

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

2021

Ing. Jiří Sika

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2031 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302V019 Stavba strojů a zařízení

DISERTAČNÍ PRÁCE

Predikce hluku s podporou měření a počítačových simulací

Autor: **Ing. Jiří Sika**

Školitel: **doc. Ing. Miloslav Kepka, CSc.**

Akademický rok 2020/2021

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma: *Predikce hluku s podporou měření a počítačových simulací* vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji mému školiteli docentovi Miloslavovi Kepkovi za jeho trpělivost a důvěru, kterou mi věnoval během celého mého studia. Přes jeho obrovské pracovní vytížení mi dokázal být oporou a spolehlivým rádčem v průběhu celého mého studia. Poté bych rád poděkoval Michalovi Křížkovi, který byl zejména velkou a nezištnou pomocí na poli teoretickém. Byl nejen pohotovým spoluvůrcem kódu v užitém výpočetním prostředí, ale i velkou inspirací a důležitým povzbuzením při náročných praktických experimentech.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Sika	Jméno Jiří
STUDIJNÍ OBOR	Stavba strojů a zařízení	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Kepka, CSc.	Jméno Miloslav
PRACOVISŤE VEDOUCÍHO	RTI Regionální technologický institut	
DRUH PRÁCE	Disertační práce	
NÁZEV PRÁCE	Predikce hluku s podporou měření a počítačových simulací	

Fakulta: Strojní
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Rok odevzdání: 2021

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	87	Textová část	76	Grafická část	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Cílem práce bylo vytvořit použitelný výpočtový postup pro predikci hladin hluku v uzavřených místnostech, jehož největším přínosem je možnost pohotového propočtu změn hladin akustického tlaku po provedených akustických úpravách. Výpočetní postup je založen na metodě akustického vyzařování, v difuzním akustickém poli v uzavřeném prostoru, se zaměřením na výpočty v hlukem zatížených provozech jako jsou výrobní haly a jiné podobné provozy. Ověření programu, pracujícího na platformě LabVIEW bylo provedeno měřením v reálných úlohách.
KLÍČOVÁ SLOVA	akustické výpočty, predikce hluku, akustické vyzařování, přenos zvuku, akustické úpravy

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Sika	Name Jiří
FIELD OF STUDY	Design of Machines and Equipment	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Kepka, CSc.	Name Miloslav
INSTITUTION	RTI Regional Technological Institute	
TYPE OF WORK	Dissertation	
TITLE OF THE WORK	Prediction of noise based on measurement and computer simulation	

Faculty: Mechanical Engineering
 Field of study: Design of Machines and Equipment
 Submitted in: 2021

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	87	Text part	76	Graphical part	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of the work was to create a usable calculation procedure for the prediction of noise levels in closed rooms. The biggest benefit of this computational approach is the possibility of rapid calculation of changes in sound pressure levels after acoustic adjustments. The calculation procedure is based on the method of acoustic radiation within a diffuse acoustic field in enclosed rooms. The main emphasis is on calculations in noisy rooms, such as production halls and other similar workshops. The final program operating on the LabVIEW platform was verified by real measurements in the examined room.
KEY WORDS	acoustic calculations, noise prediction, acoustic radiation, sound transmission, acoustic treatment

KURZFASSUNG

AUTOR	Nachname Ing. Jiří	Name Sika
STUDIENFACH	Konstruktion von Maschinen und Geräten	
BETREUER	Nachname doc. Ing. Kepka, CSc.	Name Miloslav
INSTITUTION	Konstruktion von Maschinen und Geräten	
ART DER ARBEIT	Dissertation	
TITEL	Vorhersage von Geräuschen basierend auf Messungen und Computersimulation	

Fakultät: Maschinenbau
 Katheder: Konstruktion von Maschinen und Geräten
 Abgeben: 2021

ANZAHL VON SEITEN (A4 a eq. A4)

Total	87	Text teile	76	Grafik	11
--------------	----	-------------------	----	---------------	----

KURZBESCHREIBUNG	Ziel der Arbeit war es, ein brauchbares Berechnungsverfahren für die Vorhersage des Geräuschpegels in geschlossenen Räumen zu schaffen. Der größte Vorteil dieses rechnerischen Ansatzes ist die Möglichkeit, Änderungen des Schalldruckpegels nach akustischen Anpassungen schnell zu berechnen. Das Berechnungsverfahren basiert auf der Methode der Schallstrahlung innerhalb eines diffusen Schallfeldes in geschlossenen Räumen. Das Hauptaugenmerk liegt auf Berechnungen in lauten Räumen wie Produktionshallen und ähnlichen Werkstätten. Das endgültige Programm auf der LabVIEW-Plattform wurde durch reale Messungen im untersuchten Raum verifiziert.
SCHLÜSSELWÖRTER	Geräuschvorhersage, Schallstrahlung, Schallübertragung, Schallbehandlung

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk	12
Glosář	13
1. Úvod.....	15
1.1 Motivace pro výpočtová řešení v oblasti akustiky	15
1.2 Celkový rámec disertační práce	16
1.3 Struktura disertační práce	17
2. Přehled výpočtových nástrojů a jejich použití v oblasti prostorové akustiky	19
2.1 Deterministické modely - FEM - metody konečných prvků	20
2.2 Deterministické modely - BEM - Metoda hraničních prvků	21
2.3 SEA - Statistická Energetická Analýza	22
2.4 GA - Geometrická akustika	23
2.5 Akustické vyzařování	25
3. Stručné základy prostorové akustiky, základní pojmy a veličiny.....	28
3.1 Prostorová akustika – vlnová rovnice	28
3.2 Akustická pole v uzavřeném prostoru.....	32
3.3 Souvislost akustických veličin.....	36
3.4 Mechanické zdroje hluku	37
3.5 Koeficienty absorpce povrchu místnosti.....	38
4. Výpočtový program pro predikční akustické výpočty	39
4.1 Teorie pro sestavení programu pro vyzařování z elementů	40
4.2 Popis programu pro výpočet šíření akustické energie v uzavřeném prostoru ..	41
4.3 Experimentální ověření modelování šíření hluku v uzavřeném prostoru.....	45
4.4 Experimentální ověření - modelování šíření hluku ve výrobní hale.....	49
4.5 Měření hladin hluku v čerpadlové místnosti.....	55
5. Závěr	71
Citovaná literatura	74

Seznam obrázků

<i>Obrázek 2-1 - Řešená úloha vyzářování hluku metodou BEM v programu NX Siemens...</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2-2 - Řešená úloha šíření hluku v laboratořích RTI metodou SEA [16].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2-3 - Použitelnost metod v závislosti na typu řešené úlohy</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 2-4 - Šířící se akustická energie po dopadu paprsku na odrazovou plochu [27].</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 2-5 - Přehled metod pro modelování šíření zvuku v uzavřených místnostech</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3-1 - Akustický tlak v akustickém poli</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 3-2 - Akustické pole v uzavřeném prostoru.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 3-3 - Akustické pole v uzavřeném prostoru.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 3-4 - Rozložení akustického výkonu při dopadu zvuku na překážku</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 3-5 - Měření absorpčních charakteristik za pomoci impedanční trubice.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 4-1 - Výpočet vyzářování z elementu</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 4-2 - Blokový diagram výpočtu programu</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 4-3 - Jedna z prvních verzí programu - model prostoru ve tvaru písmene L.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 4-4 - Vytvoření modelu všech zvuko-odrazivých povrchů</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 4-5 - Vytvoření sítě všech zvuko odrazivých povrchů</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 4-6 - Ukázka pokročilejšího modelu kancelářské místnosti</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 4-7 - Množství energie dopadajícího na jednotlivé elementy</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 4-8 - Výpočet energií dopadajících na elementy v místnosti při 125 Hz</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 4-9 - Výpočet energií dopadajících na elementy v místnosti při 800 Hz</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 4-10 - Výpočet energií dopadajících na elementy v místnosti při 6300 Hz.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 4-11 - Model návrhu obložení krytu čerpadla zvuko-izolačními panely</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 4-12 - Model návrhu obložení krytu čerpadla zvukoizolačními panely.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 4-13 - Model návrhu obložení krytu čerpadla zvukoizolačními panely.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 4-14 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 1. pozici mikrofonu</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 4-15 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 2. pozici mikrofonu</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 4-16 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 3. pozici mikrofonu</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 4-17 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 4. pozici mikrofonu</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 4-18 - Změřené třetino oktávové spektrum pro 4. pozici mikrofonu</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 4-19 - Změřené třetino oktávové spektrum pro 4. pozici mikrofonu</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 4-20 - Rozložení mikrofonů v testované místnosti olejového hospodářství.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 4-21 - Testovaná místnosti olejového hospodářství s čerpadly</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 4-22 - Detailní pohled na čerpadla umístěná v místnosti</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 4-23 - Pohled na obloženou stěnou akustickým molitanem</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 4-24 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro model místnosti bez obložení ..</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 4-25 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro model místnosti s obložením ...</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 4-26 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro model místnosti s obložením ...</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 4-27 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro mikrofon č. 1 a různá obložení</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 4-28 - Změřena CPB spektra z mikrofonu č. 5 pro varianty s a bez obložení.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 4-29 - Vyzářování na okolní stěny v místnosti</i>	<i>61</i>
<i>Obrázky 4-30 - Výpočet energií na mikrofon č. 1 a 2 z elementů v místnosti</i>	<i>62</i>
<i>Obrázky 4-31 - Výpočet energií na mikrofon č. 3 a. 4 z elementů v místnosti</i>	<i>62</i>
<i>Obrázky 4-32 - Výpočet energií na mikrofon č. 5 a 6 z elementů v místnosti</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 4-33 - Výpočet energie vyzářené z definovaného elementu</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 4-34 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 1.....</i>	<i>64</i>

<i>Obrázek 4-35 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 4-36 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 2</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 4-37 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 4-38 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 3</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 4-39 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 4-40 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 4</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 4-41 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 4-42 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 5</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 4-43 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 4-44 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 6</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 4-45 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 4-46 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 7</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 4-47 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 0-1 - Akustická pěna 25 mm</i>	<i>i</i>
<i>Obrázek 0-2 - Bazotec 40 mm</i>	<i>i</i>
<i>Obrázek 0-3 - Molitan 70 mm - jehlany</i>	<i>ii</i>
<i>Obrázek 0-4 - Molitan 70mm hladká deska</i>	<i>ii</i>
<i>Obrázek 0-5 - Overlay graf hluk motor M1</i>	<i>iii</i>
<i>Obrázek 0-6 - Overlay 1/3 oktávové spektrum</i>	<i>iii</i>
<i>Obrázek 0-7 - Overlay 1/3 oktávové spektrum</i>	<i>iii</i>
<i>Obrázek 0-8 - Struktura programu v prostředí LabVIEW</i>	<i>iv</i>
<i>Obrázek 0-9 - Struktura programu v prostředí LabVIEW</i>	<i>v</i>
<i>Obrázek 0-10 - Struktura programu v prostředí LabVIEW</i>	<i>vi</i>
<i>Obrázek 0-11 - Okno programu – záložka import sítě</i>	<i>vii</i>
<i>Obrázek 0-12 - Okno programu – záložka zjemnění sítě</i>	<i>vii</i>
<i>Obrázek 0-13 - Okno programu – přiřazení absorpčních charakteristik</i>	<i>viii</i>
<i>Obrázek 0-14 - Okno programu – záložka přiřazení zdrojů</i>	<i>viii</i>
<i>Obrázek 0-15 - Okno programu – záložka výpočet</i>	<i>ix</i>
<i>Obrázek 0-16 - Okno programu – záložka interakce</i>	<i>ix</i>
<i>Obrázek 0-17 - Okno programu – zobrazení výpočtu</i>	<i>x</i>
<i>Obrázek 0-18 - Okno programu – výpočet hladin mikrofonů</i>	<i>x</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 4-1 – Orientační tabulka změřených absorpčních koeficientů</i>	<i>58</i>
---	-----------

Seznam zkratk

AML	automated mash layer
ART	acoustic radiance transfer
BEM	boundary element method
BT	beam tracing
BTM	Biot-Tolstoy-Medwin diffraction model
CT	cone tracing
DWG	Digital waveguide mesh
FDTD	finite difference time domain
FSI	fluid structure interaction
FEM	finite element method
GA	geometric acoustics
GTD	Geometrical theory of diffraction
GUI	graphic user interface
ISM	Image-source method
ISO	International standardization organization
PT	particle tracing
RT	ray tracing
SEA	statistical energy analysis
SPL	sound pressure level
SSAR	steady state acoustic radiosity
TLM	Transmission line matrix
UTD	universal theory of diffraction

Glosář

akustická energie	měřena v joulech [J], je časově-plošným integrálem normálové složky akustické intenzity přes uzavřenou smyšlenou plochu, jenž je reálnou složkou součinu okamžitého akustického tlaku a akustické rychlosti
akustická impedance	definována na stanovené ploše, podíl akustického tlaku a objemové rychlosti procházející touto plochou
akustická výchylka	efektivní hodnota okamžitých výchylek částice za daný časový interval
akustická rychlost	efektivní hodnota okamžitých rychlostí částice za daný časový interval
akustická intenzita	tok akustické energie ve stanoveném směru a smyslu plochou kolmou k tomuto směru, dělená touto plochou
akustický výkon zdroje	je absolutní mírou hluku, která je vyzařovaná zdrojem v daném frekvenčním pásmu po určitý časový interval, dělená tímto intervalem
akustický tlak	efektivní hodnota okamžitých akustických tlaků za daný časový interval
blízké zvukové pole	zvukové pole v blízkosti zdroje hluku, kde okamžitý akustický tlak a okamžitá akustická rychlost jsou v podstatě ve fázi
celková objemová hustota akustické energie	součet okamžitých objemových hustot potenciální a kinetické akustické energie
částice	část prostředí, jehož objem má malé rozměry v porovnání s vlnovou délkou zvuku
difuzní zvukové pole	zvukové pole, které má v dané oblasti statisticky jednotnou hustotu energie a v jehož každém bodě mají směry šíření náhodné rozdělení
geometrický odraz	jev, při kterém se zvuková vlna vrací od rozhraní dvou prostředí pod úhlem, který se vzhledem ke kolmici k rozhraní rovná úhlu dopadu
grafická akustika	grafický postup, jímž se pomocí zvukových paprsků prověřuje nebo optimalizuje tvarové řešení uzavřeného prostoru z hlediska rovnoměrnosti rozložení zvukové energie na plochách poslechu
L_{pFA}	je vážená (A) hladina hluku L_p . F (fast) značí krátké časové okno nahrávání.
L_{peq}	časově průměrovaná hladina emisního akustického tlaku. Je zobrazena v závislosti na frekvenčním vážení průběhu měřící periody. Nezobrazuje

	zatížení, kterému jste vystaveni.
okamžitá akustická intenzita	okamžitá hodnota toku akustické energie, je to vektorová veličina, která je úměrná součinu akustického tlaku a akustické rychlosti ve sledovaném bodě, vyjadřuje se ve wattech na metr na druhou
průměrná hladina akustického tlaku v místnosti	desetinásobek dekadického logaritmu poměru prostorově i časově průměrovaného kvadrátu akustického tlaku ke kvadrátu referenčního tlaku
SEL	SEL (sound exposure level) významná veličina. Zobrazuje se jako LAeqt, LBeq... atd, v závislosti na frekvenčním vážení a ukazuje zatížení hlukovou energií. Úroveň 90 dBA po dobu 1 sek. se zobrazí jako 90 dBA, po 2 sek. je pak hodnota 93 dBA.
střední volná dráha	vzdálenost, kterou urazí zvukové vlny v uzavřeném prostoru mezi dvěma po sobě následujícími odrazy
treatment	akustické obložení
LAFteq	časově maximální hodnota hluku, opakované maximum, hodnota je vážená frekvenční spektrem F. Cyklus měření je nastaven na 3 nebo 5 sekund.
uzavřený prostor	prostor obklopený hraničními plochami vykazující akustické vlastnosti
váhové filtry	váhové filtry A, B, C, D a Z, které jsou inverzní ke křivkám stejné hlasitosti při hladinách 40 dB, 80 dB a 120 dB. Nejčastěji se používá váhový filtr typu A.
vlna	vzruch šířící se určitou rychlostí v hmotném prostředí tak, že v každém bodě prostředí je veličina, která slouží jako míra vzruchu, funkcí času, zatímco v každém okamžiku je tatáž veličina funkcí souřadnic v bodě
vlnoplocha	geometrické místo bodů na postupující ploše, kde je fáze veličiny charakterizující vlnu v daný okamžik stejná
volná postupná vlna	vlna šířící se v prostředí, která není ovlivněna ohraničujícími povrchy
zrcadlový odraz	jev, při kterém se zvuková vlna vrací od rozhraní dvou prostředí pod úhlem, který se vzhledem ke kolmici k rozhraní rovná úhlu dopadu
zvuková izolace	schopnost soustavy potlačovat přenos zvuku mezi dvěma místy
zvukový paprsek	paprsek, který reprezentuje malou výseč kulové zvukové vlny a znázorňuje směr jejího šíření z daného bodu

1. Úvod

1.1 Motivace pro výpočtová řešení v oblasti akustiky

Nadměrný hluk, v porovnání s například daleko hmatatelnějším chemickým znečištěním ovzduší a vod, je ve společnosti chápán jako méně škodlivý jev, avšak menší škodlivost nadměrné hlučnosti je jen zdánlivá. Při působení zvýšených hladin hluku byla prokázána zdravotní škodlivost pro lidské tělo a nejde jen o možné poškození sluchu. Zejména jde o následky při dlouhodobém působení, třebaže nižších hladin hluku či o následky vyvolané v souvislosti s mžikovými, ale častými situacemi, kdy je člověk vystaven vysokým hladinám hluku. Tyto následky jsou zařazovány pod všeobecný pojem - neurovegetativní dystonie.

Hlučnost v životním prostředí roste s pokračující technizací našeho života v takové míře, že často nejen překračuje hranici zdravotní únosnosti, ale v mnohých případech se stává nekontrolovatelnou v tom smyslu, že se vymyká technicko-ekonomickým možnostem udržet rostoucí hlučnost prostředí pod přijatelnou hranicí [1].

Uzavřené pracovní místnosti s častými zdroji hluku jako jsou výrobní stroje či jiné hluk produkuje zařízení, jsou prostory, kde je nutné nejen zvýšené hladiny hluku sledovat, ale snažit se i o jejich snížení. Vyšetřováním působení hluku v těchto prostorech se zabývá vědní obor, který se nazývá akustika uzavřených prostorů.

Lidé se pokoušejí pochopit a předvídat chování zvuku v uzavřených místnostech již zhruba století. Predikovat - předpovídat hladiny akustického tlaku v uzavřených prostorech jako jsou obytné prostory, kanceláře, dílny, učebny, laboratoře, přednáškové sály, koncertní síně, nahrávací studia, divadla a tak dále, bylo pro akustiky projektanty, ale i uživatele takovýchto prostorů velmi důležité. A je více než patrné, že v současné době výrazně roste povědomí o důležitosti akustického komfortu pro lidi pracující nebo vyskytující se v takovýchto hlučných provozech nebo místech. Toto povědomí jde také ruku v ruce s rostoucí poptávkou po akusticky optimalizovaných systémech či akustických úpravách stávajících systémů, tak aby přinášely snížení hluku. A protože počítačové simulace se stávají stále dostupnější a mnohem více uplatňované při různých konstrukčních návrzích, jsou stále častěji vyžadovány také v oblasti akustiky rychlé a přesné techniky pro akustické modelování šíření hluku, jak v uzavřených místnostech, tak ve volném prostoru. Tyto výpočtové nástroje často velmi propracované, neboť musí umožnit vývojářům předvídat vibroakustické chování celých subsystémů a jejich komponent a to už ve vývojové fázi dávno před tím, než existuje finální řešení či prototyp.

V akustickém modelování uzavřených místnosti existují dva hlavní přístupy. Přesnější výpočty založené na numerickém řešení reálné vlnové rovnice. Techniky využívající tento přístup se nazývají vlnové. Jsou však výpočtově náročné a výpočetní zátěž roste rychle v závislosti na zvyšující se frekvenci. Mnohem větší uplatnění v akustické výpočetní praxi nacházejí metody založené na sledování energetických akustických veličin.

Pohotovost výpočtů a jejich uplatnění ve výpočtové praxi bylo za rozhodnutím věnovat se vývoji nového simulačního nástroje pro řešení akustických problémů, se kterými se technici setkávají při akustických výpočtech uzavřených prostorů. Prvotním impulsem bylo detailní seznámení se s pokročilým výpočetním přístupem založeným na metodě statistické energetické analýzy, která se zkráceně nazývá SEA. V této metodě, přestože název zahrnuje

slovo statistika, se nejedná o žádné statistické výpočty. Metoda pouze pracuje se sledováním a s transfery energetických toků mezi subsystémy. Jedná se o velmi propracovaný přístup, který přináší společnost ESI Group a jejich velmi známý software VA ONE. Tento propracovaný software je neustále rozvíjen za pomoci dodatečných výpočetních modulů a stal se velmi komplexním nástrojem pro predikční akustické výpočty.

1.2 Celkový rámec disertační práce

Tato práce je věnována problematice predikčních výpočtů hluku v uzavřených prostorech a využití těchto výpočtů pro návrhy konstrukčních úprav, zejména ve smyslu aplikace zvuko-absorpčních vrstev pro snižování hluku. Zkoumaná problematika má velký význam zejména v moderních průmyslových provozech, kde je kladen stále větší důraz na snižování nebezpečné akustické zátěže a kde zdrojem hluku jsou výkonné výrobní stroje a zařízení.

Obecně se dá říci, že aby bylo možné efektivně řešit výše zmíněné akustické úlohy, je nezbytné rozvíjet takové numerické nástroje, které umožňují vibroakustický výpočet v celém slyšitelném frekvenčním rozsahu. Kromě toho musí tyto nástroje nabízet vysokou flexibilitu, stejně jako možnost modelovat uvažovaný systém ve všech jeho podstatných detailech.

Různé matematické přístupy, zabývající se přímým a difuzním akustickým šířením zvuku v uzavřených prostorech, nebyly dosud plně využity a optimalizovány, a to zejména z důvodu vysokých nároků na výpočetní výkon.

Ve většině prostředí je slyšet zvuk jako kombinace zvuku šířícího se přímo ze zdroje či z více zdrojů a nepřímo odrazy od povrchů ohraničujících uzavřený prostor a také od povrchů objektů umístěných v tomto uzavřeném prostoru. Charakteristiky odrazů závisí na vlastnostech odrazových ploch. Odrazy mohou být přímočaré nebo rozptýlené. Těm přímočarým se říká zrcadlové odrazy, kdy na překážku dopadající zvuk se odrazí ve stejném úhlu (ve vztahu k normále povrchu), v jakém dopadl na tento povrch. Rozptýlený odraz vznikne, pokud je povrch difúzně odrazivý. Uzavřené prostory s alespoň částečně rozptylujícími plochami jsou v jejich akustickém chování zcela odlišné od těch, které mají pouze zrcadlově odrazivé plochy. Rozptýlené odrazy mají za následek rovnoměrnější rozložení zvukové energie v místnosti [2].

V současnosti je šíření zvuku v uzavřených místnostech často simulováno s použitím přibližných modelů založených na paprskových metodách (ray tracing) a metodách založených na vyšetřování transferu energií vyzařováním. I při těchto postupech je však problémem nedostatek spolehlivých vstupních dat (funkce rozptylu, rozptylující koeficienty, absorpční koeficienty atd.). Metoda popsaná v této práci předpokládá difuzní šíření zvuku ve vyšetřovaném uzavřeném prostoru a je založena na přenosu zvukové energie mezi plošnými elementy s respektováním absorpčních charakteristik odrazivých ploch. A to zejména ve smyslu stálé emise hlukových vln od zdrojů hluku, což má, díky rozptýleným mnohočetným odrazům vliv na homogenní rozložení zvukové energie v uzavřeném prostoru.

1.3 Struktura disertační práce

Pro přehlednost byla tato disertační práce rozdělena do pěti kapitol, jejichž obsah je následující:

Úvodní kapitola představuje rámec, směr a strukturu práce, její význam pro technickou praxi a zdraví člověka. Popisuje ve stručnosti dva základní typy odrazů zvukových vln a hlavní principy šíření zvuku. Tato kapitola dále obsahuje několik odstavců, které vysvětlují motivaci, která vedla autora ke studiu této problematiky a zpracování předkládané práce. Práce sice byla z velké části podnícena rozvojem současných výpočetních trendů v oblasti akustiky, avšak iniciátorem nebyly jen zmíněné vědecké výpočetní trendy v oblasti prostorové akustiky uzavřených místností, ale i akutní potřeba provádění takovýchto výpočtů pro vlastní praktické využití. Toto studium bylo následně impulsem pro vytvoření vlastního výpočetního přístupu. Závěr kapitoly pak sumarizuje celkový význam této disertační práce a stručně vysvětluje celý výpočetní postup a jeho význam pro výpočtovou akustiku.

Druhá kapitola se zabývá přehledem a porovnáním vybraných výpočetních nástrojů a jejich použitím ve výpočtech týkajících se prostorové akustiky a zasazuje je do kontextu ostatních výpočtových metod v oblasti akustiky uzavřených prostorů. Rešerší získaný přehled používaných výpočetních přístupů v oblasti predikční akustiky je tak doplněn o zhodnocení jednotlivých používaných výpočtových metod, ať už se jedná o metody založené na vlnovém přístupu, metody geometrické či metody přenosu akustické energie vyzařováním. Značné množství těchto výpočetních přístupů dokladuje šíři celé vědní oblasti a z ní vyplývající náročnost studijní etapy nazývané „State of the art“, kterou bylo nutné zpracovat. U metod, jež jsou v této kapitole zmíněny, jsou zhodnoceny jejich silné a slabé stránky a souvislosti, určující, která z metod je nevhodnější pro dané nasazení a jejich použitelnost pro predikční výpočty v oblasti prostorové akustiky uzavřených místností.

Třetí kapitola se zabývá převážně teoretickým základem potřebným pro pochopení fyzikálního modelování šíření zvukových vln ve volném poli a v uzavřených prostorech. Pro pochopení navrženého výpočetního přístupu jsou zde stručně uvedeny nutné základy akustiky se zaměřením na výpočty v uzavřených místnostech. Poté je detailně popsán pojem odrazu zvuku, charakter zvukových polí zejména pole difúzního, jehož teoretické pochopení a pochopení nutných fyzikálních zjednodušení je zásadní pro představený výpočetní program. Dále jsou v této kapitole dopodrobna popsány různé typy zdrojů zvuku, se kterými operuje navržený výpočetní postup. Okrajově je zmíněna i problematika zjišťování absorpčních koeficientů pro použité akusticky absorpční materiály za pomoci impedanční trubice. A na závěr jsou uvedeny i nezbytné vztahy mezi akustickými veličinami a jejich návaznost na normami předepsané zjišťování hlukové zátěže ve výrobních provozech.

Ve čtvrté kapitole je v detailu představen výpočetní program vytvořený v prostředí LabVIEW. Pro představení tohoto programu byly zvoleny tři úlohy. Tři úlohy rozmanité komplexity, s vazbou na praktické aplikace, byly zvoleny nejen pro představení širší a možnosti použití, ale i z důvodu, že je na nich demonstrována i určitá geneze vývoje výpočetního algoritmu. Nejdříve je velmi stručně popsán model kancelářského pracoviště s instalovaným laboratorním akustickým zdrojem hluku. Poté byl proveden výpočet přímo ve výrobním prostoru s hluk emitujícím čerpadlem pro vysokotlaké řezání vodním paprskem. Modely obou místností byly doplněny, přes diskretizaci všech povrchů a překážek (nábytek, stroje, přepážky v místnostech), o změřené materiálové charakteristiky povrchů (absorbce -

α). Poté byl vypočítán přenos energie mezi zdroji, elementy a body příjmu, aby mohly být stanoveny hodnoty akustického tlaku v předem vybraných bodech uzavřeného prostoru. Po provedení všech výpočtů byly výsledky porovnány s akustickým měřením přímo v reálném pracovním prostoru. Oba výpočty reprezentovaly reálné úlohy a přinesly optimistické výsledky. Třetí závěrečný experiment modeloval výkonné čerpadlo v prázdném, z hlediska absorpčních parametrů dobře zmapovaném prostoru a posloužil jako ověřovací experiment pro závěrečné stanovení přesnosti programu a jeho použitelnosti pro výpočetní praxi.

Závěrečná pátá kapitola předkládá závěrečné zhodnocení, které na základě výsledků ať už ve formě četných CPB grafů či termogramů modelovaných prostorů demonstruje jeho použitelnost pro akustickou výpočetní praxi a naznačuje směr vývoje výpočtového přístupu a jeho směřování v případě pokračujícího výzkumu.

Všechny kapitoly, zejména pak druhá, která je teoreticky více zaměřená, odkazují na přílohy, které přinášejí náhled do změřených dat, v detailu zobrazených vývojových diagramů programu či reprezentují alternativní výpočtové přístupy, které bylo možno využít při predikčních výpočtech akustiky vnitřních prostor. Aby mohlo být dosaženo vytyčených cílů, bylo zapotřebí shromáždit nejen teoretické poznatky, ale i osvojit si metodiky a zásady pro měření akustických veličin včetně odpovídajícího vybavení měřicího pracoviště. Stěžejními měřicími postupy byla například metodika určování emisí hluku za pomoci přístrojového vybavení specifikovaného v IEC 60651. Stejně tak nezbytnou byla metodika formulovaná v normě ISO 10534-2 - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích, pro zjištění neznámých absorpčních koeficientů a na ni navazující rozsáhlá problematika ověřování měřících systémů, odpovídající požadovaným třídám přesnosti.

2. Přehled výpočtových nástrojů a jejich použití v oblasti prostorové akustiky

V této kapitole je uveden přehled nejčastěji používaných výpočetních metod v oblasti akustické predikce. Její součástí je i stručné porovnání různých metod akustického modelování a snaha o nalezení jejich silných a slabých stránek majících vliv na výslednou přesnost simulací v závislosti na výpočetní účinnosti. Takovéto porovnání může pomoci určit, pro jaké účely je daná metoda nejvhodnější a zda není možné použít i určitou hybridní metodu, která kombinuje nejlepší vlastnosti každého přístupu, ideálně takovým způsobem, který je výpočetně proveditelný i fyzikálně přesný.

Tento přehled, jemuž předcházela náročná rešeršní práce zejména zahraniční literatury, je v porovnání se složitostí celé problematiky velmi stručný a je doplněn, kromě přehledu a základního definování těchto přístupů, o požadavky metod na výpočetní náročnost, náročnost okrajových podmínek atd. Výběrová retrospektivní rešerše byla provedena zejména za pomoci elektronických databází INSPEC, Dissertation Express ProQuest, Delft University of Technology, ASME Digital Collection American Society of Mechanical Engineers. Dále byly využity zdroje pro patentový průzkum prostřednictvím patentových serverů, norem a doporučení ASTM a zejména pak oborově zaměřené časopisy The Journal of the Acoustical Society of America, Acoustic, Journal of Physics, Canadian Journal of Physics, Journal of Acoustic Emission, ResearchGate.net a stále na významu nabývající český recenzovaný časopis Akustika. Studijní literatura týkající se oblasti akustiky vnitřních prostorů je velmi rozsáhlá, a proto čtenář zajímající se o oblast akustického modelování může najít poměrně ucelený přehled v této publikaci. [3]

Obecně lze říci, že hlavním úkolem akustického modelování uzavřených místností je výpočtem popsat zvukové pole v místnosti, jsou-li známy zdroje zvuku, geometrie místnosti a vlastnosti materiálů dopadových ploch místnosti. Aby bylo možné efektivně řešit akustické úlohy tohoto typu, je nezbytné vyvinout takové numerické nástroje, které umožňují vibroakustický výpočet nejen v celém slyšitelném frekvenčním rozsahu, ale zároveň musí tyto nástroje umět modelovat uvažovaný systém s respektováním tvarové složitosti zkoumaných prostorů i ve všech jeho vnitřních detailech. Právě šíře frekvenčního rozsahu a zaostření na detail systému jsou - dokonce i při využití obrovské výpočetní síly, která je dnes k dispozici a při použití vysoce účinných algoritmů - poměrně obtížným úkolem i pro silné výpočtářské týmy se silným korporátním zázemím. Při řešení akustických úloh se objevují i další obtíže, které jsou způsobeny například komplexními konfiguracemi materiálů, jako jsou stále častěji užívané lehké sendvičové struktury a jiné neobvyklé materiály, které svými materiálovými a absorpčními parametry výrazně promlouvají do sledovaných akustických hodnot.

Počáteční pokusy vedoucí k pochopení prostorové akustiky byly prováděny zejména na fyzikálních modelech. Modely sloužily k vyšetřování a pochopení základních fyzikálních principů šíření akustických vln, jejich odrazů a lomů atd. Jednalo se převážně o jednoduché vodou plněné demonstrační nádrže pro sledování vlnění a jednoduché optické soustavy pro sledování šíření zvuku za pomoci paprskových metod. Pro vyšetřování šíření zvuku v uzavřených prostorech to byly zejména v měřítku pracně vyhotovené modely prostorů i s vnitřními překážkami [4].

Následovaly modely založené na výpočtech vlnových rovnic, ve kterých byla vlnová rovnice řešena uvnitř ohraničeného prostoru. Tyto modely přinášely přesné výsledky, avšak tento přístup byl pro běžnou praxi nevyužitelný, zvláště u velkých anebo u nepravidelně tvarovaných místností a při vysokých frekvencích (kvůli nárůstu počtu modálních frekvencí).

Metody založené na vlnových výpočtech jsou tedy nevhodnější pro nízké frekvence. Tyto techniky obvykle diskretizují sledovaný prostor nebo jeho povrchy, které jej ohraničují, na malé prvky - elementy a modelují interakce mezi nimi. Z tohoto důvodu se tyto techniky občas nazývají jako metody založené na elementech.

Druhý přístup je založen na geometrické akustice, ve které je šíření zvuku modelováno přímočaře jako paprsky a zanedbává se vlnová délka zvuku. To znamená, že v těchto metodách chybí všechny vlnové jevy jako je difrakce a interference, zatímco ve vlnových modelech jsou tyto jevy zahrnuty. Tyto metody se nazývají paprskové, protože často používají, pro vysvětlení šíření zvuku nějaký druh paprsků nebo částic, které se odrážejí od povrchu místnosti či překážek. Metody, které využívají prostorových akustických paprsků, jsou známy pod sjednocujícím pojmem geometrická akustika (GA), který však zahrnuje řadu technik, z nichž každá může být považována za samostatnou metodu. Hlavní rozdíl oproti metodám založeným na vlnových výpočtech spočívá v tom, že se obvykle počítá pouze zvuková energie namísto akustického tlaku nebo rychlosti částic použitých ve vlnových metodách [5].

Metoda přenosu akustického záření je jednou z nejnovějších technik založených na geometrické akustice. Je to určitý hybrid obou přístupů, protože je založen na stejných předpokladech jako metody založené na paprskových metodách, ale používá prvky typické pro vlnové výpočty. Dalším zajímavým rysem tohoto přístupu je, že výpočetní zátěž nezávisí na počtu míst, ve kterých je působení hluku vyšetřováno, protože řešení se počítá pro celý prostor najednou podobně jak je tomu u jiných metod založených na elementech [5].

2.1 Deterministické modely - FEM - metody konečných prvků

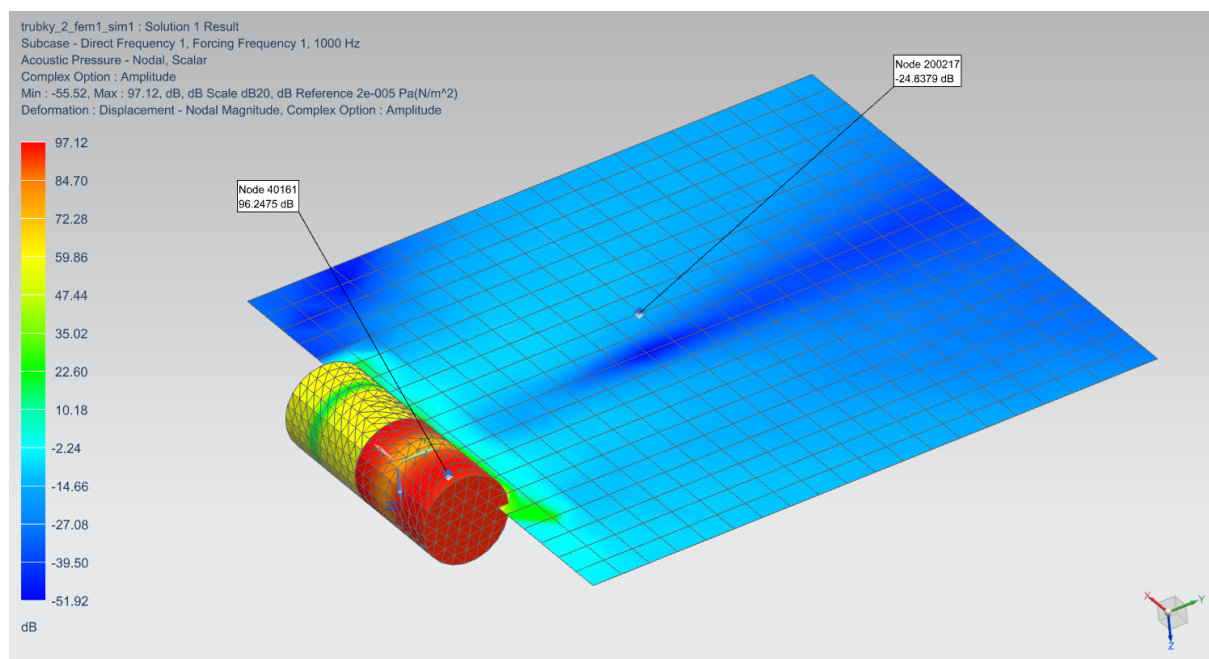
V následujících odstavcích jsou detailně popsány metody používané pro řešení prostorové akustiky uzavřených prostor numerickými metodami známými jako metoda konečných prvků či metoda hraničních prvků jakožto významných a často používaných nástrojů pro vyšetřování akustických problémů. To platí zejména pro numerickou analýzu ve spodním a středním kmitočtovém pásmu, kde je použití technik založených na konečných prvcích dobře proveditelné. Metoda konečných prvků je metodou diskretizace celé trojrozměrné akustické oblasti za pomoci samostatných prvků. Jedná se o poměrně zavedený, i když výpočtově náročný postup při řešení problémů s hlukem, který se objevuje například v dopravních prostředcích. Častou úlohou je například snížení hluku uvnitř prostoru pro cestující, kde se berou v úvahu absorpční hraniční podmínky nebo vibrující povrchy [6], [7].

V případě šíření zvuku do exteriéru, například když je třeba zkoumat zvukové vyzařování do prostoru od bloku motoru nebo jiné součásti motoru, jsou zvukové projevy vyzařující do prostoru metodou konečných prvků obtížně zpracovatelné, proto začali někteří výpočtáři používat pro tento typ výpočtů určitou nadstavbu ve formě tzv. nekonečných prvků (Infinite element method). Tento přístup umožňuje počítat přechodové jevy a pracovat

s nehomogenními akustickými prostředími. Koncept nekonečných prvků je následující. Nejprve je vibrační systém obklopen uzavřeným povrchem, obvykle koulí nebo elipsoidem. Poté je blízké pole mezi strukturou a obklopujícím povrchem (obálka) modelováno konvenčními akustickými konečnými prvky, které jsou spojeny s nekonečnými prvky v obálce. Tyto prvky jsou definovány tak, že jsou za pomoci aproximace a tvaru povrchu schopny počítat s akustickým zářením do volného prostoru. Podrobnosti lze nalézt v literatuře [8], [9].

2.2 Deterministické modely - BEM - Metoda hraničních prvků

V oblasti slyšitelného kmitočtového pásma je to zejména metoda hraničních prvků, která má potenciál pro velmi přesné predikční akustické výpočty. Metoda hraničních prvků – neboli metoda BEM - Boundary Element Method - je efektivní nástroj, který se stal často využívaným výpočetním přístupem pro řešení akustických úloh. V literatuře je akustická metoda hraničních prvků popsána na široké škále praktických úloh pro řešení akustických problémů, jako je modelování zvuku generovaného reproduktory [10] a [11] nebo určování charakteristik mikrofону [12], šíření zvuku a zvukový výkon vyzařovaný konkrétní konstrukcí, jako je kryt ventilu motoru [13] nebo ventilátor a zvuk přenášený konstrukcemi v budovách [14].



Obrázek 2-1 - Řešená úloha vyzařování hluku metodou BEM v programu NX Siemens

Zvláště užitečný je pro analýzu problémů se zvukovým vyzařováním a akustickými odrazy. V současné době již existuje plejáda komerčních BEM kódů s uživatelským rozhraním (GUIs) a integrovanými síťovými generátory. Tyto výpočetní programy jsou však poměrně drahé, což odrazuje od jejich využívání akademické instituce a menší společnosti. Alternativou pro ně je volně šířený program Helm3D. Tento program, společně s dalšími nekomerčními kódy, není ale příliš rozšířen z několika důvodů: rozhraní je řízeno z příkazového

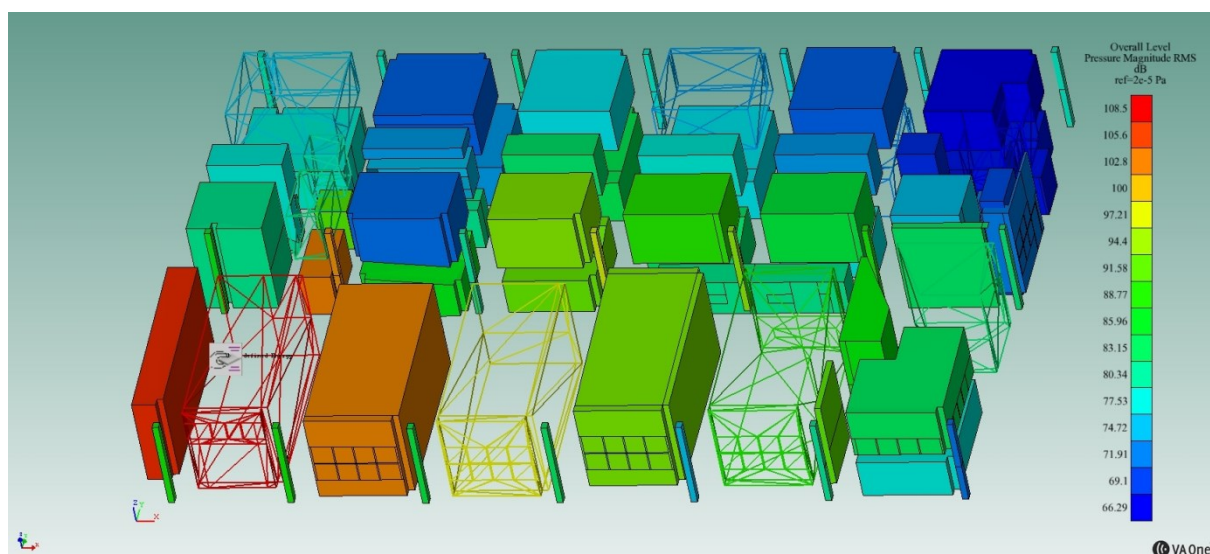
řádku a je vyžadován nějaký mechanismus pro generování sítě. Rozhraní programu Helm3D, propojuje kód programu s volně dostupným numerickým simulačním pre / post procesorem. Program demonstruje schopnost BEM ve dvou aplikačních oblastech vnitřní akustiky a vnějšího akustického vyzařování. Rozšíření tohoto užitečného programu, jak bylo výše zmíněno, však brzdí i omezená dostupnost vhodné dokumentace a studijní literatury.

Program Helm 3D byl testován pro potřeby této práce společně s akustickou nadstavbou softwaru NX Siemens, která využívá pro vyšetřování vyzařování hluku metodu hraničních prvků. V rámci studia vyšetřování šíření hluku v uzavřených prostorech byla řešena zjednodušená úloha vyzařování ze dvou do sebe vnořených válcových uzavřených prostorů s přepážkou a zdrojem hluku v jedné z takto vytvořených vnitřních kavit.

Nicméně za účelem provedení numerické analýzy, v akustické oblasti to znamená ve vyšším kmitočtovém pásmu, je praktické uvažovat o metodách založených na porovnání energetických toků, jako je například metoda statistické energetické analýzy (SEA) [15], která je zhodnocena v následující podkapitole.

2.3 SEA - Statistická Energetická Analýza

Statistická energetická analýza (Statistical Energy Analysis - SEA) je opět poměrně zavedenou výpočtovou metodou pro modelování odezvy složitých vibroakustických systémů v širokém frekvenčním spektru. Jako výpočtová metoda se začala objevovat v 50 letech, a to zejména jako požadavek pro predikční výpočty v oblasti astronautiky a námořního průmyslu. Její účinné nasazení je dokumentováno také v mnoha vojenských aplikacích. První ucelené teoretické základy pro výpočet metodou statistické energetické analýzy byly položeny zhruba kolem roku 1960. V devadesátých letech se stává statistická energetická analýza standartním nástrojem pro konstrukční analýzu. Využití je převážně v automobilovém průmyslu, vlakové železniční dopravě, stavebnictví, námořnictví, letectví a kosmonautice.



Obrázek 2-2 - Řešená úloha šíření hluku v laboratořích RTI metodou SEA [16]

SEA pracuje s rovnicemi energetické bilance - to znamená, že pracuje s veličinami jako jsou: modální hustota, ztrátový faktor tlumení, faktor ztráty ve vazbě a výkon akustických zdrojů. Vstupními a výstupními akustickými veličinami jsou nejen energetické výkonové veličiny, ale i praktické veličiny ve formě hladiny akustického tlaku s rozlišením na oktávová či třetino-oktávová pásma, což jsou vhodné veličiny pro posuzování akustického prostředí.

V této kapitole je uvedeno stručné shrnutí statistické energetické analýzy, která se používá zejména pro výpočet v oblasti středních a vyšších frekvencí (typicky ve frekvenčním pásmu od 250 Hz do 10 kHz). Avšak hlavní výhodou metody SEA je aplikace ve vysokofrekvenčním rozsahu, kde je vysoká hustota módů a kde diskretizační metody jako FEM a BEM již nemohou být efektivně použity. Proto je statistická energetická analýza převažující metodou používanou pro predikování šíření hluku týkajících se silničních vozidel, kolejových vozidel, letadel a lodí [17].

Mezi další významné výhody patří, že vztahy výkon a energie jsou méně citlivé na malé změny parametrů a že energetické hodnoty lze snadno zprůměrovat. Nejběžnějšími výstupy výpočtů jsou proměnné jako je akustický tlak, což je hodnota reprezentující množství energie a ten je možno vyhodnotit a porovnat se změřenými akustickými veličinami. V neposlední řadě jako výhodné se jeví fakt, že výpočet se provádí pouze pro kmitočtová pásma (oktávová, třetino oktávové spektrum) a pouze pro centrální frekvenci uprostřed tohoto pásma.

Moderní výpočtové programy pracující na principu statistické energetické analýzy již obsahují moduly pro diskretizační výpočty a umožňují takzvaný hybridní výpočetní přístup. Zjednodušeně lze koncept tohoto hybridního přístupu přiblížit tak, že plošné struktury a na ně navazující objemové kavity jsou počítány metodou SEA a pro spoje struktur a jiné detailněji provedené části struktur je využita pro výpočet metoda FEM. [18] [19]

Analogické implementace hybridních modelů FEM / SEA jsou automaticky aplikovány moderními softwary (např. softwarem VA One) mezi odpovídající subsystemy, což přispívá k výraznému zpřesnění výpočtů. Bližší popis těchto metod jde nad rámec této práce, a proto není dále diskutován.

Přístup statistické energetické analýzy může být také s úspěchem aplikován na problematiku přenosu zvuku zejména v průmyslových budovách, kde jsou přenášeny akustické vlny produkované intenzivním hlukem šířeným od strojů uvnitř budovy. [20]

Pro účely této práce, zejména pro pochopení způsobu přenosu energií, byla tato metoda detailně prostudována a její pomocí byly vypočítány některé z kontrolních úloh.

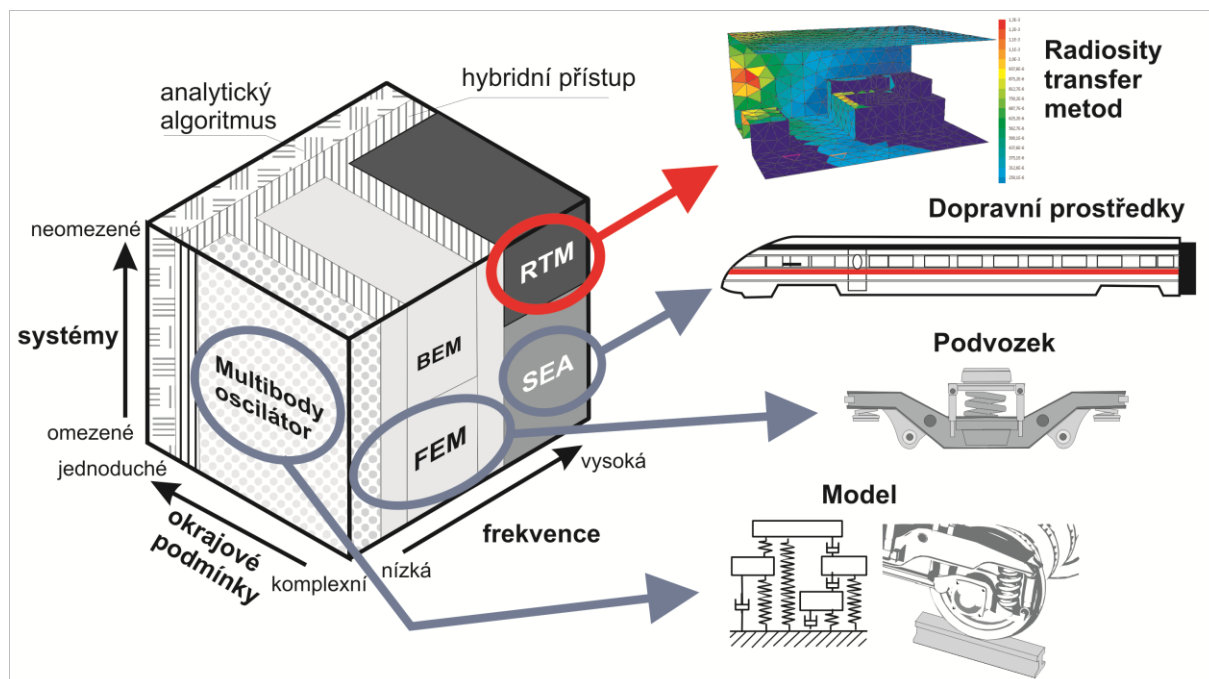
2.4 GA - Geometrická akustika

Řešení akustiky v uzavřených prostorech nabízí geometrické akustické modely, v nichž jsou zvukové vlny nahrazeny zvukovými paprsky, které mají energii, ale ne fázi [21]. Jedná se o aproximační metody, které pracují na principu sledování paprsku (ray tracing), sledování částic (particle tracing) atd. Tyto modely, které využívají určité zjednodušující předpoklady, jako jsou zrcadlové odrazy, zjednodušené chápání difúzního šíření zvuku, šíření zvuku bez difrakce atd. Předpoklad, že se v homogenním médiu zvuk šíří přímými cestami nebo

paprsky, je legitimní pro vlnové délky, které jsou kratší ve srovnání s velikostí místnosti. Pokud jsou ale modelovány delší vlnové délky, je nutný difrakční model, který kompenzuje chyby vznikající při ray tracing metodě. Modely vytvořené geometrickou metodou mohou být přesné pouze ve středních a vysokých frekvenčních pásmech. To znamená, že metoda je výhodným kompromisem mezi přesností a výpočetní náročností zejména vzhledem ke skutečnosti, že významné zvukové vjemy zahrnují převážně střední a vysoké frekvence. Proto byly geometrické modely v průběhu posledních 40 let ve velké míře využívány v akustice místnosti. Závěrem se dá říci, že se jedná o poměrně specifický výpočetní postup vyžadující kvantum intenzivní práce, než je možné vytvořit výpočetní algoritmus, který skutečně přináší užitečné výsledky. Na principu geometrické akustiky je založeno několik programů. Mezi nejznámější patří komerční CATT-Acoustic a ODEON, volně šířený je například iSimpa [22].

Z hlediska vyhodnocování akustických veličin nutných pro návrhy a hodnocení akustické kvality uzavřených prostorů není vlnová teorie zcela vhodná. Je to způsobeno tím, že vlnový přístup řeší příslušné akustické veličiny jako funkci polohy a času. Tyto hodnoty se v jednotlivých bodech prostoru od sebe mnohdy značně liší. Geometrická akustika uzavřených místností zahrnuje modely, modely zrcadlových odrazů, modely částic, kuželů a paprsků akustického vyzařování a hybridní modely (kombinují dva nebo více těchto přístupů).

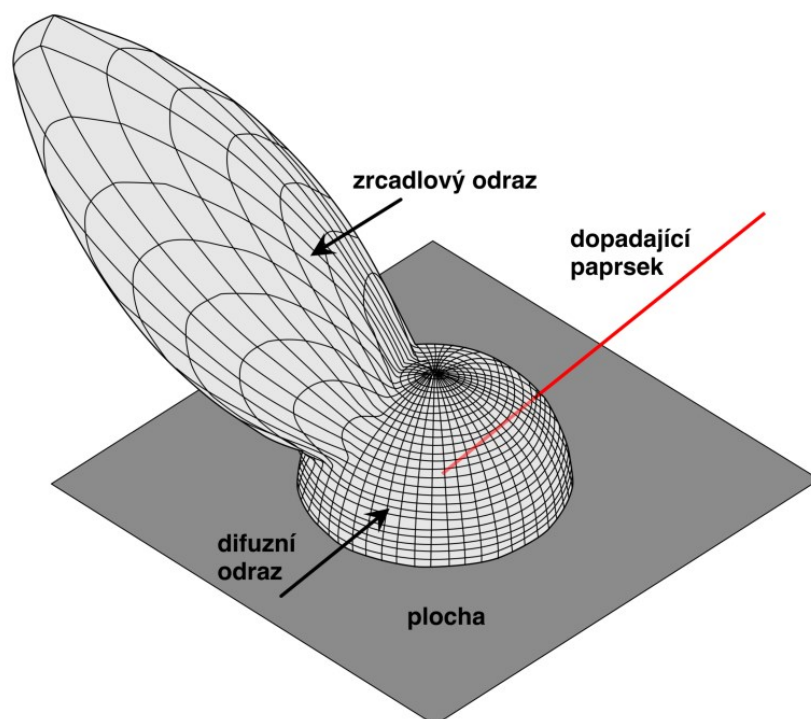
Obrázek 2-3 ukazuje schematicky použitelnost vybraných metod při výpočtech hluku v závislosti na řešeném frekvenčním rozsahu, komplexnosti okrajových podmínek a typu systému.



Obrázek 2-3 - Použitelnost metod v závislosti na typu řešené úlohy

2.5 Akustické vyzařování

Od geometrické akustiky se metoda akustického vyzařování - v angličtině Acoustic Radiance transfer method ARTM nebo též Radiosity transfer method (RTM) – či zjednodušeně akustická radiozita odlišuje. Tato metoda se doposud pro výpočty v uzavřených prostorech příliš nevyžívala, i když několik autorů [23] již popsalo některá specifika tohoto přístupu. Metoda byla původně představena ve dvacátých letech minulého století fotometrickým teoretikem, Yamautim [24], který se převážně zabýval problematikou šíření světelných paprsků, když bez pomoci výpočetní techniky prováděl zdoluhavé výpočty a proto nemohl být využit potenciál této metody. Technika byla znovuobjevena a dále rozvíjena komunitou tepelného inženýrství v 50. a 60. letech 20. století [25]. Limitujícím faktorem, pro širší využití této metody byly vysoké výpočetní nároky. Omezujícím byl také chápán předpoklad difúzního odrazu. Tato omezení jsou však menší, než se dosud předpokládalo [26]. Klíčový rozdíl mezi akustickým vyzařováním a vyšetřováním přímých drah neboli takzvaného trasování paprsků, metody využívané v geometrické akustice, je časová závislost šíření akustických signálů. Zvuk se, ve srovnání s rychlostí světla, pohybuje v prostředí vzduchu pomalu, takže časové zpoždění nemůže být v těchto výpočtech ignorováno. Každý model zabývající se výpočtem šíření zvuku v místnostech proto musí zahrnovat časový parametr. Je zřejmé, že zavedení časové závislosti při použití metody trasování akustických paprsků je jedním z omezujících aspektů geometrické akustiky, neboť přináší vysoké výpočetní nároky. Naproti tomu metoda akustického vyzařování je slibná tím, že výpočetní nároky jsou řádově nižší a vznikají pouze při počátečním vykreslování vazeb mezi elementy uzavřeného prostoru. Jakmile jsou vazby mezi elementy v uzavřené místnosti propočítány, zbývající výpočty, které vypočítávají simulace zvukových polí pro změny absorpčních parametrů zvuk pohlcujících povrchů, již probíhají rychleji. Rychlost výpočtů pro interaktivní predikce je hlavní výhodou tohoto přístupu. Základními veličinami charakterizujícími zvukové pole při akustickém vyzařování jsou veličiny energetické, a to hlavně hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku. Jak bylo tedy předesláno, metoda akustického radiačního transferu je, podobně jako metoda hraničních prvků, metodou založenou na plošných elementech a veličinou, která se při těchto transferech sleduje, je energie. To znamená, že informace o fázi není modelována. Podobný předpoklad je nastolen i u metod založených na trasování paprsků, takže obě tyto metody jsou přesnější pro kalkulace ve vyšších frekvencích. Pokud jsou tedy povrchové prvky dostatečně malé, lze bezpečně předpokládat, že intenzita zvuku dopadající na povrchový element se příliš nemění. Pak je možné odvodit podobný druh interakční matice mezi elementy, jaký je použit v metodách hraničních prvků. Maticové prvky pak popisují, jaká část energie opouštějící jeden prvek dosáhne druhého.



Obrázek 2-4 - Šířící se akustická energie po dopadu paprsku na odrazovou plochu [27]

K nalezení hodnot zvukové energie je třeba stanovit některé zjednodušující předpoklady, které je možno shrnout do těchto bodů:

a) Velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn. Tento předpoklad znamená, že se nezabýváme studiem okamžitých hodnot amplitud a fázi kmitů, a tedy interferencemi odražených zvukových vln, procházejících v daném okamžiku uvažovaným bodem. Tím se vše vlastně omezuje na vyšetřování zvukového pole nekoherentních zdrojů zvuku.

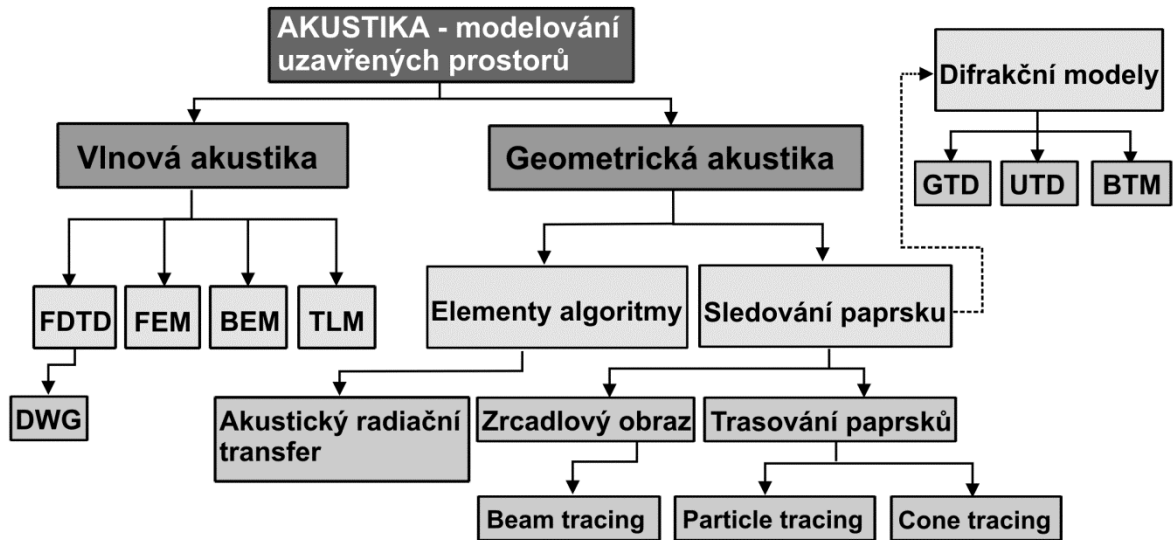
b) Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně veliká. V této souvislosti je třeba si uvědomit, že zvukové pole v daném bodě prostoru je složeno ze zvuku dopadajícího do uvažovaného místa ze zdroje přímo (jehož intenzita u bodových zdrojů klesá s druhou mocninou vzdálenosti) a ze zvuku odraženého od stěn. Hustota zvukové energie je konstantní jen v poli odražených zvukových vln, takže náš předpoklad platí teprve v takové vzdálenosti od zdroje, ve které můžeme ve srovnání s odraženou energií zanedbat energii přímo dopadající zvukové vlny.

c) Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností.

Při odvození rovnice pro hustotu zvukové energie v libovolném bodě prostoru vycházíme ze zákona o zachování energie. Součet energie v prostoru a energie pohlcované stěnami se musí rovnat energii vysílané zdrojem [28].

Předpoklad rozptýleného odrazu nemusí být tak omezující, jak se zdá. Bylo dokázáno, že předpoklad difuzního odrazu je méně restriktivní než předpoklad zrcadlového odrazu,

který se běžně používá při výpočtech geometricko-akustické predikce [29], [30]. Dále není jasné, jak předpoklad rozptýleného odrazu skutečně ovlivňuje zvukové pole a některé vlastnosti pole nemusí být citlivé na změnu od zrcadlového k difúznímu odrazu. Akustické vyzařování může být účinným způsobem, jak predikovat takové charakteristiky [26].



Obrázek 2-5 - Přehled metod pro modelování šíření zvuku v uzavřených místnostech

3. Stručné základy prostorové akustiky, základní pojmy a veličiny

Akustika je název oblasti vědy, která se zabývá původem a šířením zvukových vln. V této kapitole je pro čtenáře, kteří s tímto vědním oborem nemusí být zcela obeznámeni, nastíněn krátký úvod do tohoto zajímavého oboru. Výzkum a modely popsané v této práci se silně opírají o teorii šíření akustických vln v prostoru, což nutně vyžaduje pochopení základních akustických konceptů a vztahů mezi akustickými veličinami. Proto hned v úvodu jsou ve stručnosti představeny základní pojmy a rovnice týkající se akustického tlaku a rychlosti částic. Posléze je prostor věnován vysvětlení týkajícího se šíření akustických vln v ohraničeném a ve volném prostoru a na závěr teorii a rozdělení mechanických zdrojů zvuku. Tato část práce však v žádném případě nemá za cíl poskytnout úplný přehled o celé teorii. Tu lze nalézt v odborné literatuře například [31], [32], [33], [34], [35]. Tato kapitola je z velké části založena na zmíněné citované literatuře a čtenář snad odpustí, že tato díla nebudou v této kapitole citována průběžně.

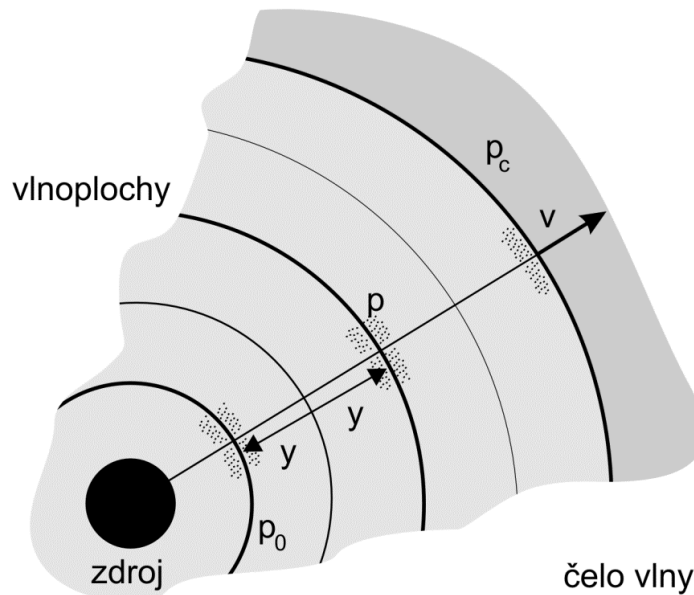
3.1 Prostorová akustika – vlnová rovnice

To, co obvykle nazýváme zvukem, je vnímání změn tlaku vzduchu prostřednictvím ucha. Změna tlaku, rychlosti částic nebo střední hustoty by bylo přesnějším popisem toho, co je vlastně zvuk. Tato odchylka je způsobena vibracemi částic média. K šíření akustických vln obvykle dochází v důsledku vibrujícího zdroje. Vibrujícím zdrojem může být například reproduktor nebo zvuk produkující vibrace nějakého strojního zařízení.

Pro pochopení šíření akustických vln ve volném prostoru se vychází z fyzikálního popisu zvukových vln, což je vlastně mechanické kmitání hmoty v pevném, kapalném nebo plynném prostředí, které vyvolává sluchový vjem. Způsob šíření zvuku závisí na druhu prostředí.

Toto prostředí chápáno jako určitá oblast, ve které se šíří zvuk, je často také nazýváno zvukovým polem. Zvukové pole se může nacházet například uvnitř budovy, pak hovoříme o ohraničeném poli nebo na volném prostranství, které pak definujeme jako neohraničené zvukové pole. Pak odvození vztahů mezi základními proměnnými veličinami zvukového pole - akustickým tlakem, akustickou rychlostí (nebo výchylkou, popř. zrychlením) a hustotou prostředí - je možné provést na základě klasických fyzikálních zákonů.

Na obrázek 3-1 jsou zobrazeny základní veličiny zvukového pole. Mezi tyto hlavní veličiny pro odvození vlnové rovnice patří akustický tlak, akustická rychlost a časová změna hustoty prostředí.



Obrázek 3-1 - Akustický tlak v akustickém poli

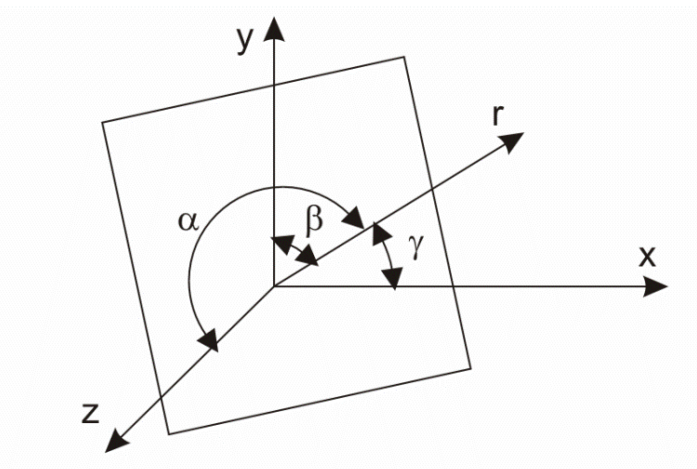
Akustický tlak p je veličina, která se neustále mění v čase a znázorňuje rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě zvukového pole p_c a minimální hodnotou akustického tlaku p_{min} .

Akustická rychlost v je rychlost, s jakou kmitají částice prostředí kolem rovnovážné polohy. Je dána časovou změnou akustické výchylky y . Akustická výchylka y je vzdálenost, o kterou se částice vychylují ve snaze posunu z místa většího tlaku vzduchu do místa menším tlakem.

Poslední veličinou popisující proměnnou změnu tlaku ve zvukovém poli je časová změna hustoty prostředí. Jedná se o střídavou složku, která je závislá na předchozích veličinách akustického tlaku p a akustické rychlosti v . Je dána rozdílem celkové hustoty prostředí p_c a střední statické hustoty p_0 , kterou mělo prostředí před vznikem akustického vlnění. [31]

V literatuře je uváděna řada způsobů pro odvození obecné vlnové rovnice. Jedním z nich je například odvození obecné vlnové rovnice na základě dodržení podmínek kontinuity a za předpokladu adiabatických změn v plynech.

Pro potřeby této práce je praktické využití odvození obecné vlnové rovnice na základě čistě matematickém.



Obrázek 3-2 - Akustické pole v uzavřeném prostoru

$$u_1 = f\left(\tau - \frac{r}{c}\right) \quad (3.1)$$

$$u_2 = g\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \quad (3.2)$$

Vlnění u_1 se šíří v kladném smyslu a vlnění u_2 v ve smyslu opačném. Obě vlnění jsou se zcela libovolným časovým průběhem, proto je možné je vyjádřit jako funkce f a g .

Pak veličina r [m] představuje prostorovou vzdálenost sledovaného bodu od počátku souřadného systému. Viz obrázek 3-2.

Tu lze vyjádřit vztahem

$$r = x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma \quad (3.3)$$

Z obrázku je zřejmé, že α, β, γ jsou úhly, které svírají směr paprsku zvuku v prostoru se souřadnicovými osami x, y, z .

Poté je možné označit součet funkcí výsledného vlnění v obou směrech jako akustickou výchylku a vyjádřit ji vztahem

$$u = u_1 + u_2 = f\left(\tau - \frac{r}{c}\right) + g\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \quad (3.4)$$

Po provedení parciálních derivací této rovnice dostaneme následující vztahy

$$f''\left(\tau - \frac{r}{c}\right) + g''\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} = \left[f''\left(\tau - \frac{r}{c}\right) + g''\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \right] \frac{\cos^2 \alpha}{c^2} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f''\left(\tau - \frac{r}{c}\right) + g''\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \frac{\cos^2 \alpha}{c^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f''\left(\tau - \frac{r}{c}\right) + g''\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \frac{\cos^2 \beta}{c^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = f''\left(\tau - \frac{r}{c}\right) + g''\left(\tau + \frac{r}{c}\right) \frac{\cos^2 \gamma}{c^2} \quad (3.9)$$

Po porovnání těchto rovnic navzájem je zřejmé, že součet levých stran rovnic (3.6) až (3.9) se liší od rovnice (3.5) jen o násobek převrácené hodnoty druhé mocniny rychlosti šíření zvuku.

Na základě toho lze stanovit obecnou vlnovou rovnici ve tvaru

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \quad (3.10)$$

Zápis (3.10) je obecným zápisem vlnové rovnice. To znamená, že nezáleží na tvaru funkcí f a g a rovnice je platná pro jakýkoliv signál šířený v libovolném směru. Levou stranu rovnice lze za pomoci Laplaceova diferenciálního operátoru zapsat ve zkráceném tvaru

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \quad (3.11)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.12)$$

Z fyzikálního hlediska je rovnice (3.12) pohybovou rovnicí pro akustickou vlnu. Pravá strana představuje zrychlení bodu nebo objemového elementu prostředí. Levá strana má význam podílu síly působící na hmotný bod nebo objemový element prostředí a jeho hmoty čili je to síla působící na element s jednotkovou hmotou [31].

V praxi se obvykle setkáváme se dvěma základními případy šíření zvuku - s vlnou rovinou a vlnou kulovou.

Ve volném prostoru je tedy možné předpokládaný zdroj hluku s akustickým výkonem P vyzařovaným rovnoměrně všemi směry v určité vzdálenosti r vyjádřit rovnicí

$$I_{str} = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \quad (3.13)$$

kde I_{str} je hodnota střední intenzity hluku.

V praxi má většina zdrojů zvuku směrový charakter vzrůstající s rostoucím kmitočtem. „Proto je zaveden činitel Q , který je nazýván činitelem směrovosti a je ustanoven jako poměr druhé mocniny akustického tlaku v určeném směru (směr je vymezen prostorovým úhlem θ) na definovaném plošném elementu a druhé mocniny průměrného akustického tlaku. Toho, který by způsobil zdroj stejného akustického výkonu na definovaném plošném elementu, a to v případě, že by zdroj vyzařoval všesměrově do veškerého prostorového úhlu 4π rad“ [31].

Činitel směrovosti Q lze pak stanovit ze vztahu:

$$Q_{\theta} = \frac{I_{\theta}}{I_{str}} = \frac{p_{ef}^2}{p_{0efstr}^2} \quad (3.14)$$

Intenzita zvuku $I(\theta)$ směřujícího od zdroje, ze kterého se šíří zvuk, směrem θ , se stanoví ze vztahu:

$$I_{\theta} = I_{str} \cdot Q = P \cdot \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} \quad (3.15)$$

Z této rovnice je zřejmé, že intenzita zvuku se mění nepřímoúměrně v závislosti na kvadrátu vzdálenosti. Rovnici 3.15 je možné za pomoci vzájemných vztahů mezi hladinami akustického tlaku uspořádat do tvaru:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} \quad (3.16)$$

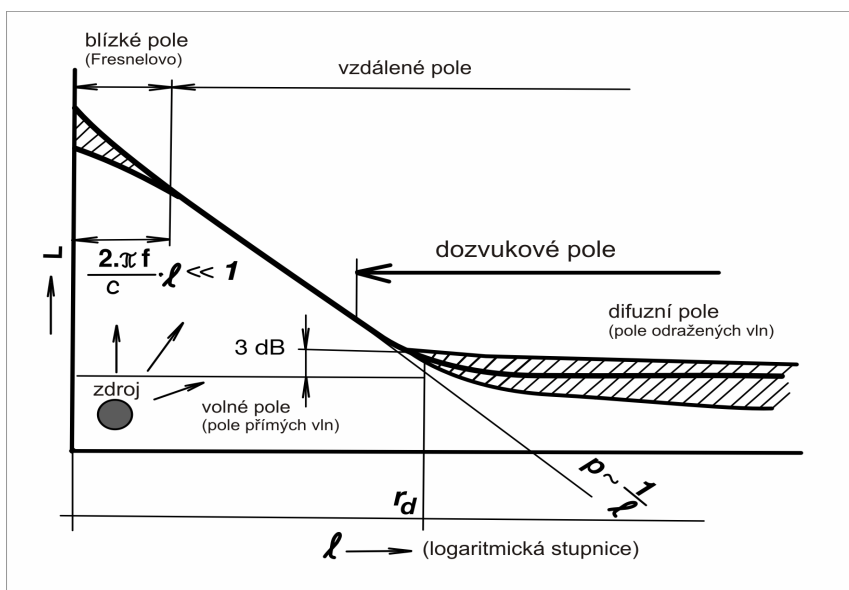
kde L_w je hladina akustického výkonu

Pokles hladiny akustického tlaku při šíření zvuku ve volném prostoru je nepřímo úměrný rostoucí vzdálenosti od zdroje zvuku. Přičemž pokles hladiny akustického tlaku o 6 dB je způsoben vždy dvojnásobným zvětšením vzdálenosti od zdroje zvuku. [31].

3.2 Akustická pole v uzavřeném prostoru

Často se v průmyslové praxi setkáváme s případy, kdy se zdroj zvuku nachází v nějakém uzavřeném prostoru. Pokud se šíří zvuk v uzavřeném prostoru (montážní hala, dílna či laboratoř, ve které pracuje nějaký zvuk produkující stroj), dopadají akustické vlny na stěny, podlahy a strop místnosti, odkud se dále odráží zpět do uzavřeného prostoru. To vede k výskytu dvou základních typů vlnění, a sice vlnění v poli přímých vln a v poli odražených vln.

V drtivé většině případů se jedná o místnosti, které jsou tvořeny navzájem rovnoběžnými rovinými plochami.



Obrázek 3-3 - Akustické pole v uzavřeném prostoru

V porovnání se stavem, který vzniká ve volném prostoru, zvyšují tyto odrazy hladinu akustického tlaku, přičemž významnou roli hraje zvuková pohltivost povrchů (absorpce α), které tento uzavřený prostor ohraničují.

„V obecném případě pro uzavřené prostory se mohou vytvořit tři typy akustických polí. V nejbližším okolí zdroje jsou pole přímých vln nazývané blízké (či též Fresnelovo) pole. V tomto poli podléhá pokles hladiny akustického tlaku se vzdáleností stejným pravidlům jako ve volném prostoru a člověk nacházející se v tomto prostoru je schopen sluchem rozpoznat směr, odkud zvuk přichází. Pro tento případ platí teorie šíření zvuku ve volném prostoru, jež je vysvětlena v předchozí kapitole. Pole přímých vln je ohraničeno vzdáleností r_d [m], které říkáme dozvuková vzdálenost. Ve vzdálenějším místě uzavřeného prostoru se nalézá pole odražených vln. Zde dominuje akustické vlnění, které do sledovaného místa dorazí po mnohočetném odrazu od ploch, které ohraničují sledovaný uzavřený prostor. V poli odražených vln, kde se předpokládá difuzní charakter zvukového pole, je hodnota hladiny akustického tlaku nezávislá na vzdálenosti od zdroje a závisí převážně na celkové zvukové pohltivosti místnosti. [31].“

Představa zvukového pole, které má jen difuzní charakter šíření akustických vln, je zjednodušeným obrazem, který nám pomáhá pochopit a popsat zákonitosti, které se uplatňují při šíření zvukové energie v uzavřeném prostoru. Difuzní charakter ve sledovaných prostorech je ve skutečnosti vždy do jisté míry narušen. Toto zjednodušení, které neumožňuje vyhodnocovat kvalitativní parametry zvuku, a podobně jako v paprskové akustice (ray acoustic), akustická difúzní rovnice nezohledňuje nízkofrekvenční vlnění, jako jsou stojaté vlny nebo difrakce kolem rohů. Naopak umožňuje dostatečně přesně stanovit výpočtem kvantitativní zatížení uživatelů hlukem. Předpokládaný difuzní charakter šíření zvuku v uzavřeném prostoru předpokládá, že vznik a pohlcování zvuku v tomto prostoru v poli odražených vln probíhá nepřetržitě, tudíž platí zákon zachování energie:

$$(P - P_p) \cdot d\tau = V \cdot dw \quad (3.17)$$

P ve vztahu značí akustický výkon vyzařovaný, P_p - akustický výkon pohlcený, V - je objem prostoru a w - značí hustotu akustické energie.

V případě rovnoměrného rozložení energie, která dopadá na stěny uzavřené místnosti, lze definovat střední intenzitu pole pro odražené vlny jako:

$$I = \frac{w \cdot c}{4} \quad (3.18)$$

Následně je možné definovat akustický výkon, který je pohlcen ohraničujícími stěnami sledovaného prostoru jako:

$$P_p = \alpha_m \cdot I \cdot S = \frac{\alpha_m \cdot w \cdot c \cdot S}{4} \quad (3.19)$$

S ve vztahu označuje součet všech jednotlivých ploch S_i , které ohraničují uzavřený prostor a α_m je střední hodnotou činitele zvukové pohltivosti. Tuto hodnotu je možné určit, jestliže známe činitele zvukové pohltivosti α_i jednotlivých ploch:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (3.20)$$

Souhrnný akustický výkon, který se odrazil od všech stěn P_R je možno vyjádřit jako:

$$P_R = P \cdot (1 - \alpha_m) \quad (3.21)$$

Ustálený stav při šíření zvuku v uzavřeném prostoru chápeme jako stav rovnovážný. To znamená, že nedochází k žádné změně v hustotě akustické energie. Platí, že $dw/d\tau = 0$. To také znamená, že výkon v poli odražených vln se rovná výkonu pohlcenému:

$$P \cdot (1 - \alpha_m) = \frac{\alpha_m \cdot w \cdot c \cdot S}{4} \quad (3.22)$$

Rovnici akustického výkonu u rovinné vlny a intenzity zvuku lze napsat ve tvaru:

$$\frac{p^2}{\rho \cdot c} = \frac{4P \cdot (1 - \alpha_m)}{\alpha_m \cdot S} \quad (3.23)$$

Pokud převedeme rovnici (3.16) do logaritmického tvaru a dosadíme vztah pro intenzitu zvuku, pak za předpokladu zanedbání vlivu přímých akustických vln, se stanoví hladina akustického tlaku v poli odražených vln jako:

$$L_P = L_w + 10 \cdot \log \frac{4 \cdot (1 - \alpha_m)}{\alpha_m \cdot S} = L_w + 10 \cdot \log \frac{4}{R} \quad (3.24)$$

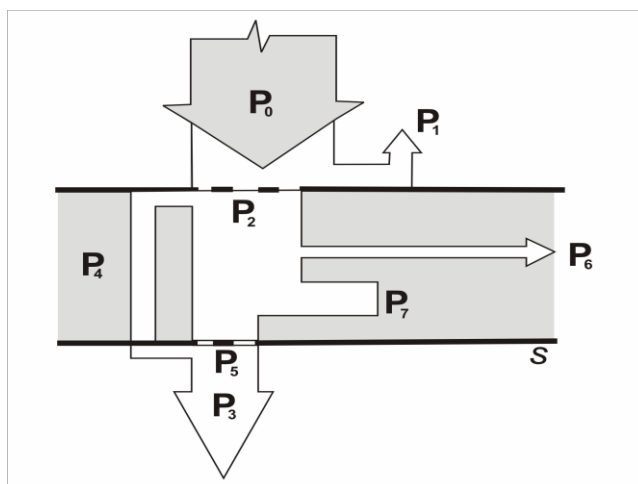
kde R je konstantou pro daný prostor, která vyjadřuje schopnost tohoto prostoru absorbovat akustickou energii

$$R = \frac{\alpha_m \cdot S}{1 - \alpha_m} \quad (3.25)$$

Při zjišťování hladin akustického tlaku se jedná vždy o současné působení vlivu vlnění v poli akustických vln, a to jak přímých, tak i vln odražených. Výraz (3.26) je znám jako Berankův vztah a charakterizuje hladinu akustického tlaku v poli přímých i odražených vln v určitém bodu v uzavřeném prostoru [31].

$$L_P = L_w + 10 \cdot \log \left[\frac{Q}{4\pi \cdot r^2} + \frac{4P \cdot (1 - \alpha_m)}{\alpha_m \cdot S} \right] \quad (3.26)$$

Aby bylo možno lépe sledovat vlastnosti pohltivých látek, bude stručně pojednáno o veličinách, pomocí kterých se tyto vlastnosti charakterizují. Co se děje s akustickou energií při dopadu na nějakou překážku nejlépe ukazuje schéma na Obrázek 3-4. Zvuk, který se šíří prostorem narazí na překážku a část původního výkonu P_0 [W] se rozdělí na výkon odražený P_1 , na výkon pohlcený P_2 .



Obrázek 3-4 - Rozložení akustického výkonu při dopadu zvuku na překážku

Zvuk, který se šíří prostorem narazí na překážku (stěnu místnosti) S , na překážce se určité množství výkonu odrazí a zbylá část je pohlcena materiálem nebo se vyzáří do prostoru po průstupu materiálem. Akustický výkon dopadající na 1 m^2 stěny, označený jako

výkon zvuku P_0 , se rozdělí na část: P_1 - výkon zvuku vlny odražené, P_2 - výkon zvuku vlny, která je pohlcená, P_3 - výkon zvuku vlny, která je vyzářená za stěnu celkem, P_4 - výkon zvuku vlny, kterou stěna vyzáří vlivem svého ohybového kmitání do prostoru za překážku, P_5 - výkon zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry, P_6 - výkon zvuku vlny, která je formou kmitání odevzdána do struktury, P_7 - výkon zvukové vlny přeměněné ve stěně na teplo. Na těchto úvahách lze stanovit veličiny, jako jsou: činitel pohltivosti, činitel odrazu a činitel prostupu neboli též průzvučnosti [35].

„Zvuková pohltivost povrchu konstrukce (i-tého povrchu) je dána součinem plochy povrchu a činitele pohltivosti. Celková zvuková pohltivost místnosti je pak součtem zvukové pohltivosti všech ploch, které místnost ohraničují, případně též zvukové pohltivosti předmětů a osob, které se v místnosti nacházejí.“ [31] Činitel pohltivosti je veličina bezrozměrná a závislá na frekvenci zvuku. Je proto důležité, aby všechny děje, které souvisejí se zvukovou pohltivostí, byly sledovány a hodnoceny v daných frekvenčních pásmech. Nejčastěji se jedná o kmitočtová pásma třetino-oktávová, případně oktávová. Přičemž zvuková pohltivost je závislá na materiálu obkladů a jeho tloušťce, eventuálně na odstupu (tloušťka vzduchové mezery) od pevného povrchu stěny. Zvuková pohltivost, také nazývána absorpční koeficient, dosahuje hodnot v rozmezí 0 až 1 [35].

V poli odražených vln, kde je očekáván difúzní charakter zvuku, jsou uplatněny tyto předpoklady:

„- každý směr dopadu zvuku je stejně pravděpodobný neboli úhly, pod kterými zvuková energie dopadá na sledovaný bod, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností

- *hustota energie zvuku je součtem hustoty energie všech zvukových vln, které současně do daného místa z různých směrů přicházejí*
- *hustota akustické energie je ve všech místech difúzního pole stejná“* [35]

Tyto tři předpoklady se staly zásadní a výchozím předpokladem pro představený výpočetní postup.

3.3 Souvislost akustických veličin

Základním vzorcem v technické akustice je výraz popisující vztah mezi intenzitou zvuku a akustickým tlakem

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} \quad (3.27)$$

na jehož platnosti je založeno měření hluku v technické akustice a i ostatní akustické výpočty. Výraz je platný sice pouze pro vlnu rovinou, ale s dostatečnou přesností je ho možno využít i v šíření kulových vln [31].

Pokud je tento výraz dosazen do definičního vzorce pro výpočet hladiny intenzity zvuku, je možno psát

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p^2}{\rho c}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 c_0}} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 10 \log \frac{\rho_0 c_0}{\rho c} \quad (3.28)$$

Při běžných klimatických podmínkách dosahuje poslední člen rovnice -0,2 dB, takže se vztah zjednoduší do tvaru

$$L_{II} = L_p - 0,2 \cong L_p \quad (3.29)$$

Tato rovnice má velký význam v technické akustice, protože umožňuje na základě měření hladiny akustického tlaku přímo určit hladinu intenzity zvuku. Hladina akustického výkonu L_w je také vyjadřována v dB, avšak je nutné ji odlišovat od ostatních hladin, zejména od hladiny akustického tlaku a hladiny intenzity zvuku [31].

3.4 Mechanické zdroje hluku

V této podkapitole jsou jen velmi stručně zmíněny mechanické zdroje hluku, které budeme uvažovat v této práci, protože pro správné pochopení zákonitostí spojených s vyzářováním zvuku z různých zdrojů je třeba využít znalostí o základních typech akustických zářičů.

Součástí většiny strojů a strojírenských výrobků jsou díly, které konají nějaký pohyb (vratný nebo rotační), s nímž je spojeno silové působení na okolní prvky. Jestliže je kmitající povrch součásti obklopený vzduchem, nastává přenos energie kmitání do okolního prostředí. Označujeme pak tuto součást jako zdroj hluku.

V akustice uvažované zdroje zvuku dostatečně malých rozměrů jsou chápány jako bodový zdroj zvuku. Od něj se zvuková vlna šíří homogenním prostředím přímočaře do všech směrů. Takto vzniklý tvar zvukové vlny je možno považovat za kulový. Tento typ akustických výpočtů se řeší pomocí obecných vlnových rovnic. Pro potřeby výpočtu akustického vyzářování je důležitý vztah (3.15) pro výpočet intenzity zvuku kulové vlny uvedený v předchozí podkapitole.

V diskutovaném přístupu se převážně bude jednat o případy, kdy zářičem (zdrojem) je velký plošný útvar a s ním související akustické pole. Například plechový kryt motoru čerpadla, ze kterého se do prostoru šíří zvuk.

Výpočet pak bude na základě předpokladu o znalosti akustického výkonu, který připadá na plochu S [m²] zářiče.

$$W = \rho_{ef} v_{ef} S c \cos \varphi \quad (3.30)$$

Po dosažení do rovnice amplitudy akustického tlaku na povrchu pulsující koule a dalších matematických úpravách dostaneme konečný vztah určující vyzářovaný akustický výkon [W] zdroje nultého řádu

$$W = v_{ef}^2 \rho c 4\pi R^2 \frac{k^2 R^2}{1 + k^2 R^2} = v_{ef}^2 \rho c S_s \quad (3.31)$$

kde v_{ef} je efektivní rychlost kmitání na povrchu koule

ρc je vlnový odpor prostředí

k je vlnové číslo

R je poloměr zářiče

S je činitel vyzářování

3.5 Koeficienty absorpce povrchu místnosti

Dalo by se říci, že nejobtížněji získanými proměnnými, které je nutné pro výpočet algoritmu radiosity, jsou absorpční koeficienty povrchu místnosti. Pro změření absorpčních charakteristik mohou být využity spolehlivé metody pro měření zvukové pohltivosti, jako jsou metody měření za pomoci impedanční trubice nebo metody získané v dozvukové komoře. Materiály, ze kterých bylo možné vytvořit požadovaný vzorek absorpčního materiálu, byly změřeny a byly zaznamenány jejich absorpční charakteristiky. Tyto charakteristiky ve formě třetino-oktávových spekter byly vloženy do databáze programu materiálové databáze.

Pro materiály ze kterých nebylo možné vytvořit vzorek, typicky zeď v místnosti či betonová podlaha, byla použita metodika popsána například [37]. Detailní popis této metodiky je mimo rozsah této práce.

Pro materiály obecně je možné využít hodnot získaných z rozsáhlých tabulek absorpčních koeficientů různých materiálů a povrchových úprav [50]. Přestože často není možné znát přesné materiály, z nichž je zeď postavena, mohou tyto tabulky sloužit jako vodítko. Je nutné brát v úvahu, že i kdyby byla konstrukce stěny známa přesně, skutečný absorpční koeficient by se případ od případu mohl mírně lišit.



Obrázek 3-5 - Měření absorpčních charakteristik za pomoci impedanční trubice

4. Výpočtový program pro predikční akustické výpočty

V rámci studia byly posouzeny přednosti, nedostatky a využitelnost některých výpočetních přístupů týkajících se akustiky uzavřených prostorů. V počáteční fázi byl na základě rešerší literatury získán přehled o standardních numerických metodách využitelných v akustice. Tyto výpočtové přístupy založené na principech a algoritmech metod konečných prvků, metod hraničních prvků a metod statistické energetické analýzy, byly porovnány z hlediska jejich přesnosti a použitelnosti, jak s ohledem na výpočtovou náročnost, tak s ohledem na frekvenční rozsah (16 Hz až 10 kHz) [38].

Bylo konstatováno, že již existují pokročilé (drahé) komerční programy, které jsou vhodné pro tento typ výpočtů. Například v rámci ZČU je zakoupena licence pro rozsáhlý výpočetní balík firmy Siemens NX a v minulosti byly získány zkušenosti s akademickou licencí softwaru pro statistickou energetickou analýzu VA One.

První ze zmíněných výpočetních přístupů je součástí komplexního softwarového balíku pro podporu činností v konstrukci a výrobě, umožňující provést v jednom výpočtovém prostředí vše od ideového návrhu po síťování, výpočet, simulace a analýzy. Obsahuje také složitější interdisciplinární simulační rozšíření jako je rozšíření Simcenter 3D Acoustics Modeling zabývající se akustickými výpočty a simulacemi. To je založeno na kombinaci akustického síťování pro NX Nastran pro metodu konečných prvků a Simcenter pro metodu hraničních prvků. Tato kombinovaná konfigurace modelu FEM-BEM je vhodná, protože FEM specifikuje vlastnosti materiálu na základě jednotlivých prvků, což dovoluje modelovat komplexní vnitřní struktury, zatímco BEM představuje nekonečnou vnější kapalinovou doménu s povrchovou diskretizací.

Druhým komerčně nabízeným výpočetním přístupem, který byl v rámci této práce studován, je software VA One. Tento software je založen na výpočtech metodou statistické energetické analýzy a umožňuje počítat úlohy, jejichž výsledky jsou použitelné pro řešení problémů v oblasti provozu kolejových vozidel, trolejbusů a autobusů. Je vhodný zejména pro úlohy řešící hlukové vyzařování uvnitř vozu od pohonů, podvozku a vzduchotechniky. Je použitelný i při vyšetřování hluku pronikajícího do prostoru interiéru vozů z okolí a hlukem vyzařovaným z vozu do prostoru. Byl také úspěšně použit i pro výpočty a návrhy různých protihlukových krytů. Řešen byl například protihlukový kryt turbíny 200 MW (tzv. autobus) na elektrárně Tušimice. Posledním, ne příliš běžným přístupem využití této metody bylo její nasazení do predikčních výpočtů hladin akustického tlaku v budovách [16].

Výhodou tohoto softwaru je, že umožňuje velmi rychle, za pomoci rozsáhlých materiálových knihoven, přepočítávat změny v modelu ve smyslu modifikací absorpčních charakteristik stěn (treatment layers). V dalších verzích byl do tohoto softwaru implementován i konečně-prvkový řešič, který umožňoval počítat modely komplexně ve smyslu hybridního spojení metody energetické statistické analýzy a metody konečných prvků (pro uzlové sekce struktury). Program VA One se stal jedním z nejuniverzálnějších způsobů, jak vyřešit často velmi komplexní problémy s hlukem v oblasti dopravních prostředků.

Z nabytých zkušeností však vyplynulo, že pro řešení úloh v oblasti hlukového zatížení, může být nasazení těchto softwarových nástrojů velmi komplikované. Přitom pro řešení řady úloh pro snižování hluku v uzavřených prostorech lze zásadní opatření pro snížení hluku

stanovit jednodušeji. To platí zejména pro méně komplexní výpočty bez požadavku na rozšíření o konečně prvkový řešič. Proto byl navržen základní koncept ve formě tohoto operativního výpočetního nástroje pro pohotovostní predikční výpočty se zaměřením na návrh zvuko-izolačních úprav vnitřních prostorů, který byl následně podroben ověření. První výsledky ukazují, že je to nadějná cesta. A z tohoto důvodu byl naformulován konečný cíl disertační práce takto:

Za pomoci nově vyvinutého výpočetního přístupu stanovit hladiny akustického tlaku v namodelovaném vnitřním prostoru pro následné praktické využití takto zjištěných výsledků při návrzích úprav stěn za pomoci zvuko-izolačního materiálu. Výpočtem predikované hladiny akustických tlaků poté ověřit měřením.

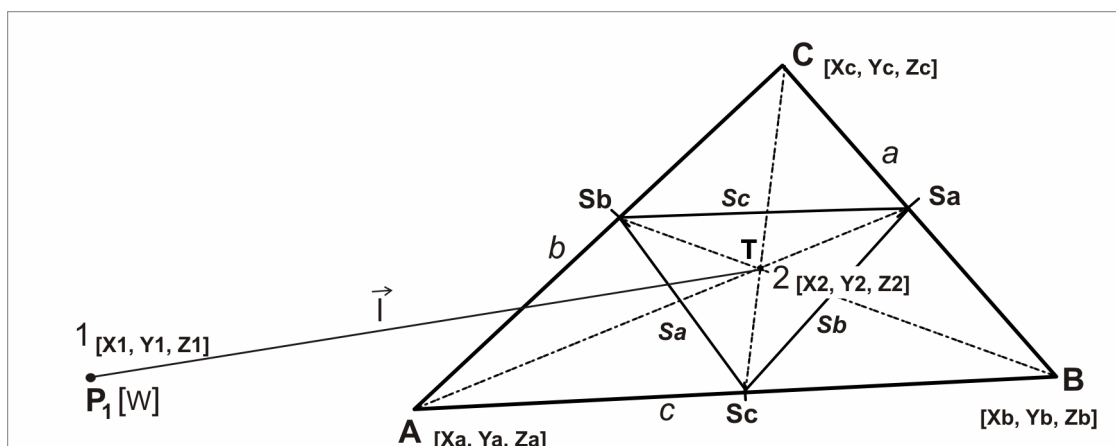
V kapitole 3 byly definovány základní vztahy pro výpočet přenosu energie mezi prvky na povrchu uzavřené místnosti. K provedení prediktivních výpočtů na vytvořeném modelu bylo nutné rozdělit všechny povrchy, na které zvuková energie padá, na vhodné prvky/elementy. K tomuto účelu byl použit program Siemens NX. V tomto programu byl celý prostor namodelován, a to včetně všech překážek a ploch reprezentujících zdroje zvuku. Poté byly plochy převedeny na síť elementů. Tyto sítě s příslušnými atributy byly exportovány do výpočetního vytvořeného programu v prostředí LabVIEW. Je nutné podotknout, že síť elementů včetně přiřazení atributů elementům (typ elementu, reálné konstanty, materiálové vlastnosti) může být vytvořena i v jiném programu. Volně k dispozici jsou programy pracující jako nadstavby k modelovacím programům, které umožňují vytvořit požadovanou síť elementů včetně nastavení parametrů tvorby sítě.

4.1 Teorie pro sestavení programu pro vyzařování z elementů

Výpočet byl proveden za pomoci určení vektorových součinů pro strany trojúhelníka, středy stran a těžišť. Jako základní element je uvažován trojúhelník s vrcholy A, B, C o souřadnicích vrcholů $[X_a, Y_a, Z_a; X_b, Y_b, Z_b; X_c, Y_c, Z_c]$ a stranami a, b, c . Souřadnice těžiště je dáno středními hodnotami jednotlivých souřadnic vrcholů.

$$T[X_2, Y_2, Z_2], X_2 = (X_a, X_b, X_c)/3, Y_2 = (Y_a, Y_b, Y_c)/3, Z_2 = (Z_a, Z_b, Z_c)/3$$

Pak normálový vektor plochy je $\frac{1}{2}$ vektorového součinu $\mathbf{AB} \times \mathbf{AC}$ a nese informaci o velikosti plochy. Viz Obrázek 4-1 -.



Obrázek 4-1 - Výpočet vyzařování z elementu

Vztahy mezi vzdálenostmi, plochami výkonů a intenzitou akustického vyzařování lze formulovat do následujících rovnic, které se staly zásadními vztahy pro výpočtový algoritmus predikčního programu:

$$|l^2| = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \quad (4.1)$$

$$I_2 = P_1 / 4\pi l^2 \quad (4.2)$$

$$P_2 = I_2 \cdot S_{2P} \quad (4.3)$$

kde S_{2P} je průmět plochy trojúhelníkového elementu S_2 do směru P_1T .

4.2 Popis programu pro výpočet šíření akustické energie v uzavřeném prostoru

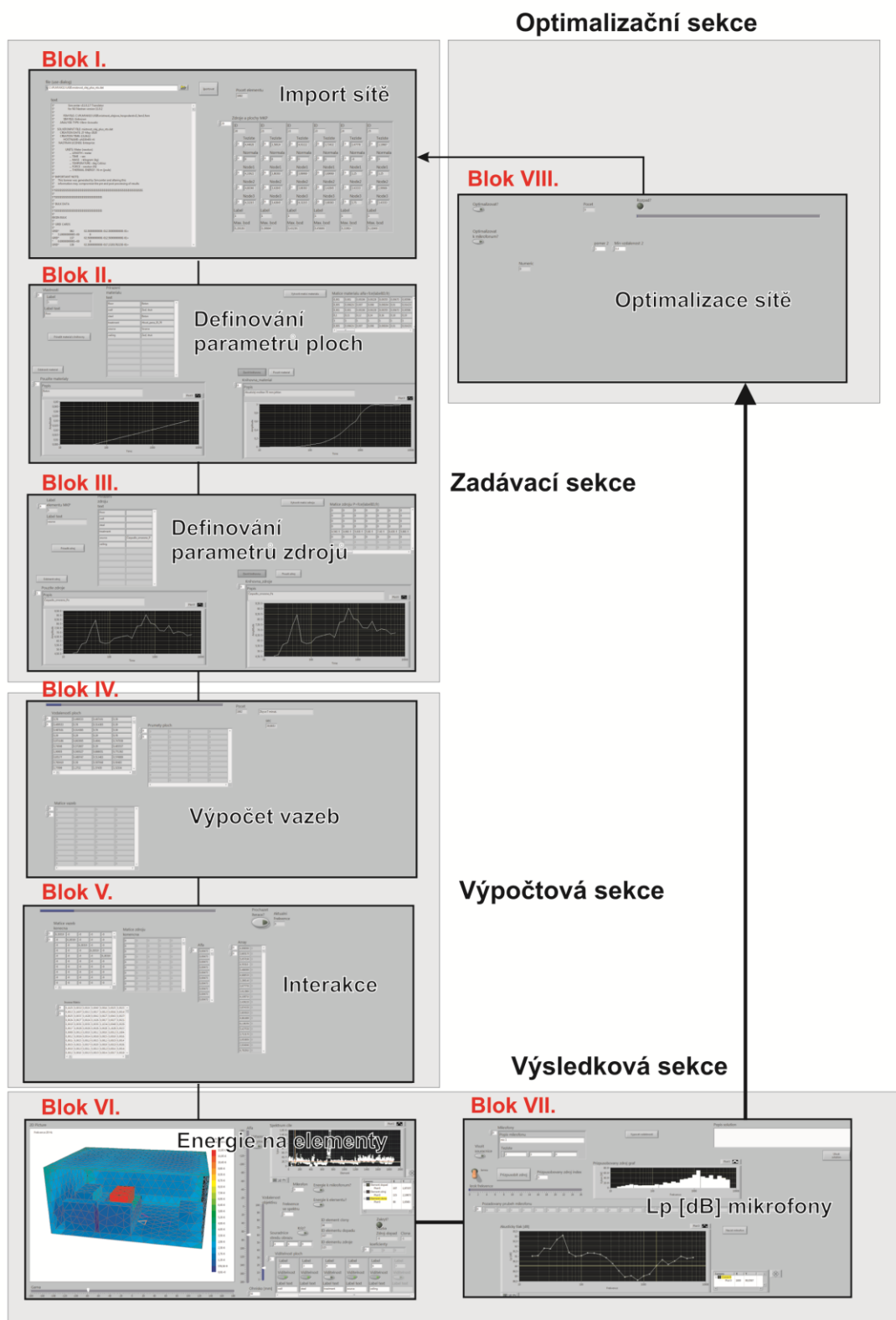
Program byl vyvíjen přibližně ve čtyřech etapách, přičemž výpočetní algoritmus počítající transfer energie mezi elementy zůstal bez zásadních úprav po celou dobu vývoje programu. Řešič doznával změn jen z hlediska přidávání určitých funkcí a vylepšování uživatelského rozhraní. Nejvýznamnější přidanou funkcí je bezesporu přidání optimalizačního bloku, který zásadním způsobem optimalizuje síť elementů v plochách, které jsou vzhledem k predikčním výpočtům uzavřeného prostoru, významné. Na obrázku 4-2 je vidět blokové schéma finální verze programu pro predikční výpočet v uzavřených prostorech.

Schéma přehledně zobrazuje bloky, které lze podle funkčnosti sdružit do čtyř sekcí.

První sekce by se dala označit jako vstupní. V těchto třech blocích jsou postupně zadány hlavní vstupní veličiny, jako je síť modelu (vytvořená v externím modelovacím prostředí), absorpční parametry ploch a frekvenční charakteristiky zdrojů hluku vstupující do výpočtu. Zadávací sekce má tři záložková okna.

První záložkové okno (Blok I.) slouží k importu souřadnic sítě elementů a souřadnic jejich těžišť.

Druhé a třetí záložkové okno (Blok II. a III.) slouží k importu absorpčních charakteristik vybraných materiálů, které se nahrají do výpočetních matic z vytvořené knihovny a přiřadí se použitým materiálům.



Obrázek 4-2 - Blokový diagram výpočtu programu

Na základě těchto importovaných dat se vytvoří matice absorpčních charakteristik materiálů. Ve třetím záložkovém okně se stejným způsobem z knihoven zdrojů naimportují použité zdroje a přiřadí je k plochám, které přísluší zdroji či zdrojům a stejně jako v předchozí záložce se vytvoří matice zdrojů.

Ve vývojovém diagramu se posouváme do výpočtové sekce, kde dochází ve dvou záložkových oknech k výpočtu vzdálenosti ploch, průmětů ploch a matic vazeb mezi plochami. V druhém záložkovém okně této sekce se vytvoří konečná matice vazeb mezi elementy, konečná matice zdrojů. Předposlední sekce má dva výpočtové bloky opět ve formě dvou záložkových oken. V prvním je generován výsledkový termogram a zobrazen celý model a vizualizace energie dopadající na jednotlivé elementy. Zobrazený model lze samozřejmě zvětšovat, zmenšovat, rotovat a výsledek je možné zobrazit celou řadu třetino-oktákových frekvencí.

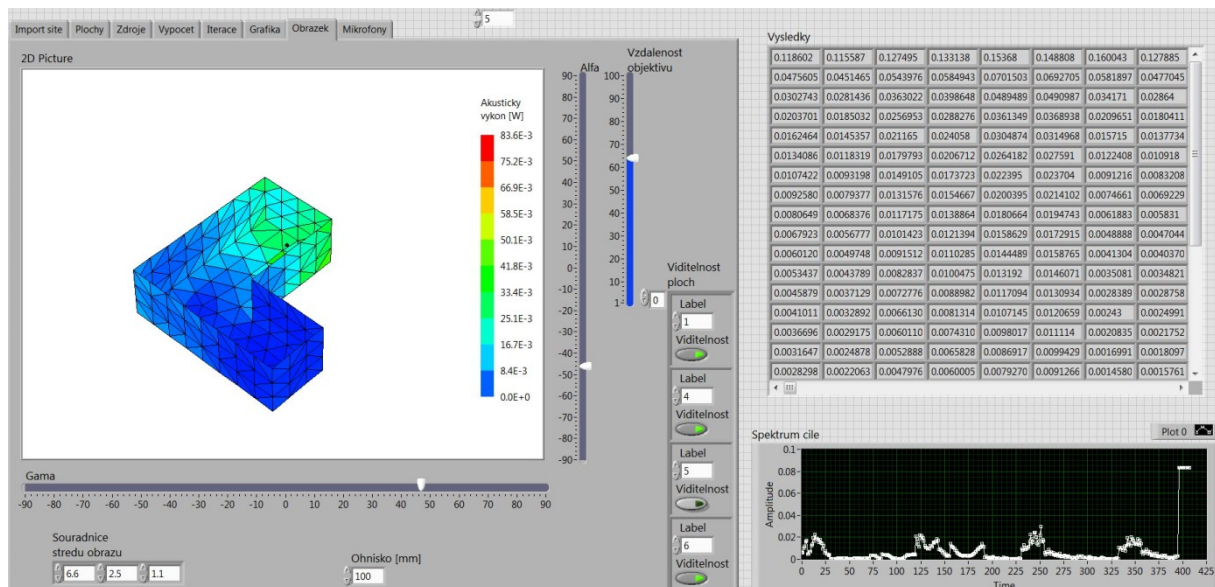
Druhá záložka v této sekci nazvaná mikrofony umožňuje výpočet akustického tlaku pro mikrofony definované v různých bodech modelu. Na této záložce je také možné vygenerovat frekvenční charakteristiku zdroje v případě, že máme naměřený mikrofón a toto změřené třetino-oktákové spektrum zadáme do požadovaného průběhu mikrofónu.

Poslední sekci lze nazvat optimalizační. Tato sekce obsahuje jedno záložkové okno a její smysl je v tom, že pokud se u zdroje nachází plošně dostatečně velký element, je možné tímto optimalizačním výpočtem zjemnit lokálně síť v blízkosti vyšetřovaného elementů. To znamená, že lze tuto funkci využít v případě lokálního vyšetřování třeba v rohu místnosti a to tak že do tohoto prostoru nadefinujeme mikrofón a pustíme funkci optimalizovat k mikrofónu. Zmíněná funkce je dalo by se říci určitou nadstavbou a již se nachází mimo výzkumný rámec této práce, jejímž hlavním úkolem bylo vytvořit praktický a pohotový nástroj pro predikční výpočty při změnách obložení různými zvuku izolační materiály.

Rozšíření programu o optimalizační sekci sloužící pro podrobnější vyšetřování a zjemňování sítě v inkriminovaných místech, stejně tak jako implementace 3D modeláře, který by byl vhodný pro tvorbu základních modelů a vhodný pro vytvoření vhodné sítě, byla přesunuta do plánů s tímto algoritmem do budoucna.

Na obrázku 4-3 je vidět jeden z prvních modelů vytvořených v počáteční verzi programu. Jednalo se o prostor ve tvaru písmene L. Výpočet této úlohy již byl proveden v prostředí LabVIEW od National Instruments. Z modelu je zřejmé, na které elementy dopadá ze zdroje šířená akustická energie a barevná škála zobrazuje intenzitu dopadající energie. Graf umístěný vpravo dole, označený jako Spektrum cíle, znázorňuje množství energie dopadající na jednotlivé elementy.

Jak bylo zmíněno v úvodním odstavci této kapitoly, pro výpočet byl použit přenos energie mezi povrchovými elementy uzavřeného prostoru.



Obrázek 4-3 - Jedna z prvních verzí programu - model prostoru ve tvaru písmene L

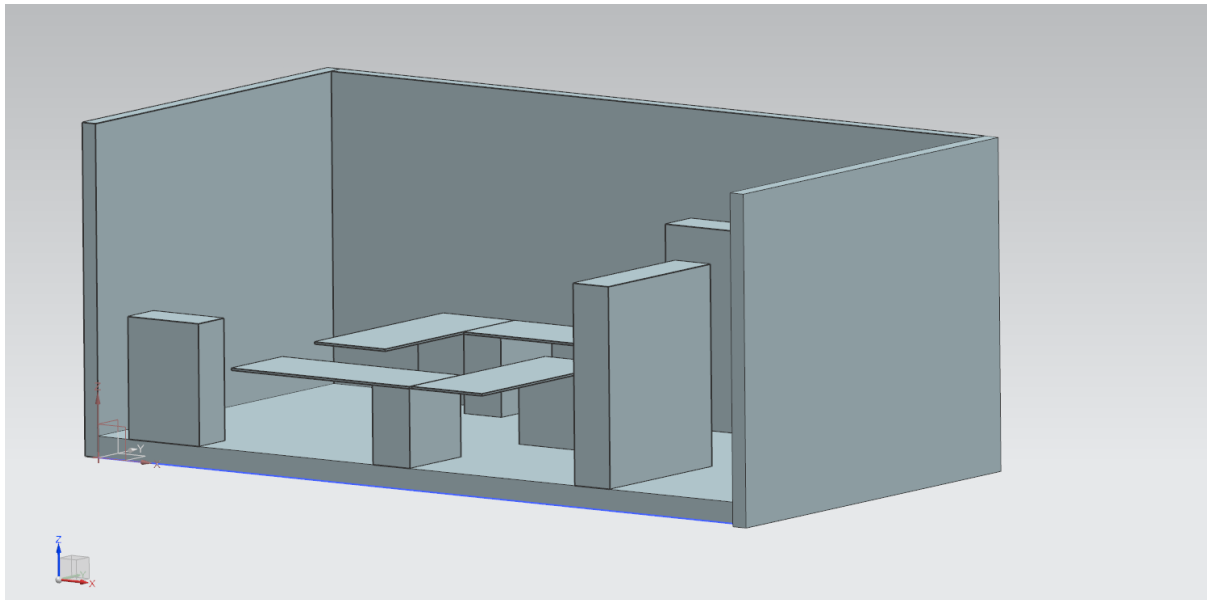
Po spuštění výpočetní procedury je třeba nejdříve načíst data sítě, která byla vytvořena v programu Simcenter v.11 pro NX Nastran. Soubor s koncovkou *.dat obsahuje nejen koordináty sítě, ale i všechny do bloků rozdělené, elementy. Tyto jednotlivé bloky neboli kategorie reprezentují jednotlivé materiály s různými materiálovými charakteristikami. Jedna z prvních verzí programu - model prostoru ve tvaru písmene L je vidět na Obrázek 4-3. V této variantě programu nebyla implementována možnost vyhodnocení energie dopadající na vybrané elementy. Tato první verze programu také neumožňovala optimalizovat načtenou síť ve smyslu zjemnění sítě v problematických místech.

V následujícím kroku dochází k přiřazení materiálu z knihovny materiálů jednotlivým kategoriím elementů. V knihovně materiálů jsou obsaženy amplitudově-frekvenční absorpční charakteristiky materiálů (α). Poté jsou z knihovny do matice zdrojů staženy jednotlivé použité zdroje opět ve formě amplitudově-frekvenčních charakteristik. V následujícím kroku probíhá již vlastní výpočet vzdálenosti ploch, průmětů ploch a určují se matice vazeb. Tento výpočet při množství elementů nepřesahujících 2000 se pohybuje zhruba okolo 15-18 minut. Ve chvíli, kdy je tento výpočet ukončen, dojde k výpočtu interakcí a stanovují se konečné matice vazeb a matice zdrojů.

Následně je možné zobrazit 3D obrázek modelu s již zbarvenými elementy podle množství na ně dopadajícího akustického výkonu. V příloženém grafu lze vyhodnotit výkon dopadající i na jednotlivý element. Stejně tak je možné souřadnicemi definovat místa, kde budou umístěny virtuální mikrofony a v těchto místech zjistit vypočítané hladiny akustického tlaku.

4.3 Experimentální ověření modelování šíření hluku v uzavřeném prostoru

Po modelu prázdné, do písmene L tvarované, místnosti byl namodelován reálný prostor - kancelář i s vnitřním nábytkovým vybavením. Obrázky 4-4 až 4-6 zobrazují tento model i pokročilejší verzi programu. A to postupně od vytvoření CAD modelu spolu s vytvořením sítě až po vlastní výpočet ve vytvořeném prostředí.

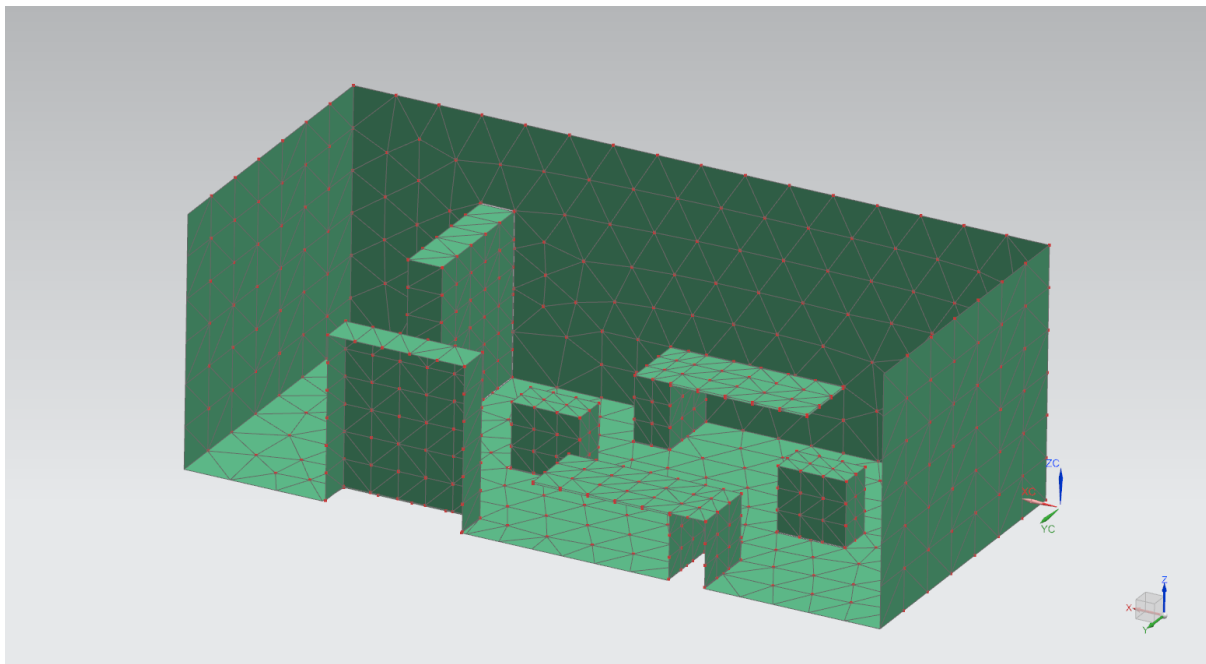


Obrázek 4-4 - Vytvoření modelu všech zvuko-odrazivých povrchů

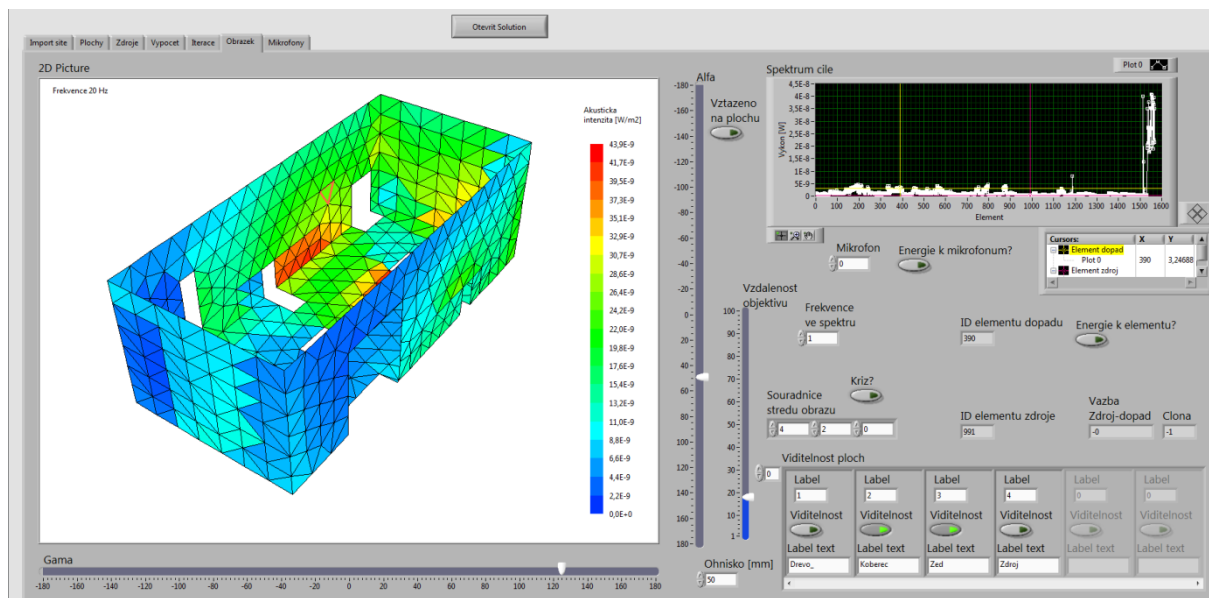
Tento model místnosti byl realizován včetně všech překážek, skříní a stolu. Nejdříve byl pro potřeby sítě vytvořen model v měřítku v programu NX Siemens. Poté byla provedena diskretizace (sítě elementů 2d_mesh - CTRIA3) všech vnějších povrchů, na které dopadá akustická energie. Celkový počet elementů celého modelu pro 2D síť CTRIA3 s velikostí elementů zhruba v rozmezí 400 - 800 mm (na větší plochy jako je strop a boční stěny byly vytvořeny sítě s velikostí elementu 600 až 800 mm, nábytek, překážky a menší prvky byly vybaveny sítí s velikostí elementů 400 mm) dosáhl zhruba 1400 elementů a při tomto počtu elementů trvalo standardnímu počítači sestavení matic přibližně 15 min.

Jednotlivé povrchy byly podle materiálu, jehož povrch reprezentují, rozděleny do kategorií (mesh collectors). K těmto kategoriím se poté přiřadí absorpční charakteristika.

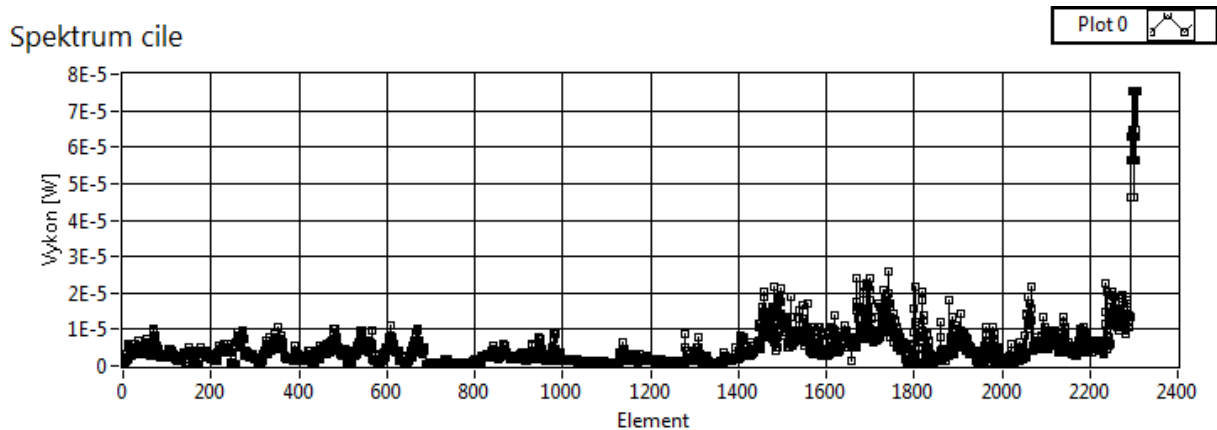
Jako zdroj zvuku je možné do programu zavést pro jednoduchost konstantní hladinu akustického výkonu, definovanou jen hladinou akustického výkonu ve watttech. Pro získání realistických hladin akustického tlaku v uzavřeném prostoru je praktické zadávat skutečné hladiny akustického výkonu vztažené k referenční hodnotě akustického výkonu 10^{-12} W, které byly naměřeny v reálném prostředí jako zdroj hluku. Tyto hodnoty je pak výhodné zadat do programu ve formě třetino-oktávového frekvenčního spektra.



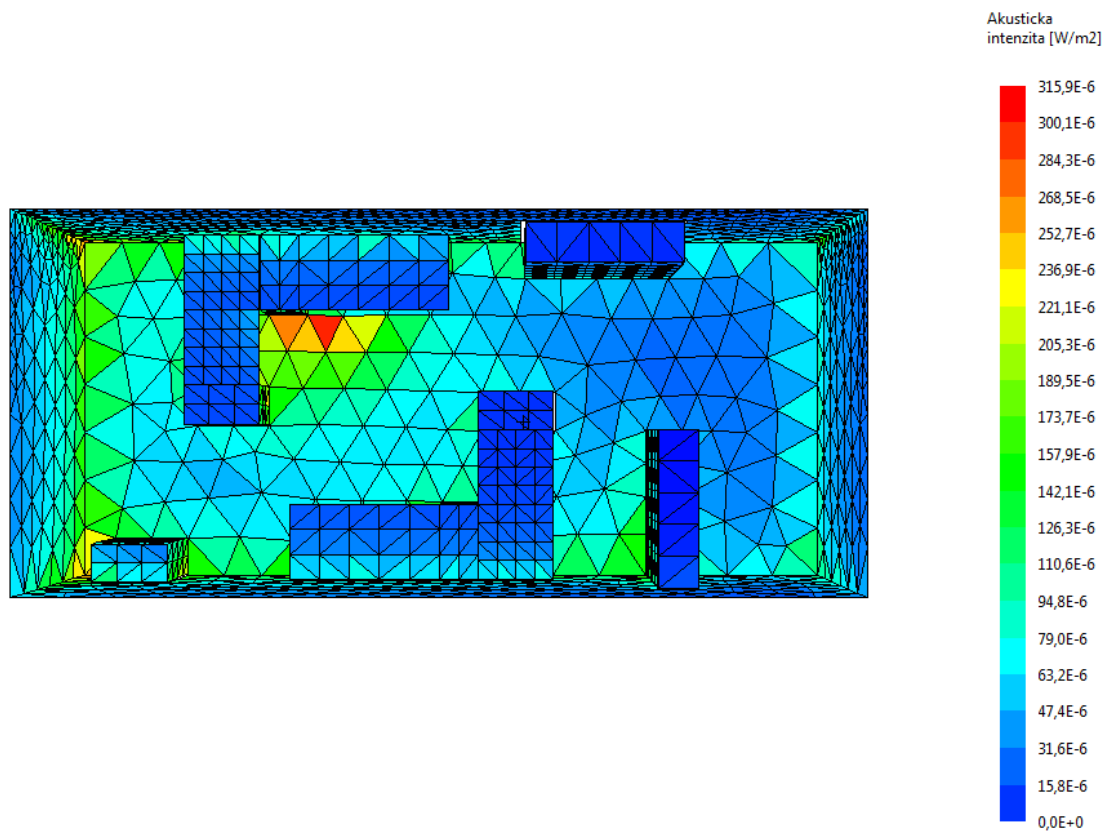
Obrázek 4-5 - Vytvoření sítě všech zvuko odrazivých povrchů



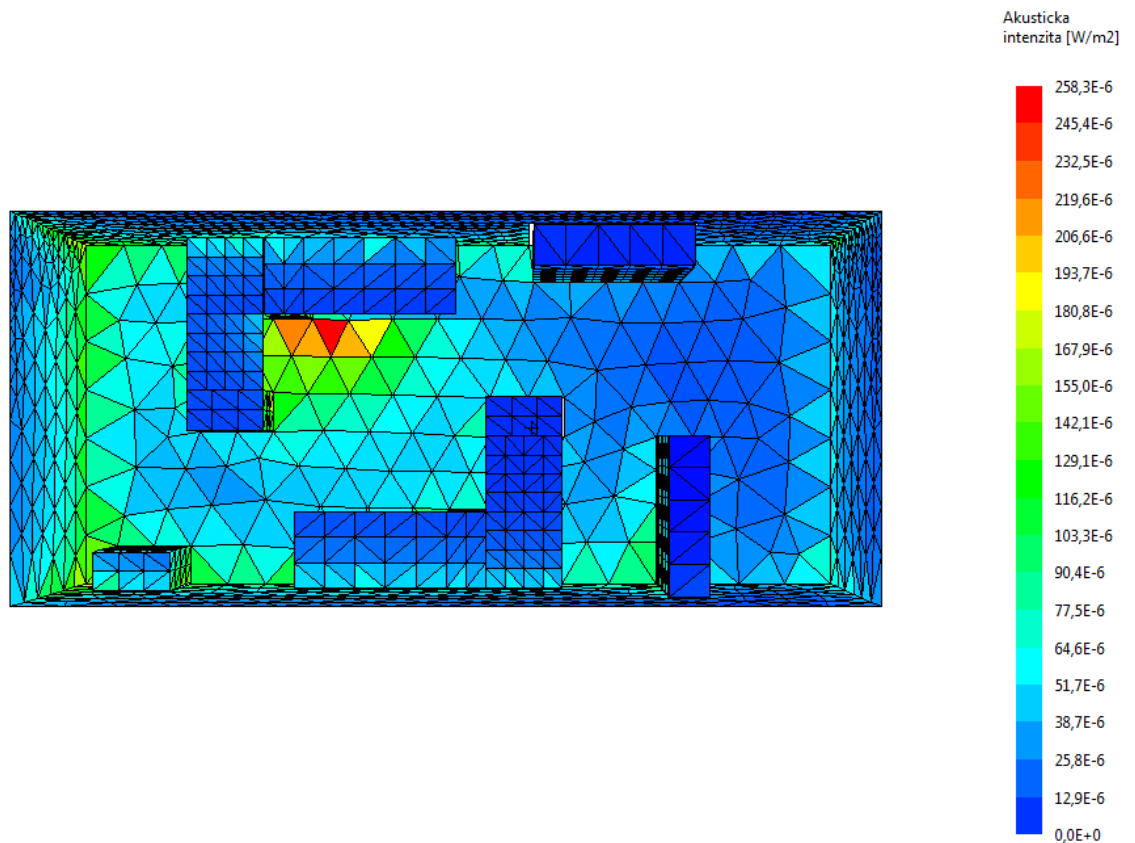
Obrázek 4-6 - Ukázka pokročilejšího modelu kancelářské místnosti



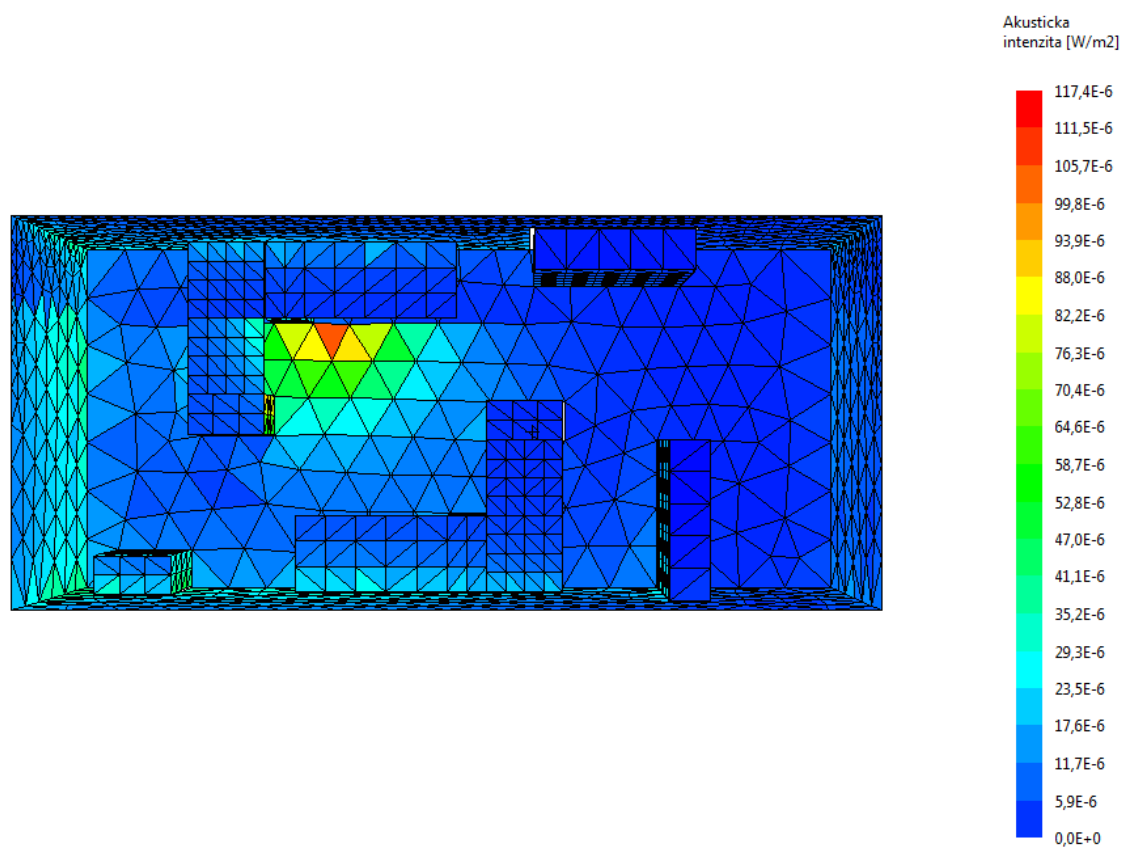
Obrázek 4-7 - Množství energie dopadajícího na jednotlivé elementy



Obrázek 4-8 - Výpočet energií dopadajících na elementy v místnosti při 125 Hz



Obrázek 4-9 - Výpočet energií dopadajících na elementy v místnosti při 800 Hz



Obrázek 4-10 - Výpočet energií dopadajících na elementy v místnosti při 6300 Hz

Pro kancelářskou místnost, která zahrnuje charakteristiky šesti materiálů, byl poté proveden predikční výpočet pro dva stavy. První bez absorpčního panelu a druhý s absorpčním panelem. V obou případech byl zdrojem hluku reproduktor umístěný na dně trubky. (impedanční trubice s reproduktorem na zadní stěně o akustickém výkonu 0,005 W.) Absorpce vzduchu byla zanedbávána. Absorpční panel byl předsazen před trubicí s reproduktorem.

Stejně jako u jakéhokoliv jiného numerického řešení je žádoucí ověřit výpočet porovnáním s měřením v reálných uzavřených prostorech. Takové srovnání by také mohlo odhalit možné problémy nebo chyby ve výpočtu programu. Proto byly naměřeny hodnoty akustického tlaku pro různé body prostoru. Měření respektovalo postup měření emise hluku definovaný například v ČSN ISO 230-5. Experimentální ověření bylo provedeno v reálném uzavřeném prostoru nábytkem vybavené kanceláře, kde byl v určeném místě instalován reproduktor, který je součástí sestavy Impedanční trubice typ 4206 od firmy Brüel&Kjaer jako zdroj hluku. Zde byla poté naměřena hladina akustického výkonu vyzařovaného tímto zdrojem. Aby mohla být tato hladina akustického výkonu vyzařovaného tímto zdrojem vypočtena, bylo potřeba - v souladu s normou - změřit hladiny akustického tlaku na definované měřicí ploše ohraničující zdroj hluku. Nejdříve bylo třeba stanovit polohy mikrofону na měřicí ploše, které se nachází na povrchu referenčního rovnoběžnostěnu. Umístění zkoušeného zdroje, měřicí plocha a plochy mikrofону jsou určeny souřadnicovým systémem s vodorovnými osami X a Y v základní rovině, rovnoběžnými s délkou a šířkou referenčního rovnoběžnostěnu [39].

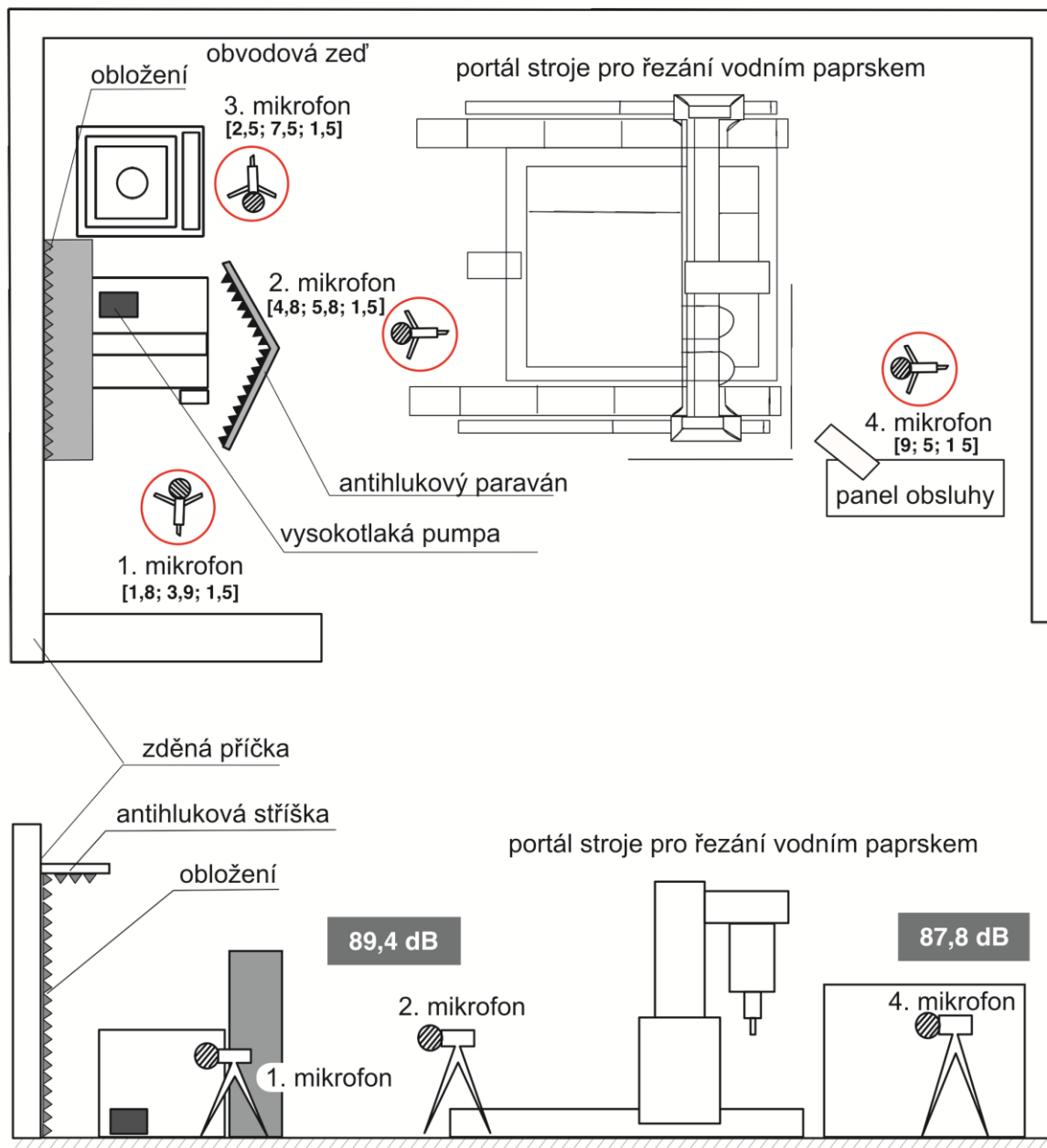
Poté byla v tomto místě změřena hladina akustického tlaku za pomoci ověřeného hlukoměru a tyto hodnoty byly porovnány s vypočtenými hodnotami akustického tlaku z programu o sdílení energií.

Následně byl proveden test vložím absorpční plochy o rozměrech 1200 x 800 mm za účelem snížení hladiny akustického tlaku pohlcením zvukové energie touto plochou. Porovnání bylo opět provedeno stejným způsobem a ve stejných místech, kde byl umístěn mikrofón hlukoměru. Výsledky tohoto prvního testu nejsou v této práci uvedeny. Vypočtený i změřený pokles hladin akustického tlaku, způsobený vložím absorpčního panelu, byl vlivem poměru vložené absorpční plochy k celému povrchu kanceláře velmi nepatrný.

4.4 Experimentální ověření - modelování šíření hluku ve výrobní hale

Po této prvotní úloze následovalo praktické nasazení vyvíjeného výpočetního programu pro řešení reálného problému zvýšených hladin akustického tlaku v laboratoři. Byla modelována reálná úloha z výrobní haly v laboratořích RTI. V této hale se nachází velmi hlučné zařízení – řezačka vodním paprskem. Tryska při řezání produkuje velmi silný pulsující hluk, zejména v okamžiku, kdy se ústí trysky dostane nad hladinu vody v pracovní nádrži. Tyto intenzivní zvukové pulzace jsou intenzivním, ale ne trvalým zdrojem hluku šířícím se celou laboratorní halou. Druhým trvalým zdrojem hluku je vysokotlaké čerpadlo, které produkuje velmi nepříjemný hluk se špičkami ve frekvenční oblasti 800 až 1000 Hz. Čerpadlo je částečně zakryto. Kryt tohoto soustrojí je zčásti otevřen pro nutnou ventilaci. Těmito otvory, které jsou kryté jen mřížkou, dochází k vyzařování akustické energie do prostoru haly. Ke snížení hladin akustického zatížení obsluhy, bylo třeba navrhnout obložení krytu čerpadla zvuko-izolačními panely a stejně tak i obložení nejbližší stěny, která působí jako

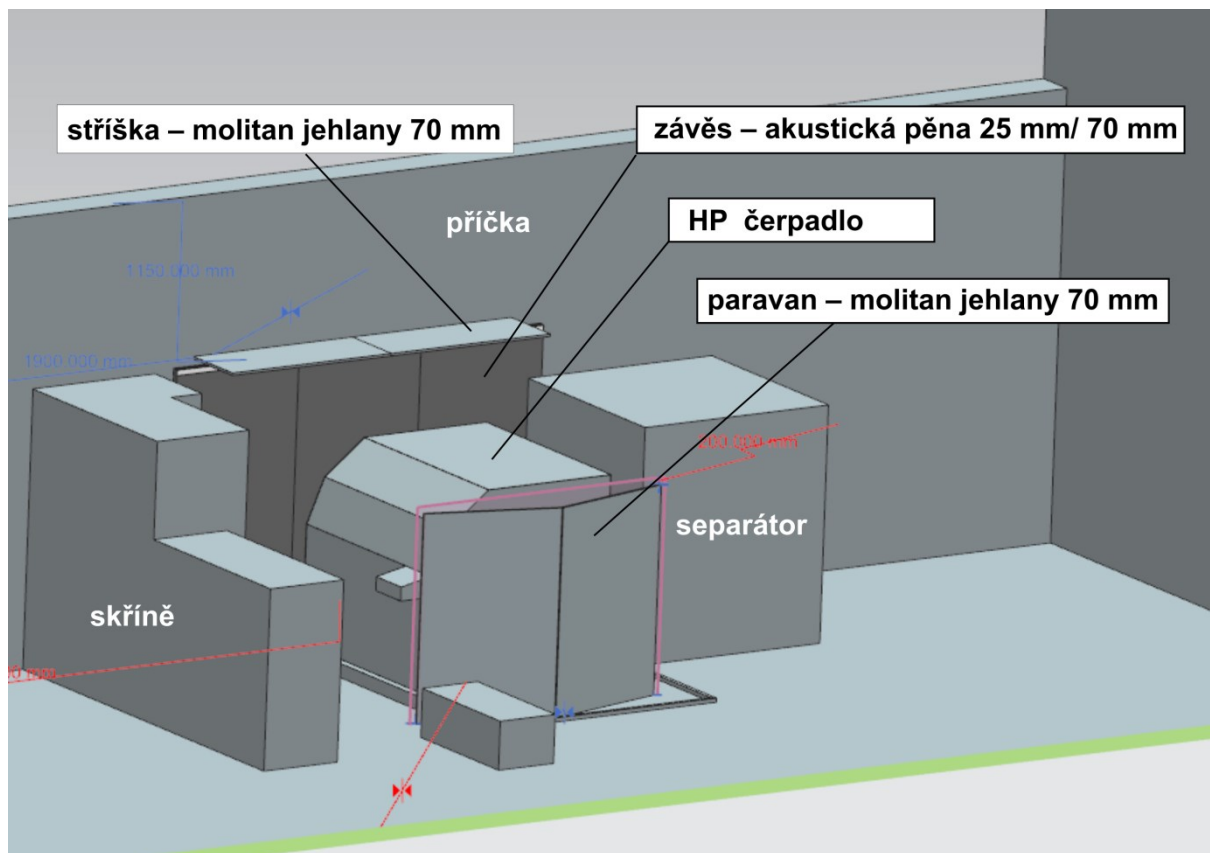
silně odrazivá plocha. Viz Obrázek 4-11, kde je patrný kryt čerpadlové jednotky (červený) a emise hlukové energie na stěnu přepážky.



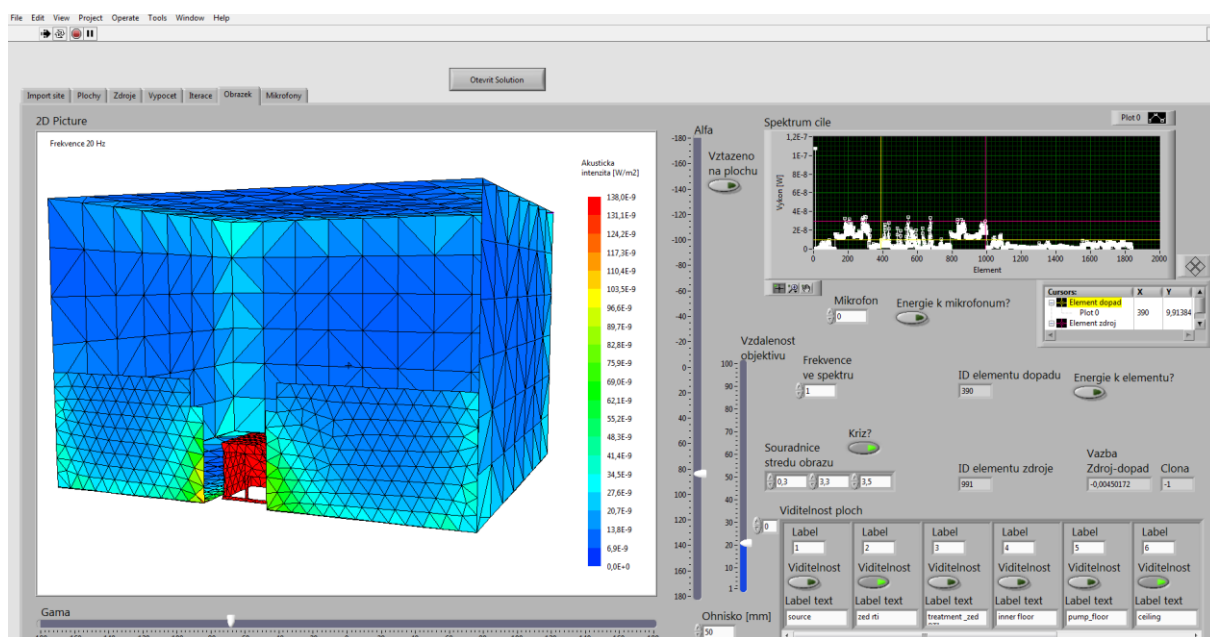
Obrázek 4-11 - Model návrhu obložení krytu čerpadla zvuko-izolačními panely

Po provedení výpočtů různých variant úprav stěn a krytů byly získány výsledky akustických tlaků v různých vzdálenostech od zdroje (čerpadla). Na obrázcích 4-14 až 4-17 je metodou přenosu energie mezi elementy na povrchu dopadových ploch vypočítáno porovnání třetino-oktávných spekter hladin akustických tlaků L_p [dB] pro různé typy zvuko-izolačních (treatment layers) úprav. Z porovnání je patrné, jaký vliv na hladinu akustického tlaku pro dané frekvenční pásmo má například obložení dopadové stěny zvuko-izolačním materiálem v porovnání s variantou bez obložení dopadové stěny. Dále je zřejmé, jaký vliv má obložení dopadové stěny a obložení vnitřní podlahy, či vliv přidané tlumící přepážky (použitým tlumícím materiálem byla 30 mm a 40 mm silná akustická pěna). To vše je možné

vyčíst z prvního obrázku 4-14. Další obrázky ukazují hladiny akustického tlaku pro stejné varianty obložení stěn, avšak pro jiné pozice mikrofonů.

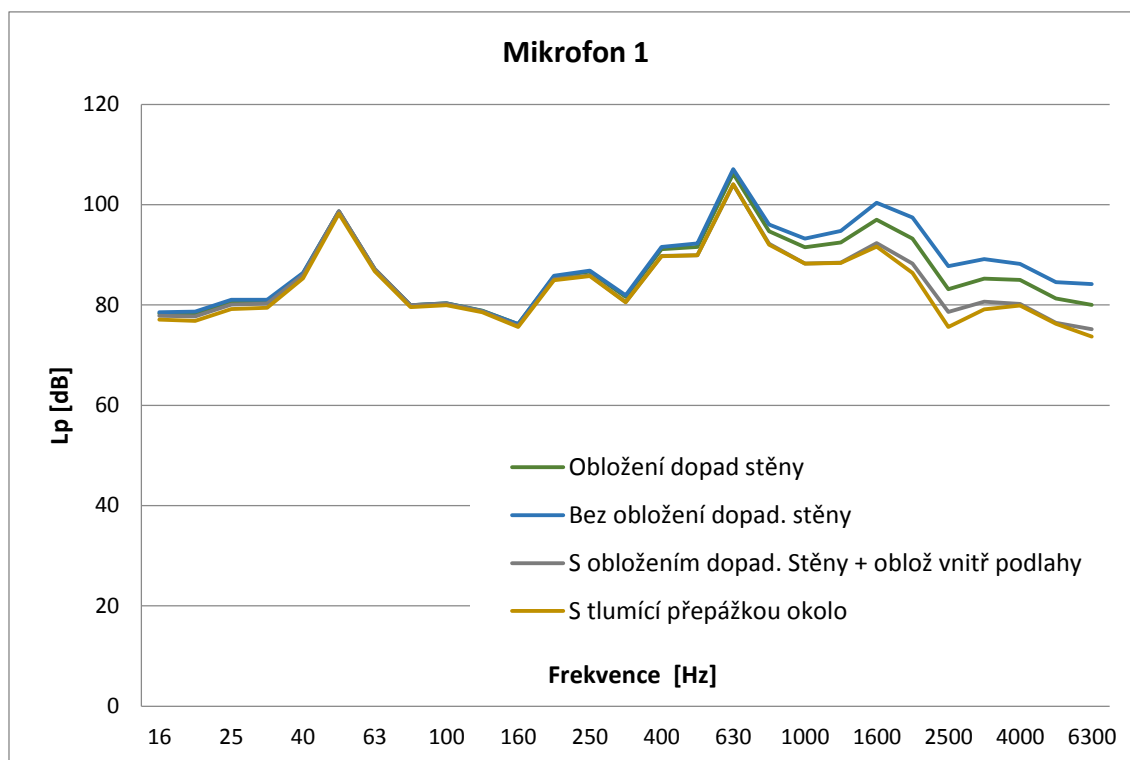


Obrázek 4-12 - Model návrhu obložení krytu čerpadla zvukoizolačními panely

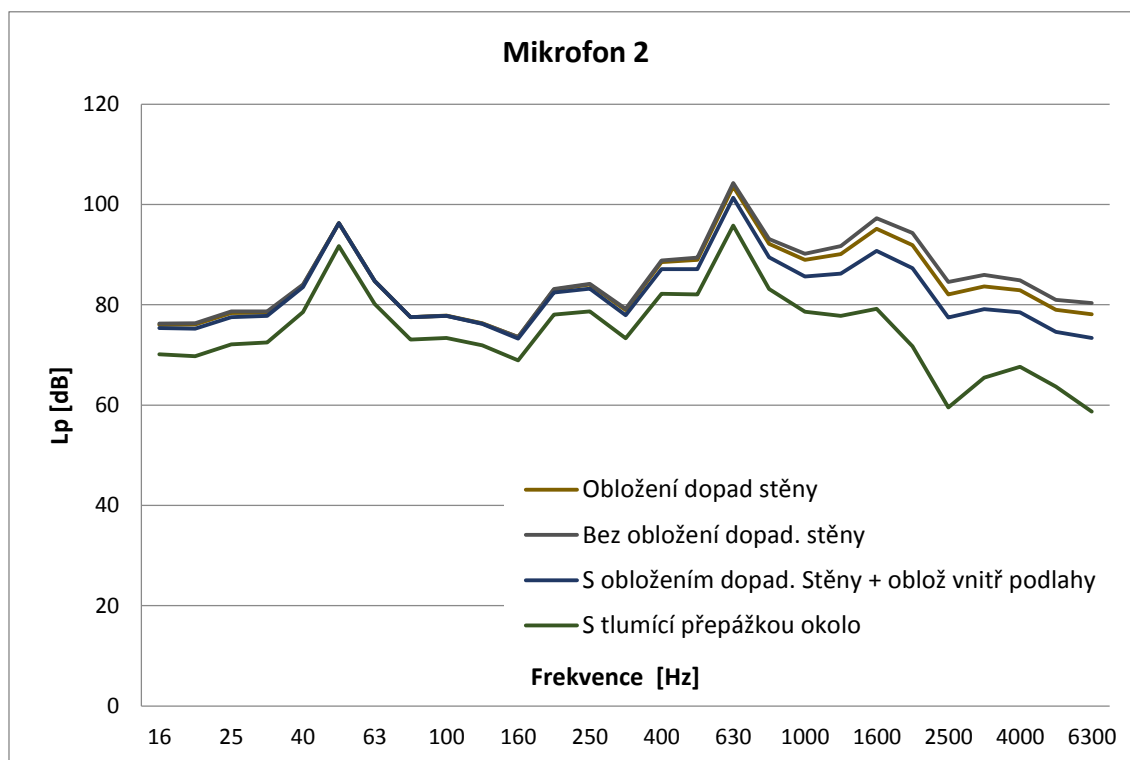


Obrázek 4-13 - Model návrhu obložení krytu čerpadla zvukoizolačními panely

Umístění mikrofonů je v ose prostoru ve výšce 1,5 m nad podlahou a ve vzdálenostech od zdroje 0,3, 2,3, 4,3, a 8,3 m. Pozice mikrofonu je zobrazena na obrázku 4-11.



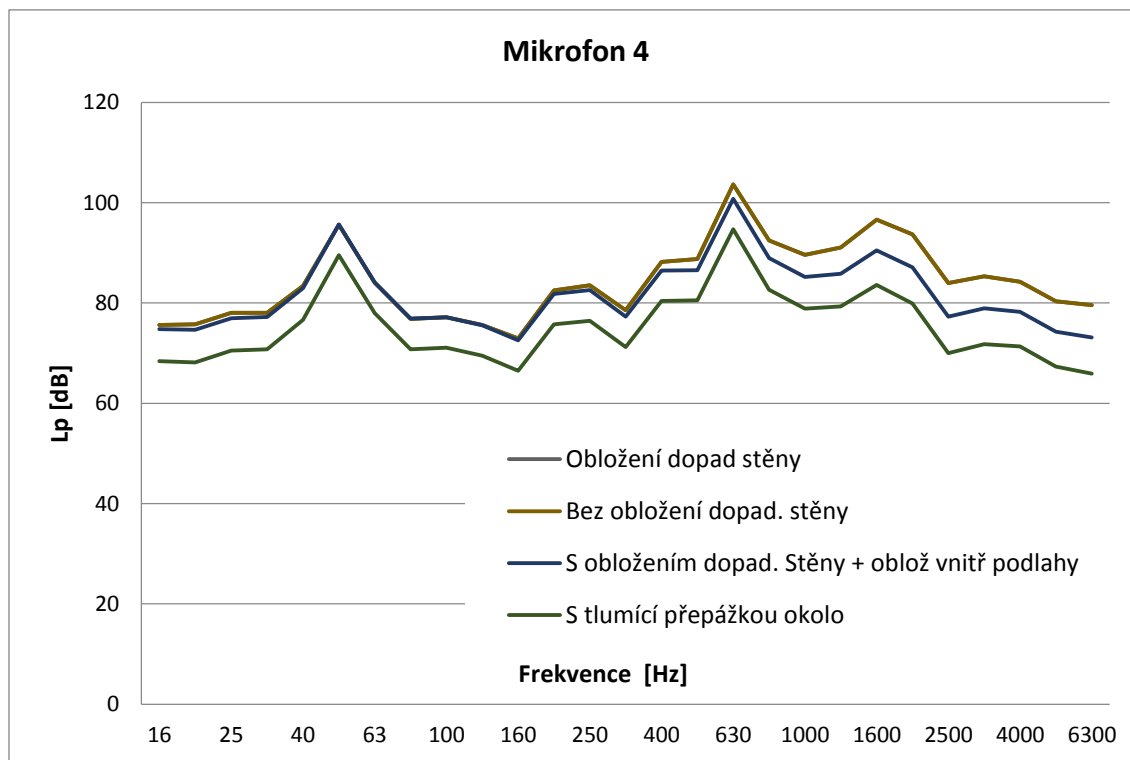
Obrázek 4-14 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 1. pozici mikrofonu



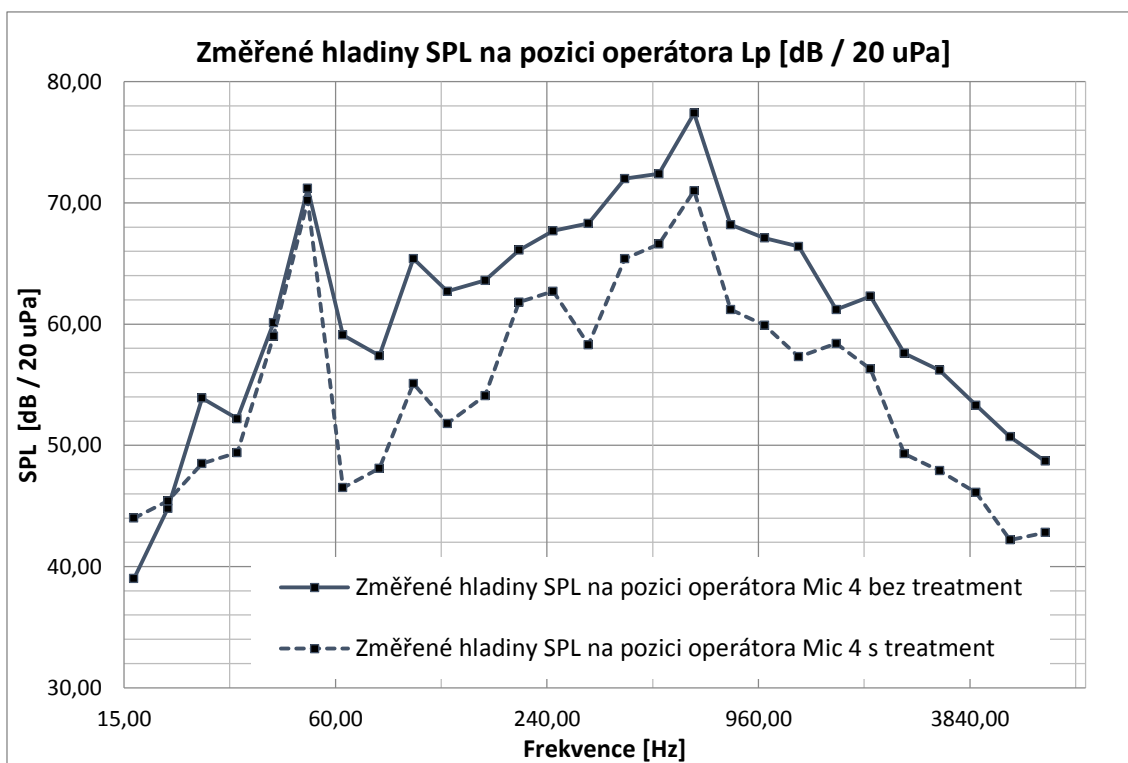
Obrázek 4-15 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 2. pozici mikrofonu



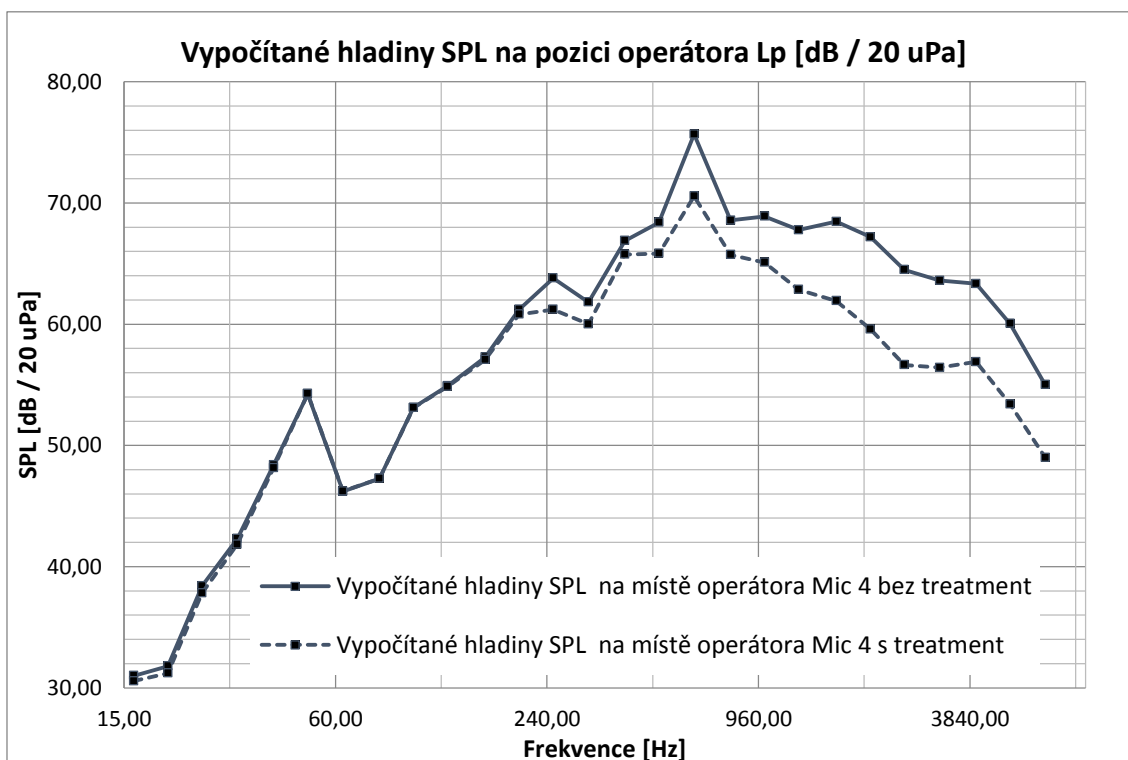
Obrázek 4-16 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 3. pozici mikrofonu



Obrázek 4-17 - Vypočítané třetino oktávové spektrum pro 4. pozici mikrofonu



Obrázek 4-18 - Změřené třetino oktávové spektrum pro 4. pozici mikrofonu



Obrázek 4-19 - Změřené třetino oktávové spektrum pro 4. pozici mikrofonu

První výpočty reálných prostorů (kancelář a výrobní hala) byly provedeny v roce 2018 a koncem tohoto roku bylo vyhodnoceno první srovnávací měření s výsledky výpočtu. Přestože na tomto prvním modelu kanceláře bylo experimentálně ověřeno, že panuje shoda se změřenými a vypočítanými hodnotami hladin akustického tlaku ve sledovaném uzavřeném prostoru, hovořit o finálních výsledcích práce bylo předčasné. Byl odladěn program na prvním jednoduchém modelu a byla značně rozšířena funkčnost algoritmu.

Protože pro tyto nadstavby, jako například zobrazení grafu ve formě spektrogramu zobrazující množství energie dopadajícího na jednotlivé elementy s možností identifikovat přesně v modelu daný element, měly tyto pokročilejší funkce víceméně jen kontrolní význam pro vyšetřování správného výpočetního postupu, nadále je v této práci nezmiňuji.

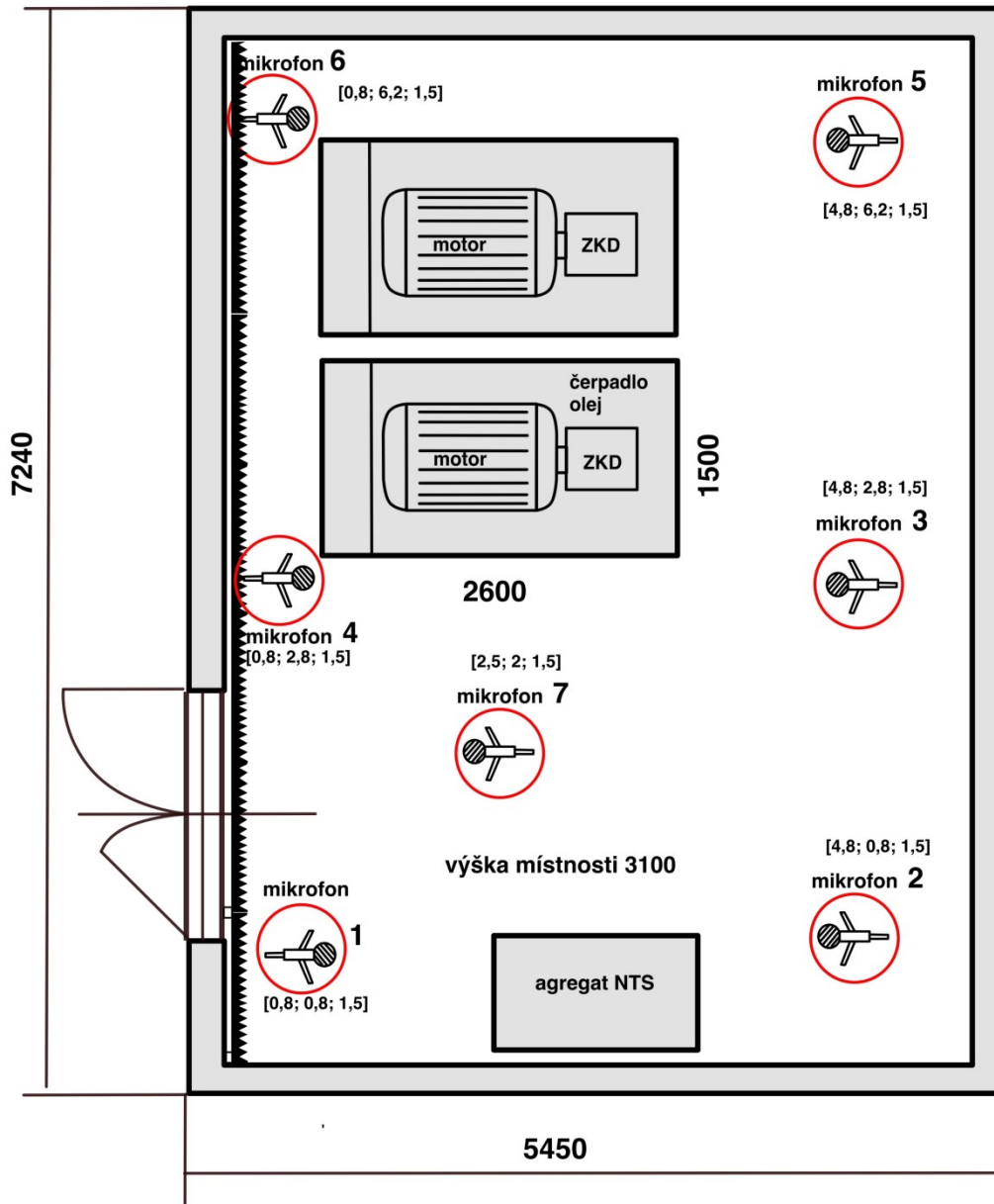
Další etapou ověření správnosti výpočetního algoritmu bylo jeho využití pro modelování již více komplexní úlohy, která se nabídla v rámci konkrétního výrobního prostoru v laboratořích RTI. Jednalo se o komplexní model v hale pracoviště pro řezání vodním paprskem. Tyto výpočty přinesly již relevantní výsledky, které byly publikovány v časopise *Akustika* v článku *Modelování šíření zvuku v uzavřených prostorech* [*Akustika*, Volume 35 / March 2020] [40]. Na základě těchto výpočtů již tedy bylo možné formulovat dílčí závěry.

4.5 Měření hladin hluku v čerpadlové místnosti

Měření se v místnosti s čerpadly uskutečnilo na začátku roku 2020 a následně byly zahájeny práce na výpočtech pro zjištění hladiny akustického tlaku v této uzavřené místnosti.

Výhoda tohoto měření spočívala v tom, že místnost je téměř prázdná bez další techniky kromě dvou na zemi umístěných čerpadel. Místnost je zcela uzavřená, a proto nedochází k úniku zvukové energie mimo tento prostor. Čerpadla jsou umístěna víceméně v levém, od dveří vzdálenějším, kvadrantu, což je patrné z přiloženého nákresu viz Obrázek 4-20 - Rozložení mikrofونů v testované místnosti olejového hospodářství.

Měření hluku kalibrovaným mikrofونem (viz Obrázek 4-21 až Obrázek 4-23) opět respektovalo postup měření emisí hluku definovaný například v ČSN ISO 230-5.



Obrázek 4-20 - Rozložení mikrofonů v testované místnosti olejového hospodářství

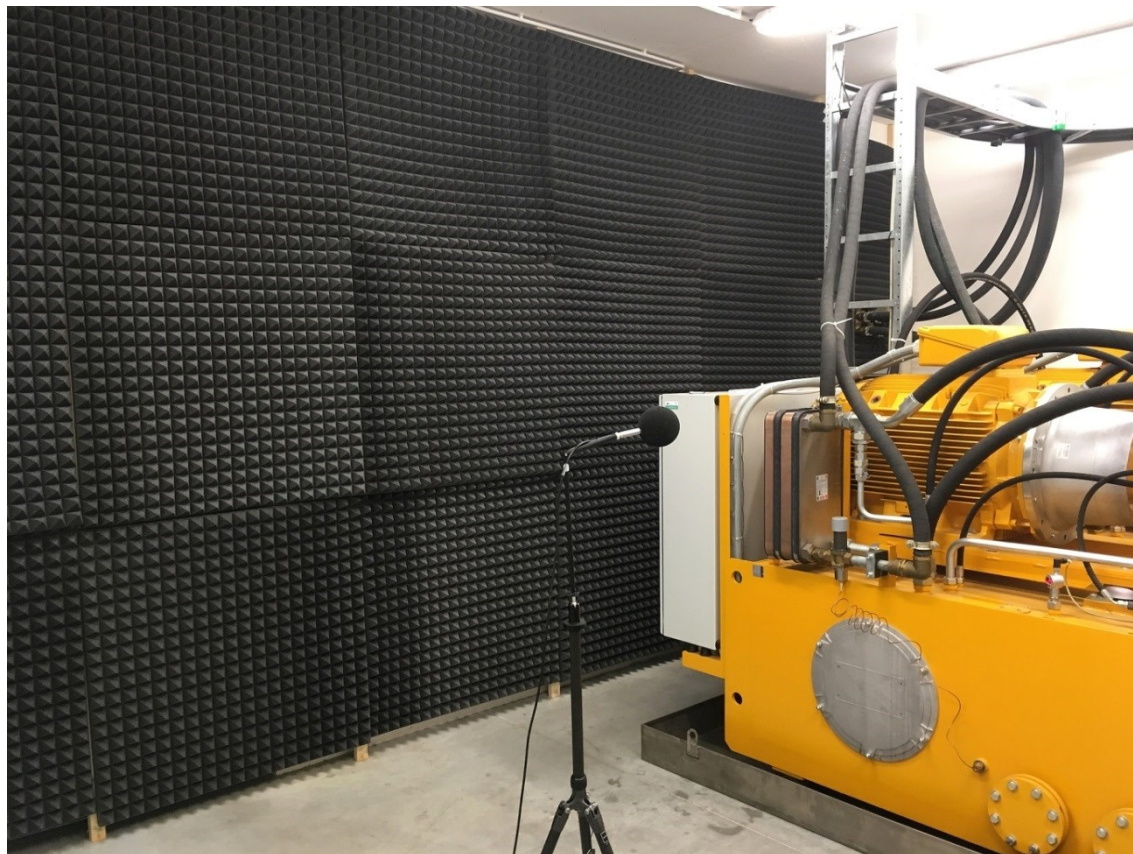
Ve sledované technické místnosti se nacházejí dvě čerpadla. Čerpadla pracují ve střídavém režimu, to znamená, že jedno pracuje a je zdrojem hluku. Druhé z čerpadel slouží jako záložní. Viz Obrázek 4-21 - Testovaná místnosti olejového hospodářství s čerpadly, čerpadlo na levé straně je v provozu.



Obrázek 4-21 - Testovaná místnosti olejového hospodářství s čerpadly



Obrázek 4-22 - Detailní pohled na čerpadla umístěná v místnosti



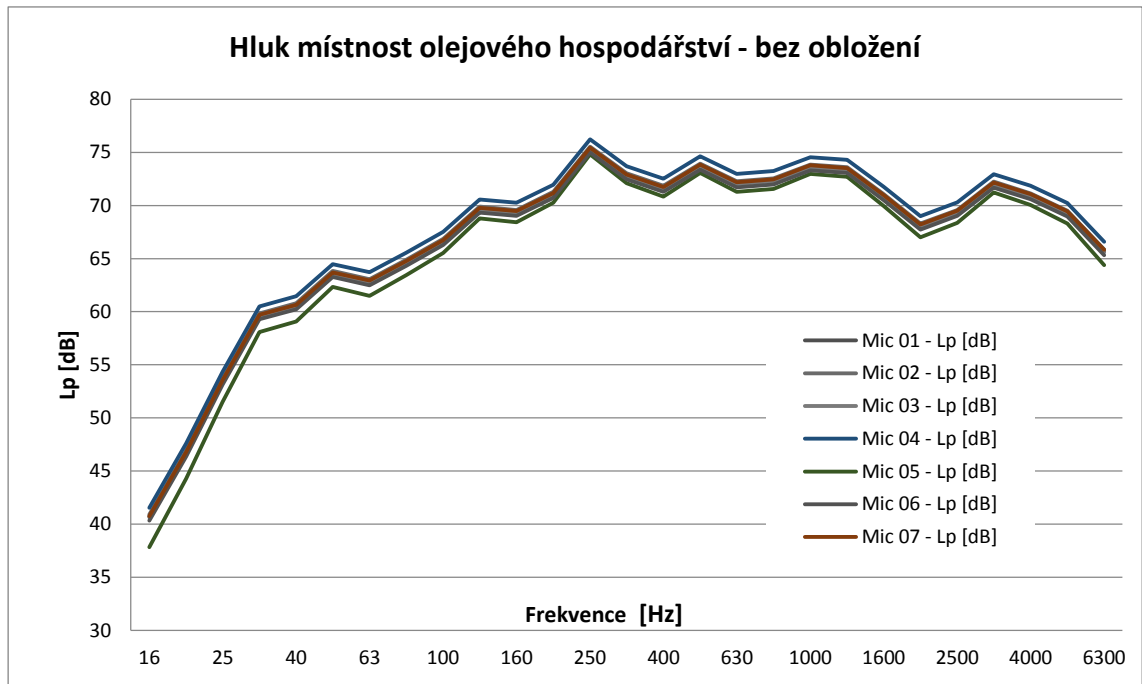
Obrázek 4-23 - Pohled na obloženou stěnou akustickým molitanem

Jako hluk tlumící absorpční panely byly použity panely akustického molitanu tloušťky 70 mm/70 mm, které byly připevněny na dřevěný rám. Připevnění na dřevěný rám, mělo za následek vznik 70 mm vzduchové mezery od povrchu stěny. Tato skutečnost výrazně mění absorpční charakteristiku použité zvukové izolace. Viz grafy absorpčních charakteristik v příloze č. 1.

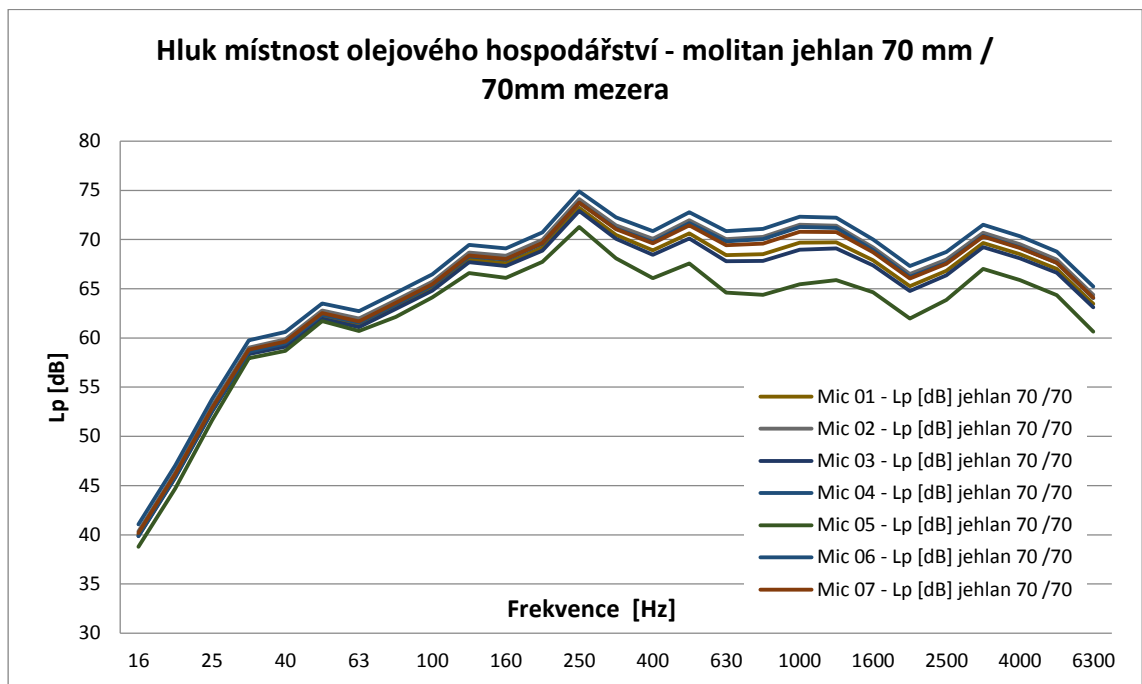
Poznámka: V technické akustice často používá anglický termín pro akustické obložení termín treatment. (je používaný i v grafech v této práci)

Materiál	Frekvence [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	6400
Zed' štuk	0,01733	0,0218	0,0267	0,0328	0,0328	0,0415	0,0481
Beton	0,00959	0,0133	0,0169	0,0206	0,0243	0,0280	0,0304
Plech	0,00959	0,0133	0,0169	0,0206	0,0243	0,0280	0,0304
Ak. molitan 70mm	0,06780	0,1700	0,4070	0,7740	0,9940	0,9770	0,9890
Ak. pěna 30 mm	0,00192	0,0988	0,2420	0,562	0,9620	0,8570	0,9660
Ak. molit. 70/70 mm	0,09851	0,3182	0,6271	0,7713	0,4215	0,3417	0,2785

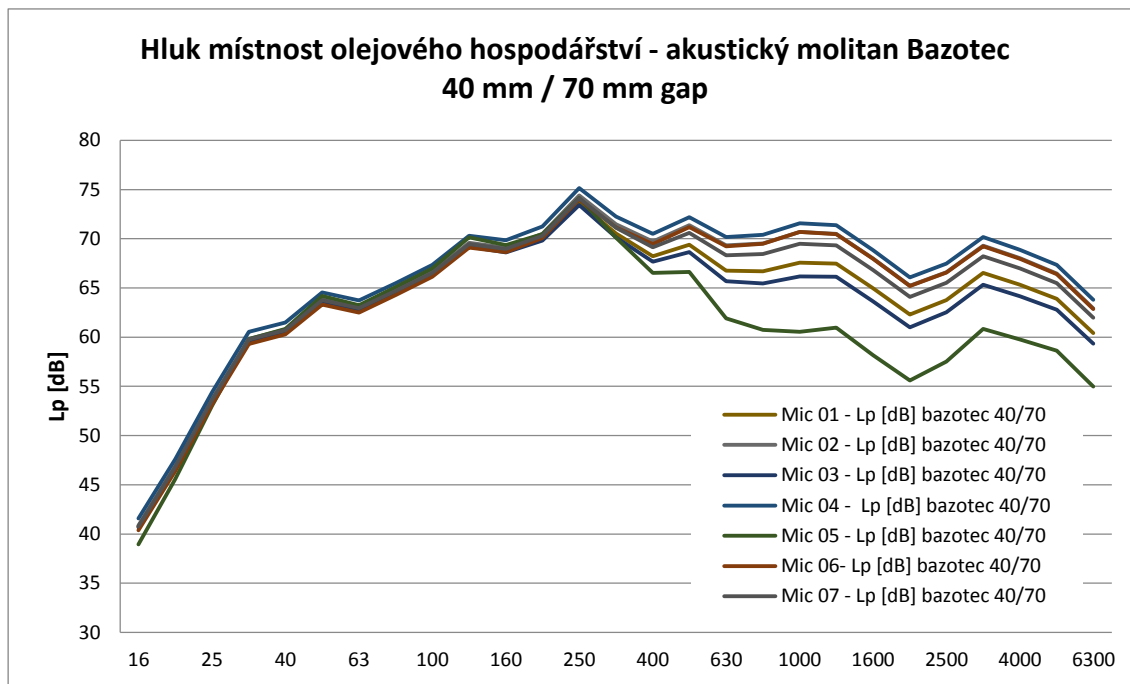
Tabulka 4-1 – Orientační tabulka změřených absorpčních koeficientů



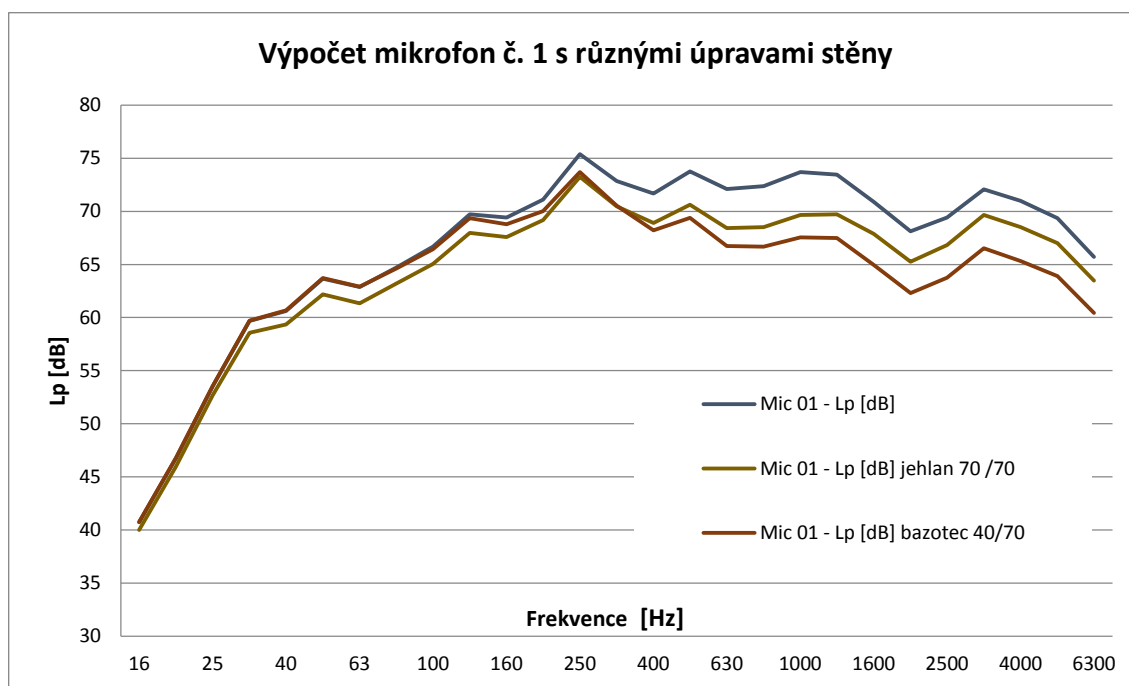
Obrázek 4-24 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro model místnosti bez obložení



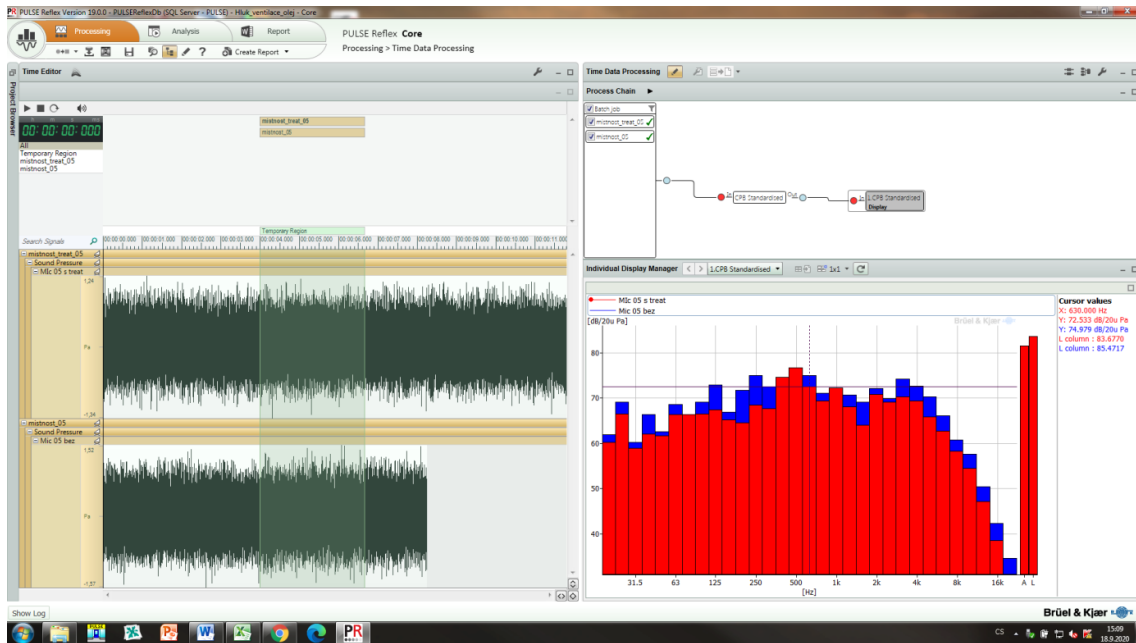
Obrázek 4-25 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro model místnosti s obložením



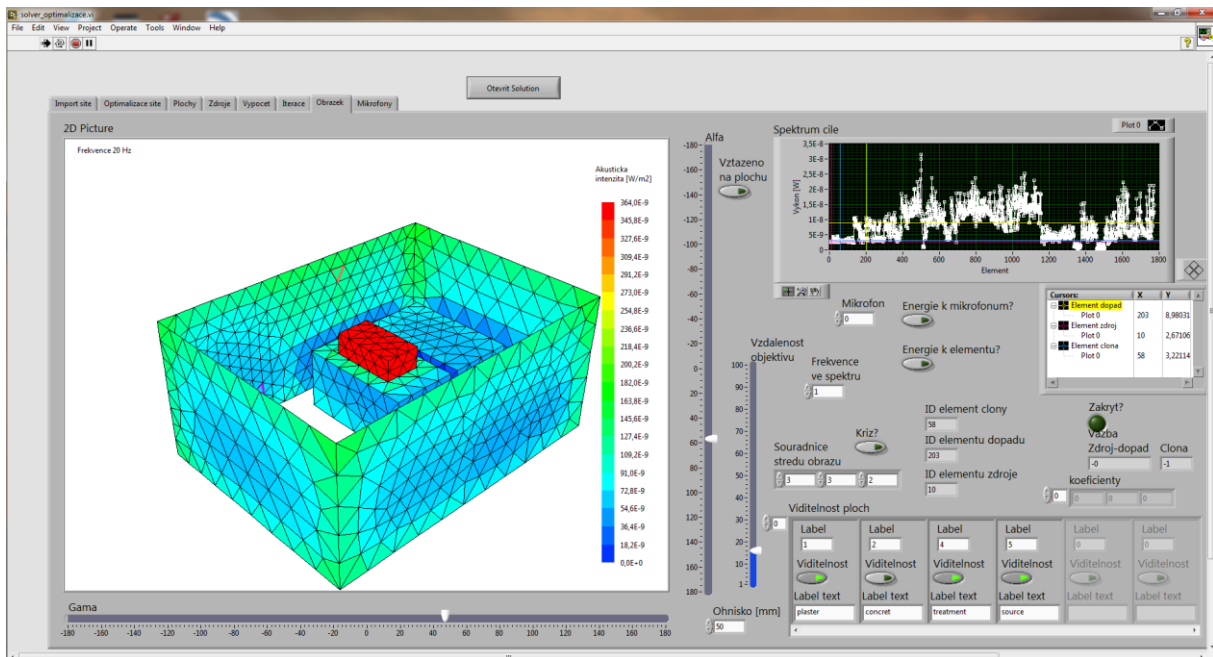
Obrázek 4-26 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro model místnosti s obložením



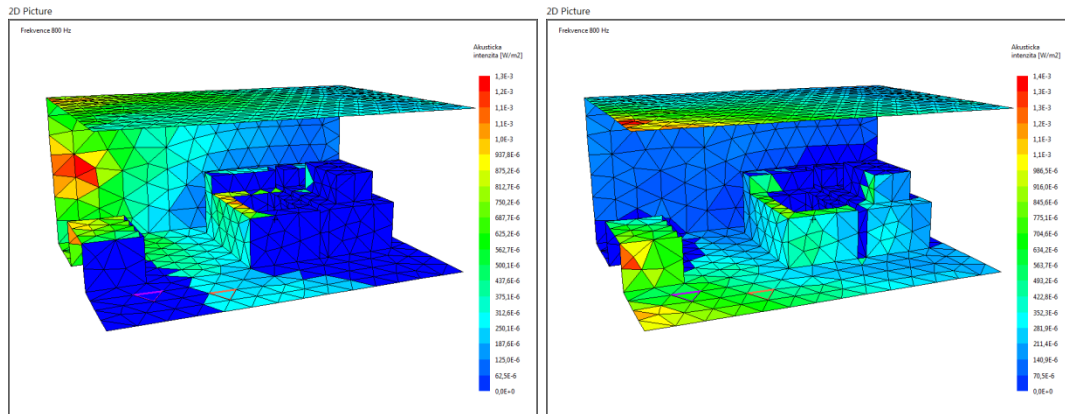
Obrázek 4-27 - Spočítané hladiny akustického tlaku pro mikrofon č. 1 a různá obložení



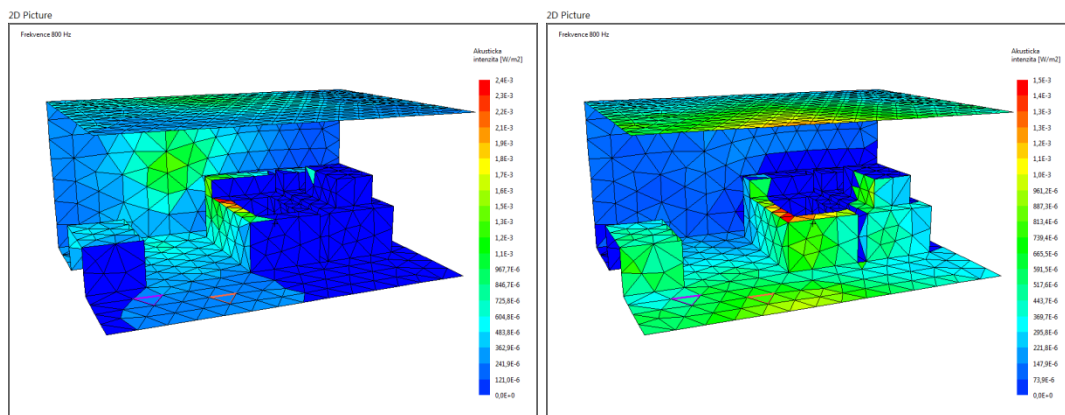
Obrázek 4-28 - Změřena CPB spektra z mikrofonu č. 5 pro varianty s a bez obložení



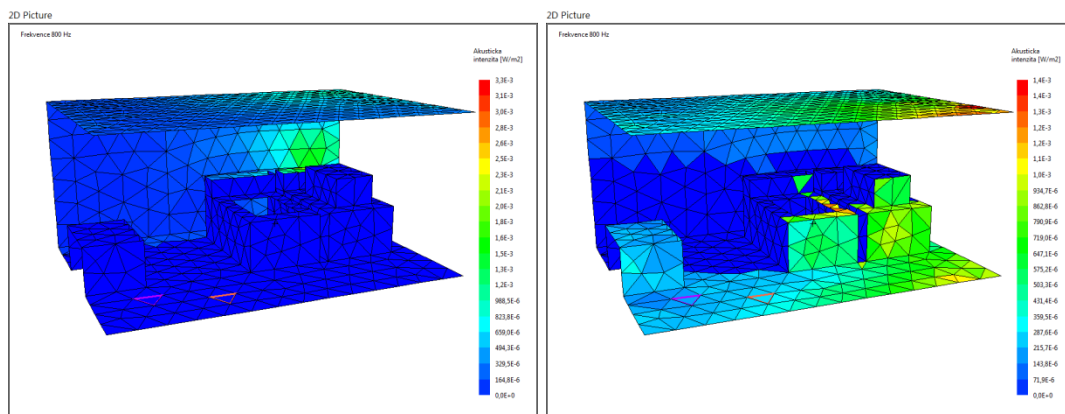
Obrázek 4-29 - Vyzářování na okolní stěny v místnosti



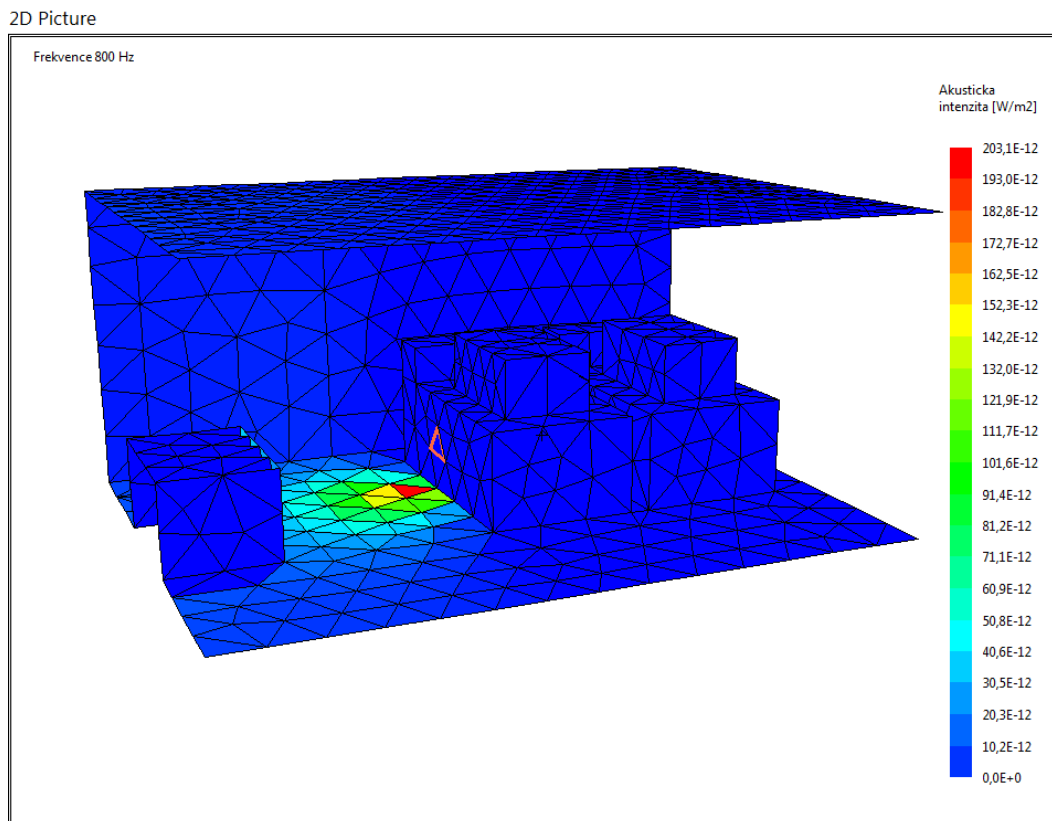
Obrázky 4-30 - Výpočet energií na mikrofon č. 1 a 2 z elementů v místnosti



Obrázky 4-31 - Výpočet energií na mikrofon č. 3 a 4 z elementů v místnosti



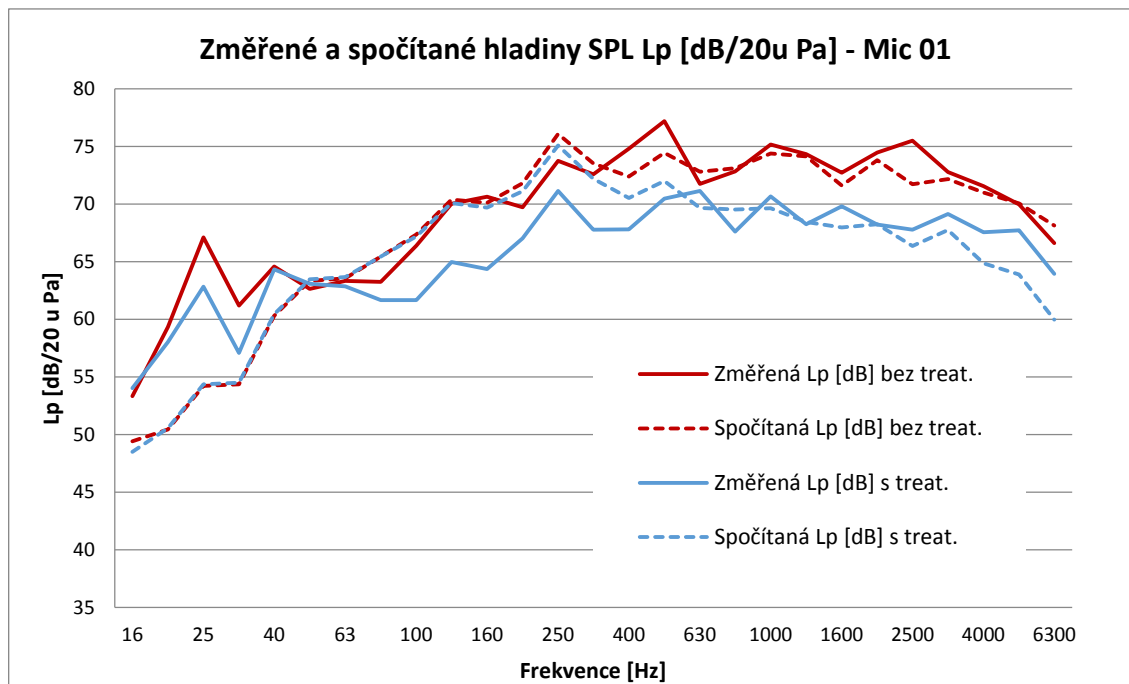
Obrázky 4-32 - Výpočet energií na mikrofon č. 5 a 6 z elementů v místnosti



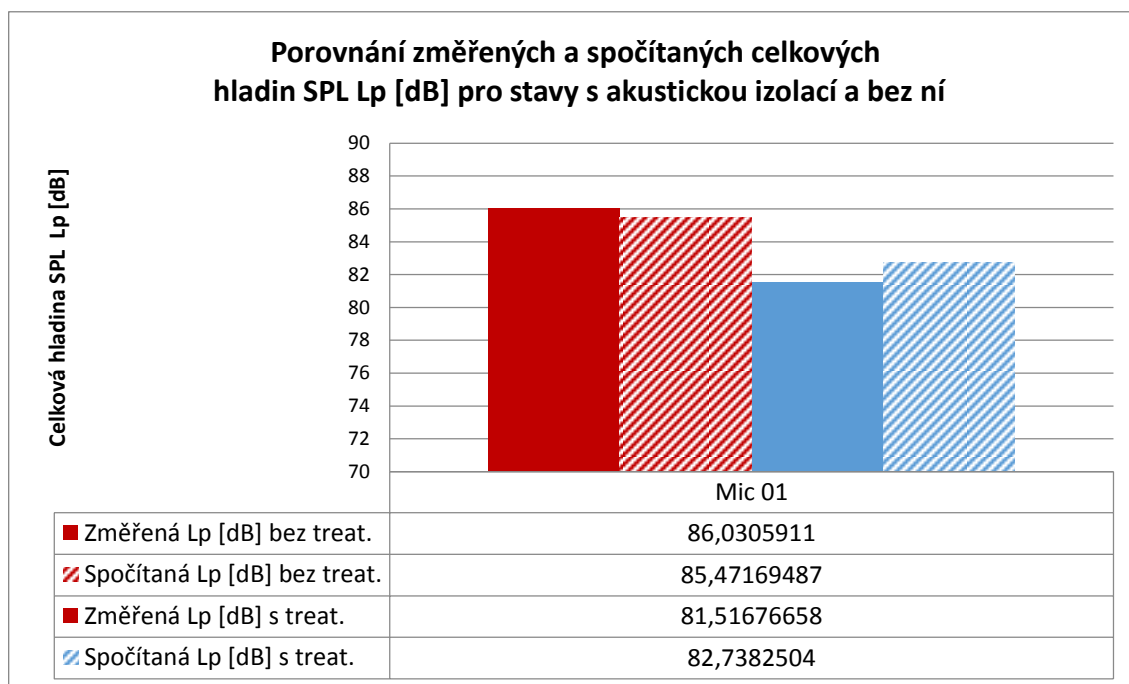
Obrázek 4-33 - Výpočet energie vyzářené z definovaného elementu

Analýza změřených hodnot akustického tlaku:

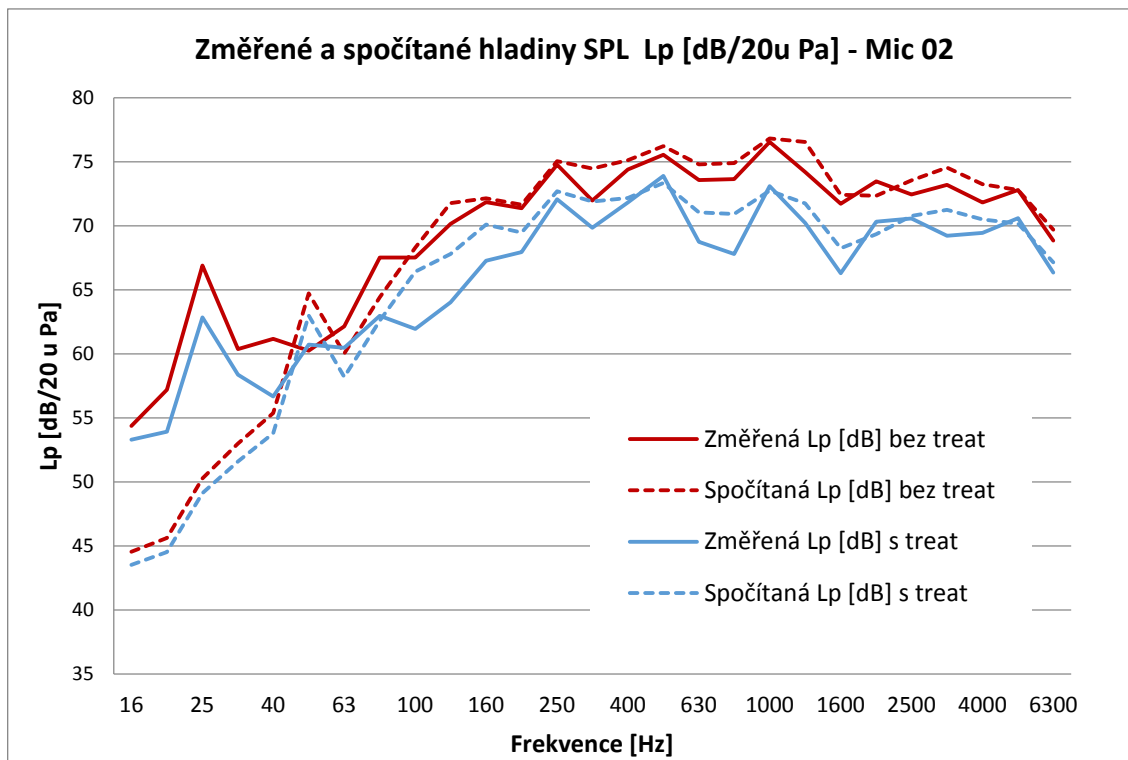
Ze změřených a vypočítaných hodnot v následujících grafech je patrné, že kromě měření na pozici mikrofону č. 5, kde byl mikrofón umístěn do koridoru mezi strojem a rohem místnosti a rozdílné hodnoty lze přičíst na vrub stojatému vlnění, které vzniká v blízkosti stěn a má za následek zvýšené hladiny akustického tlaku. Z ostatních grafů je patrné, že všechna měření jsou ve velmi dobré shodě s vypočítanými hodnotami. Dále je patrné, že akustická spektra nevykazují v nižších frekvenčních pásmech do 150 Hz hodnoty, z kterých by byl patrný vliv zvuko-izolačního obložení, což však koresponduje s tvarem křivky absorpční charakteristiky použitého materiálu. Naopak ve vyšších frekvenčních pásmech nad 1,6 kHz již dochází k vyrovnání hladin akustického tlaku vlivem zmenšujících se absorpčních schopností zvuko-izolačního materiálu jako je akustická pěna, akustický molitan či bazotec. Patrná shoda je narušena jen občasnými výkyvy hladin hluku. Tyto výkyvy mohou být způsobeny různými odrazy od zdroje, ale nemají větší vliv na celkovou hladinu a tedy na přesnost požadovaných výsledků. Pokles celkových hladin vlivem obložení (treatmentu) se pohybuje v rozmezí 3 -4 dB. Pro měření bylo podstatné, že tento pokles byl měřitelný a tudíž bylo možné dokázat i vypočítané hodnoty. Je zřejmé, že pokrytí všech stěn nebo dokonce stěn i stropu, by bylo z hlediska výpočtů mnohem průkaznější, avšak tomuto bránili stavební dispozice místnosti a také by tyto úpravy šly nad rámec úsilí, které bylo práci na této úloze vyčleněno. Ve sloupcových grafech první dva – červené a zleva na sebe navazující - sloupce zobrazují porovnání celkových změřených a spočítaných hladin akustického tlaku pro stav bez akustického obložení a pravé dva sloupce opět porovnání celkové hladiny změřených a spočítaných pro stav s akustickým treatmentem.



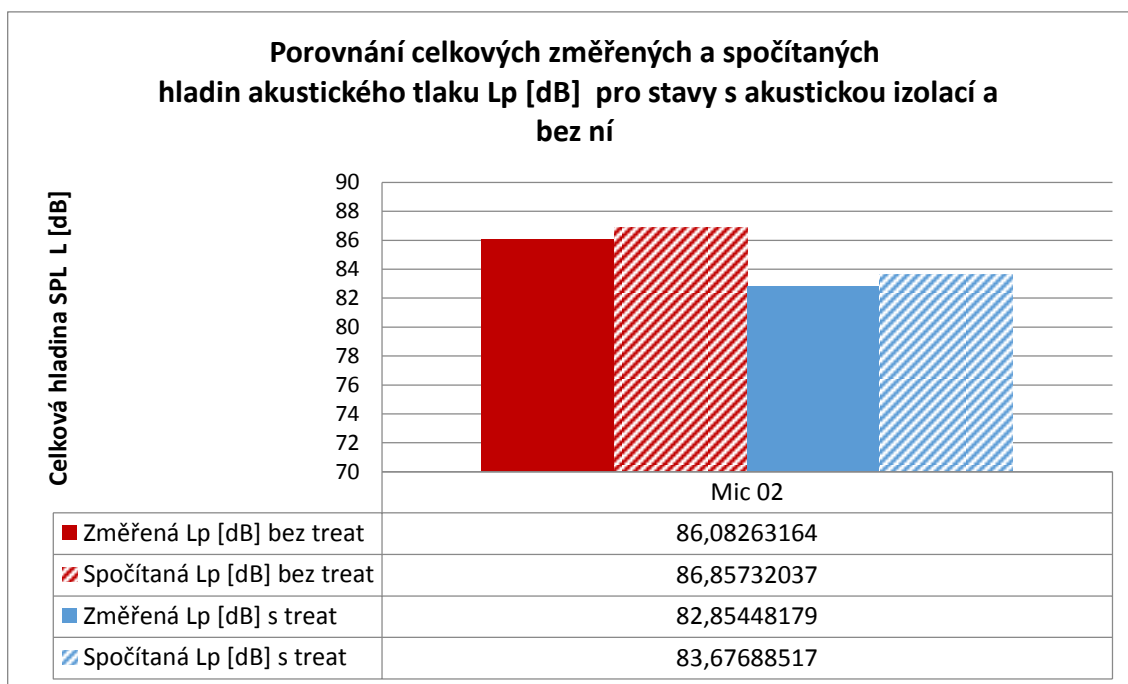
Obrázek 4-34 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 1



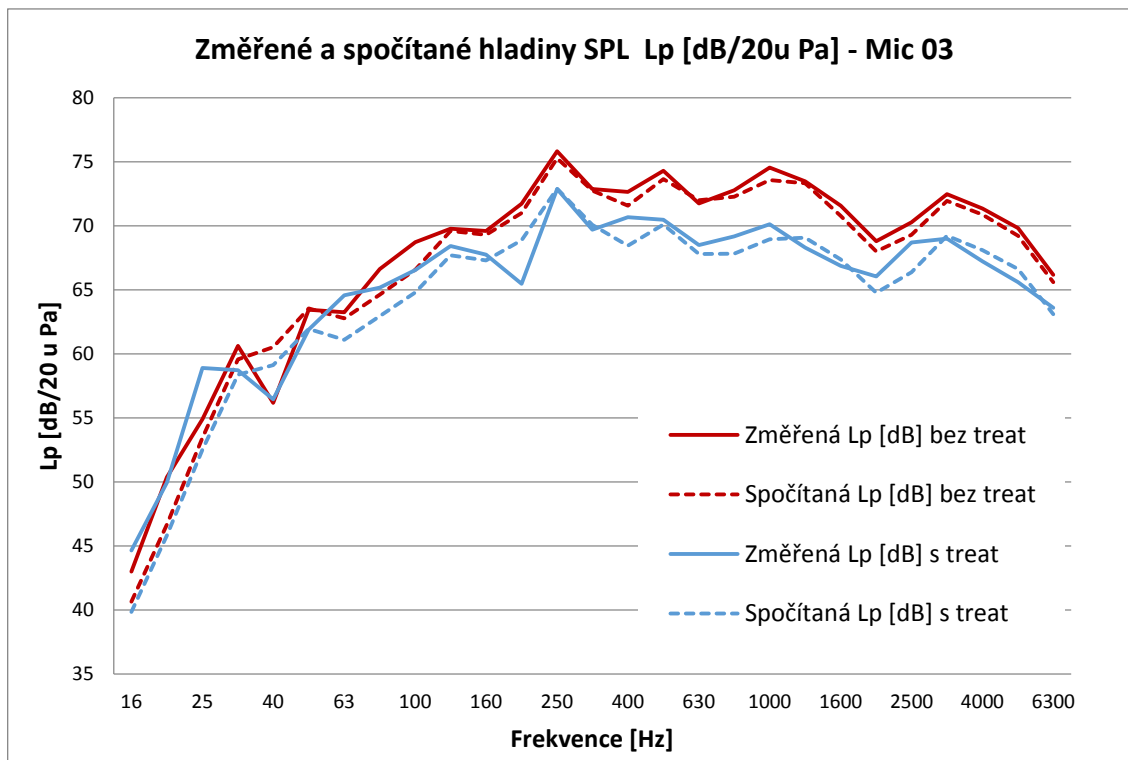
Obrázek 4-35 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL



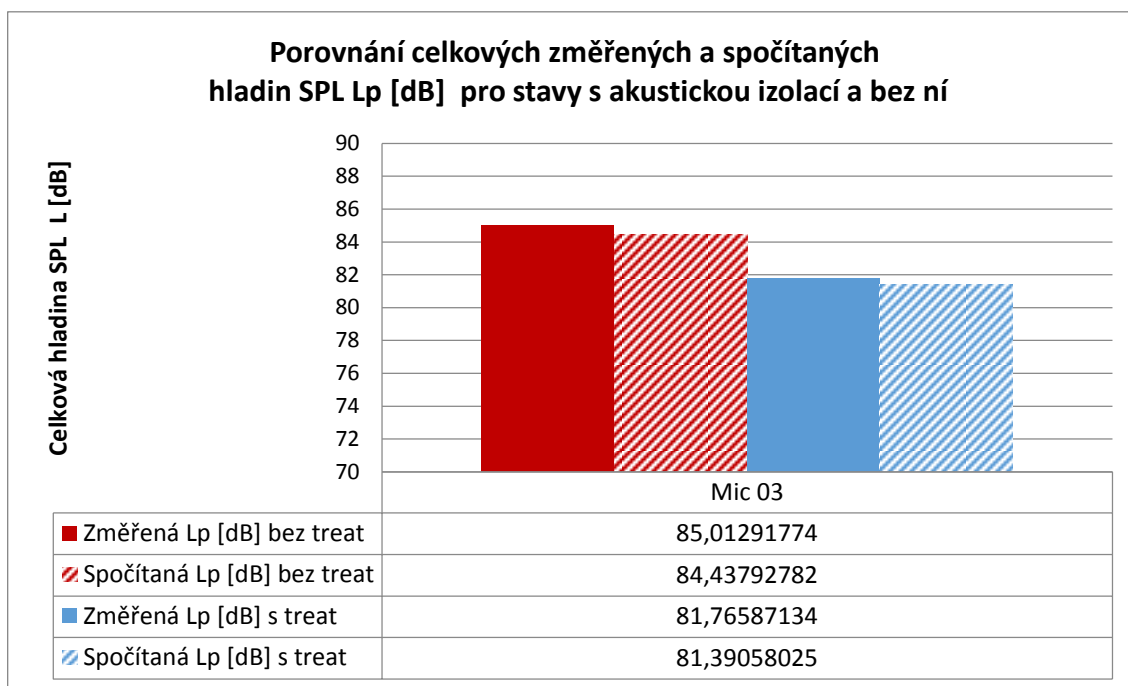
Obrázek 4-36 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 2



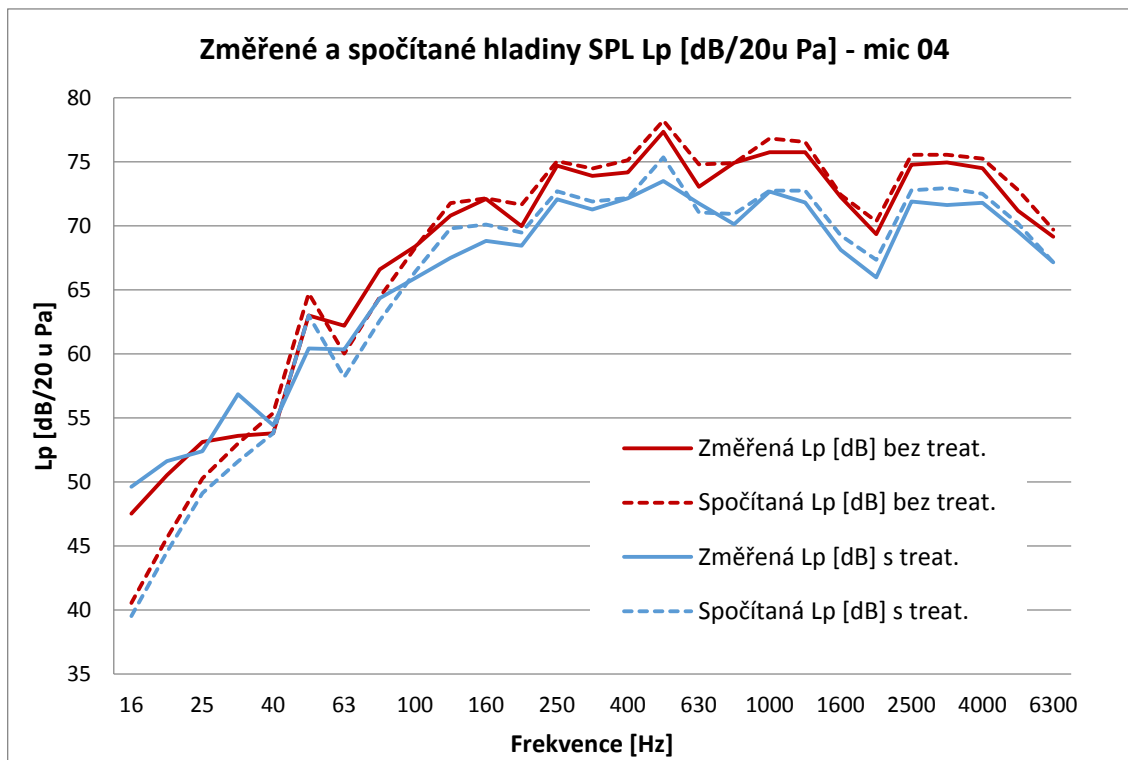
Obrázek 4-37 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL



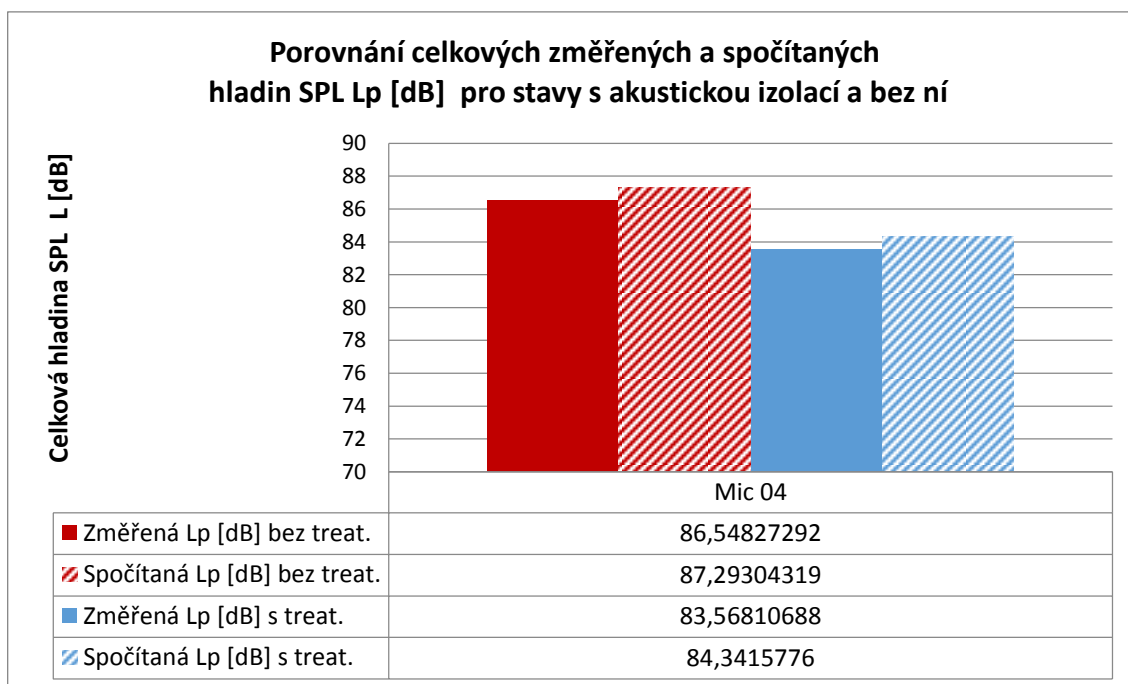
Obrázek 4-38 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 3



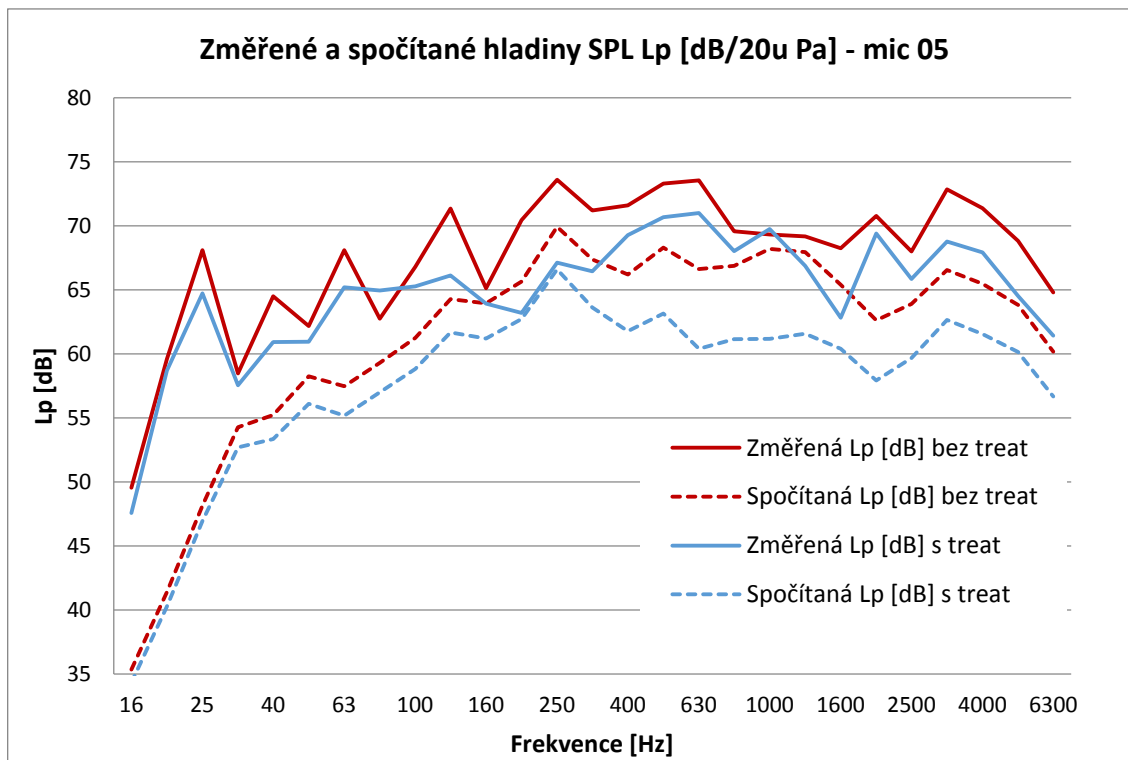
Obrázek 4-39 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL



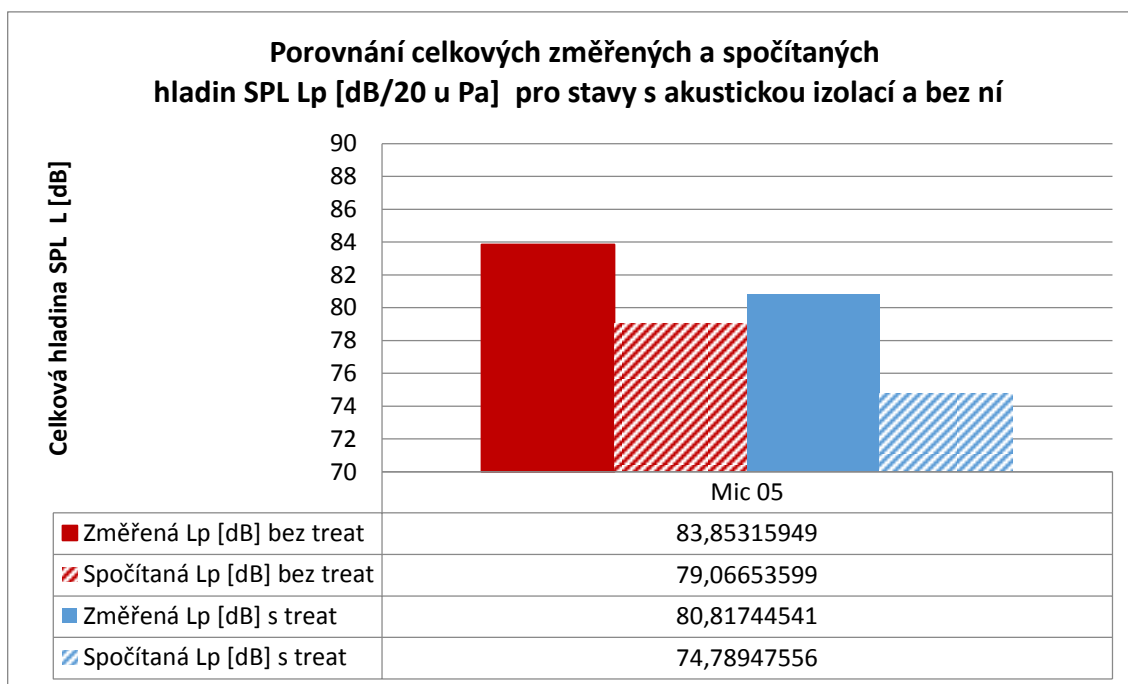
Obrázek 4-40 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 4



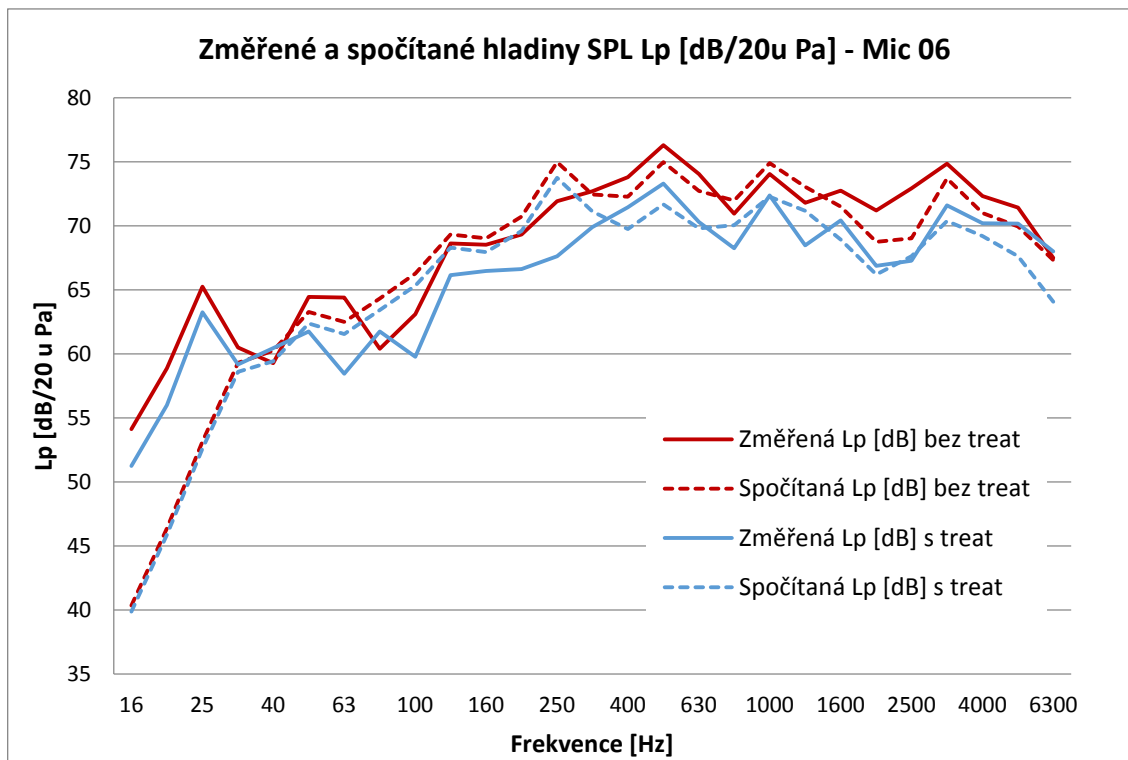
Obrázek 4-41 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL



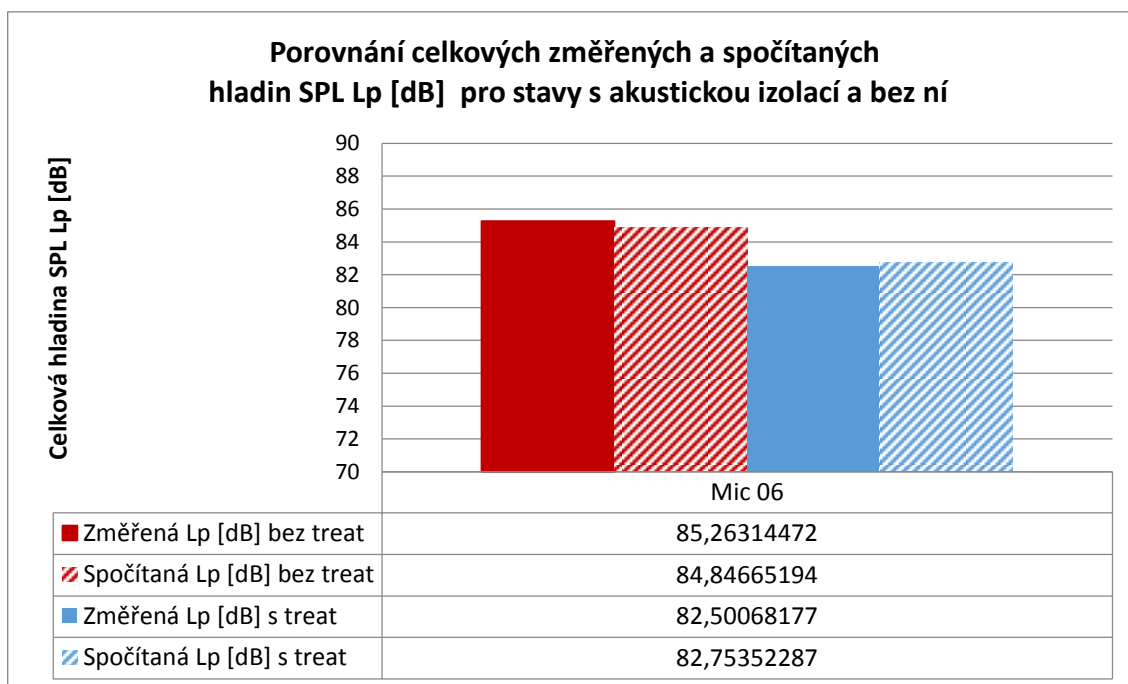
Obrázek 4-42 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 5



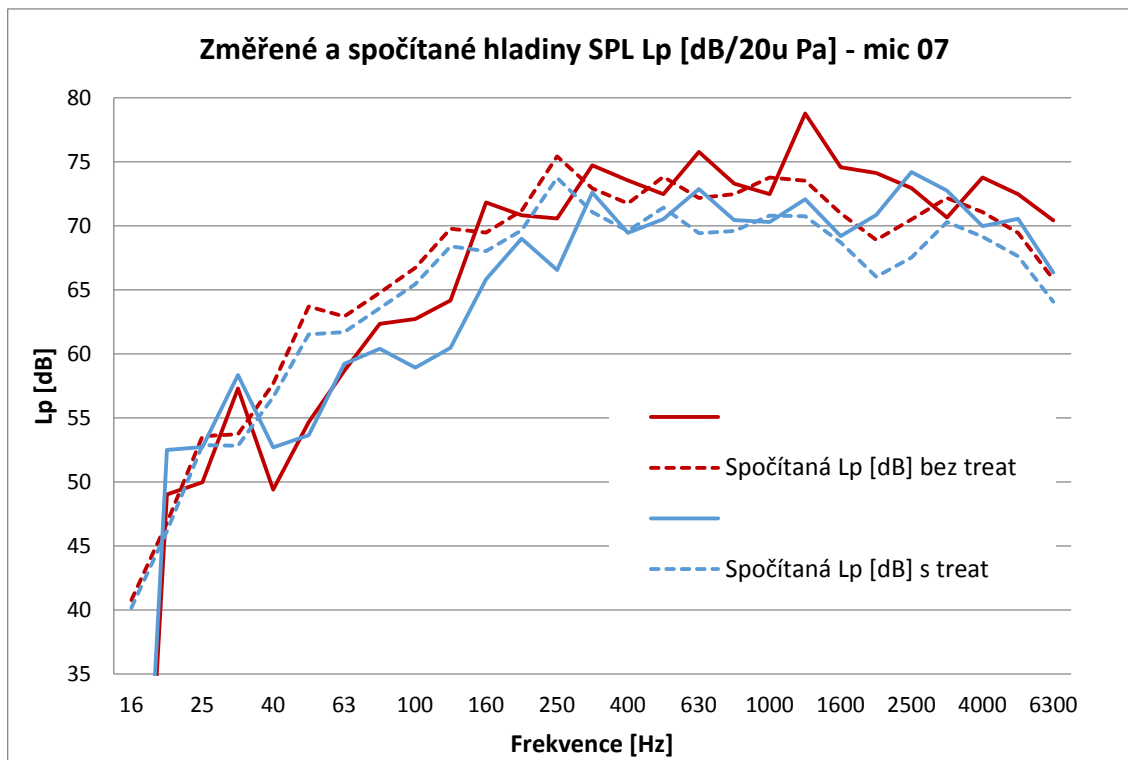
Obrázek 4-43 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL



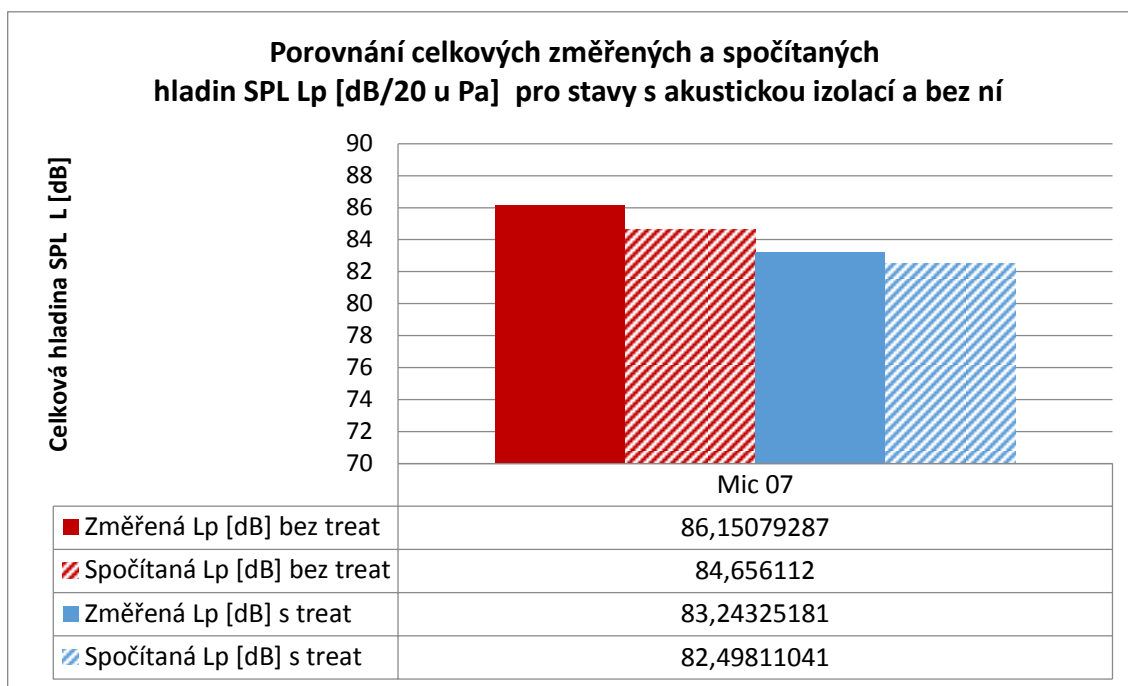
Obrázek 4-44 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 6



Obrázek 4-45 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL



Obrázek 4-46 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL - mikrofon č. 7



Obrázek 4-47 - Porovnání změřených a vypočítaných hladin SPL

5. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit pro průmyslovou praxi použitelný výpočtový postup pro predikci hladin hluku za účelem řešení hlukových problémů a nadměrného hlukového zatížení v uzavřených místnostech. Největším přínosem tohoto výpočetního přístupu je možnost pohotového propočtu změn hladin akustického tlaku v uzavřených místnostech, zejména pak ve výrobních halách a v jiných podobných uzavřených provozech, po provedených akustických úpravách. Standartní akustické úpravy jsou nejčastěji prováděny pokrytím vybraných ploch ohraničujících vyšetřovaný prostor zvuk pohlcujícím materiálem. Výpočty a měření v představené práci prokázaly, že za pomoci vytvořeného programu je možné nejen predikovat vliv zvuko-izolačního obložení s různými absorpčními parametry, ale i určit vhodné plochy pro aplikaci těchto absorpčních materiálů.

Pro úspěšné splnění tohoto úkolu byla práce rozdělena na několik etap. První etapou "State of the art" bylo studium základů akustiky se zaměřením na akustiku uzavřených prostor/místností. V návaznosti na těchto teoretických poznatků byly do detailu studovány používané metody a přístupy pro výpočetní akustiku uzavřených prostor a byla zhodnocena použitelnost těchto metod pro požadované predikční výpočty. Byly to zejména metody založené na deterministických přístupech a energeticko-statistických přístupech, na jejichž principech postavené řešiče již bývají běžnou součástí dostupných výpočetních programů pro strojírenskou praxi.

V rámci této studijní etapy bylo zjištěno, že výpočetní nástroje, založené ať už na deterministických metodách, paprsek trasujících metodách či na energeticko-statistických metodách, začínají být ve výpočetní praxi stále více využívány. Programy, založené na těchto metodách jsou v současné době velmi komplexní a rozvinuté, avšak z různých důvodů není jejich použití zcela praktické pro běžné predikční úlohy šíření zvuku v uzavřených prostorech.

Při detailním studiu těchto metod vyvstávaly otázky, zda opravdu potřebujeme v akustice uzavřených prostor velice přesné avšak výpočtově náročné predikční metody v případě, že se pohybujeme v kategorii nazývané noise control. Je vůbec možné v reálných podmínkách pro jejich plné využití získat relevantní vstupní data? Lze získat dostatečně přesné výsledky při detailních výpočtově náročných deterministické nebo zvuk trasovacích výpočtech při nedostatečně definovaných okrajových podmínkách? A není možné se dopracovat k použitelným výsledkům jednodušším rychlejším a tudíž levnějším postupem? Vždyť i přes masivní rozmach výkonné výpočetní techniky je jedním ze současných trendů snižování výpočetní náročnosti modelu. V oblasti akustiky je řešení klasických konečně-prvkových modelů příliš zdlouhavé a pro řešení naléhavých problémů se zvýšenými hladinami hluku je praktické získat výsledky rychleji, zejména pokud se jedná o řešení akutních problémů s nadměrným hlukem.

Odpovědí na tyto otázky bylo představení algoritmu založeného na metodě akustického vyzařování. Tato oblast akustiky se zabývá akustickým vyzařováním založeným na předpokladu šíření zvuku a jeho odrazu v difuzním poli. Jako svébytná metoda se začala rozvíjet již v 70. letech, avšak z důvodu limitované výpočetní kapacity nebyl rozvoj tak intenzivní jako v ostatních oborech výpočetní akustiky. Akustické vyzařování neřeší výpočty na úrovni vlnového charakteru, a proto nabízí pouze přibližný popis toho, jak se zvuk šíří a

interaguje uvnitř prostoru na základě geometrických vlastností a povrchových vlastností prostoru. Je důležité, aby tyto aproximace byly při výpočtech dobře pochopeny, a to jak z hlediska přesnosti výpočtů, tak i jejich omezení. Je třeba zdůraznit, že přesnost výsledků získaných z modelu akustického vyzařování je silně závislá na kvalitě zadávaných dat a je velmi důležité, aby geometrie modelu, koeficienty absorpce, pozice zdroje a přijímače byly zadány s velkou pečlivostí a se znalostí pravděpodobných akustických účinků těchto parametrů.

Zprvu velmi zjednodušený algoritmus byl vložen do výpočetního prostředí LabVIEW, kde byl posléze odladěn a zdokumentován a následně experimentálně ověřen měřeními na několika reálných úlohách. Pro jednotlivé úlohy, které byly podrobeny výpočtům, byly vždy vypočítány hladiny akustického tlaku před a po provedení povrchových úprav na absorpčních plochách a tyto výsledky byly porovnány s naměřenými hodnotami v reálných podmínkách. Tímto způsobem byl získán náhled na použitelnost a přesnost představené metody. Program pracuje s určitými omezeními a zjednodušujícími předpoklady, ale ty nejsou v rozporu s tím, na jaké úlohy je výpočetní postup zacílen. Asi nejvýznamnější omezující předpoklad se jevil předpoklad homogenity difúzního pole, který přináší určitá omezení v oblasti nižších frekvencí. Nicméně provedená měření a charakter úloh, pro které byl algoritmus navržen, prokázal, že difúzní pole může být méně restriktivní předpoklad, než se původně zdálo.

Principiálně lze algoritmus popsat jako přenos energie mezi plošnými elementy, které ohraničují daný prostor. Po prvotním výpočtu, kdy je vytvořena matice vazeb mezi plošnými elementy při daném umístění definovaného zdroje. Následné predikční interakční propočty pro měnící se polohy mikrofónů (libovolných míst v prostoru, kde zjišťujeme vypočtené hladiny akustického tlaku), či dopady změn absorpčních parametrů, jsou již spočítány velmi rychle, proto má metoda nižší nároky na výpočetní výkon a je předurčena pro praktické využití.

Alternativní a mnohem složitější metody založené na vlnových výpočtech, jako je FEM, BEM, mohou přinést 90 nebo 95 % výsledků, ale s mnohem větším úsilím a to díky potřebným složitým vstupním datům jako jsou impedance stěn pro lokálně reagující povrchy, skutečného chování vibrujících stěn nebo hlukových absorbérů [40].

Pro každou pozici mikrofónu bylo snahou ověřit přesnost výpočtů nejméně pro dvě odlišné varianty zvuko-izolačního obložení. Pro zeď bez jakéhokoliv obkladu a zeď vybavenou zvuko-izolačním obkladem. Statistické vyhodnocení bylo provedeno formou mediánu odchylky vypočtených a změřených celkových hladin akustického tlaku L_p [dB] pro dva stavy s a bez treatmentu. Z výsledků vyplývá, že metoda v závěrečné úloze popisující změnu hladin akustického tlaku před a po aplikaci absorpčních panelů v místnosti olejového hospodářství, potvrzuje potenciál dosáhnout relativně vysoké přesnosti pro běžné akustické úlohy, neboť hodnota mediánu odchylky se pohybuje $\Delta L_p = 0,5$ [dB]. Obecně platí, že nejpřesnější predikce je dosaženo v oblasti středních a vyšších kmitočtů, zatímco na nízkých kmitočtech se vypočtené hodnoty od naměřených liší výrazněji.

Výpočty a následná měření v této práci prokázaly, že představený program založený na metodě akustického vyzařování nemůže být vysoce přesný, ale může být dostatečně přesný, aby se stal velmi užitečným nástrojem při návrzích dodatečných úprav a při konzultacích v případě problémů s hlukovým zatížením. Je možné říci, a jak předložené výsledky výpočtů

a měření naznačují, že je možné za pomoci tohoto predikčního programu, získat relevantní výsledky při rozumném kvantu výpočetní práce a za pomoci snadno dostupných nebo dokonce odhadovaných vstupních dat.

Směry dalšího pokračování práce

V této části práce je krátce nastíněno, v jakých směrech je možné na disertační práci navázat. Jelikož je program viděn zejména, jako praktický nástroj pro pohotová výpočtová řešení bylo by velmi vhodné zapracovat na implementaci 3D modeláře, který by byl vhodný pro tvorbu základních modelů s volbou pro vytvoření vhodné sítě. Spolu s vytvořením samo spustitelné aplikace s příponou *.exe, která by byla nezávislá na prostředí LabVIEW, by umožnilo přesunout tento program do kategorie all in one řešení.

Vhodným směrem, kterým by se mohlo vydat pokračování v tomto výzkumu, by mohlo být rozpracování sekce optimalizační. Určitá práce na tomto poli byla již odvedena, když byla do poslední výpočtové sekce programu implementována funkce zjemňování sítě, která slouží pro podrobnější vyšetřování přenosů energie v inkriminovaných místech struktury. Jelikož hlavním úkolem této práce byla verifikace a testování možnosti využití navrženého postupu, byla při sestavování programu tato funkce chápána jako určitá nadstavba a již se nachází mimo výzkumný rámec této práce, jejímž hlavním úkolem bylo vytvořit praktický a pohotový nástroj pro predikční výpočty zejména vhodný pro zjišťování vlivu změn při obložení různými zvuko-izolačními materiály.

Tato sekce obsahuje jedno záložkové okno a její smysl je v tom, že pokud se u zdroje nachází plošně dostatečně velký element, je možné tímto optimalizační výpočtem zjemnit lokálně síť v blízkosti vyšetřovaného elementů. To znamená, že lze tuto funkci využít v případě lokálního vyšetřování třeba v rohu místnosti a to tak že do tohoto prostoru nadefinujeme mikrofon a pustíme funkci optimalizovat k mikrofonu.

Citovaná literatura

- 1] C. Smetana, Hluk a vibrace - Měření a hodnocení, Praha: Sdělovací technika, 1998.
- 2] H. Kuttruff, Room acoustics, Taylor & Francis, 2000.
- 3] U. P. Svensson a U. R. Kristiansen, „Computational modeling and simulation of acoustic spaces,“ *AES 22nd Int. Conf. on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio*, pp. 11-30, 15-17 June 2002.
- 4] J. H. Rindel, Modeling in auditorium acoustics – from ripple tank and scale models to computer simulations, Seville, Spain: Spanish Acoustical Society, 2002.
- 5] S. Siltanen, T. Lokki a L. Savioja, „Rays or Waves?,“ v *International Symposium on Room Acoustics*, Melbourne, 2010.
- 6] D. Dreyer, O. v. Estorff a S. Petersen, „ Effectiveness and Robustness of Improved Infinite Elements for Exterior Acoustics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,“ v *195 3591-3607*, 2006.
- 7] H. Beckmann, R. Draier a O. Zaleski, „Modellierung eines Waschautomaten für vibroakustische Untersuchungen,“ v *CAD-FEM User's meeting*, Dresden, Germany, 2004.
- 8] M. Brinkmeier, U. Nackenhorst, O. v. Estorff, S. Petersen a J. Bierman, „Simulation and Analysis of Tire Road Noise Using a Finite Element Approach,“ Tampere, Finsko, 2006.
- 9] L. International, „SYSNOISE Rev 5.6, User's Manual,“ Leuven, Belgium, 2005.
- 10] J. A. Pedersen a G. Munch, „Driver Directivity Control by Sound,“ v *in 113th AES Convention Paper 5648*, Los Angeles, 2002.
- 11] T. Hodgson a R. Underwood, „BEM computations of a finite-length acoustic horn and comparison with experiment,“ v *The Built Environment*, 28, 213-222, 1997.
- 12] P. Juhl, „A note on measurement of sound pressure with intensity probes,“ v *The Journal of the Acoustical Society of America* 116, 1614, 2004.
- 13] R. D. Ciskowski a C. A. Brebbia, „Boundary element methods in acoustics,“ v *Computational Mechanics Publications ; Elsevier Applied Science*, Southampton, 1991.
- 14] R. C. Morgans, A. C. Zander, C. H. Hansen a D. J. Murphy, „Fast boundary element models for far field pressure prediction,“ v *Proceedings of Acoustics*, Gold Coast, Australia, 2004.
- 15] J. Prnka, : Výpočtové modelování hluku v kabině letounu VUT 100 Cobra, Brno Česká Republika: VUT Brno, 2009.

- 16] J. Sika a M. Křížek, Noise prediction in buildings based on Statistical Energy Analysis, České Budějovice: Akustika, září 2017.
- 17] J. Sika, P. Budek a M. Chmelíček, „The interior noise prediction in vehicles based on SEA,“ v *IC-EpsMsO*, Atény, 2007.
- 18] B. Van Hal, W. Desmet, D. Vandepitte a P. Sas, „Hybrid Finite Element - Wave Based Method for acoustic problems,“ *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, sv. 10, 2003.
- 19] J. P. Shorter, B. K. Gardner a P. G. Bremner, „A hybrid method for full spectrum noise and Vibration prediction,“ *Journal of Computational Acoustics*, sv. 11, 2003.
- 20] B. Gardner, J. A. Cordioli a J. P. Carneal, „Advanced Modeling of Aircraft Interior Noise using the Hybrid,“ *Conference Paper*, March 2008.
- 21] L. Cremer a H. A. Müller, „Principles and applications of room acoustics,“ v *Applied Science Publishers*, London, 1982.
- 22] G. M. Naylor, „ODEON - another hybrid room acoustical model,“ *Applied Acoustica*, pp. 131-143, 38 1993.
- 23] H. E. Rushmeier, Extending the radiosity method to transmitting and specularly reflecting surfaces, Cornell: Master's thesis, Cornell University, 1986.
- 24] Z. Yamauti, „The light flux distribution of a system interreflecting surfaces,“ *Journal of the optical society of America*, sv. 13(5), 1926.
- 25] R. Siegel a J. Howell, „Thermal radiation heat transfer,“ *Hemisphere publishing Corporation*, 1981.
- 26] E. M. Nosal, Room sound field prediction by acoustical radiosity, Calgary, 2000.
- 27] S. Siltanen, T. Lokki, S. Kiminki a L. Savioja, „The room acoustic rendering equation,“ sv. The Journal of the Acoustical Society of America, pp. 1624-1635, 5 July 2007.
- 28] F. Kolmer a J. Kyncl, *Prostorová akustika*, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980.
- 29] H. Kuttruff, „A simple iteration scheme for the computation of decay constants in,“ v *Journal of the Acoustical Society of America* 98(1): 288-293, July, 1995.
- 30] H. Kuttruff, „Energetic sound propagation in rooms,“ v *Acta Acustica united with Acustica* 83: 622-628, 1997.
- 31] R. Nový, *Hluk a chvění*, Praha: ČVUT, 2009.
- 32] F. Fahy, *Foundations of engineering acoustics*, London: Academic press, 2001.
- F. Fahy, *Sound intensity*, London: Elsevier applied science, 1989.

33]

F. Fahy a P. Gardonio, Sound and structural vibration – Radiation, transmission and
34] response, Oxford: Academic Press Elsevier, 2008.

J. Kaňka a J. Nováček, Stavební fyzika 3: akustika pozemních staveb, Praha: České
35] vysoké učení technické, 2015.

J. Kaňka, Akustika stavebních objektů, ERA, 2009, p. 145.
36]

P. Mondschein a J. Valentin, „Metodika měření akustické pohltivosti asfaltových
37] obrusných vrstev vozovek v laboratoři,“ 2015.

O. v. Estorff, Challenges in technical acoustics: What can be computed today,
38] Bamberg: LS-Dyna Anwenderforum, 2008.

Č. n. institut, Zkušební předpisy pro obráběcí stroje - Část 5: Určení emise hluku,
39] Český normalizační institut, 2001.

J. Sika a M. Křížek, „Modelování šíření zvuku v uzavřených prostorech,“ *Akustika*,
40] Vol. 35 2020.

L. E. Kinsler, A. R. Frey a A. B. Coppens, Fundamentals of acoustics, New York: John
41] Wiley & Sons, 1982.

A. James, Common pitfalls in computer modelling of room acoustics, Norwich, UK,
42] 2006.

J. H. Rindel, Modelling the directional characteristics of sound reflections,
43] Mariehamn, Åland: Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, 2004.

S. Callsen, O. v. Estorff, W. Galeine a S. Lippert, Numerical Modelling of the
44] Vibroacoustic Behaviour of Aircraft Cabin Components and Verification with
Measurement Data, Hamburg: Int. Workshop on Aircraft System Technologies AST
2007, 2007.

A. Danihelová, Moderné spôsoby hodnotenia akustických charakteristik
45] uzatvorených a otvorených priestorov, Sezimovo Ústí: Česká akustická společnost, 72.
Akustický seminář, str. 27., 2006.

R. D. Ciskowski a C. A. Brebbia, „Boundary Element Methods in Acoustics,“ 1991.
46]

L. A. Brooks, R. C. Morgans a C. H. Hansen, „Learning Acoustics through the
47] Boundary Element Method,“ v *Acoustics 2005*, Adelaide, Australia, 2005.

U. P. Svensson, „Modelling room acoustics,“ v *Baltic-Nordic Acoustic Meeting*, 2004.
48]

J. B. Allen a D. A. Berkley, „Image method for efficiently simulating small-room
49] acoustics,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 943-950, 65 1997.

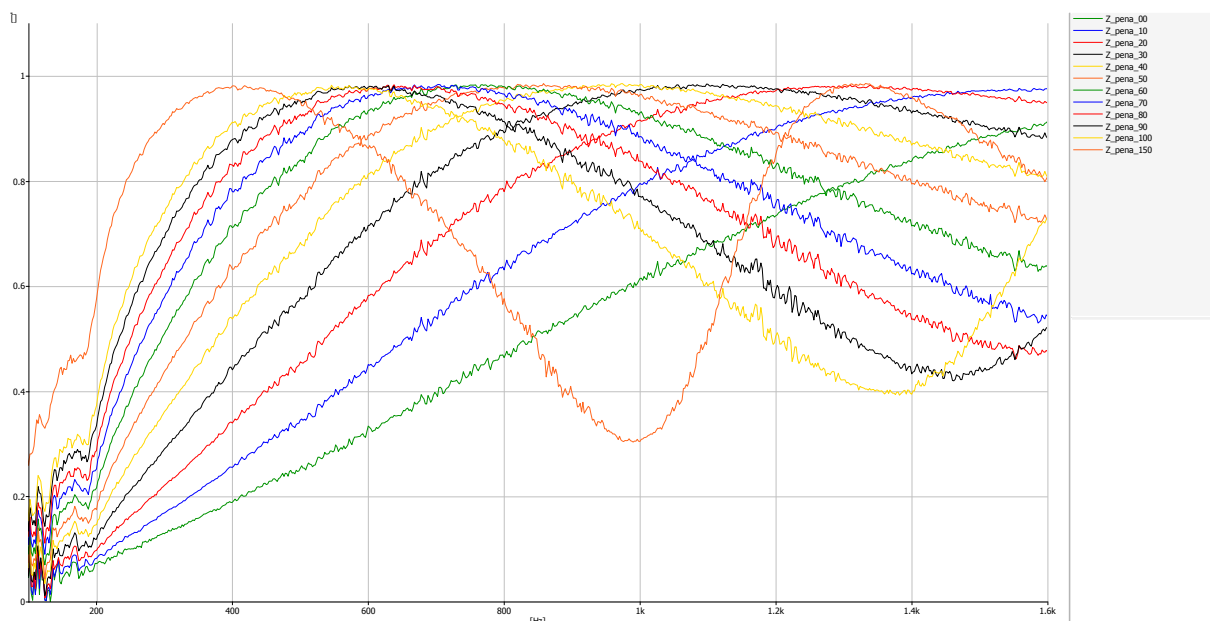
E. M. Nosal, M. Hodgson a I. Ashdown, „Improved Algorithms and Methods for
50] Room Sound-Field Prediction by Acoustical Radiosity in Arbitrary Polyhedral Rooms,“
The J. Acoustical Soc. of Am., vol. 116, no. 2, pp. 970-980,, p. <http://link.aip.org/link/?J>,
2004.

A. Krokatad, S. Strom a S. Sorsdal, „Calculating the acoustical room response by the
51] use of the ray tracing technique,“ *Journal of Sound and Vibration*, pp. 118-125, 8 1968.

PŘÍLOHA č. 1

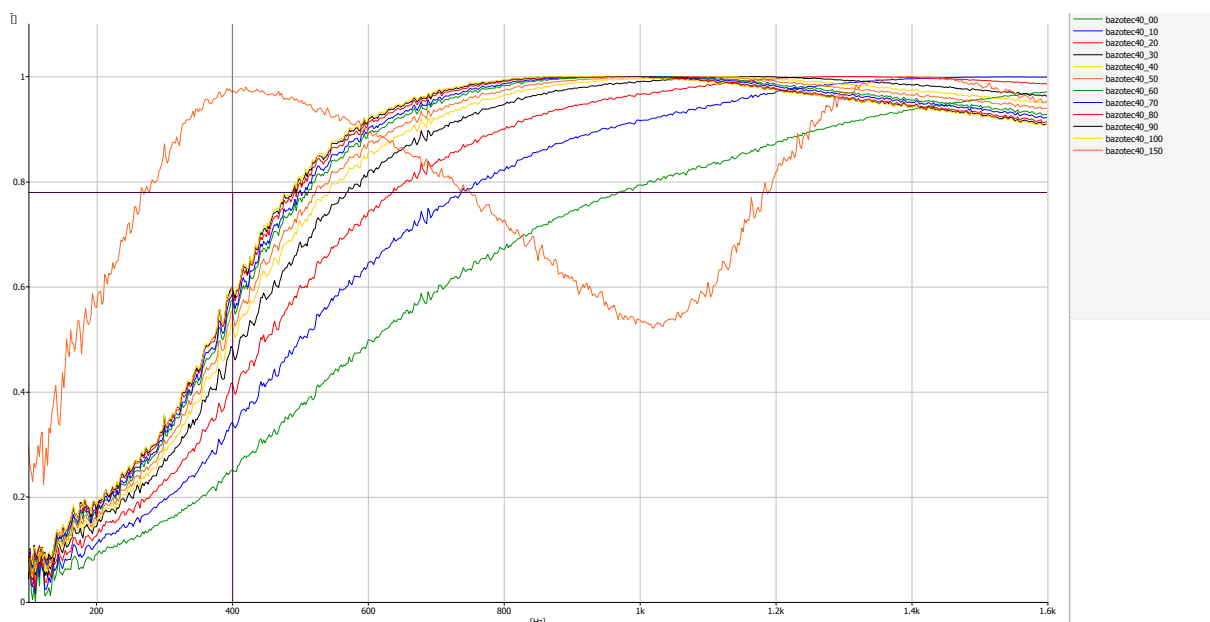
Určení absorpčního koeficientu pro použitý zvuko-izolační materiál

Změřené materiály v impedanční trubici



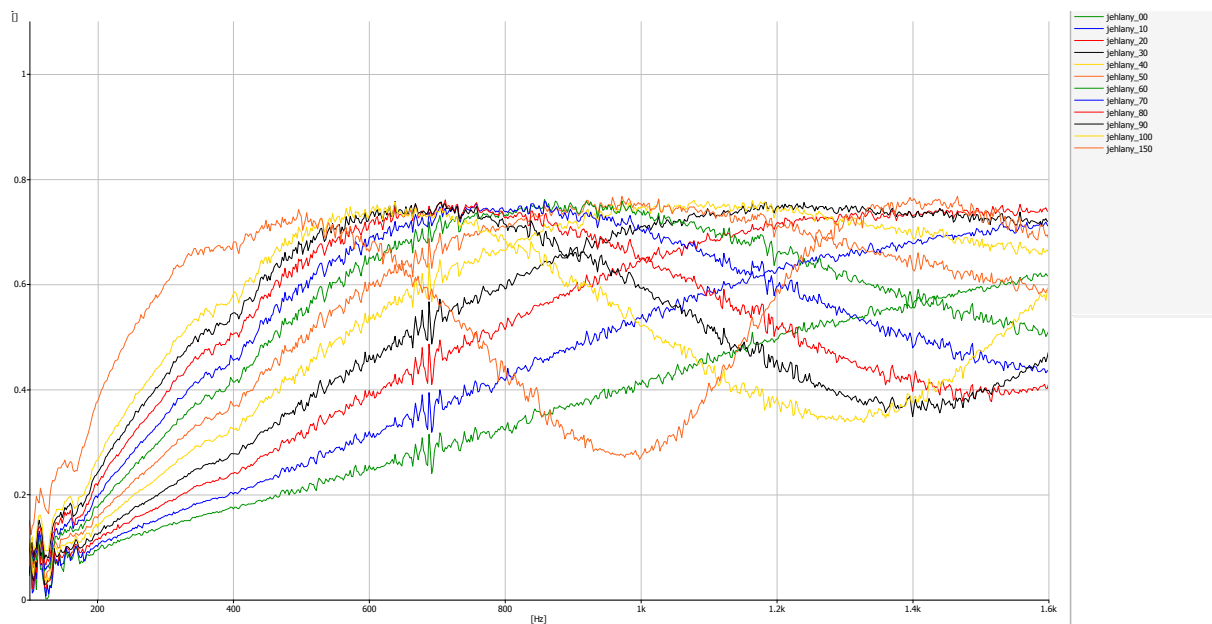
Obrázek 0-1 - Akustická pěna 25 mm

Legenda - Z_pena_00 je akustická absorbce bez vzduchové mezery, číslo za podtržítkem značí velikost vzduchové mezery v milimetrech



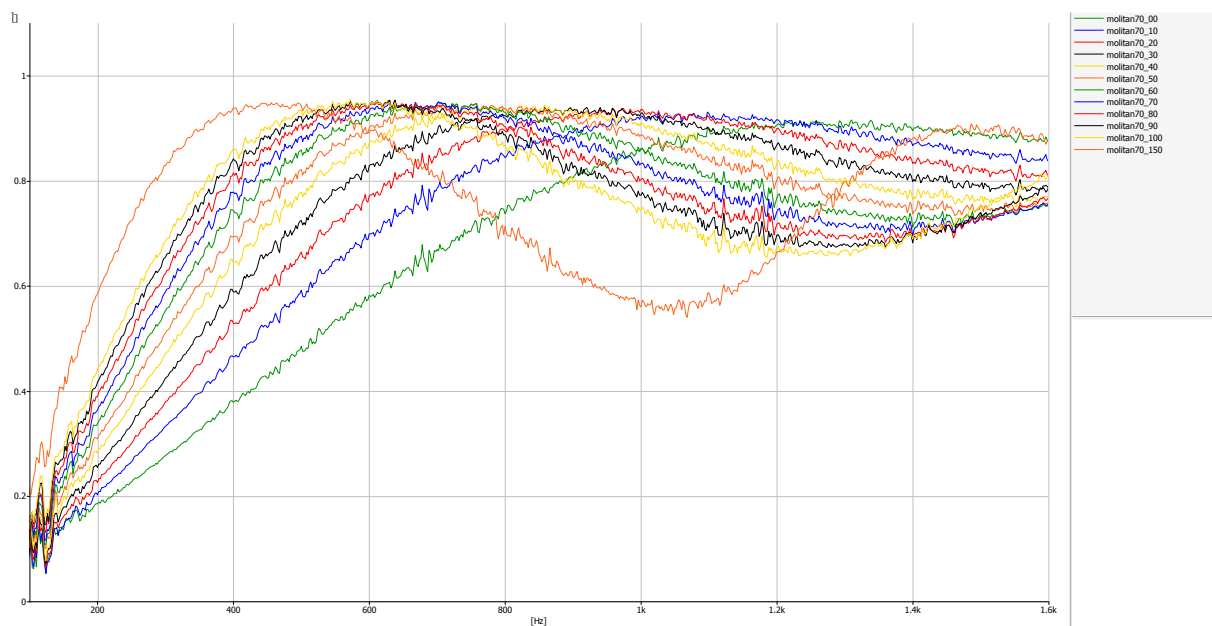
Obrázek 0-2 - Bazotec 40 mm

Legenda - (Bazotec 40_00 je akustická absorbce bez vzduchové mezery, číslo za podtržítkem značí velikost vzduchové mezery v milimetrech)



Obrázek 0-3 - Molitan 70 mm - jehly

Legenda - (jehly_00 je akustická absorbce bez vzduchové mezery, číslo za podtržítkem značí velikost vzduchové mezery v milimetrech)

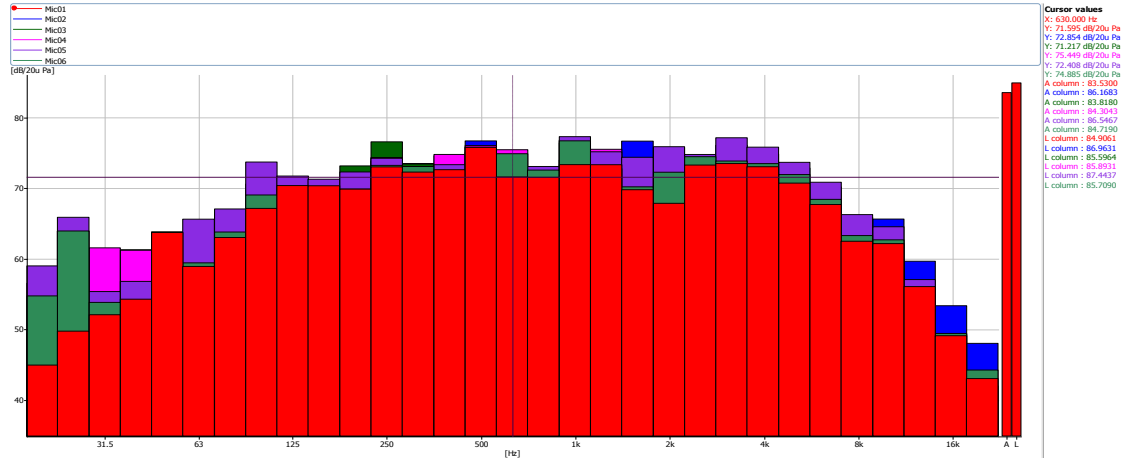


Obrázek 0-4 - Molitan 70mm hladká deska

Legenda - (molitan_00 je akustická absorbce bez vzduchové mezery, číslo za podtržítkem značí velikost vzduchové mezery v milimetrech)

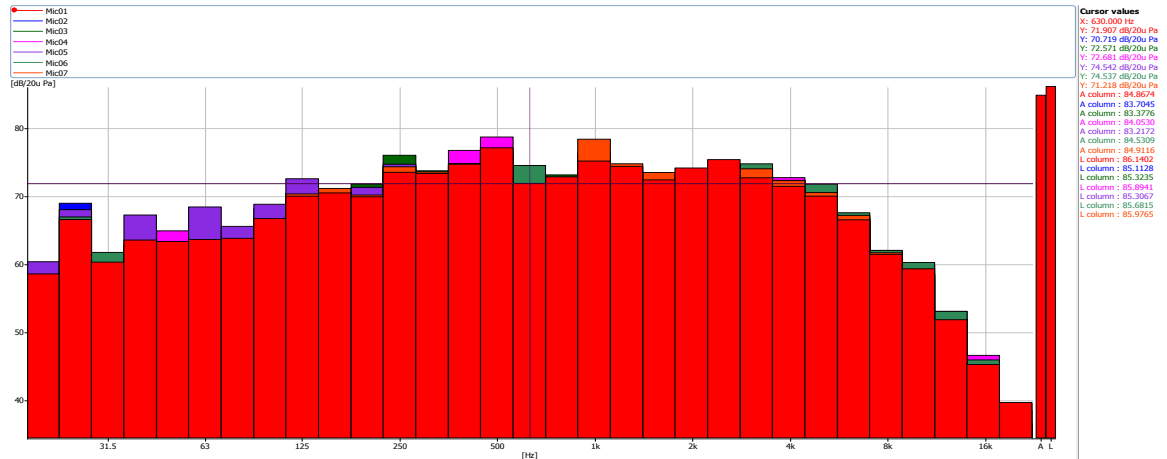
PŘÍLOHA č. 2

Třetino-oktávová spektra zdrojů a třetino-oktávová spektra testovací uzavřené místnosti



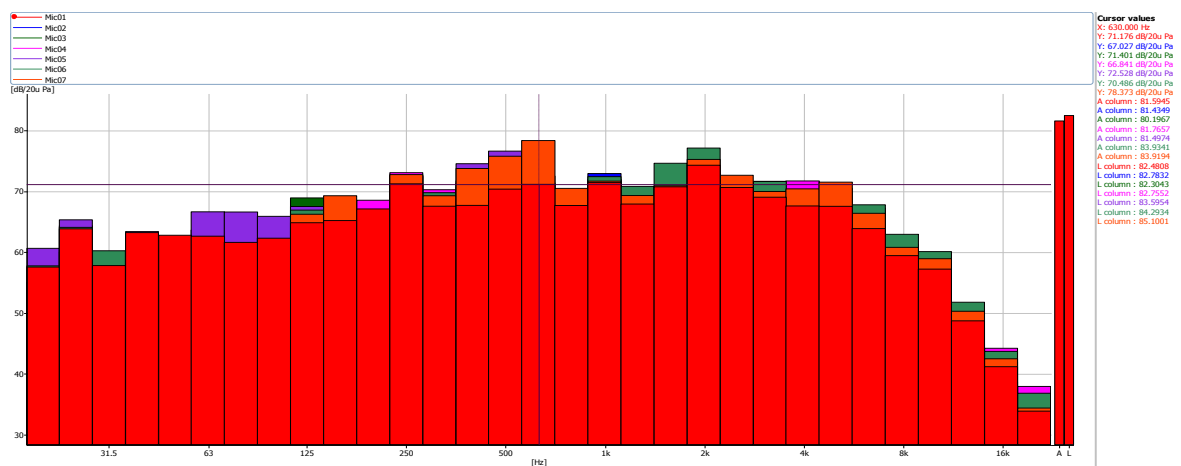
Obrázek 0-5 - Overlay graf hluk motor M1

(6 mikrofonů okolo, 1,5 m nad zemí, 0,5 m od zdroje) bez obložení zdi



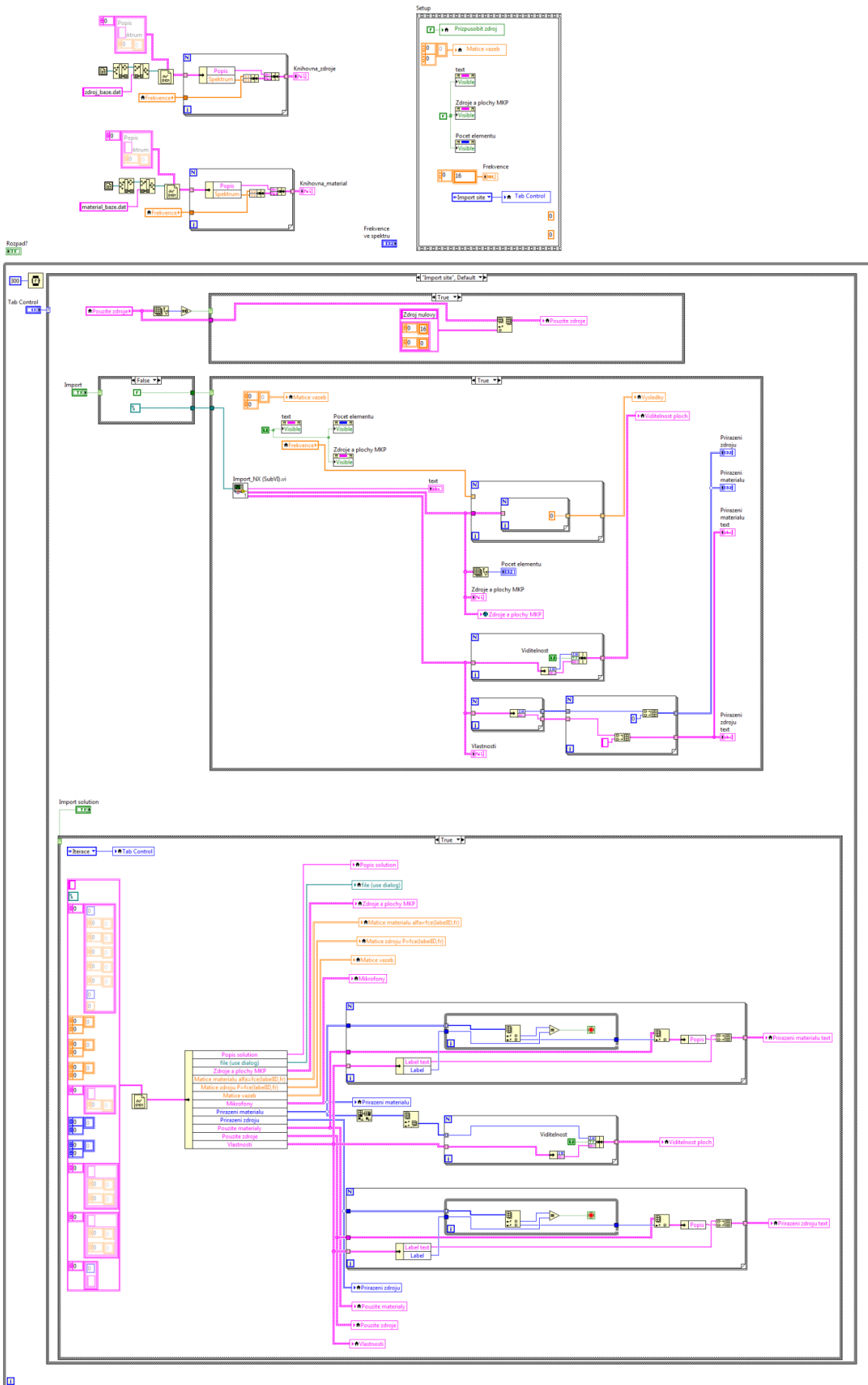
Obrázek 0-6 - Overlay 1/3 oktávové spektrum

(hluk motoru M1, 6 mikrofonů okolo, 1,5 m nad zemí, jednu (7.) uprostřed) bez obložení zdi

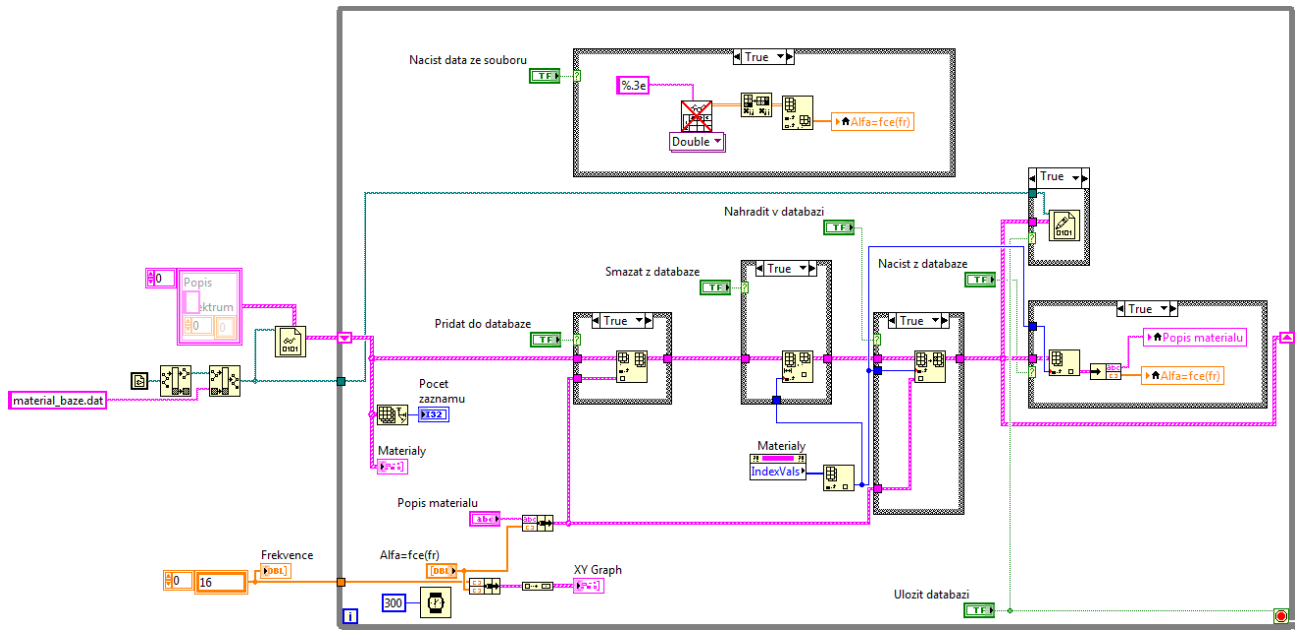


Obrázek 0-7 - Overlay 1/3 oktávové spektrum

(hluk motoru M1, 6 mikrofonů okolo, 1,5 m nad zemí, jeden (7.) uprostřed) s obložení zdi

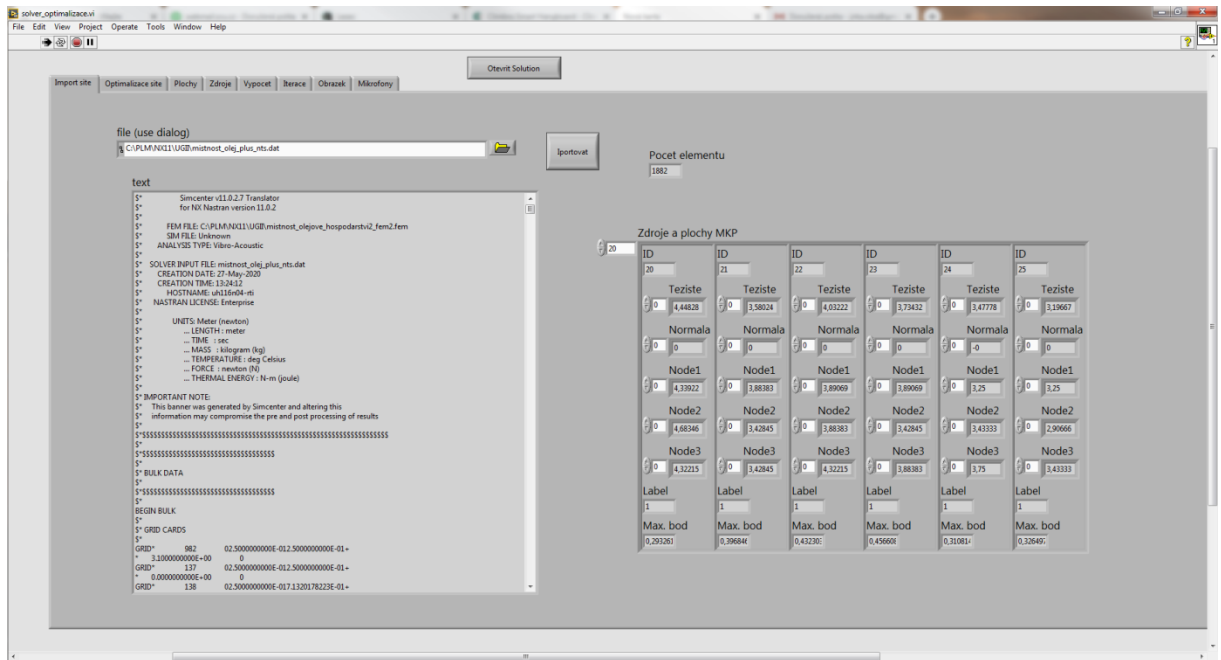


Obrázek 0-9 - Struktura programu v prostředí LabVIEW

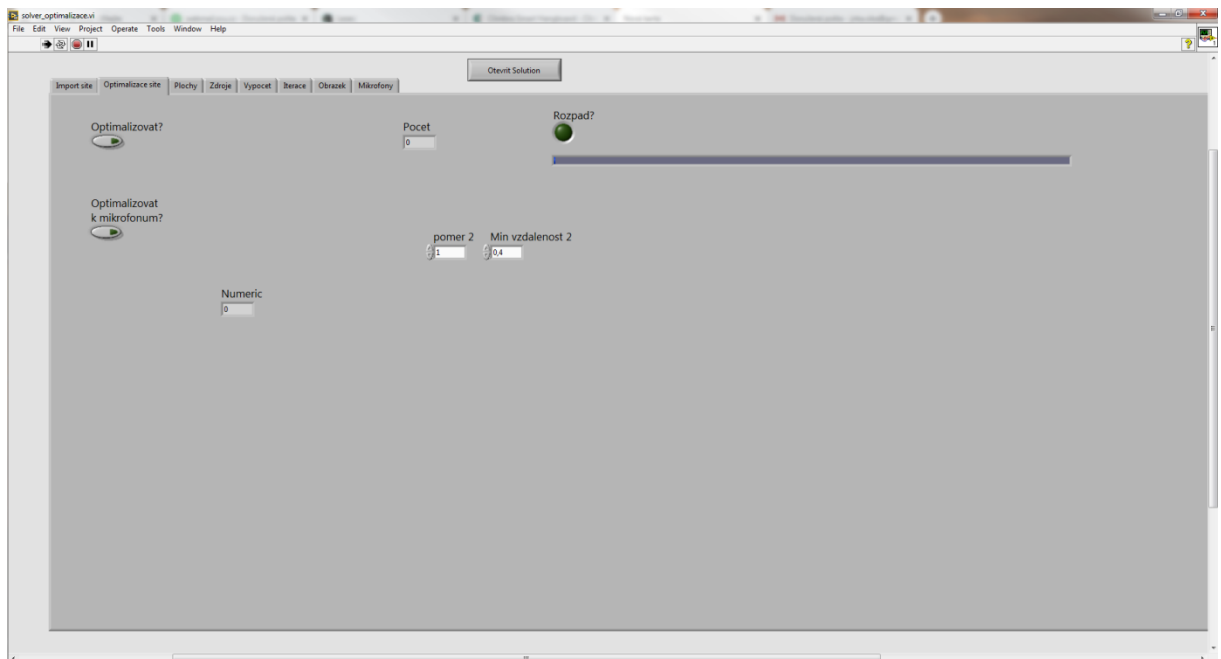


Obrázek 0-10 - Struktura programu v prostředí LabVIEW

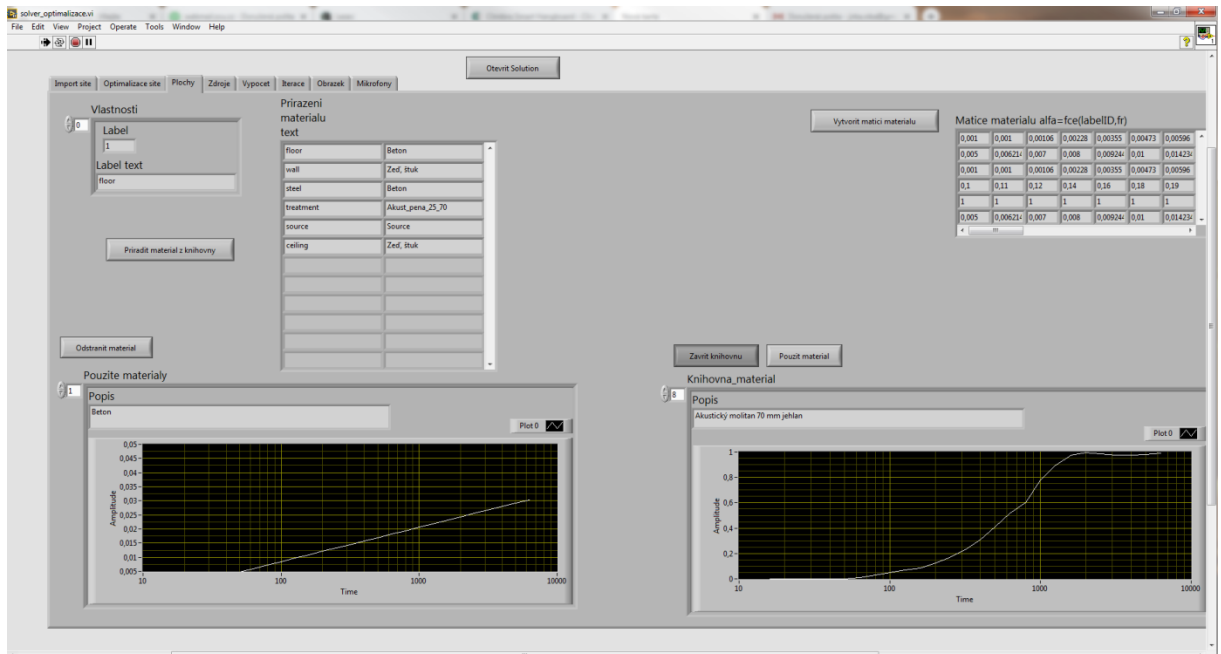
PŘÍLOHA č. 4



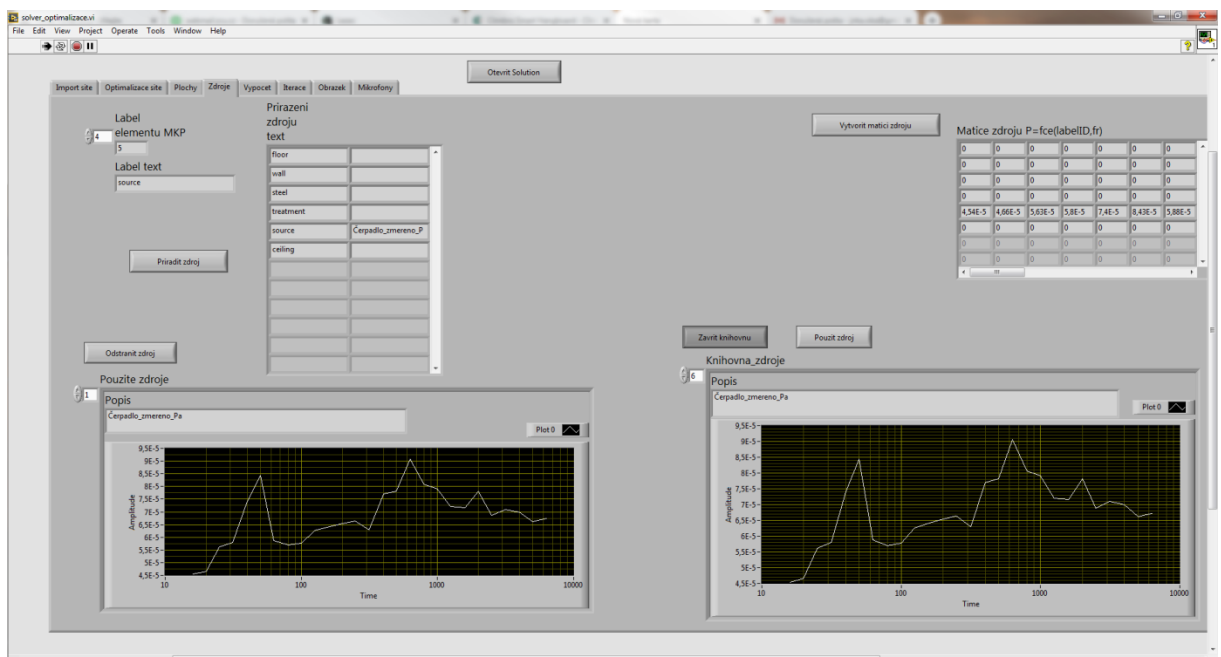
Obrázek 0-11 - Okno programu – záložka import sítě



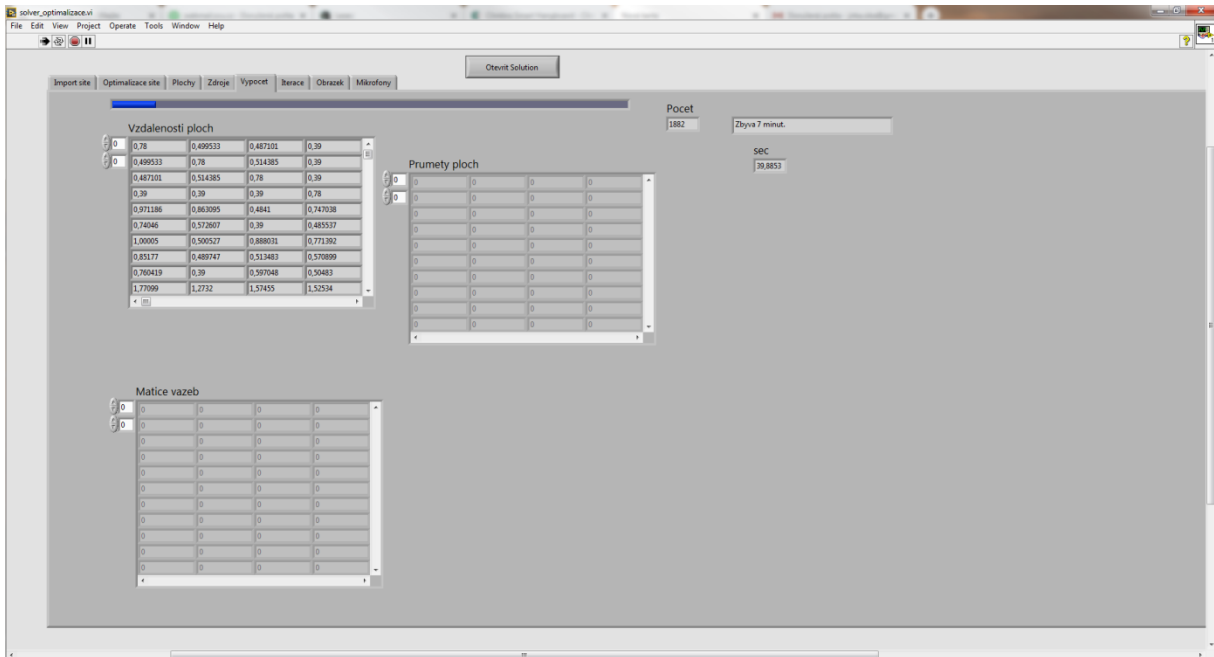
Obrázek 0-12 - Okno programu – záložka zjemnění sítě



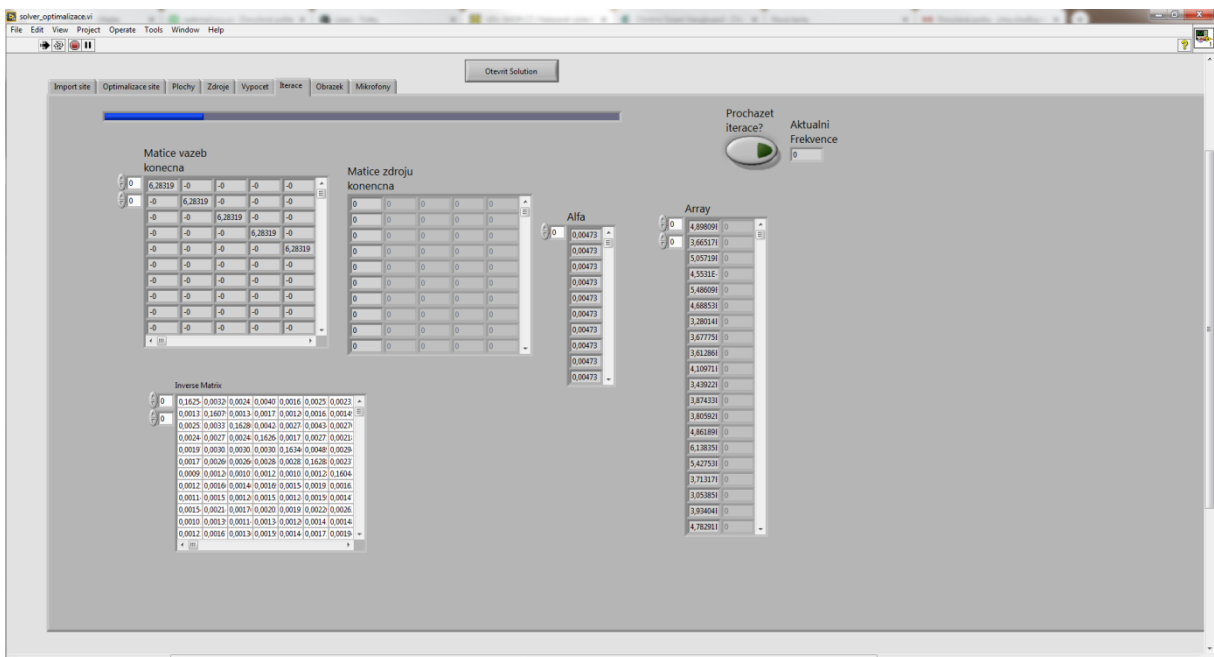
Obrázek 0-13 - Okno programu – přiřazení absorpčních charakteristik



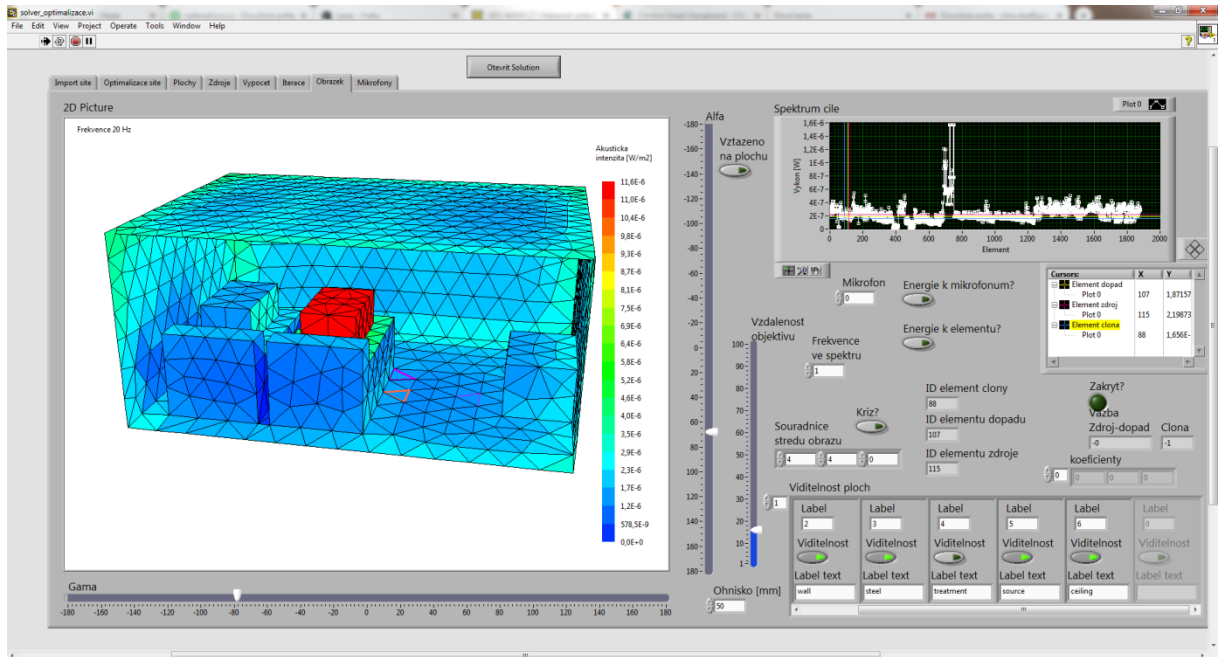
Obrázek 0-14 - Okno programu – záložka přiřazení zdrojů



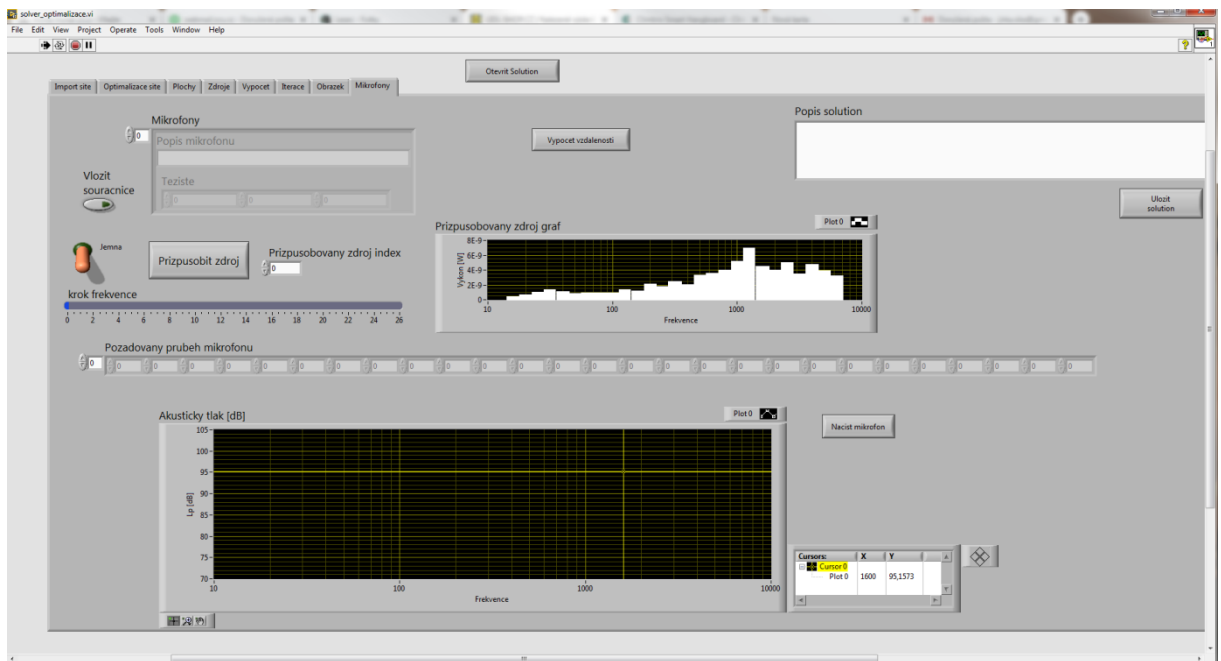
Obrázek 0-15 - Okno programu – záložka výpočet



Obrázek 0-16 - Okno programu – záložka interakce



Obrázek 0-17 - Okno programu – zobrazení výpočtu



Obrázek 0-18 - Okno programu – výpočet hladin mikrofonů