stěny a 3 pouze strop |

Do souboru results.txt se nejprve vypíší odsimulované hodnoty počtu odrazů na jednotlivých plochách, poté celkové počty odrazů jednotlivých skupin ploch, doba dozvuku místnosti s výchozími materiály na frekvencích 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz, vypočítané optimální materiály a jako poslední parametr výsledné doby dozvuku s navrhovanými materiály.

Funkcionality programu

1) Doba dozvuku

Dobu dozvuku program spočítá na těchto frekvencích: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz a 4 000 Hz. Výpočet proběhne na základě simulace vln zvuku z jednoho všesměrového zdroje, z kterého v čase nula vyšleme Dirackův impuls, a sledujeme pokles hladiny akustického tlaku o 60 dB. Navíc program zobrazuje kromě průměrné doby dozvuku také minimální a maximální dobu dozvuku.

2) Počet odrazů

V průběhu simulace dochází ke sledování jednotlivých parpsků zvuku. Každá plocha v místnosti, jako je podlaha, stěny a strop, je rozdělena na dílčí plošky. Každá dílčí ploška si uchovává informaci, kolikrát se od ní odrazila libovolná vlna zvuku. Po simulaci se pak provede statistické vyhodnocení plošek, kde probíhá nejvíce a nejméně odrazů, a tyto plošky jsou rozděleny do tříd, podle počtu odrazů.

3) Optimální návrh akustických materiálů

Tato funkcionality patří k těm nejsložitějším na celém softwaru. Na základě seřídění ploch do různých kvalitativních kategorií dojde poté k řádově stovkám iterací, v nichž se na dané plochy aplikují různé materiály, a na základě scóre optimality dojde k nalezení nejvíce optimální varianty. Scóre optimality funguje tím způsobem, že bere na jednotlivých frekvencích cílovou optimální hodnotu doby dozvuku vypočítanou na základě vztahu od pana Eyringa, a porovnává je s aktuálně vypočítanou, s důrazem na vyrovnanost. Není přínosné mít například na pěti ze šesti sledovaných frekvencích optimální hodnoty a na jedné absolutně mimo pásmo. Hlavní přednost této funkcionality je skutečnost, že program může nalézt nejvíce optimální variantu z velké databáze materiálů.

4) Hladina akustického tlaku v jednotlivých místech místnosti

Na základě zadaných parametrů zdrojů zvuku program automaticky zdroje umístí na dané pozice v místnosti a dojde k zapnutí simulace. Daný prostor je rozdělen na velké množství krychliček a každá tato krychlička se chová jako měřicí mikrofón. Zaznamenává jednotlivé průlety vln zvuku a přičítá jejich hodnotu akustického tlaku k celkové hodnotě akustického tlaku v daném místě. Tyto hodnoty jsou pak exportovány do barevného grafu, který je lépe čitelný pro člověka, než tisíce hodnot z jednotlivých bodů.

Mezi další funkcionality patří interaktivní výpis simulace v reálném čase, kdy uživatel vidí aktuální hodnoty jako jsou čas ve scéně, počet vln zvuku ve scéně, maximální, minimální a střední hodnota akustického tlaku zvolené zvukové vlny, maximální, minimální a střední hodnota akustického tlaku v prostoru.

6 Praktické ukázky výpočtů

6.1 Situace A

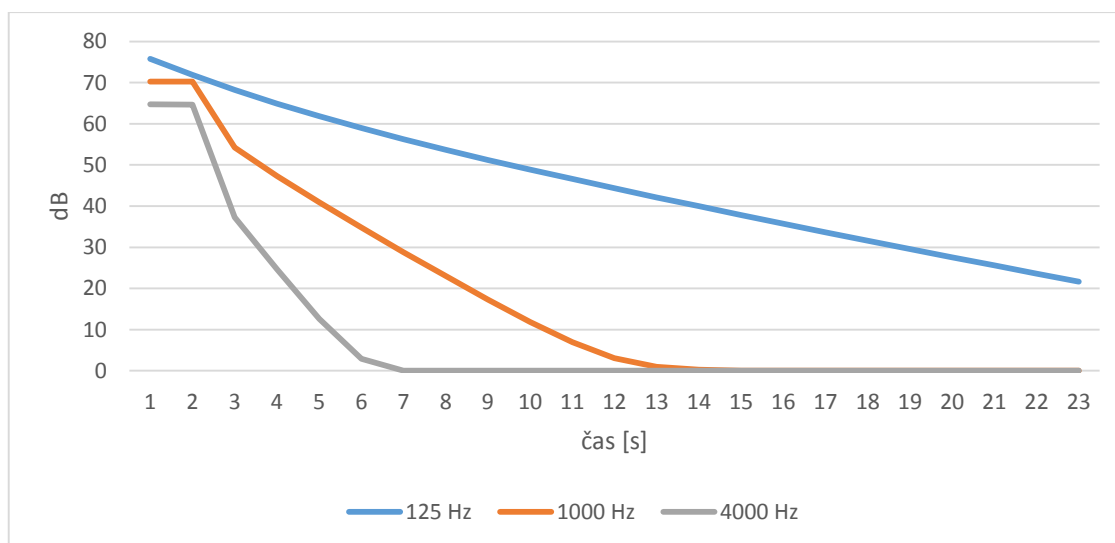
Akustika místnosti o půdorysu 10 x 10 m a výšce stropu 5 m. Zdroj umístěn uprostřed místnosti. Vliv útlumu vzduchu zapnut. Prázdná místnost, na podlaze linoleum, na stěnách a zdech omítka.

Tabulka 3: parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti

| Materiál | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|-----------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Linoleum | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Omítka strop | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Omítka zdi | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |

Tabulka 4: Vypočítané hodnoty

| Výpočet | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| doba dozvuku [s] | 23,86 | 23,86 | 23,86 | 8,53 | 6,99 | 4,38 |



Graf 9: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích

Při této simulaci došlo ke 116 000 000 odrazů paprsků od stěn. Celkem bylo vygenerováno v počátečním místě zdroje v čase nula 64 800 paprsků. Z výsledků každý na první pohled vidí, že takováto místnost není vhodná k žádné reálné aplikaci. Doba dozvuku na 125 - 500 Hz je velmi dlouhých 23,86 s, u vyšších frekvencí se tato doba výrazně snižuje. Je to dáno tím, že vyšší frekvence mají výrazně nižší energii než vyšší, a tudíž i materiály typu omítka nebo linoleum je dobře tlumí. Jakýkoliv zvukový signál v této místnosti by byl nesrozumitelný. Dalším výrazným faktorem, který ovlivňuje dobu dozvuku na vyšších frekvencích, je pohltivost vzduchu, jak je vidět z výsledků, tak i když mají materiály v místnosti na frekvencích od 1 000 Hz do 4 000 Hz stejnou pohltivost, tak doba dozvuku na 4 000 Hz je přibližně poloviční oproti době dozvuku na 1 000 Hz.

6.2 Situace B

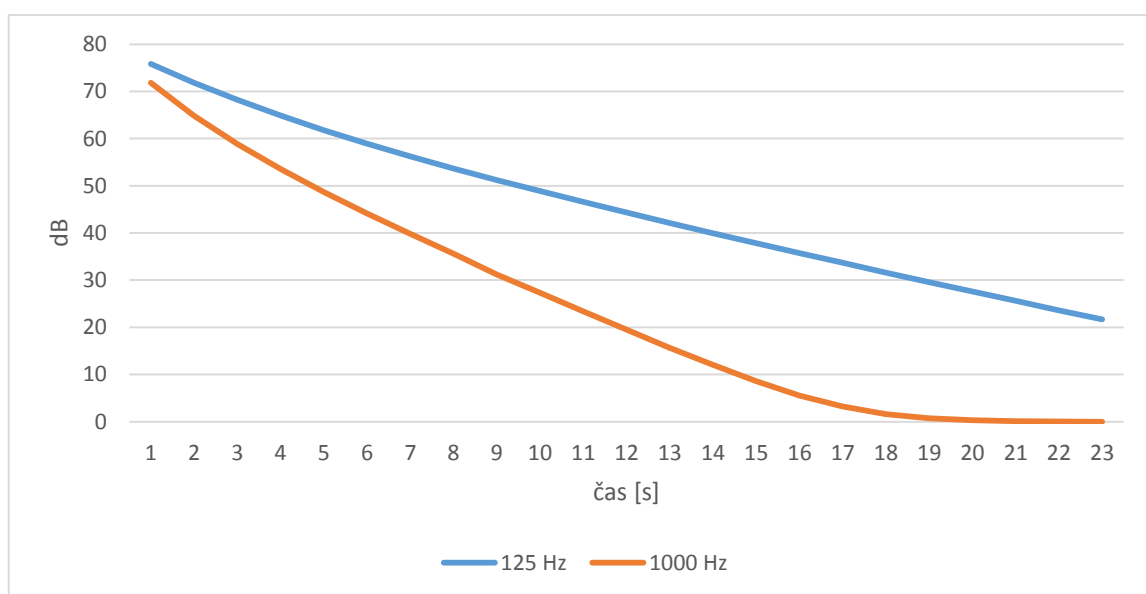
Akustika místnosti o půdorysu 10 x 10 m a výšce stropu 5 m. Zdroj umístěn uprostřed místnosti. Vliv útlumu vzduchu vypnut. Prázdná místnost, na podlaze linoleum, na stěnách a zdech omítka.

Tabulka 5: Parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti

| Materiál | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Linoleum | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Omítka strop | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Omítka zdi | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |

Tabulka 6: Vypočítané hodnoty

| Výpočet | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| doba dozvuku [s] | 23,86 | 23,86 | 23,20 | 11,86 | 11,86 | 11,86 |



Graf 10: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích

Tento výpočet se liší od výpočtu 6.1 A tím, že zde není brán do simulace útlum vzduchu. Díky tomu si můžeme všimnout, že na frekvencích 1 000 Hz až 4 000 Hz je doba dozvuku shodná. U frekvence 4 000 Hz rozdíl činí více jak dvoujnásobek doby dozvuku. Pokud porovnáme rozdíl u frekvencí 125 Hz, 250 Hz a 500 Hz, tak vidíme, že rozdíl je prakticky nulový.

6.3 Situace C

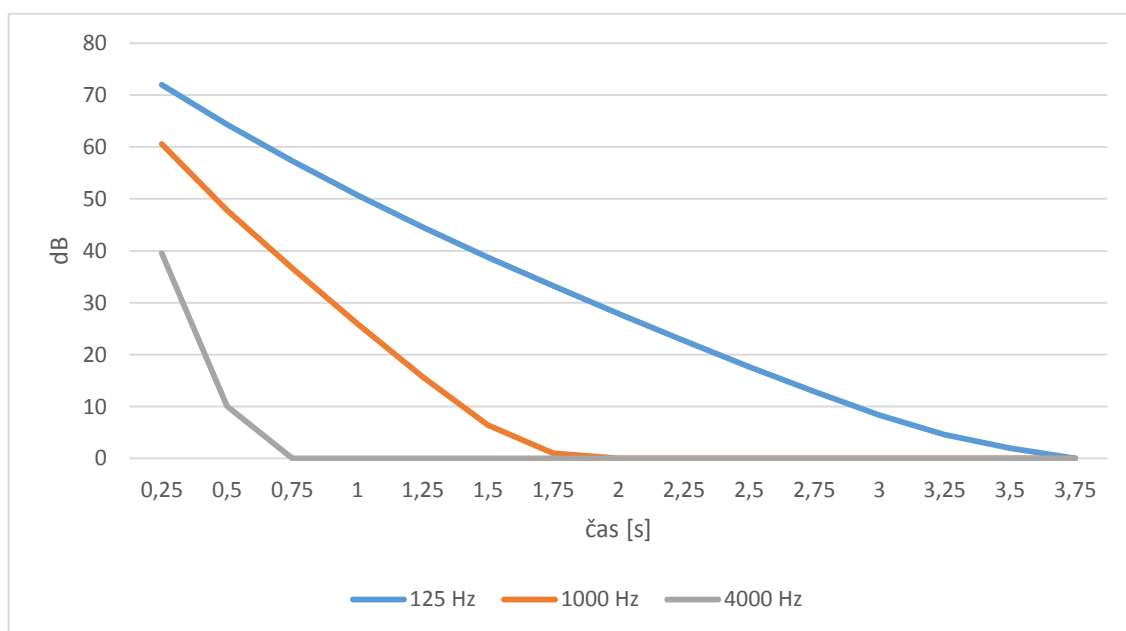
Akustika místnosti o půdorysu 10 x 10 m a výšce stropu 5 m. Zdroj umístěn uprostřed místnosti. Vliv útlumu vzduchu vypnut. Prázdná místnost, na podlaze koberec, na stropě dřevovláknitá deska a na zdech omítka.

Tabulka 7: Parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti

| Materiál | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Koberec kokosový | 0,17 | 0,06 | 0,11 | 0,19 | 0,37 | 0,80 |
| Dřevovláknitá měkká deska | 0,10 | 0,15 | 0,55 | 0,52 | 0,50 | 0,45 |
| Omítka zdi | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |

Tabulka 8: Vypočítané hodnoty

| Výpočet | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| doba dozvuku [s] | 2,39 | 3,75 | 2,00 | 1,14 | 0,59 | 0,41 |



Graf 11: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích

Na tomto příkladu vidíme, jak již vložením jednoduchým materiálů do místnosti jako je koberec na podlahu a nebo měkká deska na stěny diametrálně změníme dobu dozvuku. Skoro na všech frekvencích je změna skoro až desetinásobná. Avšak ani tato kombinace materiálů v místnosti nestačí na to, aby se z této místnosti stala dobře akusticky upravená místnost. Jsou zde dva problémy: první je ten, že stále doba dozvuku na úrovni 2 - 3 sekund je stále vysoká a druhý je veliká nerovnováha mezi dobou dozvuku na jednotlivých frekvencích.

6.4 Situace D

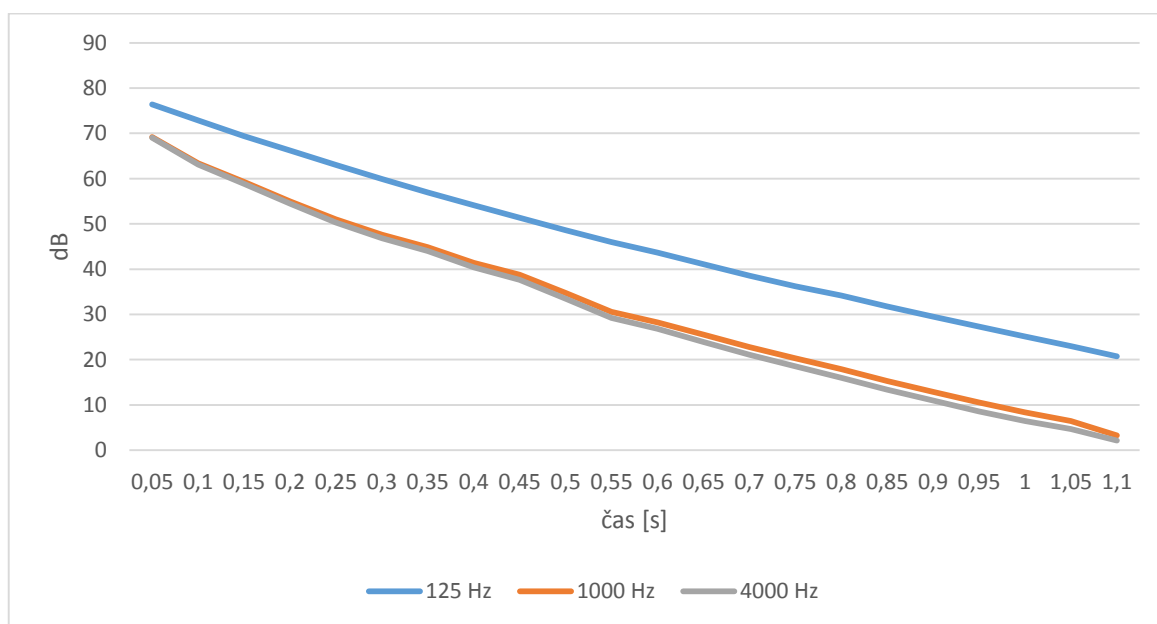
Akustika místnosti o půdorysu 10 x 10 m a výšce stropu 5 m. Zdroj umístěn uprostřed místnosti. Vliv útlumu vzduchu vypnut. Prázdná místnost, na podlaze beton vylehčený, na stropě beton vylehčený a na stěnách Ecophon Master A.

Tabulka 9: Parametry pohltivosti materiálů v dané místnosti

| Materiál | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Beton vylehčený | 0,20 | 0,22 | 0,23 | 0,25 | 0,21 | 0,26 |
| Beton vylehčený | 0,20 | 0,22 | 0,23 | 0,25 | 0,21 | 0,26 |
| Ecophon Master A | 0,20 | 0,70 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Tabulka 10: Vypočítané hodnoty

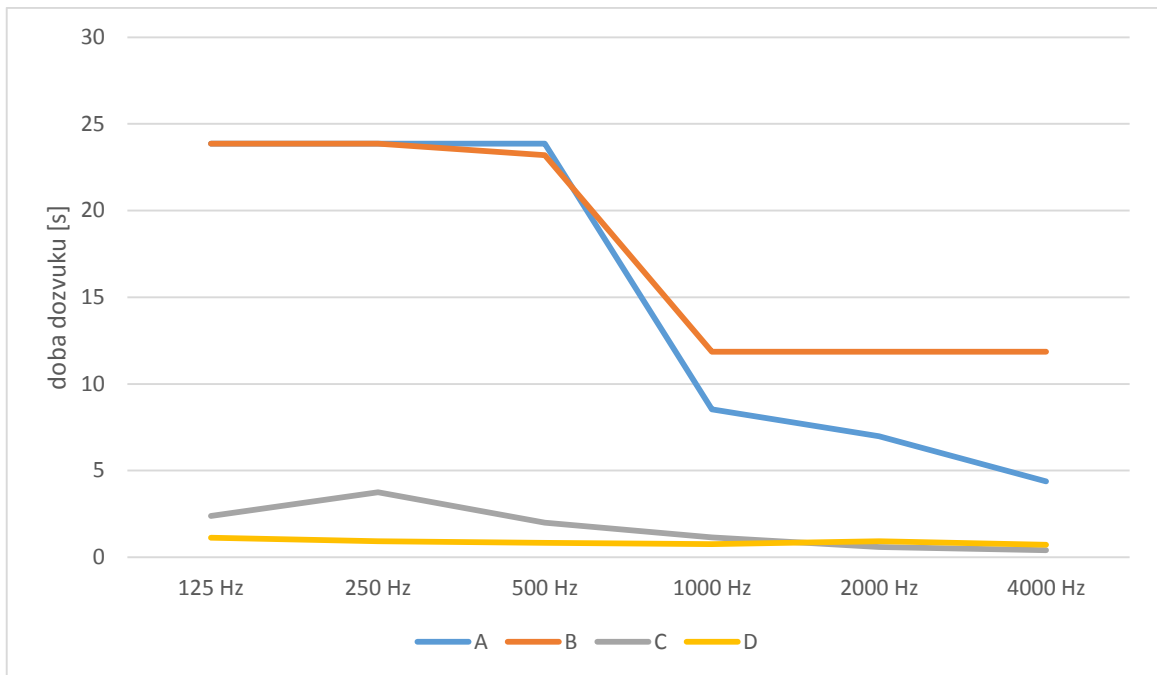
| Výpočet | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| doba dozvuku [s] | 1,12 | 0,92 | 0,83 | 0,76 | 0,92 | 0,72 |



Graf 12: Útlum zvuku na jednotlivých frekvencích

Takto upravená místnost již splňuje všechny předpoklady k tomu, aby se dala označit jako akusticky dobře upravená. Zprvé, doba dozvuku by se pro tento objem místnosti měla pohybovat na úrovni 0,91 s pokud bychom ji chtěly použít jako víceúčelový sál. Zadruhé doba dozvuku je ve všech pásmech velmi vyrovnána.

7 Zhodnocení výsledků



Graf 13: Porovnání simulací

Na zvolených simulacích jsem chtěl demonstrovat několik důležitých jevů: zaprvé vliv útlumu vzduchu pro vyšší frekvence, zadruhé velké rozdíly mezi základně upravenou místností a neupravenou místností. První jev je vidět při porovnání výsledků z simulace A

a simulace B, kdy prakticky při nízkých frekvencích se křivky kopírují, avšak u vyšších frekvencí nastává veliký rozdíl. Druhý jev je na první pohled vidět při porovnání simulací A, B se simulacemi C a D, ten rozdíl je naprosto diametrální.

8 Automatický návrh vs. optimum

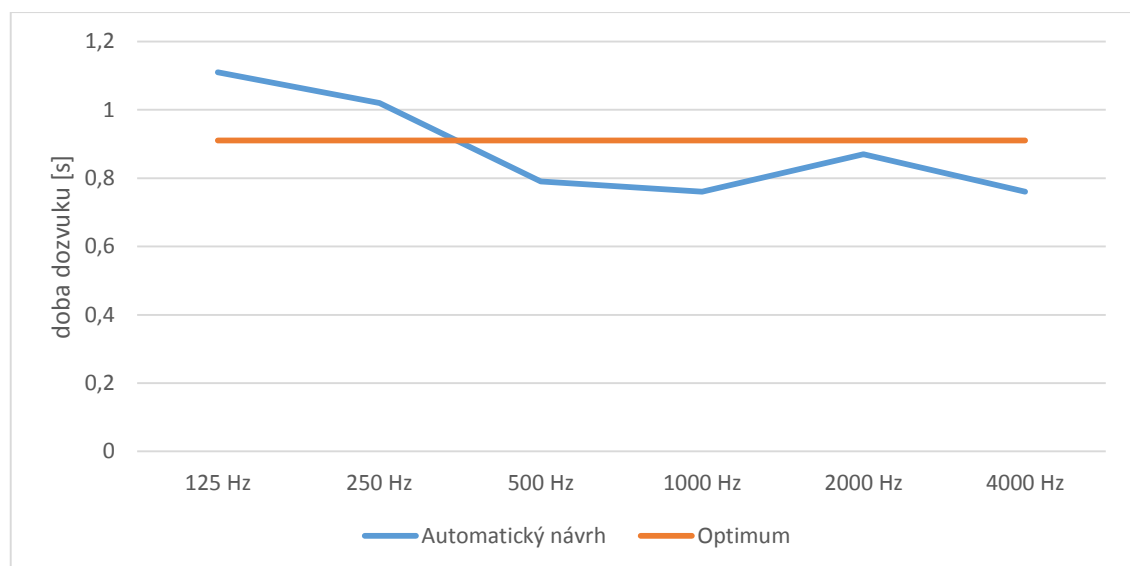
Automatický návrh materiálů pro akustickou úpravu mi pro místnost 10 x 10 m s výškou 5 m navrhl tyto materiály:

Tabulka 11: Navrhnuté materiály

| Skupina | Materiál |
|---------|------------------------------|
| 1 | Deska z pěnového polystyrenu |
| 2 | Deska z pěnového polystyrenu |
| 3 | Koberec plysový |
| 4 | Deska z pěnového polystyrenu |
| 5 | Ecophon Focus A |
| 6 | Beton vylehčený |
| 7 | Beton vylehčený |

Tabulka 12: Vypočítané hodnoty

| Výpočet | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| doba dozvuku [s] | 1,11 | 1,02 | 0,79 | 0,76 | 0,87 | 0,76 |



Graf 14: Automatický návrh vs. optimum

Z grafu je patrné, že automatický návrh je velice blízko optimu. Prakticky by volba materiálu šla vylepšit dvěma způsoby: prvním z nich je vytvořit více skupin ploch a pro ně vybírat materiály a druhý z nich je zvětšit množství materiálů v databázi a tím umožnit vyhledat programu vhodnější materiály na dané plochy.

9 Porovnání výpočtu s výsledky výpočtu pomocí Sabineho vzorce

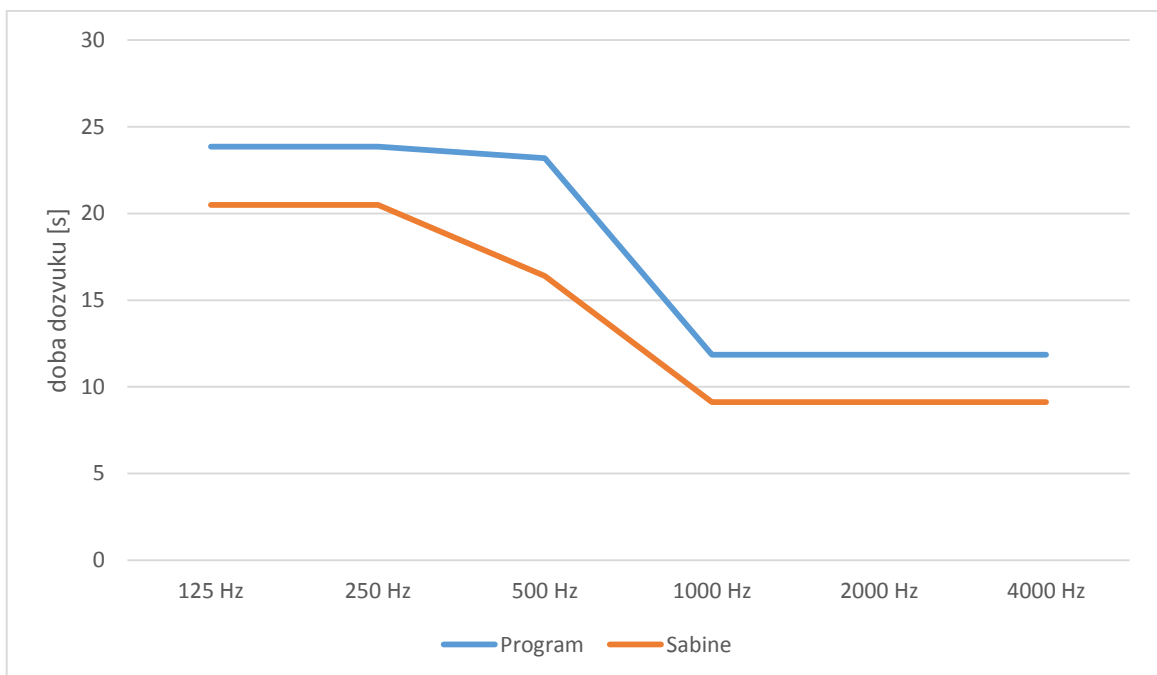
Pro porovnání jsem vybral simulaci 6.2 B.

Tabulka 13: Průměrná pohltivost materiálů

| Materiál | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Průměrná pohltivost | 0,01 | 0,01 | 0,0125 | 0,0225 | 0,0225 | 0,0225 |

Tabulka 14: Vypočítané hodnoty podle Sabineho

| Výpočet | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| doba dozvuku [s] | 20,50 | 20,50 | 16,4 | 9,11 | 9,11 | 9,11 |



Graf 15: Program vs. Sabine

Rozdíl mezi hodnotami vypočítanými pomocí Sabineho metody a simulací mého programu se pohybuje okolo 14% na 125 Hz až po 29% odchylku u 500 Hz. Průměrná odchylka je na úrovni 21% což považuji za celkem přijatelnou. Abych mohl lépe optimalizovat simulaci, bylo by dobré ověřit si výsledky výpočtů také na reálném měření.

10 Možnosti dalšího vývoje a vylepšení programu:

Modul pro export místnosti z 3DS Max

Nyní v této verzi softwaru je k dispozici možnost vypočítávat pouze místnosti, které mají kolmě stěny, tedy mají tvar krychle nebo kvádrů. Na druhou stranu výpočetní jádro programu umožňuje vypočítávat odrazy v místnosti s libovolnými stěnami, ale to nastavit pomocí jednoduchého rozhraní by nebylo vůbec jednoduché, proto jako další rozšíření bych viděl exportní modul, který by šel například přidat do velmi používaného 3D softwaru Autodesk 3DS Max. Tento modul by umožňoval vymodelovanou místnost v 3D softwaru vyexportovat do vlastního formátu a nebo nějakého meziformátu, z kterého bych pak mohl danou místnost načíst do softwaru pro simulaci zvuku. Tím by se velmi rozšířila možnost použití tohoto softwaru. Šlo by to naprogramovat v interním skriptovacím jazyce MaxScript. Toto rozšíření určitě do budoucna plánuji.

Webový portál pro výpočet akustiky

Další možností rozšíření tohoto softwaru by mohl být webový portál, který by se buď specializoval jen na výpočet akustických parametrů místnosti nebo kombinace eshopu a výpočetního modulu, který by pro zadané parametry místnosti mohl vypočítat ideální rozložení materiálů v místnosti a zkombynoval bych to s okamžitou nabídkou k nákupu těchto materiálů.

Zvětšení databáze materiálů

Nyní má databáze materiálů přibližně 50 různých materiálů. Logicky pro vylepšení a lepší specializaci by šlo rozšířit databázi těchto materiálů. Dalším celkem zajímavou možností by mohlo být rozřídít materiály do různých kategorií podle typu povrchu, pohltivosti a ceny.

Modul pro export animace simulace do 3DS Max

Při simulaci zvuku v mém softwaru mám možnost získávat veliké množství dat, které nyní nikde neprezentuji a nebo neexportuji. Celkem zajímavou možností by bylo zaznamenávat dráhu letu jednotlivých vln, vypisovat jejich pozice X, Y, Z a čas T do externího souboru například ve standardním formátu .txt a poté vytvořit modul pro načítání a interpretaci těchto dat v 3D programu Autodesk 3DS Max v interním skriptovacím jazyce Maxscript. Po načtení těchto dat by se pak dala spustit animace a vizualizovat tím simulace zvuku. Toto by se dalo poté vyrenderovat ve formě videa.

Modul pro akceleraci výpočtu na grafické kartě

Díky tomu, že v rámci optimalizace simulace se mi povedlo převést tuto úlohu do stavu, kdy lze použít ve velkém paralelizace, tak mi hnedka vytanula na mysly možnost akcelarovat danou simulaci na grafické kartě. Hlavní výhodou grafických karet značky Nvidia řady například GeForce, které se primárně používají pro hraní počítačových her, je obrovské množství paralelních jader, tzv. CUDA jader. Například vlajková loď Nvidia GeForce GTX Titan X má ve svém GPU 3 072 jader taktovaných na 1000 MHz. Samozřejmě jedno jádro grafické karty není ekvivalentní s jedním jádrem procesoru, má menší a méně komplikovanou instrukční sadu, takže za jeden takt neudělá stejný množství operací, ale v aplikaci simulace to ani není zapotřebí. Jedinou komplikací, kterou vidím v použití k akceleraci výpočtu grafickou kartu je použití specializovaného development kitu od společnosti Nvidia, který bych musel nejprve důkladně prostudovat a naučit se.

11 Hodnocení práce:

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se se základy stavební akustiky, výpočty akustických polí, měřeními akustických parametrů místnosti, numerickými metodami výpočtu akustických polí a vybrat vhodnou metodu pro implementaci simulace zvuku a dosažené výsledky zhodnotit.

Programování a náplň této bakalářské práce se mi líbila, i když to nebyl úplně jednoduchý problém k vyřešení. Před samotným programováním jsem strávil velké množství času přemýšlením nad tím, jak simulaci zvuku naprogramovat tak, abych se dostal k předpokládaným výsledkům pokud možno na standardním PC a v relativně krátkém výpočetním čase. Asi největší obavu jsem měl z toho, jestli mnou zvolený postup bude vypočítávat aspoň trochu relevantní výsledky, protože jsem šel relativně neprošlapanou cestou. V ročníkovém projektu jsem měl velikou výhodu v tom, že jsem využíval již dokázané vzorce, tedy stačilo pracovat přesně podle postupu jejich použití, avšak v této bakalářské práci jsem musel vymyslet vlastní postup.

Velice mne potěšilo, když po první simulaci jsem došel k výsledku doby dozvuku místnosti, který se lišil od doby dozvuku vypočítané podle Sabineho vzorce pouze o 20%, takže mi to řádově vyšlo. Nejhorší by byla situace, kdybych se dostal absolutně do jiného řádu. V další fázi vývoje bych chtěl strávit několik dní v měřicí komoře, abych si mohl některé myšlenky také otestovat pomocí reálných měření, a díky tomu mít možnost porovnat výsledky simulace s výsledky měření.

Program bych chtěl doladit do takové podoby, aby jeho výpočetní jádro bylo možno používat pro reálné automatické návrhy akustických úprav, hlavně poslechových místností.

Cíle bakalářské práce jsem splnil, avšak mám ještě řadu myšlenek, jak daný software vylepšit a posunout dál.

12 Zdroje:

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění* 1. vydání. Praha : Nakladatelství Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3
- [2] PLÍVA, Z., J. DRÁBKOVÁ, J. KOPRNICKÝ a L. PETRŽÍLKA. *Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací*. 2. upravené vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2014. ISBN 978-80-7494-049-1.
- [3] GINN, K.B., SC. M., *Architectural Acoustics* 2nd edition., November 1978, ISBN 87 87355 24 8
- [4] Brüel & Kjær, *Sound Intesity* [Online], vydáno 1993
Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0476.pdf>
- [5] Brüel & Kjær, *Measuring Sound* [Online], vydáno 1984
Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0047.pdf>
- [6] Brüel & Kjær, *Noise Control* [Online], vydáno 1986
Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bn1299.pdf>
- [7] ČSN 73 0525. *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1998.
- [8] ČSN 73 0527. *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005.