



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra fyziky**

**Hodnocení akustických parametrů víceúčelových sálů**

**Evaluation of acoustic parameters of multipurpose halls**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: prof. Ing. Ondřej Jiříček, CSc.  
Vypracoval: Ondřej Simon

---

**Praha 2015**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Ondřej Simon**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Hodnocení akustických parametrů víceúčelových sálů**

### Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou měření objektivních akustických parametrů prostorů.
- 2) Výpočet parametrů realizujte na reálných datech.
- 3) Proveďte podrobný rozbor výsledků a navrhnete postup měření vhodný pro víceúčelové sály.

### Seznam odborné literatury:

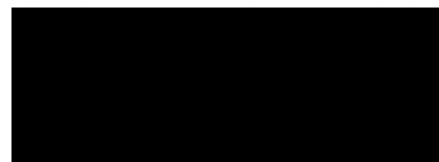
- [1] Kuttruff, H.: Room acoustics, Taylor and Francis, 2000.
- [2] Long, M.: Architectural Acoustics, Elsevier, 2006.
- [3] ČSN EN ISO 3382-1 Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky, Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči, 2009.

Vedoucí: prof. Ing. Ondřej Jiříček, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

# Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 20.5.2015

---

Ondřej Simon

# Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, prof. Ing. Ondřeji Jiříčkovi, CSc., za svědomité vedení a veškerou poskytnutou pomoc. Stejně tak děkuji i jeho kolegům z akustické laboratoře katedry fyziky ČVUT, jmenovitě pak Ing. Marku Brothánkovi, PhD. a Ing. Vojtěchu Jandákovi, PhD, za poskytnuté konzultace.

Nemalý dík patří také celé mé rodině a přítelkyni Ivaně za neutuchající morální podporu.

## Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá hodnocením akustických parametrů víceúčelových sálů. Jsou zde popsány teoretické základy akustických měření prostoru pomocí impulsové odezvy, definovány jednotlivé parametry a je vysvětlen jejich význam pro subjektivní vjem zvukového přednesu prostoru. V praktické části je poté vytvořen ucelený výpočetní nástroj pro získání těchto parametrů v prostředí MATLAB, jehož funkce byla ověřena na datech z reálného měření víceúčelové haly. Jednotlivé parametry jsou detailně analyzovány a okomentovány. Závěrem je předložen návrh postupu reálného měření pro optimální získání objektivních akustických parametrů víceúčelových sálů.

## Klíčová slova

prostorová akustika, impulsová odezva, doba dozvuku, počáteční a pozdní akustická energie, síla zvuku, basový poměr, binaurální parametry, oktávové filtry, víceúčelový sál

## Abstract

This bachelor thesis deals with the evaluation of acoustic parameters of multipurpose halls. At first, theoretical basics of room acoustic measurement using impulse response is described. Also, every single acoustic parameter of the room is defined and its meaning for subjective perception of the sound performance of the space is explained. In the practical part, a complex evaluation tool for gathering these parameters using MATLAB environment is created. Its function is verified on real measurement data and the results are analyzed and commented in detail. At the end of the thesis, a real measurement suggestion for measuring the objective acoustic parameters of multipurpose halls is presented.

## Key words

room acoustics, impulse response, reverberation time, clarity measures, early and late sound energy, sound strength, bass ratio, binaural parameters, octave band filters, multipurpose hall

## Seznam použitých zkratek a symbolů

$\delta(t)$	Diracův impuls
$BR$	Basový poměr (z anglického <i>Bass Ratio</i> )
$C_{50}$	Míra zřetelnosti (dB)
$C_{80}$	Míra jasnosti (dB)
$D_{50}$	Zřetelnost
$e(t)$	Chybový signál
$EDT$	Počáteční doba dozvuku (z anglického <i>Early Decay Time</i> )
$f_c$	Zlomový kmitočet signálu warped TSP
$f_{vz}, f_s$	Vzorkovací frekvence
$G$	Síla zvuku (dB)
$h(t)$	Časový průběh impulsové odezvy
$IACC$	Činitel interaurální vzájemné korelace (z anglického <i>Inter-aural Cross Coefficient</i> )
$iTSP$	Inverzní průběh TSP signálu
$IR$	Impulsová odezva (z anglického <i>Impulse Response</i> )
$J_{LF}$	Míra počáteční boční energie
$k$	Diskrétní frekvence
$LTI$	Lineární časově invariantní (z anglického <i>Linear Time Invariant</i> )
$MLS$	Pseudonáhodná posloupnost maximální délky (z anglického <i>Maximum Length Sequence</i> )
$n$	Diskrétní čas
$NRR$	Poměr potlačení šumu (z anglického <i>Noise Reduction Ratio</i> )
$SNR$	Poměr signál-šum (z anglického <i>Signal to Noise Ratio</i> )
$T, T_{30}, T_{20}$	Doba dozvuku
$T_s$	Čas těžiště
$T_{vz}$	Vzorkovací perioda
$TSP$	Puls roztažený v čase (z anglického <i>Time Stretched Pulse</i> )

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Impulsová odezva a metody jejího měření .....</b>	<b>8</b>
2.1 Metody měření impulsové odezvy .....	8
2.2 Signály TSP .....	10
<b>3. Objektivní akustické parametry prostoru .....</b>	<b>13</b>
3.1 Doba dozvuku .....	13
3.2 Síla zvuku .....	15
3.3 Počáteční doba dozvuku .....	16
3.4 Vyváženost počáteční a pozdní energie .....	17
3.5 Basový poměr .....	19
3.6 Míra počáteční boční energie .....	19
3.7 Binaurální míry .....	20
3.8 Další objektivní parametry .....	21
3.9 Shrnutí .....	21
<b>4. Implementace výpočtů v prostředí Matlab .....</b>	<b>22</b>
4.1 Struktura pracovního adresáře .....	22
4.2 Běh programu .....	23
4.3 Funkce programu .....	24
4.4 Zhodnocení výsledků a možností výpočetního řetězce .....	25
4.4.1 <i>Metody hledání počátku impulsové odezvy</i> .....	26
4.4.2 <i>Použitelnost oktávových filtrů</i> .....	32
4.4.3 <i>Analýza objektivních akustických parametrů konkrétního víceúčelového sálu</i> .....	36
<b>5. Návrh měřicího postupu k získání akustických parametrů víceúčelového sálu .....</b>	<b>50</b>
5.1 Měřicí vybavení .....	50
5.2 Rozložení měřicích bodů a podmínky během měření .....	53
5.3 Optimalizace měřicích signálů .....	56
5.4 Analýza a zpracování získaných dat .....	57
5.5 Prezentace výsledků .....	58
<b>6. Závěr .....</b>	<b>60</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>61</b>
<b>Dodatky .....</b>	<b>63</b>

## 1. Úvod

Měření impulsové odezvy patří mezi základní postupy, kterými lze získat komplexní informace o akustických parametrech neznámého prostoru. Definice velkého množství těchto parametrů jsou založeny právě na matematické úpravě dat získaných měřením impulsové odezvy. Tyto objektivní parametry jsou uzpůsobeny tak, aby disponovaly maximální vypovídací hodnotou o tom, jak je daný prostor subjektivně vnímán člověkem, ale zároveň aby byly podloženy skutečnými a hlavně opakovaně měřitelnými daty.

Právě teorii a principu měření impulsové odezvy je věnována první část této práce. Je popsán význam impulsové odezvy v soustavě LTI (lineární, časově invariantní) a jsou nastíněny základní metody jejího získání. Důraz je zde kladen zejména na metodu pulsu roztaženého v čase – TSP, jelikož právě ten byl v rámci praktické části této práce použit. Výčet jednotlivých akustických parametrů získatelných právě ze signálu impulsové odezvy je důležitý k celkovému pochopení problematiky. Jednotlivé parametry jsou zde jednak definovány a dále je zde uvedena jejich korelace se subjektivním hodnocením zvukového přednesu prostoru.

Hlavním cílem této práce bylo vyvinout nástroj na získání těchto parametrů u víceúčelových sálů a doporučit postup, resp. uspořádání měření k jejich získání. Pro tyto prostory v současnosti neexistují ucelená pravidla a postupy, jak by akustické měření v nich mělo být provedeno. Důvod je vcelku jasný – nelze přesně specifikovat obecný víceúčelový sál. Skutečnost, že každý takovýto prostor je využíván odlišně jak z hlediska produkce (konference, koncerty, plesy,...), tak z hlediska jeho multifunkce (tělocvična, restaurace,...), výrazně ztěžuje možnost stanovení optimálních hodnot jednotlivých akustických parametrů nebo definování měřicího postupu.

Praktická část této práce je věnována právě této problematice. V prostředí MATLAB byl vytvořen ucelený nástroj pro výpočet objektivních akustických parametrů z impulsové odezvy. Jeho funkce byla ověřena na datech z reálného měření víceúčelové haly a výsledky byly analyzovány, jak z hlediska frekvenční a prostorové závislosti jednotlivých parametrů, tak z hlediska použitelnosti dílčích výpočetních nástrojů, jako je metoda hledání začátku impulsové odezvy nebo typ použitého filtru.

Spolu s poslední kapitolou prezentující návrh reálného měřicího postupu pro prostory tohoto typu mohou závěry z analýzy výsledků posloužit jako návod, čemu by v rámci akustického měření víceúčelových sálů a následného zpracování naměřených dat měla být věnována pozornost.

## 2. Impulsová odezva a metody jejího měření

Podle obecné systémové teorie jsou veškeré vlastnosti libovolného lineárního přenosového systému obsaženy v jeho impulsově odezvě [1]. V případě, že budeme uvažovat, že tento systém má navíc časově stabilní vlastnosti, hovoříme o soustavě LTI (z anglického *Linear Time Invariant* - lineární, časově invariantní). Impulsová odezva takovéto soustavy poté odpovídá jejímu výstupu v případě, že je celý systém vybuděn Diracovým impulsem  $\delta(t)$ , jak ukazuje obr. 1:



Obrázek 1: Princip impulsově odezvy LTI soustavy

Vzhledem k tomu, že akustické vlastnosti uzavřeného prostoru jsou ve většině případů stabilní, a pokud navíc zavedeme zjednodušující kritérium jeho linearity, jsou oba tyto předpoklady splněny a na takový prostor můžeme nahlížet jako na soustavu LTI. Impulsová odezva se tedy jeví jako ideální nástroj k získání komplexních informací o chování prostoru při jeho vybudění akustickým signálem.

### 2.1 Metody měření impulsově odezvy

V ideálním případě by tedy k získání impulsově odezvy daného prostoru stačilo vybudit jej Diracovým impulsem  $\delta(t)$ , který je definován jako impuls nekonečně úzký s nekonečně vysokou amplitudou v daném bodě. Je zřejmé, že takový impuls není z hlediska fyzikálních zákonitostí realizovatelný, a proto je zapotřebí jako budící signál použít náhradní signál, který vykazuje alespoň podobné vlastnosti. Volba vhodného signálu na základě podmínek během měření je kritická [2].

#### Metoda výstřelem

V rámci měření impulsově odezvy se místo Diracova impulsu používají signály, jejichž amplitudová charakteristika je ve zkoumaném frekvenčním pásmu co nejvíce plochá. Mezi vhodné zdroje takových signálů patří např. výstřely slepých nábojů, exploze dělobuchů nebo prasknutí balónků. Proti výhodě této metody tkvící v její jednoduchosti se staví její hlavní nedostatek – poměrně nízká hodnota parametru SNR (z anglického *Signal to Noise Ratio* – odstup signálu od šumu) a časté nedostatečné vybudění prostoru na nízkých frekvencích.



## Metoda MLS

Sofistikovanější možností jak získat impulsovou odezvu daného prostoru je použití pseudonáhodné posloupnosti maximální délky – signálu MLS (z anglického *Maximum Length Sequence*). Jedná se o periodickou binární posloupnost, která je do analogového signálu převáděna jednoduchou konverzí:

Binární hodnota	Analogová amplituda
Logická „1“	+A
Logická „0“	-A
kde A – zvolená amplituda signálu	

Tabulka 1: Konverze MLS signálu

Tento signál v případě správného nastavení disponuje plochým spektrem v akustickém pásmu 20 Hz až 20 kHz, lepší hodnotou SNR než v případě použití výstřelu nebo exploze, a lidské ucho ho vnímá jako šum. Podrobný výklad a matematické odvození této metody přesahuje potřeby této práce a je uvedeno např. v článku [3]. Zásadní nevýhodou signálů MLS je chyba vzniklá časovým aliasingem v případě špatného nastavení parametrů signálu. K jeho eliminaci je nezbytné, aby délka jedné periody posloupnosti byla delší než impulsová odezva prostoru, která bude měřena [2].

## Metoda přeladovaného sinu

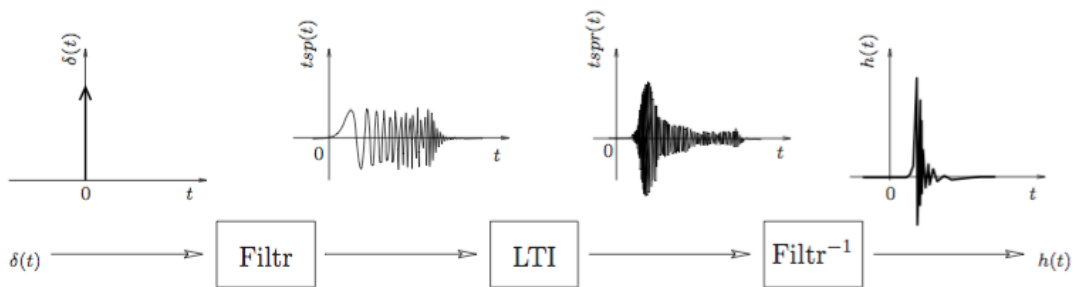
Dalšími měřicími signály nahrazujícími Diracův impuls jsou tzv. *swept sine* signály. Samotný název signálu již částečně popisuje jeho skutečnou podobu. Jedná se o sinusové signály, které jsou v čase přeladovány (zpravidla od nízkých frekvencí k vysokým). Výsledná impulsová odezva je poté rovna podílu spektra získané impulsové odezvy systému na *sweep* a spektra samotného *sweepu*. Hlavní nevýhoda této metody tkví v možnosti jejího použití pouze v časové oblasti. V případě transformace do frekvenční oblasti dochází k výpočetním chybám z důvodu častého dělení čísly blízkými nule.

## Metoda TSP

Použití signálů TSP (z anglického *Time Stretched Pulse* – puls roztažený v čase) je v současnosti asi nejmodernější metodou měření impulsové odezvy nejen v akustice. Tato metoda má za cíl zvýšit množství emitované zvukové energie a tím i parametr SNR bez současného zvyšování vlivu nelinearit měřicího řetězce [2]. Právě signál TSP byl použit v rámci praktické části této práce, proto mu bude věnováno více prostoru v následující podkapitole.

## 2.2 Signály TSP

Princip této metody znázorňuje obrázek 2. Diracův impuls  $\delta(t)$  je filtrován speciálním filtrem, který jeho energii rozloží v čase podle frekvence. Dochází tedy k roztažení Diracova impulsu v čase a vzniká měřicí signál  $tsp(t)$ . Tento signál vstupuje do zkoumané soustavy (v našem případě je jím akusticky vybuzen zkoumaný prostor), jejíž impulsová odezva  $tsp_r(t)$  je zaznamenána. Tato odezva je na závěr filtrována inverzním filtrem, čímž je na jeho výstupu získána skutečná impulsová odezva LTI soustavy na Diracův impuls  $\delta(t)$ .



Obrázek 2: Princip metody TSP (převzato z [4])

Zavedme nyní přehledné rozlišení signálů ve frekvenční a časové oblasti. Signály ve frekvenční oblasti budeme označovat velkými písmeny (např.  $TSP$ ), a signály v časové oblasti písmeny malými (např.  $tsp(t)$ ).

Aby mohlo dojít ke zpracování samotných signálů, je potřeba nejprve definovat signál inverzní  $iTSP$ , který odpovídá charakteristice inverzního filtru z obrázku 2:

$$iTSP(k) = (TSP(k))^{-1}. \quad (1)$$

K převodu z frekvenční oblasti do časové (a zpět) využijeme funkci zpětné Fourierovy transformace  $\mathcal{F}^{-1}$  (v případě převodu z časové domény do frekvenční pak její přímou podobu  $\mathcal{F}$ ). Pro signál TSP pak bude platit:

$$tsp(n) = \mathcal{F}^{-1}[TSP(k)], \quad itsp(n) = \mathcal{F}^{-1}[iTSP(k)], \quad (2)$$

$$TSP(k) = \mathcal{F}[tsp(n)], \quad iTSP(k) = \mathcal{F}[itsp(n)]. \quad (3)$$

Po vynásobení diskrétního času  $n$  z rovnice (2) vzorkovací periodou  $T_{vz}$  je okamžitá hodnota signálu definována jako:

$$tsp(t) = tsp(nT_{vz}), \quad itsp(t) = itsp(nT_{vz}). \quad (4)$$

Podle průběhu skupinového zpoždění filtru rozlišujeme 3 základní typy TSP signálů:

- lineární TSP
- logaritmické TSP
- warped TSP

### Logaritmické TSP

Vzhledem k tomu, že v rámci výpočtů v praktické části této práce byl použit právě logaritmický typ signálu TSP, věnujme mu trochu prostoru ke stručnému představení.

Na rozdíl od lineárního TSP, které má plochou amplitudovou charakteristiku, je logaritmické TSP záměrně posíleno ve spodní části svého frekvenčního spektra. Důvodem k tomuto posílení je záměr zlepšení odstupů signál-šum za předpokladu, že většina šumu pozadí je často shromážděna právě na nízkých frekvencích. Podle (Morise, Irino a Banno, 2007) je logaritmické TSP definováno jako:

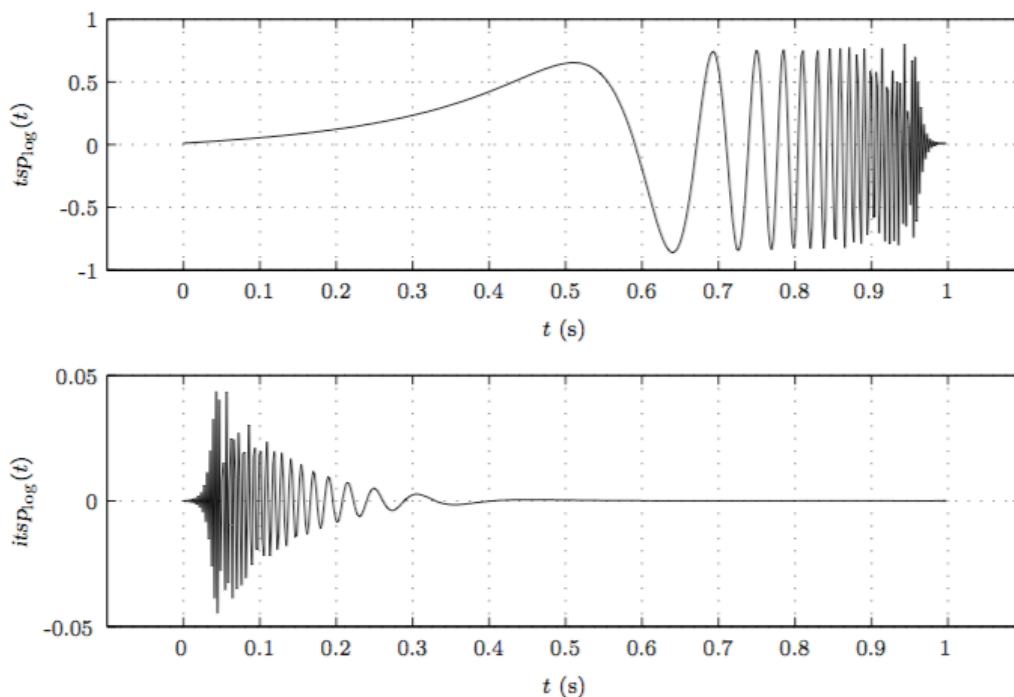
$$TSP_{\log}(k) = \begin{cases} 1, & \text{pro } k = 0 \\ \frac{\exp(-jak \cdot \log(k))}{\sqrt{k}}, & \text{pro } 1 \leq k \leq \frac{L}{2} \\ TSP_{\log}^*(L - k), & \text{pro } \frac{L}{2} < k < L \end{cases}, \quad (5)$$

pro

$$a = \frac{2M\pi}{\frac{L}{2} \log\left(\frac{L}{2}\right)}$$

kde  $L$  je délka signálu,  $k$  je diskretní frekvence a  $M$  je rovno polovině délky úseku, který nese většinu energie.  $L$ ,  $k$  i  $M$  musí být z množiny celých čísel,  $L$  pak navíc ještě číslo kladné. Hvězdička označuje komplexně sdruženou hodnotu.

Časový průběh logaritmického TSP a jeho inverzního signálu znázorňuje pro lepší představu obrázek 3:



Obrázek 3: Časový průběh logaritmického TSP (převzato z [4])

### Ostatní typy signálů TSP

Jak již bylo zmíněno, lineární TSP disponuje na rozdíl od logaritmického plochou amplitudovou charakteristikou. Warped TSP (nebo také „kombinované TSP“) je signál, který vznikl kombinací obou předchozích. Na nižších frekvencích je stejně jako logaritmické TSP posílen a od určité zlomové frekvence jeho amplitudová charakteristika přechází na lineární. Nastavením této zlomové frekvence  $f_c$  lze tento signál optimalizovat pro konkrétní hluk pozadí k získání co nejvyšší hodnoty SNR.

Detailní popis těchto signálů, jaký byl uveden u logaritmického TSP, včetně jejich matematické definice a časových průběhů, není pro potřeby této práce nezbytný a může být nalezen např. v práci [4].

### Optimalizace parametrů

Všechny výše popsané typy měřicích signálů je nutno pro správnost měření optimalizovat pro konkrétní prostor. Podrobný rozbor této optimalizace na konkrétních signálech může být nalezen např. v [4]. Zde uvedme pouze základní myšlenku:

V ideálním případě nastavení TSP signálu by mělo platit, že konvolucí přímého průběhu  $tsp(t)$  a inverzního  $itsp(t)$  vznikne Diracův impuls  $\delta(t)$ , tedy že platí:

$$tsp(t) * itsp(t) = \delta(t). \quad (6)$$

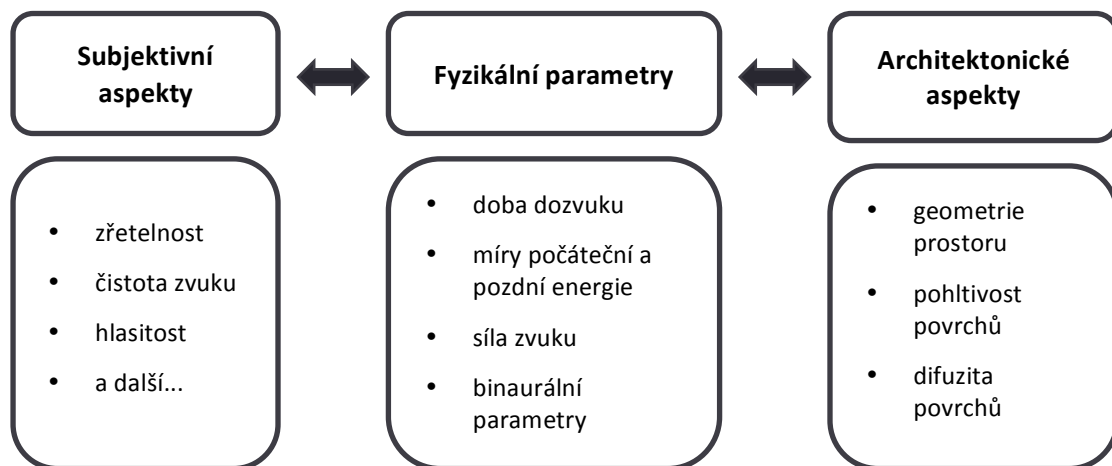
Ve skutečnosti je však výsledný Diracův impuls zatížen chybou  $e(t)$ :

$$tsp(t) * itsp(t) = \delta(t) + e(t). \quad (7)$$

Cílem optimalizace je nalézt takové hodnoty jednotlivých parametrů signálu, při kterých bude energie chybového signálu  $e(t)$  minimální. To se v praxi nedá realizovat jinak než přímým experimentem, kdy je pro každý parametr zvolen jeho definiční obor a pro každou kombinaci parametrů je vytvořen TSP signál i se svým inverzním průběhem. Vzniklý přímý a inverzní signál je poté podroben vzájemné konvoluci a od výsledku je odečten správně posunutý jednotkový impuls (Dirac). Výsledkem je samotný chybový signál  $e(t)$  jehož průměrná energie je spočtena a porovnána se signály vzniklými použitím jiné kombinace parametrů TSP. Kombinaci parametrů, která vytvoří chybový signál s nejmenší energií, poté lze považovat za optimální [4].

### 3. Objektivní akustické parametry prostoru

Akustické vlastnosti uzavřeného prostoru lze popsat množstvím objektivně měřitelných parametrů. Tyto parametry představují spojovací prvek mezi světem subjektivního vnímání a architekturou prostoru, sestávající z geometrie daného prostoru, mírou pohltivosti povrchů, množstvím difúzních prvků a dalších aspektů [1], jak znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 4: Význam objektivních parametrů

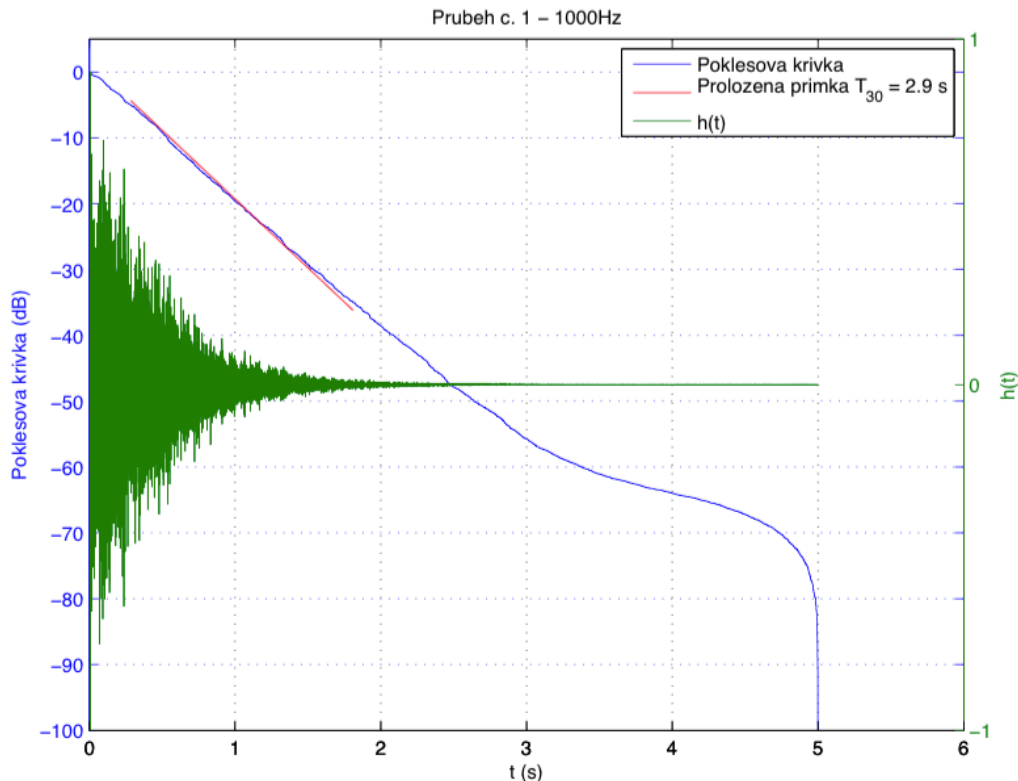
Všechny tyto parametry disponují z hlediska jejich použitelnosti dvěma zásadními vlastnostmi: úzce koreluje se subjektivním vnímáním akustické kvality prostoru a jsou matematicky snadno získatelné z impulsové odezvy prostoru. Korektně naměřená impulsová odezva tedy představuje komplexní informace o akustických vlastnostech daného prostoru v konkrétním měřicím bodě nezbytné k analýze prostoru i jeho případné optimalizaci pro různé aplikace [1].

Výčet těchto parametrů včetně technických požadavků a postupů jejich měření je součástí technické normy ČSN EN ISO 3382-1 [5]. V rámci následujících podkapitol budou stručně představeny parametry, které se pro potřeby hodnocení různých druhů prostor používají, a které byly v rámci praktické části použity pro zpracování dat z reálného měření. Důraz je kladen zejména na jejich fyzikální význam a korelaci se subjektivním vjemem posluchače.

#### 3.1 Doba dozvuku

Doba dozvuku je základním parametrem pro hodnocení akustických vlastností uzavřeného prostoru a je definována jako čas, během kterého dojde k poklesu nahromaděné akustické energie na  $10^{-6}$  původní hodnoty. V hladinovém vyjádření tato hodnota odpovídá poklesu o 60 dB.

Způsobů, jakými lze dobu dozvuku měřit, je několik. Všechny ovšem vychází z prokladu poklesové křivky přímkou, jak znázorňuje obrázek 5:



Obrázek 5: Proklad poklesové křivky (výstup programu v rámci [4])

Proložení poklesové křivky v bodech s rozmezím celých 60 dB podle definice doby dozvuku se v reálném měření příliš nevyužívá. Důvodem je obvyklé nedostatečné vybudnění prostoru o více jak 60 dB oproti šumu pozadí. Stejně tak se jako horní mez prokladu nevolí hladina 0 dB, kde se často vyskytuje zkreslení v okamžiku ukončení působení zdroje zvuku. Podle zvoleného prokladu se výsledná doba dozvuku získává vynásobením skutečné doby poklesu mezi zvolenými body odpovídajícím faktorem a parametr doby dozvuku je indexován tak, aby bylo zřetelné, jakým způsobem byl získán. Výsledná doba dozvuku  $T_x$  je poté dána jako:

$$T_{30} = 2 \cdot \Delta t = 2 \cdot (t_{-35 \text{ dB}} - t_{-5 \text{ dB}}), \quad \text{pro proklad od } -5 \text{ do } -35 \text{ dB.} \quad (8)$$

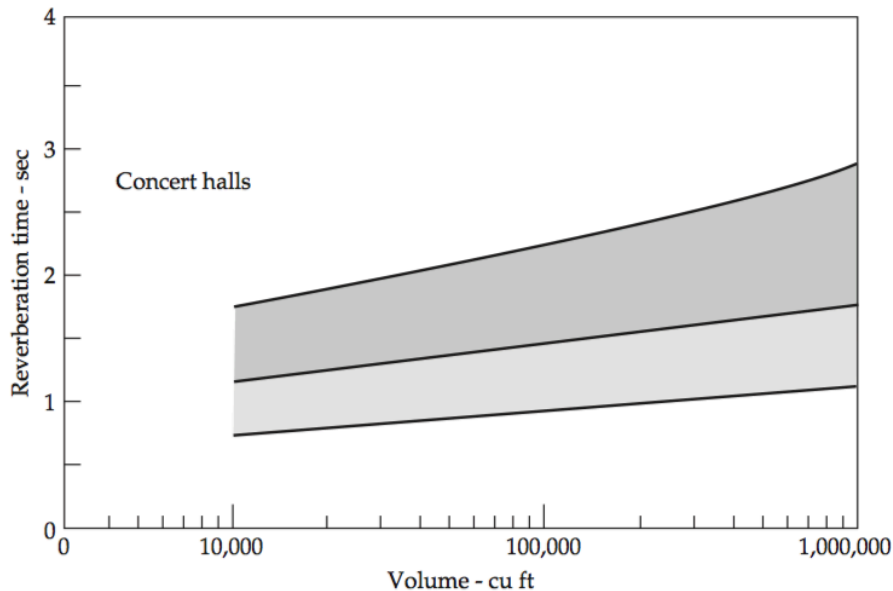
$$T_{20} = 3 \cdot \Delta t = 3 \cdot (t_{-25 \text{ dB}} - t_{-5 \text{ dB}}), \quad \text{pro proklad od } -5 \text{ do } -25 \text{ dB.} \quad (9)$$

Konkrétně na obr. 5 se jedná o proklad od -5 do -35 dB.

Nutno doplnit, že stejně jako většina ostatních akustických veličin, je i doba dozvuku frekvenčně závislá a je tedy potřeba ji pro každé zkoumané frekvenční pásmo stanovit zvlášť.

V případě uvažování všech možných prostor od bezdrazových místností, kde doba dozvuku není teoreticky definovaná, a kde se reálné hodnoty pro všechna frekvenční pásma pohybují v setinách až desetínách sekund, až po velké katedrály, kde naopak může doba dozvuku dosahovat i pěti sekund a více, vyvstává myšlenka, zda neexistuje nějaká optimální hodnota doby dozvuku. O tuto optimální hodnotu se vedou v celé

akustické společnosti diskuse už od samého začátku měření doby dozvuku. Přesné stanovení optimální hodnoty pochopitelně znemožňuje subjektivní vnímání zvuku každého jedince. Výsledkem je, že každý autor na základě svých vlastních zkušeností a získaných dat určuje jiná toleranční pásma doporučených rozmezí hodnot doby dozvuku pro konkrétní typy prostorů, jako jsou sakrální stavby, koncertní sítě, nahrávací studia a další. Doporučení jednotlivých autorů pak ne vždy korelují. Příklad takového tolerančního pásma pro koncertní sítě dle [6] je na obr. 6:



Obrázek 6: Doporučené toleranční pásmo doby dozvuku pro koncertní sítě (převzato z [6])

### 3.2 Síla zvuku

Síla zvuku  $G$  je definována jako logaritmický poměr zvukové energie získané impulsové odezvy k energii odezvy pořízené ve vzdálenosti 10 m od téhož zdroje zvuku ve volném poli [5], matematicky pak:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \quad (\text{dB}), \quad (10)$$

kde

$$L_{pE} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad \text{a} \quad L_{pE,10} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad (\text{dB}),$$

kde  $p(t)$  je okamžitý akustický tlak impulsové odezvy v měřicím bodě,  $p_{10}(t)$  je totéž ve vzdálenosti 10 m ve volném poli,  $p_0$  je 20  $\mu\text{Pa}$ ,  $T_0 = 1$  s,  $L_{pE}$  je hladina expozice akustickému tlaku  $p(t)$  a  $L_{pE,10}$  je hladina expozice akustickému tlaku  $p_{10}(t)$ .

Tato veličina je v současnosti považována za objektivně měřitelný parametr nejvíce korelující s parametrem subjektivně vnímané hlasitosti zvuku [1, 7]. Ačkoliv se

může zdát, že síla zvuku v určitém místě uzavřeného prostoru přímo závisí na výkonu zdroje, geometrii prostoru a pohltivosti povrchů, tyto závislosti platí pouze pro dokonale difuzní prostory a nelze je tedy zobecnit pro všechny typy reálných prostorů [1]. Z tohoto důvodu se síla zvuku  $G$  jeví jako užitečný parametr pro popis akustických vlastností prostoru.

Obecné doporučení optimální síly zvuku  $G > 0$  dB je příliš jednoduché a vzhledem k její závislosti na vzdálenosti od zdroje platí pouze pro sály s maximální kapacitou 3.000 sedících diváků a největší vzdáleností sedadlo-podium 40 m [7]. Zajímavým faktem je také to, že během subjektivních testů jsou zadní sedadla často hodnocena jako nejtišší místa, i když se v nich minimum prostorové závislosti  $G$  nenachází. Důvodem je jistý subjektivní předpoklad účastníků testů nedostatečné hlasitosti v zadních řadách [7].

### 3.3 Počáteční doba dozvuku

Počáteční doba dozvuku  $EDT$  (z anglického *Early Decay Time*) je získána obdobným způsobem jako klasická doba dozvuku, tedy z prokladu poklesové křivky přímkou. Rozdílem je, že při výpočtu  $EDT$  se uvažuje sklon křivky definovaný body 0 a -10 dB. Doba tohoto poklesu je následně násobena faktorem 6 k získání odpovídající doby poklesu o 60 dB při dodržení počátečního sklonu.

Výhoda výpočtu tohoto parametru se projevuje zejména u geometricky složitějších prostorů, kde je klasická doba dozvuku ovlivněna množstvím odrazů s různým zpožděním a okamžitou akustickou energií. Parametr  $EDT$  je naopak ovlivněn zejména brzkými odrazy, a proto mnohem více závisí na poloze měřicího bodu a geometrii prostoru [1].

Pro popis takových prostor, jakými jsou krajní řady sedadel či balkóny složitějších koncertních sálů, je proto výpočet parametru  $EDT$  velice důležitý. Při zkoumání samotné doby dozvuku by totiž došlo ke zkreslení výsledků a tedy i případným chybám při realizaci optimalizace akustických vlastností.

Množství studií [7, 8] také shledalo parametr  $EDT$  jako podstatně lepší indikátor subjektivního vnímání doznívání, než je klasická doba dozvuku. Hodnoty  $EDT$  a klasické doby dozvuku jsou ve většině případů velmi podobné. V určitých výjimkách ovšem jejich výraznější diference může indikovat akustické zvláštnosti zkoumaného prostoru, které by měly být v rámci měření prozkoumány. [8]

Zajímavým parametrem může být také poměr  $EDT$  ku klasické době dozvuku. Hodnoty tohoto poměru v rozmezí 0,8 až 1,1 mohou být známkou vyšší směrovosti geometrie prostoru, kdy povrchy sálu směřují brzké odrazy přímo do oblasti hlediště [7].



### 3.4 Vyváženost počáteční a pozdní energie

V této skupině existuje několik objektivních parametrů popisujících subjektivně vnímanou jasnost zvuku. Některé zdroje je definují také jako vyváženost mezi jasností zvuku a dozníváním [8]. Pro všechny tyto parametry hraje hlavní roli poměr počáteční energie přímého zvuku k energii pozdní. Tento základní poměr je obecně definován jako:

$$C_{t_e} = 10 \log \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}), \quad (11)$$

kde  $C_{t_e}$  je index počáteční energie k pozdní,  $t_e$  časová hranice a  $p(t)$  okamžitý akustický tlak impulsové odezvy v měřicím bodě.

Časová hranice  $t_e$  se stanovuje rozdílně podle toho, zda je zkoumaný prostor primárně určen pro produkci mluveného slova nebo hudby, jak popisují následující veličiny:

#### Míra zřetelnosti $C_{50}$

Míra zřetelnosti  $C_{50}$  udává akustické kritérium zřetelnosti pro mluvené slovo a je definována jako:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}). \quad (12)$$

Obecně platí, že každá hodnota nad 0 dB ukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova. Naopak hodnoty nižší než -5 dB definují zkoumaný prostor jako nevhodný pro produkci mluveného slova [9]. Parametr  $C_{50}$  je obecně velmi prostorově závislý a může tak být vhodným měřítkem subjektivně vnímané kvality přednesu. [6]

#### Zřetelnost $D_{50}$

Zřetelnost  $D_{50}$  je ekvivalentem k míře zřetelnosti  $C_{50}$  a je definována jako:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05s} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (-). \quad (13)$$

Optimální rozmezí  $D_{50}$  je přímo závislé na hodnotách  $C_{50}$  a v případě uvažování optima  $-5 \text{ dB} < C_{50} < 3 \text{ dB}$  odpovídá doporučená hodnota  $D_{50}$  rozmezí 0,25 až 0,7. Současné studie si však ve většině případů vystačí pouze s parametrem  $C_{50}$ , zřetelnost  $D_{50}$  je uváděna z historického důvodu jako parametr této skupiny, který byl definován jako první.

Z výše uvedených vztahů je také zřejmá vzájemná závislost parametrů  $C_{50}$  a  $D_{50}$ :

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad (\text{dB}). \quad (14)$$

### Míra jasnosti $C_{80}$

Míra jasnosti  $C_{80}$  je ekvivalentem  $C_{50}$  v případě, že zkoumáme vhodnost prostoru pro hudební produkci. Jediným rozdílem mezi  $C_{50}$  a  $C_{80}$  je posunutí časové integrační hranice, jak napovídá indexování parametru. Matematicky je míra jasnosti definována jako:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}). \quad (15)$$

Obecně lze říci, že hodnota  $C_{80}$  by měla být tím vyšší, čím kratší noty jsou hrány v rámci konkrétní pasáže produkované hudby (aby nedocházelo k jejich splývání). Na rozdíl od míry zřetelnosti je však zde potřeba dbát i na horní hranici parametru míry jasnosti. Ta by neměla překročit 8 dB, kdy by energie odrazů byla v porovnání s energií přímé vlny od zdroje už příliš malá, a docházelo by tak ke zkreslení prostorového vnímání zvuku [6]. Pro lepší představu uveďme, že typické rozmezí parametru  $C_{80}$  se v evropských a amerických koncertních sálech pohybuje mezi -5 a +3 dB [10].

Míra jasnosti má tendenci negativně korelovat s hodnotou  $EDT$ , tedy že vysoká hodnota  $C_{80}$  ukazuje na nízkou hodnotu počáteční doby dozvuku. Subjektivně si to lze vyložit tak, že vysoká jasnost vnímané produkce je často asociována s krátkým dozníváním [7].

### Čas těžiště $T_S$

Posledním parametrem ze skupiny vyváženosti počáteční a pozdní energie je čas těžiště. Stejně jako předchozí parametry  $C_{50}$ ,  $D_{50}$  a  $C_{80}$  vypovídá o vnímané jasnosti hudby nebo mluveného slova ve zkoumaném prostoru. Typické hodnoty  $T_S$  se podle [9] pohybují v rozmezí 70 – 150 ms pro hudbu, resp. 60 – 80 ms pro mluvené slovo.

Matematicky je čas těžiště definován jako:

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{s}). \quad (16)$$

Vzhledem k tomu, že některé z výše uvedených parametrů vyváženosti počáteční a pozdní energie jsou vyjádřeny logaritmicky v decibelech ( $C_{50}$ ,  $C_{80}$ ) a některé lineárně ( $D_{50}$ ,  $T_S$ ), nelze vyvodit přímé závěry z jejich vzájemných korelací. K posouzení jejich závislostí by bylo nutné podrobit měřený prostor subjektivnímu testu [8].

Zajímavostí je, že už v 50. letech 19. století Joseph Henry pochopil důležitost parametrů počáteční a pozdní energie, avšak jejich výzkum byl na mnoho let zastíněn příchodem Sabinovy rovnice doby dozvuku [8].

### 3.5 Basový poměr

Basový poměr  $BR$  vyjadřuje kvalitu subjektivního vjemu spektrálního průběhu doznívání. Některé zdroje ho definují jako podporu hlubokých tónů doznívání sálu [9]. Obecně je definován jako:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (-), \quad (17)$$

kde indexy u jednotlivých dob dozvuku určují konkrétní frekvenční pásmo.

Optimální hodnota basového poměru  $BR$  by měla být v případě sálů pro hudební produkci větší než 1 [9].

### 3.6 Míra počáteční boční energie

Míra počáteční boční energie  $J_{LF}$  vyjadřuje množství energie přicházející v prvních 80 ms z bočních směrů. Na rozdíl od všech předchozích parametrů ji nelze měřit pouze jedním mikrofonom. Její získání vyžaduje použití buď dvou mikrofونů s různou snímací charakteristikou nebo intenzitní sondy, z jejichž dvou mikrofونů jsou matematickou úpravou výstupních signálů získány obě snímací charakteristiky. Obecně je míra počáteční boční energie definována jako:

$$J_{LF} = \frac{\int_{0,005s}^{0,080s} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080s} p^2(t) dt} \quad (-), \quad (18)$$

kde  $p_L(t)$  je okamžitý akustický tlak impulsové odezvy poslechového prostoru snímáný mikrofonom s osmičkovou směrovou charakteristikou a  $p(t)$  je okamžitý akustický tlak snímáný mikrofonom všesměrovým.

Mikrofon s osmičkovou snímací charakteristikou musí být během záznamu nastaven tak, aby minimum jeho citlivosti směřovalo ke zdroji zvuku, tedy aby byla minimálně snímána přímá vlna a maximálně boční odrazy [5]. Typické rozmezí  $J_{LF}$  se v koncertních sálech pohybuje od 0 do 0,5 a vypovídá o kvalitě prostorového vjemu a vjemu zdánlivé šířky zdroje zvuku. Šířka zdroje ovšem závisí nejen na míře počáteční boční energie, ale také na dalších aspektech, jako je celková síla zvuku všech hudebníků, proměnlivá dynamika produkované hudby a „zesílení“ sálu [7].

### 3.7 Binaurální míry

Jelikož je proces slyšení člověka binaurální a právě to zásadně ovlivňuje zejména prostorové vnímání zvuku, je nutné tuto skutečnost také zapracovat do akustického popisu prostoru. K tomuto účelu slouží koeficient *IACC* (z anglického *Inter-Aural Cross Correlation Coefficient*).

K získání tohoto parametru je nutno využít buď umělé hlavy se zabudovanými mikrofony v uších (tzv. *dummy head*) nebo skutečného lidského posluchače s hlavou průměrných rozměrů vybaveného mikrofony u vstupů do zvukovodů [5]. Činitel interaurální vzájemné korelace *IACC* je poté roven:

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)| \quad \text{pro } -1\text{ms} < \tau < +1\text{ms} \quad (-), \quad (19)$$

kde:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, \quad (20)$$

kde  $p_l(t)$  je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a  $p_r(t)$  je totéž na vstupu do pravého ušního kanálu.

Časové meze  $t_1$  a  $t_2$  nebyly stejně jako obecné používání parametru *IACC* jednotně přijaty. Jednou z možností je stanovení parametru  $IACC_{\text{early}}$  pro  $t_1 = 0$  a  $t_2 = 80$  ms, vyjadřující nepodobnost signálu přicházející na jedno a druhé ucho pro počáteční odrazy, a  $IACC_{\text{late}}$  s  $t_1 = 80$  ms a  $t_2 =$  čas větší než doba dozvuku uzavřeného prostoru, vyjadřující nepodobnost signálů pro odražený zvuk [5].

Spolu s mírou počáteční boční energie  $J_{LF}$  dává *IACC* vcelku přesné informace o prostorovém vnímání zvuku v měřeném prostoru. Ačkoliv nelze obecně definovat korelaci mezi těmito dvěma parametry, některá měření poukazují na silnou korelaci  $J_{LF}$  a *IACC* ve frekvenčních pásmech 125 – 1.000 Hz, přičemž vzájemná závislost v pásmech 2.000 a 4.000 Hz již prokazatelná není [8].

Současná měření binaurálních parametrů sice vcelku odpovídají výsledkům subjektivních testů, avšak disponují velkými rozdíly výsledků způsobenými pouze drobnými nuancemi. Například pouhé posunutí či natočení snímacího mikrofону o několik milimetrů či pootočení měřicí hlavy o několik centimetrů v průběhu měření dokáže výsledky zkreslit a snížit tak jejich vypovídací hodnotu [7]. Vzhledem k tomu, že tyto drobné změny jsou u skutečných posluchačů předpokládáné, nelze je považovat za chybu měření. V tomto ohledu je potřeba měřicí metody dále zdokonalovat, jelikož binaurální impulsové odezvy s vysokými hodnotami SNR jsou stěžejní pro řadu moderních aplikací (např. virtuální realita, auralizace) [2].

### 3.8 Další objektivní parametry

Kromě výše zmíněných existují ještě další objektivní akustické parametry k popisu prostoru. Ty se týkají např. jasnosti zvukového vjemu hudebníků na podiu, která je neméně důležitá pro kvalitní produkci. Vzhledem k tomu, že v rámci praktické části této práce nebyly tyto parametry počítány, nebudeme je zde dále rozvádět. Dostatečný přehled o nich poskytne např. norma [5] v kombinaci s články [7, 8].

### 3.9 Shrnutí

Všechny výše definované parametry shrnuje pro přehlednost následující tabulka:

Veličina	Subjektivní význam	Typické rozmezí pro koncertní prostory
Doba dozvuku $T$	Délka doznívání a zdánlivá velikost prostoru	0,5 až 3,0 sekundy
Síla zvuku $G$	Vnímaná hlasitost zvuku	větší než 0 dB
Počáteční doba dozvuku $EDT$	Délka doznívání a zdánlivá velikost prostoru	0,5 až 3,0 sekundy (důležitý je zejména poměr s dobou dozvuku)
Míra zřetelnosti $C_{50}$	Zřetelnost mluveného slova	-5 až 0 dB
Zřetelnost $D_{50}$	Zřetelnost mluveného slova	0,25 až 0,7 (pro potřeby hlasového přednesu)
Míra jasnosti $C_{80}$	Jasnost hudební produkce	-5 až +3 dB
Čas těžiště $T_s$	Jasnost hudební či mluvené produkce	60 až 150 milisekund
Basový poměr $BR$	Vjem spektrálního průběhu doznívání	1,0 až 1,5
Míra počáteční boční energie $J_{LF}$	Kvalita prostorového vjemu a zdánlivá šířka zdroje zvuku	0,0 až 0,5
Binaurální parametr $IACC$	Kvalita prostorového vjemu	0,1 až 0,4

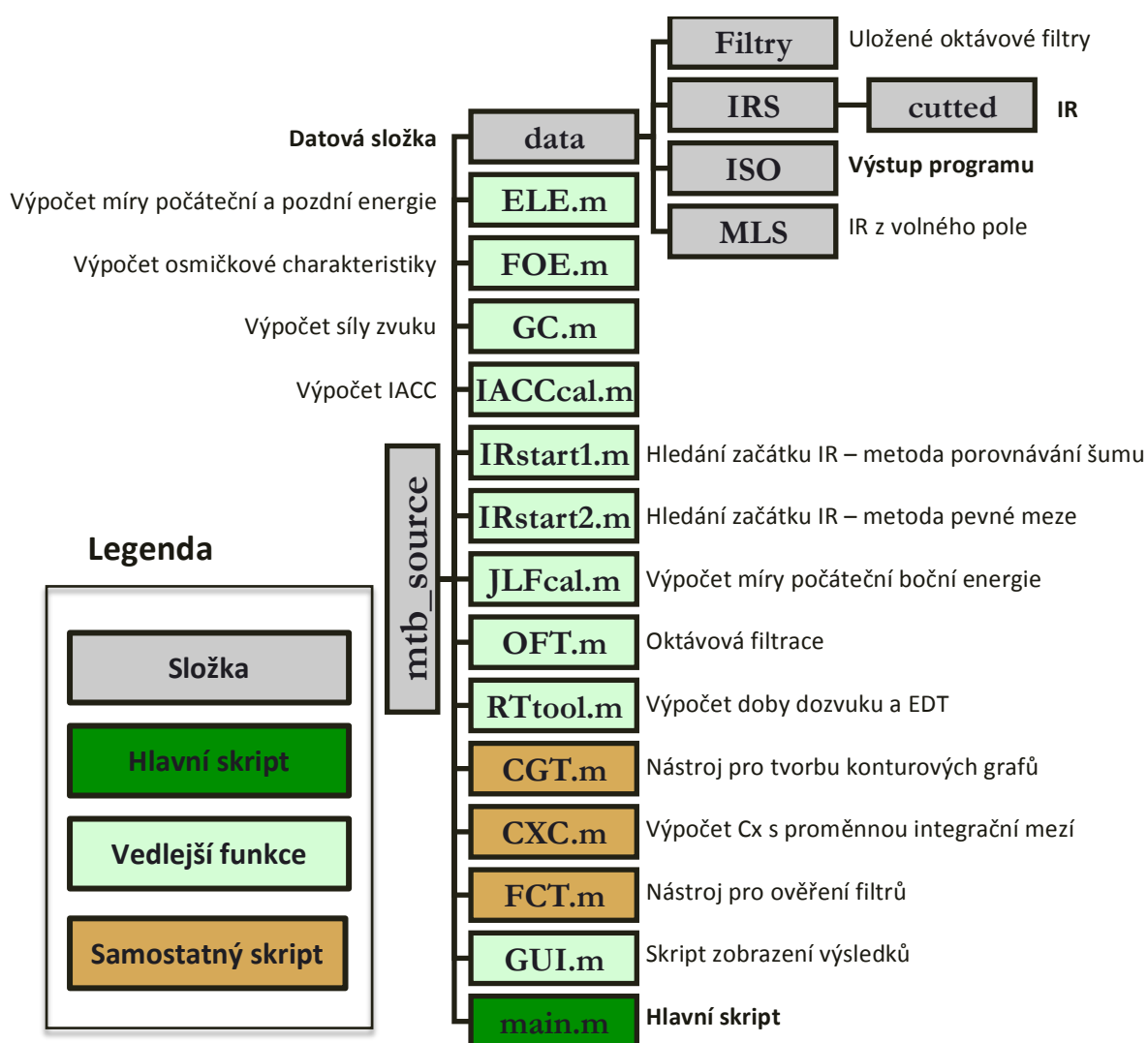
Tabulka 2: Objektivní akustické parametry

## 4. Implementace výpočtů v prostředí Matlab

V rámci praktické části této práce byl vytvořen nástroj k získání parametrů definovaných v předchozí kapitole z dat reálného měření impulsové odezvy víceúčelového sálu. K tomu bylo využito možností matematicko-simulačního prostředí Matlab společnosti Mathworks.

### 4.1 Struktura pracovního adresáře

Zdrojový adresář obsahuje datovou složku, která je pro přehlednost rozdělena do podsložek obsahující vstupy a výstupy jednotlivých dílčích výpočetních funkcí. Na stejné úrovni s datovou složkou jsou pak jednotlivé výpočetní funkce a hlavní skript *main.m*, který zajišťuje vzájemnou komunikaci mezi všemi částmi programu a vytváří uživatelské rozhraní pro editaci vstupů uživatelem. Kompletní strukturu adresáře znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 7: Struktura pracovního adresáře

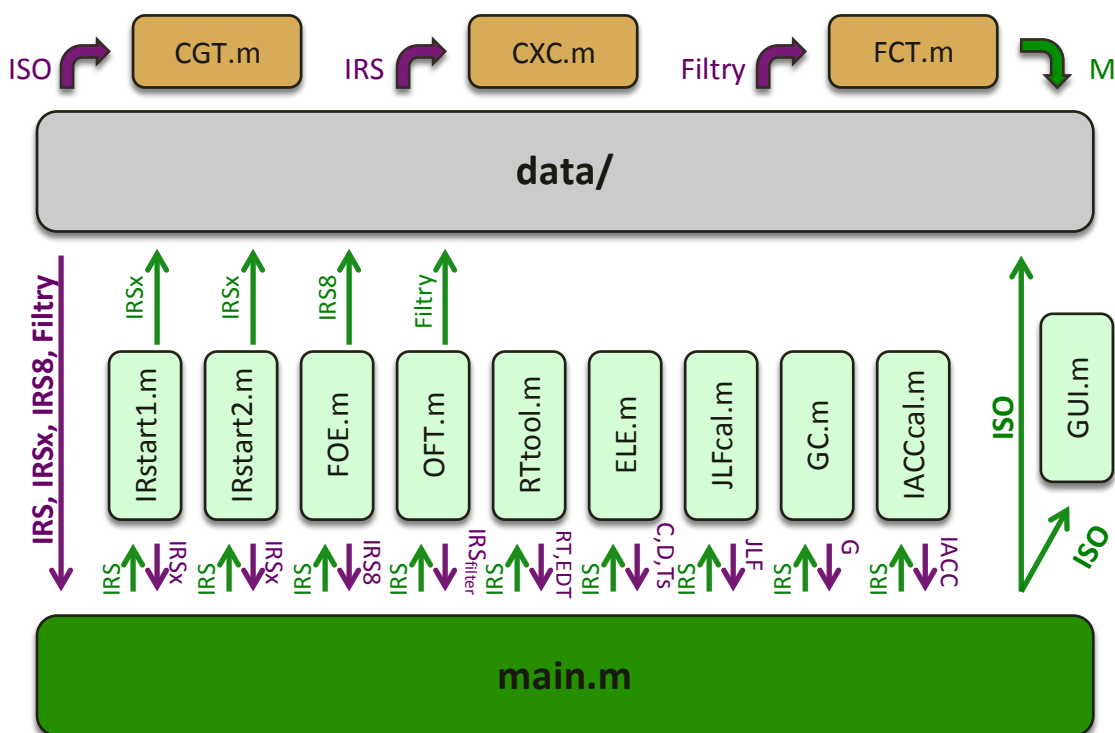
## 4.2 Běh programu

Vstupními daty pro celý program jsou impulsové odezvy měřeného prostoru a odezvy z volného pole v podobě jednoduchých číselných řad, ve kterých každý prvek vyjadřuje okamžitou hodnotu akustického tlaku. Impulsové odezvy z jednotlivých měřicích bodů jsou sjednoceny do jedné proměnné pro snadnější operace. Základní proces programu jako celku znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 8: Základní princip programu

Pro zajištění rychlejšího běhu programu jsou jednotlivé dílčí výpočetní úkony rozděleny do samostatných funkcí, jejichž výstupy se průběžně ukládají, jak ukazuje obrázek 9. Díky tomu není nutné ve většině případů procházet kompletním výpočetním procesem a lze určitá data pouze načíst z datové složky (např. již vytvořenou osmičkovou směrovou charakteristiku – v obr. „IRS8“ nebo příslušně oříznutou impulsovou odezvu – v obr. „IRSx“). Kompletní balíček spočtených parametrů (v obr. „ISO“) je na závěr opět uložen do datové složky pro další případné zpracování.



Obrázek 9: Struktura programu

## 4.3 Funkce programu

### Hlavní skript

Hlavní skript *main.m* zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými dílčími funkcemi výpočtů a datovou složkou. Jeho vstupem jsou právě proměnné impulsových odezev, které jsou upravovány pro potřeby dalších operací. Konkrétní úpravy signálů, jako je hledání začátků impulsových odezev nebo volba použitých filtrů, budou prodiskutovány v rámci následující podkapitoly.

### Uživatelský vstup

Uživatel má v rámci hlavního skriptu *main.m* možnost ovlivnit vstupy a výstupy programu hned na jeho začátku. Definuje, jakou metodou má být nalezen počátek impulsové odezvy, jaké filtry mají být použity, a které konkrétní parametry mají být spočteny. Program poté po celou dobu svého běhu tyto informace respektuje, čímž je zajištěno, že operační výkon nebude čerpán na výpočty, které ve výsledku nebudou použity k analýze či dalšímu zpracování.

### Vytvoření osmičkové snímací charakteristiky

Výpočet některých objektivních parametrů vyžaduje, abychom disponovali impulsovými odezvami zaznamenanými jednak mikrofonom s osmičkovou snímací charakteristikou a jednak odezvami z mikrofonu všesměrového. V rámci skutečného měření se často místo dvou různých mikrofونů s různou snímací charakteristikou využívá intenzitní sondy, z jejichž dvou mikrofونů namířenými proti sobě lze snadným výpočtem obě směrové charakteristiky získat.

Všesměrová charakteristika je získána jednoduchým aritmetickým průměrem okamžitých výstupů obou mikrofونů. Osmičková vyřazovací charakteristika pak vyžaduje aplikaci následujícího vzorce, který byl použit v rámci programu ve funkci *FOE.m* (*Figure-Of-Eight tool*):

$$p_8(t) \approx \frac{c}{d} \cdot \int_0^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau, \quad (21)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku,  $d$  je vzdálenost použitých mikrofونů,  $p_8$  je impulsová odezva měniče prvního řádu (s osmičkovou směrovou charakteristikou) a  $p_1, p_2$  jsou impulsové odezvy snímané prvním resp. druhým mikrofonom [11].

### Výpočet jednotlivých objektivních parametrů

Jednotlivé parametry jsou počítány dílčími funkcemi (viz obr. 7 a 9), jejichž základní struktura je obdobná. Na vstupu jsou načteny již oříznuté a filtrované impulsové odezvy, na kterých je realizován výpočet podle definic konkrétních parametrů daných normou [5]. Výsledky jsou poté ve formě proměnných vráceny do hlavního pracovního

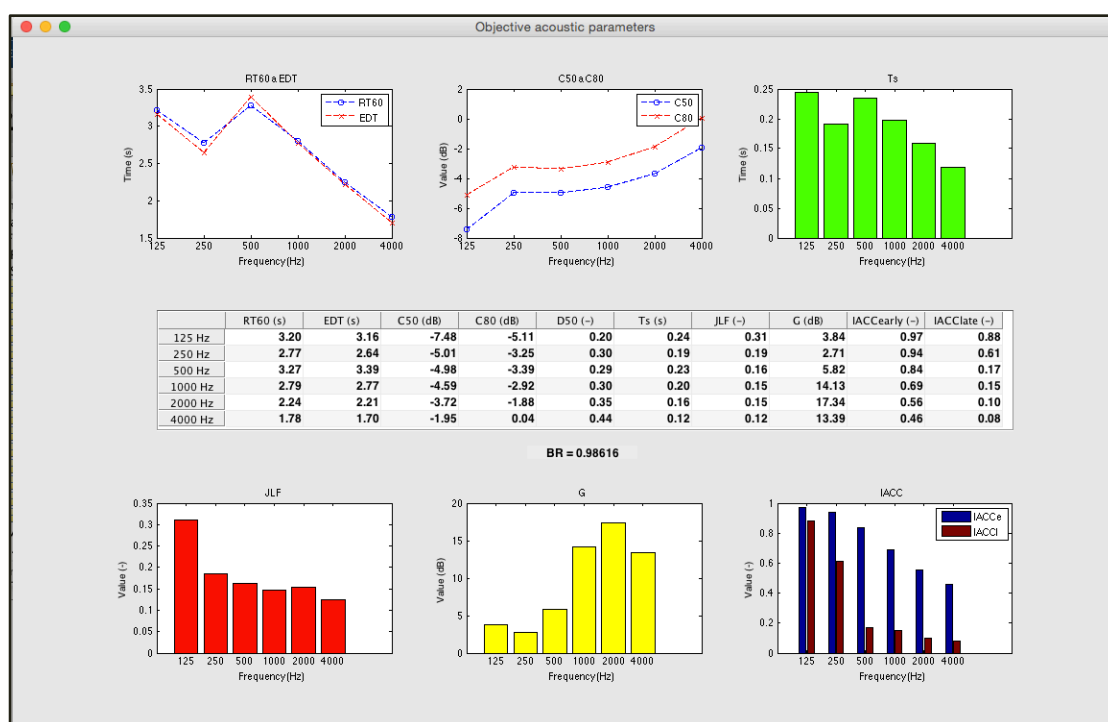


prostoru k dalšímu zpracování. Detailní popis výpočetních postupů nabízí komentáře v rámci samotného programu.

### Zobrazení výsledků

Spočtené hodnoty jsou na závěr uloženy jako kompletní balíček proměnných „ISO“ do datové složky pro následnou analýzu.

Finální grafické a tabelární zobrazení všech spočtených parametrů (průměrovaných pro všechny měřicí body) zajišťuje skript *GUI.m*. Příklad takového výstupu je na následujícím obrázku:



Obrázek 10: Výstup programu

## 4.4 Zhodnocení výsledků a možností výpočetního řetězce

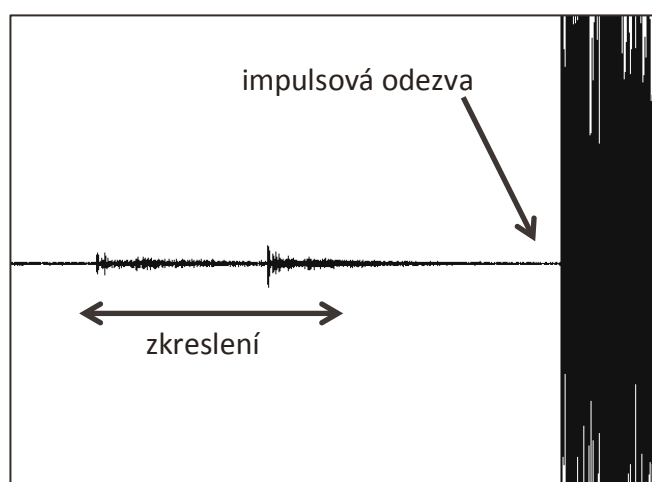
K ověření funkce výpočetního řetězce bylo použito dat získaných v rámci měření impulsové odezvy víceúčelové haly Elim v Písku, realizované jako součást práce [4] v roce 2009. V rámci této podkapitoly jsou nejprve okomentovány možnosti použitelnosti výpočetního řetězce z hlediska univerzálnosti. Důraz je kladen zejména na metody hledání počátku impulsové odezvy a použitelnost oktávních filtrů. Následuje stručné představení měřeného prostoru a detailní analýza frekvenčních a prostorových závislostí daných parametrů, ze kterých jsou vyvozena doporučení, u kterých konkrétních parametrů by těmito závislostem měla být věnována pozornost.

#### 4.4.1 Metody hledání počátku impulsové odezvy

Hledání začátků signálů impulsových odezev je obecně velmi problematické. Dokonce ani norma [5] neudává jednoznačný postup, jak začátek signálu nalézt.

Jako počátek odezvy je potřeba zvolit takový bod, ve kterém energie signálu zřetelně přesahuje energii šumu nasnímaného pozadí. Současně je ovšem potřeba eliminovat vliv artefaktů vyšších harmonických frekvencí vzniklých nelinearitami v měřicím řetězci. Ty se v případě logaritmického TSP projevují jako solitérní vertikální čáry na časové ose těsně před začátkem samotné impulsové odezvy a je potřeba je odfiltrovat [4]. Jako počátek signálu ovšem nesmí být zvolen ani bod jeho maxima, který většinou začátkem odezvy nebývá. To by způsobilo zkreslení výpočtů zejména těch parametrů, které korelují s jasností a prostorovým vjemem zvuku.

Příklad zkreslení před samotnou impulsovou odezvou ukazuje následující obrázek:



Obrázek 11: Zkreslení impulsové odezvy

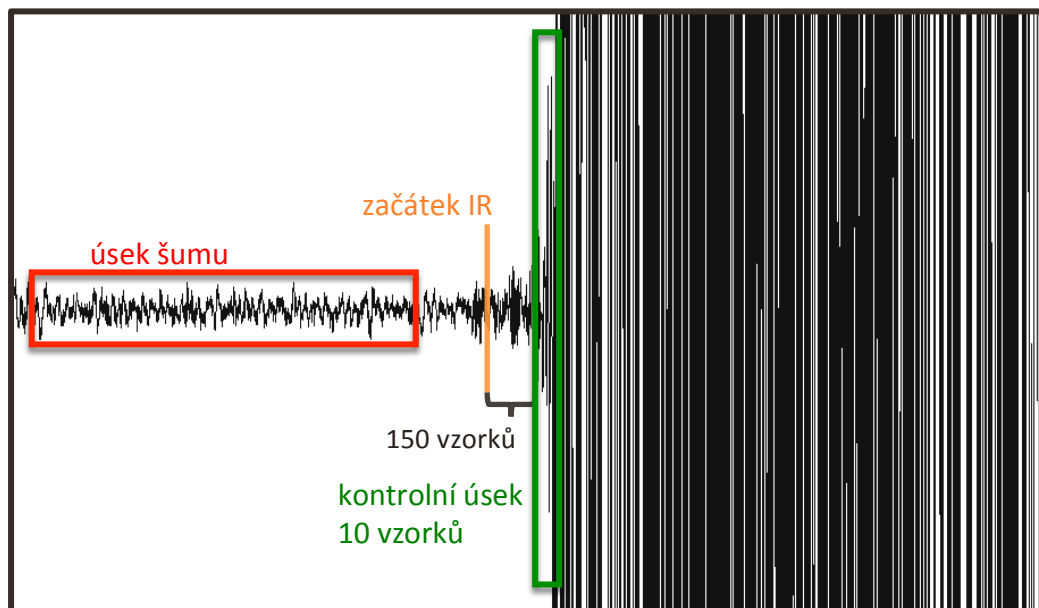
Z výše uvedených důvodů byla této problematice věnována zvláštní pozornost a v rámci programu lze využít až pět různých postupů hledání začátku impulsové odezvy, které budou představeny v následujících odstavcích.

##### 1) Porovnání okamžitého akustického tlaku daného úseku IR s akustickým tlakem šumu

V rámci této metody je do výpočtu zahrnut úsek 10 vzorků okamžitého akustického tlaku impulsové odezvy, jejichž absolutní hodnoty jsou zprůměrovány. Výsledný průměr je poté porovnán s průměrnou absolutní hodnotou akustického tlaku v oblasti šumu (tedy před začátkem samotné impulsové odezvy). V případě, že je průměr zkoumaného úseku  $X$ -krát větší, než je průměrná hodnota v oblasti šumu, je za začátek impulsové odezvy považován bod ve vzdálenosti  $Y$  vzorků před počátkem zkoumaného 10-vzorkového úseku. V případě, že průměr úseku nedosahuje požadované hodnoty, je testovací úsek posunut o 5 vzorků vpřed a proces se opakuje.

Hodnotu  $X$ -násobku i „rezervy“  $Y$  je nutno optimalizovat pro konkrétní zkoumaný paket impulsových odezev experimentální cestou tak, aby byl počátek zvolen podle pravidel, která byla zmíněna výše. V případě paketu testovaného v rámci

této práce bylo stanoveno  $X = 65$  a  $Y = 150$ . Pro lepší představu princip metody znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 12: Princip hledání začátku signálu

## 2) Porovnání okamžitého akustického tlaku daného úseku IR, filtrované oktávovým filtrem 2 kHz, s akustickým tlakem šumu

Tato metoda funguje obdobně jako metoda první s tím rozdílem, že analýze je podroben průběh impulsové odezvy filtrovaný oktávovým filtrem se střední frekvencí 2 kHz. Důvodem je skutečnost, že harmonické zkreslení se projevuje na vyšších frekvencích a může zde být tedy snadněji odhaleno. Ve chvíli nalezení počátku filtrovaného průběhu signálu je zapamatována jeho poloha, která je poté aplikována v ořezu původní nefiltrované impulsové odezvy.

## 3) Porovnání okamžitého akustického tlaku daného úseku IR, filtrované oktávovým filtrem 4 kHz, s akustickým tlakem šumu

Třetí metoda je obdobou té předchozí. V tomto případě je analýze podroben průběh filtrovaný oktávovým filtrem 4 kHz.

## 4) Nastavení pevné meze

Metoda č. 4 funguje na principu porovnávání průměru absolutních hodnot okamžitého akustického tlaku 10-vzorkového úseku s pevně stanovenou mezí. V případě, že je tato mez překročena, je vzorek na začátku úseku stanoven jako počátek impulsové odezvy. Samotná hodnota pevné meze musí být stejně jako koeficient  $X$  v předchozích metodách určena experimentálně vzhledem ke konkrétnímu zkoumanému paketu signálů. V případě paketu testovaného v rámci této práce byla její hodnota stanovena na 0,004 Pa.

## 5) Ruční oříznutí

Nejpřesnější a současně nejnáročnější je metoda ručního oříznutí průběhů impulsových odezev. Ta vyžaduje vizuální kontrolu každého signálu a manuální stanovení jeho počátku. V případě velkých paketů to tedy vzhledem k časové náročnosti může být téměř nerealizovatelné, a proto je snaha metodu hledání začátku nějakým způsobem algoritmovat. Další nevýhodou ručního ořezu je jeho částečná subjektivita, kdy dva různí pozorovatelé s největší pravděpodobností zvolí jiný počáteční bod. Na druhou stranu lze tuto metodu jako jedinou považovat za referenční při porovnávání efektivity vyhledávacích algoritmů.

### Porovnání jednotlivých metod

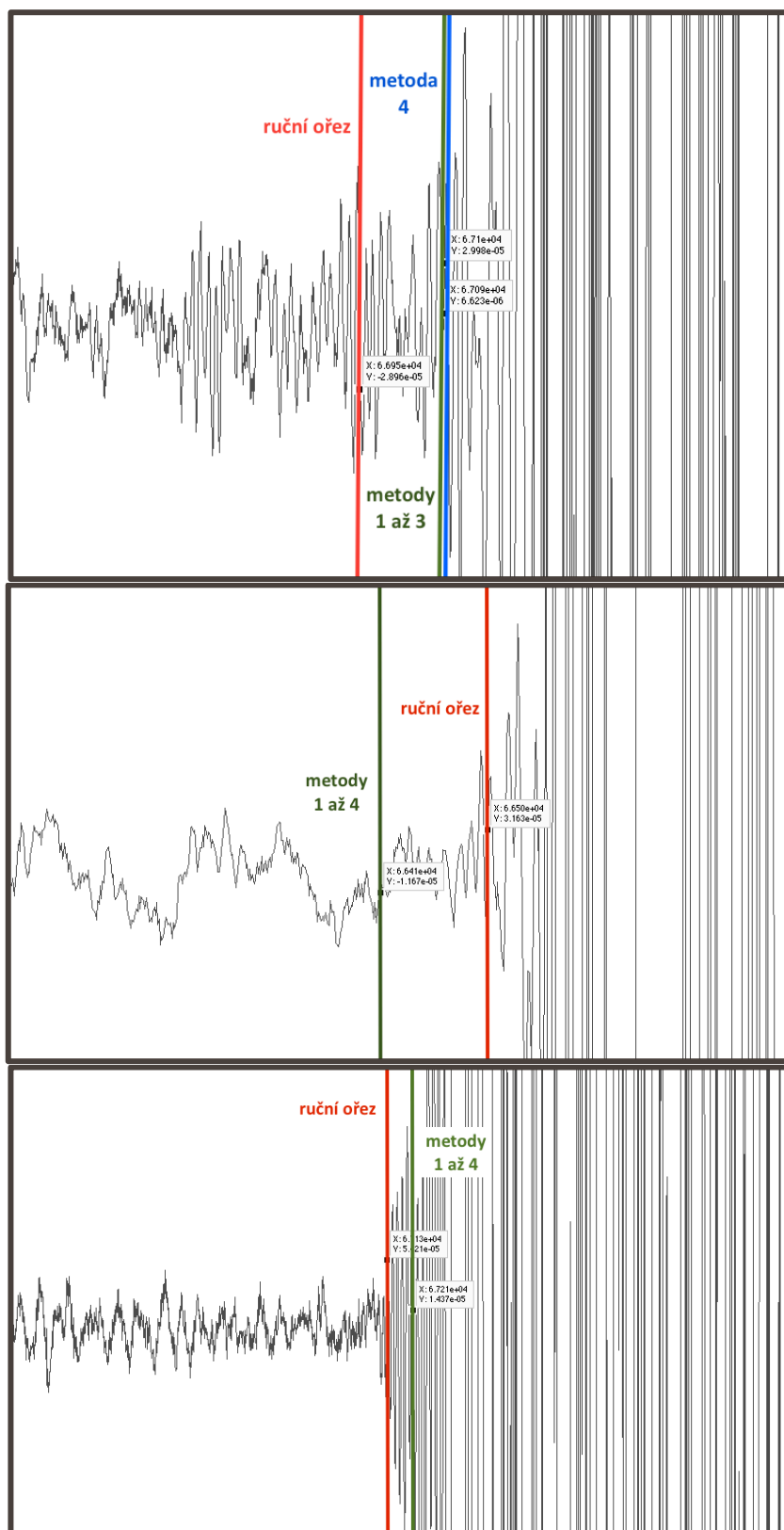
Testování metod proběhlo na celém paketu celkem 144 impulsových odezev. Jednotlivé metody byly optimalizovány tak, aby v každém průběhu bylo oříznuto harmonické a jiné zkreslení před začátkem samotné impulsové odezvy, a současně aby oříznutím nebylo odstraněno příliš mnoho vzorků skutečného začátku signálu. Průměrnou odchylku jednotlivých metod znázorňuje následující tabulka (jako referenční je uvažována metoda ručního oříznutí):

	Levý ušní kanál		Pravý ušní kanál		Intenzitní sonda	
	ms	vzorky	ms	vzorky	ms	vzorky
Ruční ořez	0	0	0	0	0	0
Metoda 1	2,94	96	2,73	89	2,15	70
Metoda 2	2,98	98	2,76	90	2,15	70
Metoda 3	2,92	95	2,71	89	2,14	70
Metoda 4	2,95	97	2,73	89	2,17	71
<b>Průměr</b>	<b>2,948</b>	<b>97</b>	<b>2,733</b>	<b>89</b>	<b>2,153</b>	<b>70</b>

Tabulka 3: Odchylky hledání začátku signálu

Je zřejmé, že odchylky jednotlivých metod mezi sebou nejsou nijak významné. Může se tedy zdát, že z hlediska dalšího zpracování signálů je jedno, jaká konkrétní metoda bude použita. Nutno ovšem uvažovat, že výše uvedené metody byly optimalizovány pro konkrétní balíček zkoumaných dat a v případě použití dat jiných se od sebe mohou lišit. Porovnání začátků impulsové odezvy podle jednotlivých metod na konkrétních průbězích impulsových odezev znázorňuje obrázek 13.

Zásadnější rozdíl mezi jednotlivými metodami je však ve výkonové a časové náročnosti jejich výpočtu. Metoda 4 (nastavení pevné meze) je téměř 20x rychlejší než metody 1 až 3 (porovnávání energie signálu se šumem). Ruční ořez vyžaduje vizuální kontrolu každého signálu a stanovení jeho počátku, proto je pro větší soubory dat prakticky nepoužitelný.



Obrázek 13: Příklady použití metod hledání začátku impulsové odezvy

### Závislost výsledných akustických parametrů na použité metodě hledání začátku impulsové odezvy

K tomu, abychom mohli stanovit závěr, zda jsou vyvinuté metody hledání začátku impulsové odezvy korektní a použitelné, je potřeba zaměřit se na závislost výsledných vypočtených objektivních parametrů právě na použité metodě. K tomu účelu byly prozkoumány odchylky prostorově průměrovaných parametrů  $C_{50}$ ,  $EDT$ ,  $IACC$ ,  $J_{LF}$  a  $BR$  v závislosti na použité metodě. Záměrně byly zvoleny právě tyto parametry z důvodu jejich rozdílného způsobu výpočtu a předpokladu rozdílné náchylnosti k nalezenému počátku signálu. Výsledné odchylky znázorňují tabulky 4 až 7. Jako referenční je opět zvolena metoda ručního oříznutí.

$C_{50}$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ruční ořez	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Metoda 1	3,6%	2,1%	2,6%	4,2%	3,6%	9,1%
Metoda 2	3,6%	2,1%	2,6%	4,2%	3,6%	9,1%
Metoda 3	3,7%	2,1%	2,6%	4,2%	3,7%	9,1%
Metoda 4	3,6%	2,1%	2,6%	4,1%	3,6%	8,6%
<b>Průměrná odchylka</b>	<b>3,6%</b>	<b>2,1%</b>	<b>2,6%</b>	<b>4,2%</b>	<b>3,6%</b>	<b>9,0%</b>

Tabulka 4: Odchylky parametru  $C_{50}$  v závislosti na metodě hledání počátku impulsové odezvy

Je zřejmé, že míra zřetelnosti  $C_{50}$  vykazuje největší odchylky ve vyšších frekvenčních pásmech. Toto zjištění může být podloženo skutečností, že srozumitelnost lidského hlasu je dána právě těmito vyššími pásmy [6], a že zřetelnost roste s rostoucí počáteční energií signálu v prvních 50 ms. Jakákoliv odchylka ve zvolení počátku signálu impulsové odezvy tedy logicky způsobí odchylku samotného parametru. Pro míru zřetelnosti  $C_{50}$  (a samozřejmě i pro zřetelnost  $D_{50}$ ) je tedy volba počátku impulsové odezvy kritická.

$EDT$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ruční ořez	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Metoda 1	0,3%	0,3%	0,0%	0,2%	0,3%	0,7%
Metoda 2	0,3%	0,3%	0,0%	0,2%	0,3%	0,7%
Metoda 3	0,3%	0,3%	0,0%	0,2%	0,3%	0,7%
Metoda 4	0,3%	0,3%	0,0%	0,2%	0,3%	0,7%
<b>Průměrná odchylka</b>	<b>0,3%</b>	<b>0,3%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,2%</b>	<b>0,3%</b>	<b>0,7%</b>

Tabulka 5: Odchylky parametru  $EDT$  v závislosti na metodě hledání počátku impulsové odezvy

Na první pohled je z tabulky 5 zřejmé, že parametr  $EDT$  není na přesný počátek impulsové odezvy náchylný. Důvod je vcelku jasný –  $EDT$  je počítána pomocí prokladu poklesové křivky přímkou, kdy se za počáteční bod volí maximum obálky signálu. Stejný závěr můžeme bezpečně konstatovat i pro dobu dozvuku, která je počítána obdobným způsobem.

$IACC_{early}$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ruční ořez	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Metoda 1	28,2%	20,1%	20,5%	26,0%	27,3%	28,9%
Metoda 2	28,2%	20,1%	20,5%	25,9%	27,3%	28,9%
Metoda 3	28,2%	20,1%	20,5%	26,0%	27,3%	28,9%
Metoda 4	28,2%	20,1%	20,5%	26,0%	27,3%	28,9%
<b>Průměrná odchylna</b>	<b>28,2%</b>	<b>20,1%</b>	<b>20,5%</b>	<b>26,0%</b>	<b>27,3%</b>	<b>28,9%</b>

Tabulka 6: Odchylny parametru  $IACC_{early}$  v závislosti na metodě hledání počátku impulsové odezvy

Vysoké hodnoty odchylek v tabulce 6 jsou zapříčiněny skutečností, že parametr  $IACC_{early}$  počítá pouze s hodnotami prvních 80 ms impulsové odezvy. Jakákoliv drobná odchylna volby jejího počátku má tak za následek zásadnější změnu výsledné hodnoty. Jako závěr může být stanoveno doporučení použití pouze metody ručního ořezu v případě, že bude z impulsové odezvy parametr  $IACC_{early}$  počítán. Parametr  $IACC_{late}$  zohledňuje hodnoty pouze po prvních 80 ms signálu, proto se dá předpokládat, že jeho závislost na volbě počátku bude podstatně slabší.

$J_{LF}$	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Ruční ořez	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Metoda 1	0,2%	2,6%	8,8%	8,2%	9,8%	11,8%
Metoda 2	0,2%	2,6%	8,8%	8,2%	9,8%	11,8%
Metoda 3	0,2%	2,6%	8,8%	8,3%	9,9%	11,9%
Metoda 4	0,2%	2,6%	8,9%	8,3%	9,7%	11,6%
<b>Průměrná odchylna</b>	<b>0,2%</b>	<b>2,6%</b>	<b>8,8%</b>	<b>8,3%</b>	<b>9,8%</b>	<b>11,8%</b>

Tabulka 7: Odchylny parametru  $J_{LF}$  v závislosti na metodě hledání počátku impulsové odezvy

Vyšší hodnoty odchylek parametru  $J_{LF}$  lze opět odůvodnit jeho samotnou matematickou definicí, kdy je zohledňováno pouze prvních 80 ms signálu (navíc ve jmenovateli s dolní mezí 5 ms, což odpovídá pouze dvojnásobku průměrné odchylky počátku – viz tabulka 3). Zajímavou skutečností může být rostoucí hodnota odchylky se zvyšující se frekvencí. Nelze to ovšem považovat za obecný závěr na základě jediného provedeného měření. V případě, že bude parametr  $J_{LF}$  počítán, je tedy opět vhodné doporučit použití ručního ořezu signálu.

Vzhledem k tomu, že basový poměr  $BR$  je počítán přímo z doby dozvuku, u které byla závislost na počátku impulsové odezvy již vyvrácena v rámci zkoumání  $EDT$ , ani basový poměr nebude na počátek signálu náchylný.

#### 4.4.2 Použitelnost oktávových filtrů

Při analýze akustických signálů se bez oktávových a zlomko-oktávových filtrů prakticky nelze obejít. Frekvenční závislost většiny akustických parametrů vyžaduje filtraci zkoumaných signálů do jednotlivých pásem ještě před jejich výpočtem. Tyto filtry stejně tak jako i ostatní prvky měřicího a výpočetního řetězce musí splňovat určité předpoklady k tomu, aby mohly být k analýze použity. Konkrétně požadavkům na oktávové a zlomko-oktávové filtry se věnuje technická norma ČSN EN 61260-1. [12], která definuje maximální a minimální meze útlumu pro filtry třídy I. a II. podle následující tabulky:

Normovaný kmitočet $\Omega = f/f_m$		Minimální a maximální přejímací meze poměrného útlumu dB	
		Třída 1	Třída 2
$\Omega$	$\leq Z^{-4}$	+70; $+\infty$	+60; $+\infty$
$\Omega$	$Z^{-3}$	+60; $+\infty$	+54; $+\infty$
$\Omega$	$Z^{-2}$	+40,5; $+\infty$	+39,5; $+\infty$
$\Omega$	$Z^{-1}$	+16,6; $+\infty$	+15,6; $+\infty$
$\Omega_{1-\varepsilon}^*$	$Z^{-1/2} - \varepsilon$	+1,2; $+\infty$	+0,8; $+\infty$
$\Omega_{1+\varepsilon}^*$	$Z^{-1/2} + \varepsilon$	-0,4; +5,3	-0,6; +5,8
$\Omega$	$Z^{-3/8}$	-0,4; +1,4	-0,6; +1,7
$\Omega$	$Z^{-1/4}$	-0,4; +0,7	-0,6; +0,9
$\Omega$	$Z^{-1/8}$	-0,4; +0,5	-0,6; +0,7
$\Omega, \Omega_n$	$Z^0 = 1$	-0,4; +0,4	-0,6; +0,6
$\Omega_n$	$Z^{+1/8}$	-0,4; +0,5	-0,6; +0,7
$\Omega_n$	$Z^{+1/4}$	-0,4; +0,7	-0,6; +0,9
$\Omega_n$	$Z^{+3/8}$	-0,4; +1,4	-0,6; +1,7
$\Omega_{2-\varepsilon}^*$	$Z^{+1/2} - \varepsilon$	-0,4; +5,3	-0,6; +5,8
$\Omega_{2+\varepsilon}^*$	$Z^{+1/2} + \varepsilon$	+1,2; $+\infty$	+0,8; $+\infty$
$\Omega_n$	$Z^{+1}$	+16,6; $+\infty$	+15,6; $+\infty$
$\Omega_n$	$Z^{+2}$	+40,5; $+\infty$	+39,5; $+\infty$
$\Omega_n$	$Z^{+3}$	+60; $+\infty$	+54; $+\infty$
$\Omega_n$	$\geq Z^{-4}$	+70; $+\infty$	+60; $+\infty$

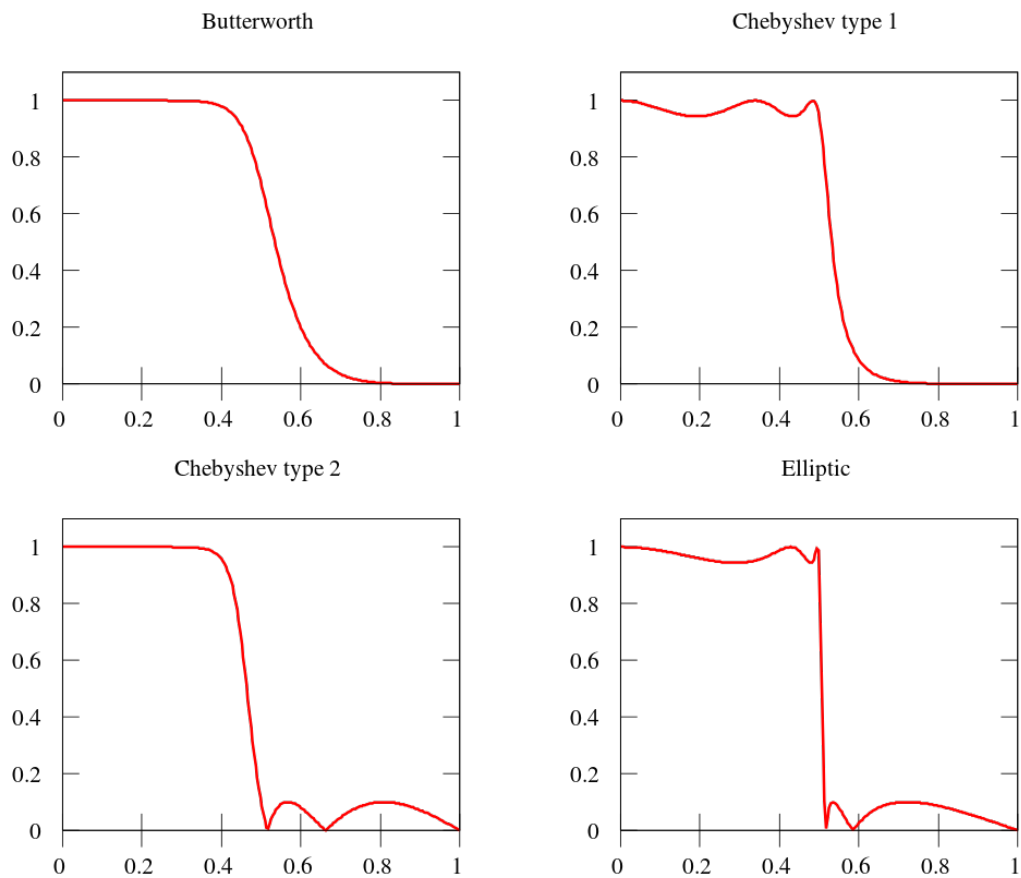
Tabulka 8: Přejímací meze poměrného útlumu oktávových filtrů (upraveno z [12])

kde  $Z$  je oktávový poměr frekvencí.

V rámci implementace výpočtů v prostředí Matlab byly k filtraci použity built-in oktávové filtry Butterworthova typu. Ty jsou navrženy tak, aby jejich frekvenční odezva byla co nejvíce plochá. Ani jejich vyšší řády tedy neobsahují žádné periodické zvlnění útlumu v okolí zlomové frekvence, jako některé ostatní typy filtrů [13].

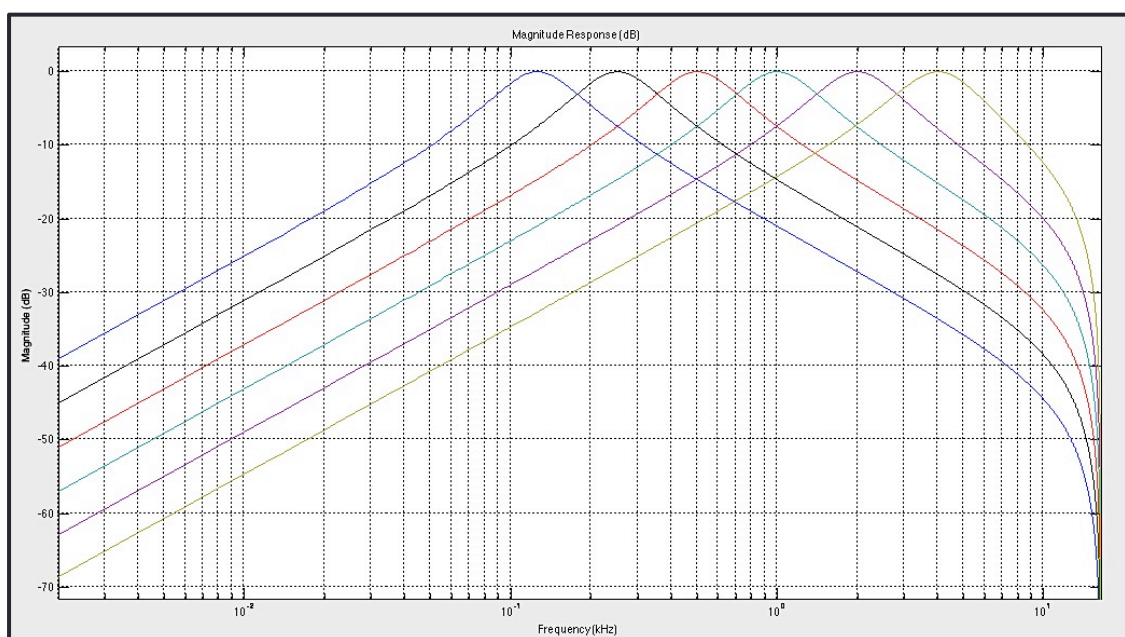


Přehledněji znázorňuje rozdíly mezi frekvenčními odezvami jednotlivých filtrů následující obrázek:



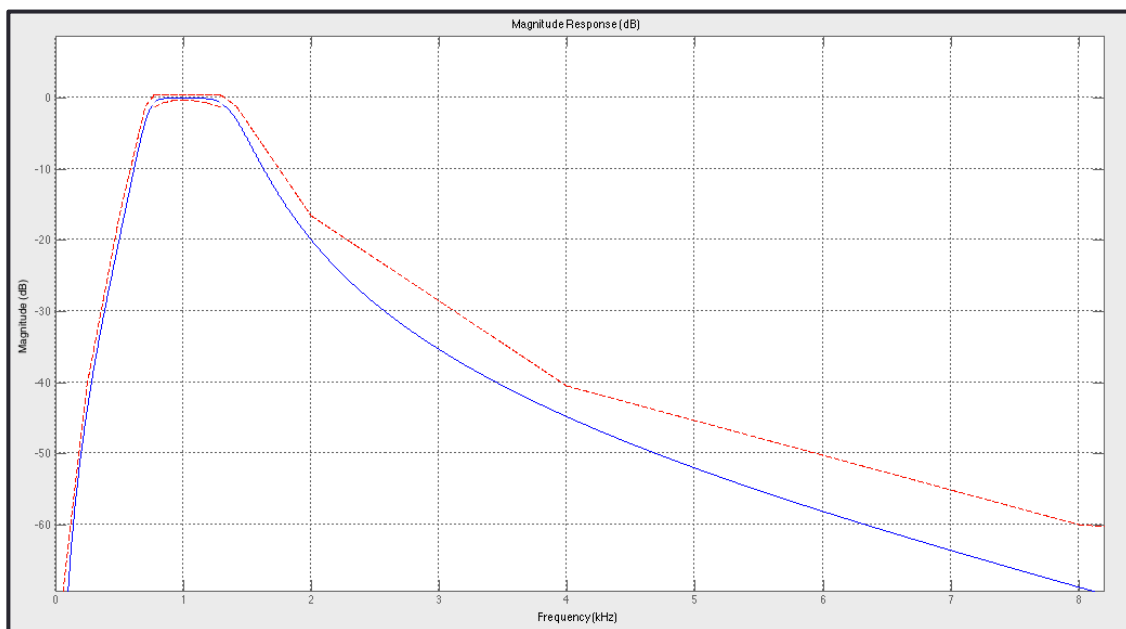
Obrázek 14: Frekvenční odezvy jednotlivých typů filtrů (převzato z [13])

Frekvenční závislost útlumu celého balíčku vytvořených oktávových filtrů II. řádu 125 – 4000 Hz zobrazenou nástrojem Matlab FV Tool pak znázorňuje obrázek 15.



Obrázek 15: Útlum oktávových filtrů II. řádu - Matlab Filter Visualisation Tool

Tyto vytvořené filtry byly podrobeny kontrole, zda vyhovují limitům stanoveným normou [12]. K tomu účelu byl vytvořen samostatný skript *FCT.m* (*Filter Check Tool*), který uživatele kontrolou provede. Příklad grafického ověření dostatečného útlumu oktávového filtru 1 kHz řádu VI. znázorňuje obrázek 16, výsledky ověření pak tabulka pod ním.



Obrázek 16: Frekvenční odezva filtru VI. řádu a limit ČSN

Řád filtru	Vyhovuje limitům ČSN EN 61260
II.	NE
IV.	NE
VI.	ANO
VIII.	ANO

Tabulka 9: Filtry vyhovující limitům ČSN

Z tohoto pohledu je tedy použitelný jak filtr VI. řádu, tak filtr řádu VIII. Kromě limitů útlumu podle ČSN však existují ještě další kritéria, která by při ověření použitelnosti filtrů měla být zohledněna. Jedním z nich je délka impulsové odezvy samotného filtru. Ta by neměla přesáhnout délku zkoumaného úseku signálu, aby nedošlo k jeho zkreslení impulsovou odezvou filtru.

Vzhledem k tomu, že řada objektivních akustických parametrů je založena na poměru krátkých úseků impulsových odezev, bylo nutné délku impulsových odezev jednotlivých filtrů ověřit. K tomu je nejprve potřeba definovat samotný konec IR filtru, která je z teoretického hlediska nekonečná. Jako konec IR filtru byl v rámci skriptu *FCT.m* stanoven bod, ve kterém je energie impulsové odezvy filtru menší než  $10^{-2}$  původní hodnoty za předpokladu, že signál s tak nízkou energií již žádné zásadní zkreslení filtrovaného průběhu nezpůsobí.

Výsledné délky impulsových odezev filtrů jednotlivých řádů a středních frekvencí shrnuje tabulka 10:

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>II. řád</b>	22,0 ms	11,0 ms	5,6 ms	2,8 ms	1,4 ms	0,7 ms
<b>IV. řád</b>	35,9 ms	18,0 ms	9,1 ms	5,2 ms	2,6 ms	1,3 ms
<b>VI. řád</b>	57,1 ms	28,7 ms	14,4 ms	7,2 ms	3,7 ms	1,8 ms
<b>VIII. řád</b>	73,1 ms	36,7 ms	18,4 ms	9,9 ms	5,0 ms	2,5 ms

Tabulka 10: Délka IR oktávových filtrů

V případě, že budeme jako limitní považovat hodnotu 50 ms, která odpovídá délce úseku počáteční energie zkoumané v rámci míry zřetelnosti  $C_{50}$  a je současně nejkratším zkoumaným úsekem výpočtu všech výše uvedených parametrů, lze z tabulky 10 snadno určit, které řády oktávových filtrů z hlediska délky jejich impulsové odezvy vyhovují a které ne:

Řád filtru	Vyhovuje limitní délce IR
II.	ANO
IV.	ANO
VI.	NE
VIII.	NE

Tabulka 11: Filtry vyhovující kritériu délky IR

Při zkombinování obou výše zkoumaných kritérií by jako závěr vyplynulo, že ani jeden z filtrů řádů II., IV., VI. a VIII. nelze pro potřeby analýzy použít. Nicméně filtr VI. řádu přesahuje zvolený limit 50 ms pouze na jedné frekvenci 125 Hz a to pouze o 7,1 ms. Pokud vezmeme v potaz skutečnost, že průměrná energie tohoto krátkého úseku impulsové odezvy filtru je již cca 60x menší, než energie počáteční, lze s určitou tolerancí prohlásit, že built-in oktávový filtr VI. řádu typu Butterworth oběma kritériím vyhověl a může být tedy použit k oktávové analýze jednotlivých parametrů.

Řád filtru	Vyhovuje limitům ČSN EN 61260	Vyhovuje limitní délce IR	Vyhovuje celkově
II.	NE	ANO	NE
IV.	NE	ANO	NE
VI.	ANO	ANO*	ANO
VIII.	ANO	NE	NE
* - viz výše			

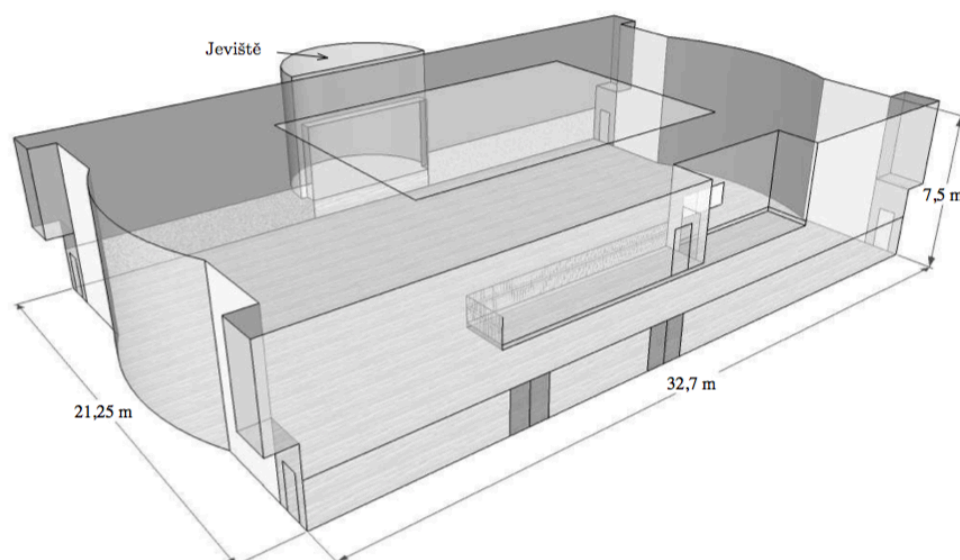
Tabulka 12: Filtry vyhovující oběma kritériím

#### 4.4.3 Analýza objektivních akustických parametrů konkrétního víceúčelového sálu

K dokončení ověření celého vytvořeného výpočetního nástroje byla na jeho vstup nahrána data reálného měření impulsové odezvy víceúčelového sálu, které proběhlo v roce 2009 v rámci práce [4]. Výsledné objektivní akustické parametry byly podrobeny prostorové a frekvenční analýze a budou okomentovány v rámci následujících odstavců. Nutno zmínit, že pro účely analýzy byly zohledněny závěry prezentované v předchozích podkapitolách, a výpočet probíhal pro impulsové odezvy s ručně nalezeným počátkem a s oktávovými filtry VI. řádu. Pro lepší představu bude nyní stručně nastíněna podoba měřeného prostoru.

##### Měřený prostor

Prostor haly Elim v Písku byl v době měření využíván ve dvou hlavních režimech: jako sportovní hala a jako sál pro přednes řeči a hudby [4]. Trojrozměrný model měřeného prostoru znázorňuje následující obrázek:

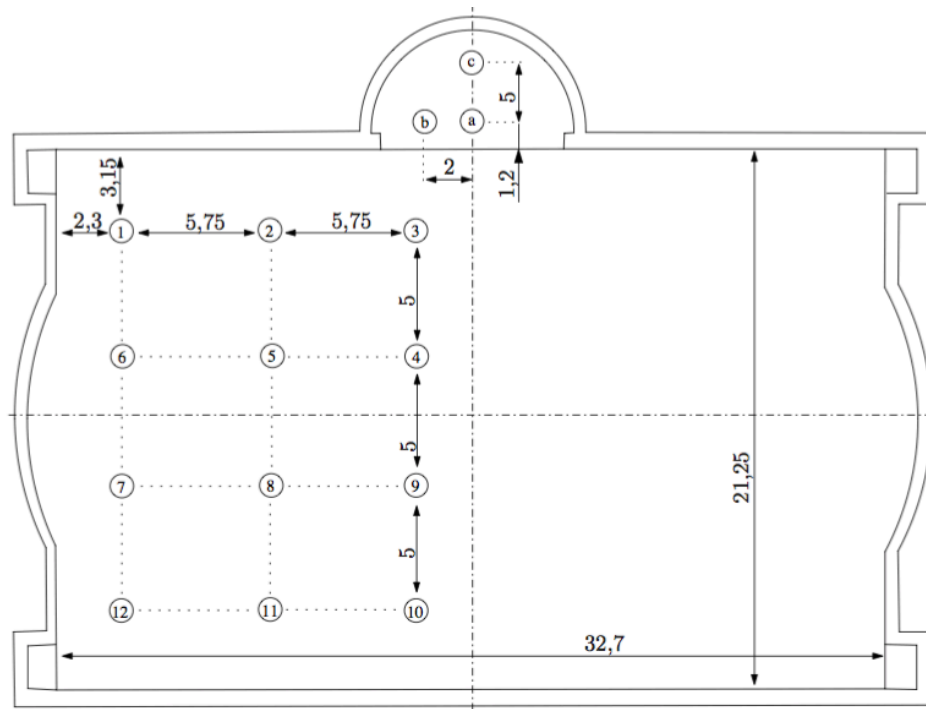


Obrázek 17: Model sálu Elim v Písku (převzato z [4])

Celkový objem prostoru činí  $5.400 \text{ m}^3$ . Stěny jsou postaveny z dutých cihel a pokryty standardní hladkou omítkou. Strop je z hladkého sádkkartonu a ve střední části je umístěn improvizovaný akustický obklad o ploše cca  $100 \text{ m}^2$ . Dlouhé stěny jsou do výšky 2 metrů pokryty kobercem a během měření podlaha kobercem pokryta nebyla.

Vzhledem k osově symetrii celého prostoru bylo v rámci měření jeho impulsové odezvy zvoleno celkem 12 měřících bodů a 3 polohy zdroje (a, b, c) v jedné polovině sálu s předpokladem, že hodnoty v jeho druhé polovině budou zrcadlově symetrické.

Půdorys sálu s rozložením měřicí techniky znázorňuje obrázek 18:



Obrázek 18: Rozložení měřících bodů (převzato z [4])

### Parametry prostoru jako celku

Veškeré parametry byly počítány pro 6 oktávových frekvenčních pásem od 125 do 4000 Hz. Následující tabulka ukazuje výsledné hodnoty jednotlivých objektivních parametrů prostorově průměrovaných pro všechny měřící body a polohu zdroje  $a$ :

	$T_{30}$ (s)	$EDT$ (s)	$C_{50}$ (dB)	$D_{50}$ (-)	$C_{80}$ (dB)	$T_s$ (ms)	$G$ (dB)	$J_{LF}$ (-)	$IACC_{early}$ (-)	$IACC_{late}$ (-)
125 Hz	3,20	3,15	-7,21	0,21	-5,03	242	3,84	0,31	0,70	0,62
250 Hz	2,77	2,63	-4,91	0,30	-3,15	188	2,71	0,18	0,75	0,47
500 Hz	3,27	3,39	-4,85	0,29	-3,30	231	5,82	0,15	0,67	0,16
1 kHz	2,79	2,76	-4,40	0,31	-2,77	194	14,13	0,13	0,51	0,10
2 kHz	2,24	2,21	-3,58	0,35	-1,79	156	17,34	0,14	0,40	0,08
4 kHz	1,78	1,69	-1,78	0,44	0,15	116	13,39	0,11	0,33	0,06

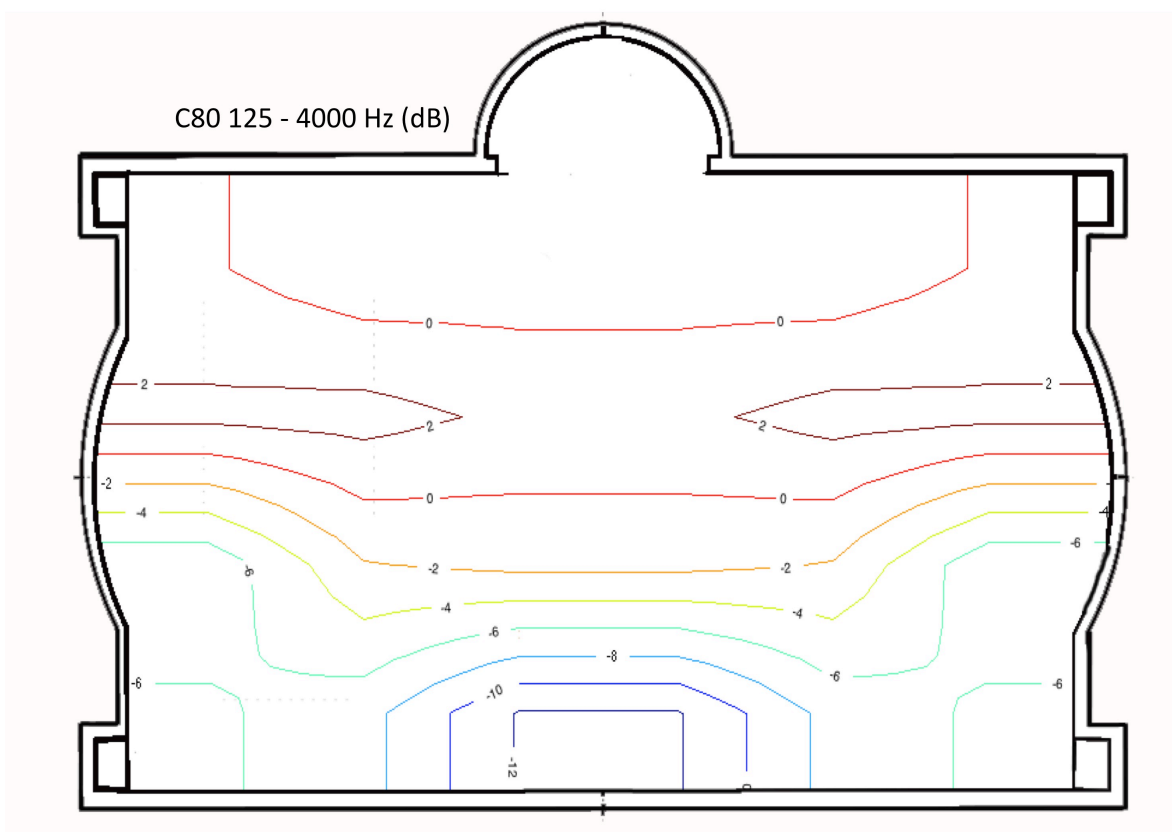
Tabulka 13: Objektivní akustické parametry haly Elim

Otázce vhodnosti prostorového průměrování jednotlivých parametrů ještě bude věnována pozornost v následujících odstavcích. Pro tuto chvíli může tabulka 13, v porovnání s doporučenými hodnotami jednotlivých parametrů v tabulce 2, posloužit k získání základního přehledu o akustických vlastnostech měřeného prostoru.

### Prostorová analýza

Z předpokladů uvedených v kapitole 3 této práce je zřejmé, že velké množství objektivních akustických parametrů vykazuje výraznou prostorovou závislost. Nerovnoměrné rozložení akustické energie v čase a prostoru způsobí, že ne všechna místa v oblasti hlediště budou k poslechu produkce vhodná. Navíc optimální místa jednotlivých parametrů se od sebe mohou zásadně lišit.

Z těchto důvodů byl vytvořen samostatný skript programu *CGT.m* (*Contour Graph Tool*), který vytváří konturové grafy prostorové závislosti uživatelem zvoleného vstupního parametru, a umožňuje tak identifikovat optimální zóny k poslechu. Znalost prostorové závislosti parametrů je také nezbytností k případnému návrhu optimalizace akustických vlastností prostoru. Příklad výstupu skriptu *CGT.m* po drobné grafické úpravě a přidání půdorysu sálu, konkrétně pro parametr  $C_{80}$  frekvenčně průměrovaný pro všechna oktávnová pásma, ukazuje následující obrázek:



Obrázek 19: Prostorová závislost parametru  $C_{80}$  v hale Elim

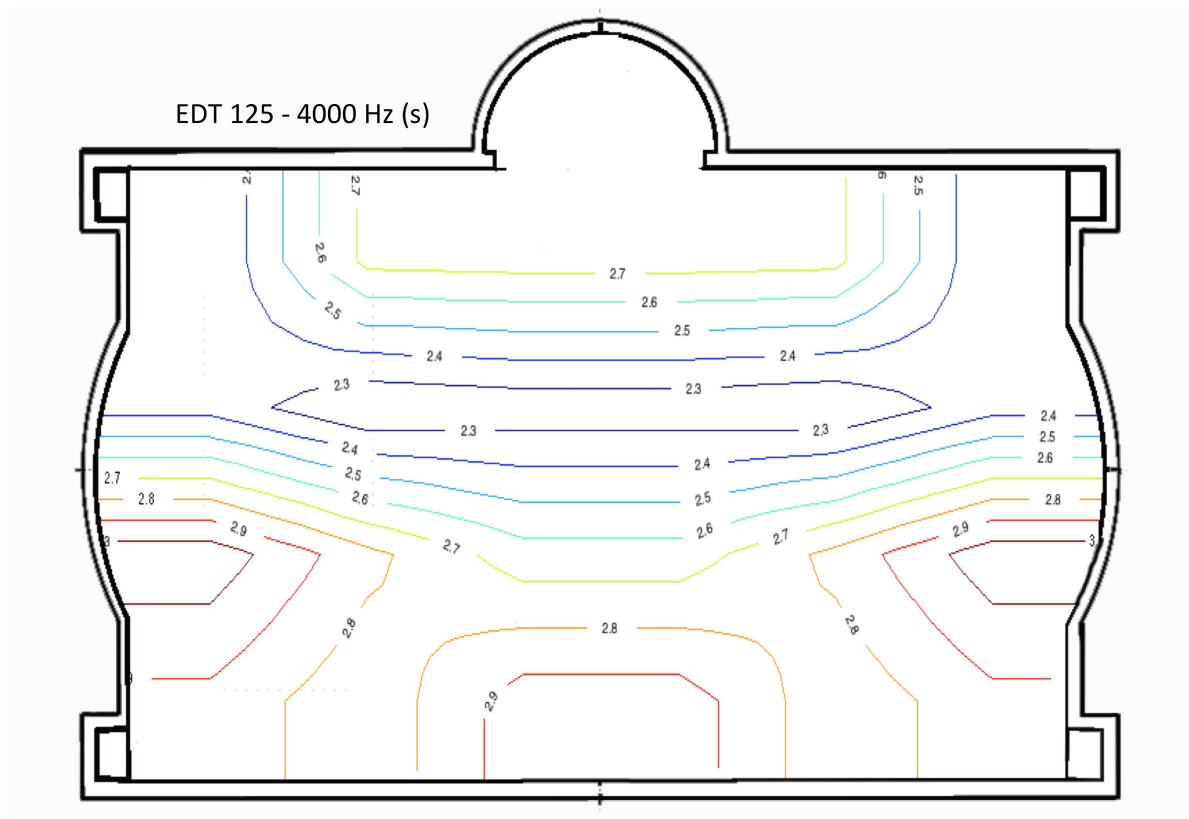
Prostorové analýze byly podrobeny všechny vypočítané objektivní parametry. Prezentace a detailní rozbor všech získaných výsledků přesahují rámec této práce a mohly by být tématem práce samostatné. Pro potřeby této kapitoly budou shrnuty pouze některé zjištěné závěry, zejména takové, které mohou sloužit jako doporučení pro návrh měřicího postupu v obdobných prostorách, který je náplní poslední kapitoly této práce.

### **Doba dozvuku**

Hodnoty doby dozvuku se v prostorové závislosti liší v měřeném sálu pouze na úrovni jednotek procent. Tato skutečnost odpovídá teoretickému předpokladu, že doba dozvuku je dána nahromaděnou akustickou energií, která je v prostoru těsně po ukončení působení zdroje zvuku rovnoměrně rozprostřena. Pro parametr  $T_{30}$  tedy není prostorová analýza nezbytná [7].

### **Počáteční doba dozvuku EDT**

Jak už bylo uvedeno v kapitole 2, počáteční doba dozvuku je v porovnání s klasickou dobou dozvuku ovlivněna zejména brzkými odrazy a tak mnohem více závisí na poloze měřicího bodu [1]. Geometrickou zvláštností zkoumaného prostoru jsou obloukové výklenky na jeho kratších stěnách, které akumulují akustickou energii odrazy do určitých oblastí, podobně jako např. v optice duté zrcadlo koncentruje paprsky do svého ohniska. Tyto oblasti jsou v konturovém grafu prostorové závislosti jasně viditelné:



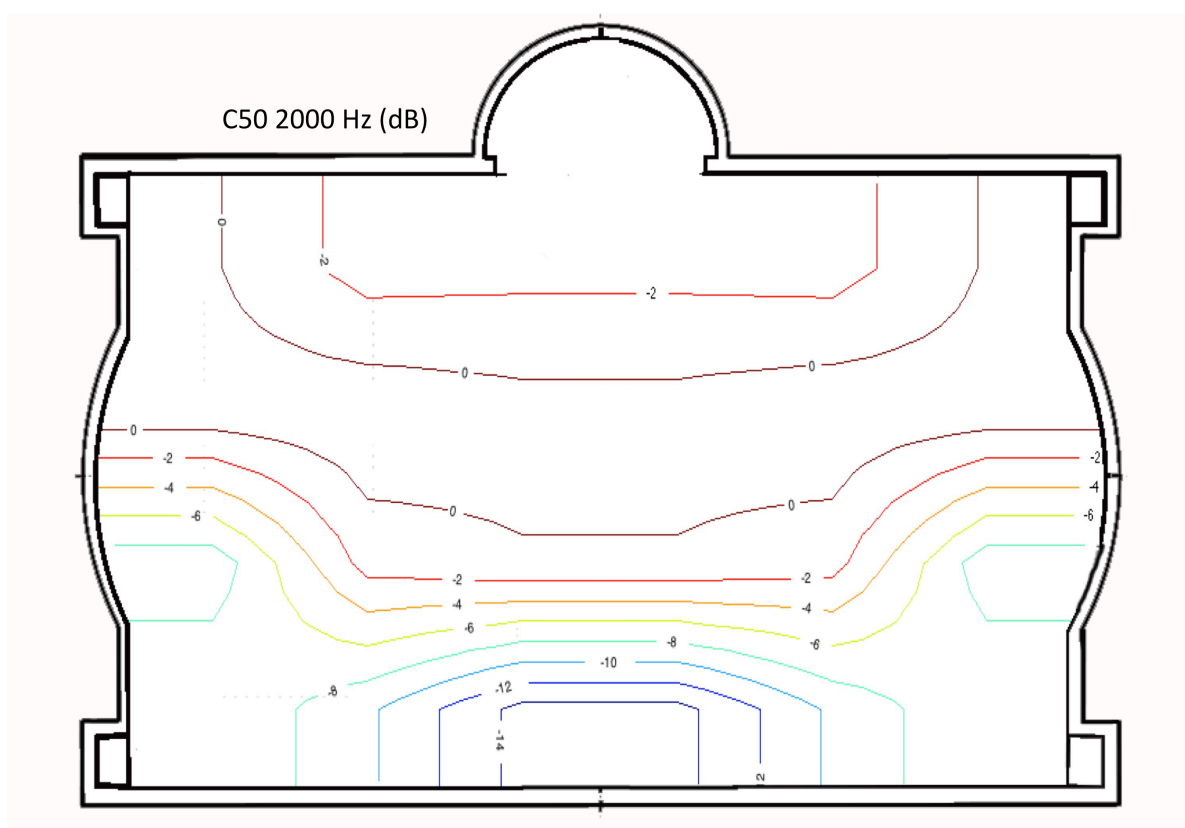
**Obrázek 20: Prostorová závislost parametru EDT v hale Elim**

Oblasti v zadní části sálu vykazují hodnoty parametru *EDT* až o 25% vyšší než v jiných oblastech. Stejně jako u sedadel koncertních sálů pod balkony, které uvádí studie [7] jako atypické z hlediska prostorové závislosti *EDT*, může i zde být doporučeno zaměřit se v rámci zkoumání počáteční doby dozvuku právě na oblasti blízko geometrických zvláštností architektury prostoru. Zajímavým poznatkem může být také to, že hodnoty

*EDT* jsou v místech bližších poloze zdroje obecně nižší. To je způsobeno silnou (v porovnání s energií odrazů) přímou vlnou v těchto oblastech. Stejný závěr byl zjištěn i v rámci studie [7].

### **Míra zřetelnosti $C_{50}$**

Zřetelnost mluveného slova je ve víceúčelových sálech obecně velkým problémem. Otevřené prostory s nedostatkem difúzních prvků a delšími dobami dozvuku způsobují časté nerovnoměrné prostorové vlastnosti parametru  $C_{50}$ . Stejně je tomu i u prostoru zkoumaného v rámci této práce. Prostorovou závislost  $C_{50}$  pro oktávové pásmo 2 kHz znázorňuje následující obrázek:



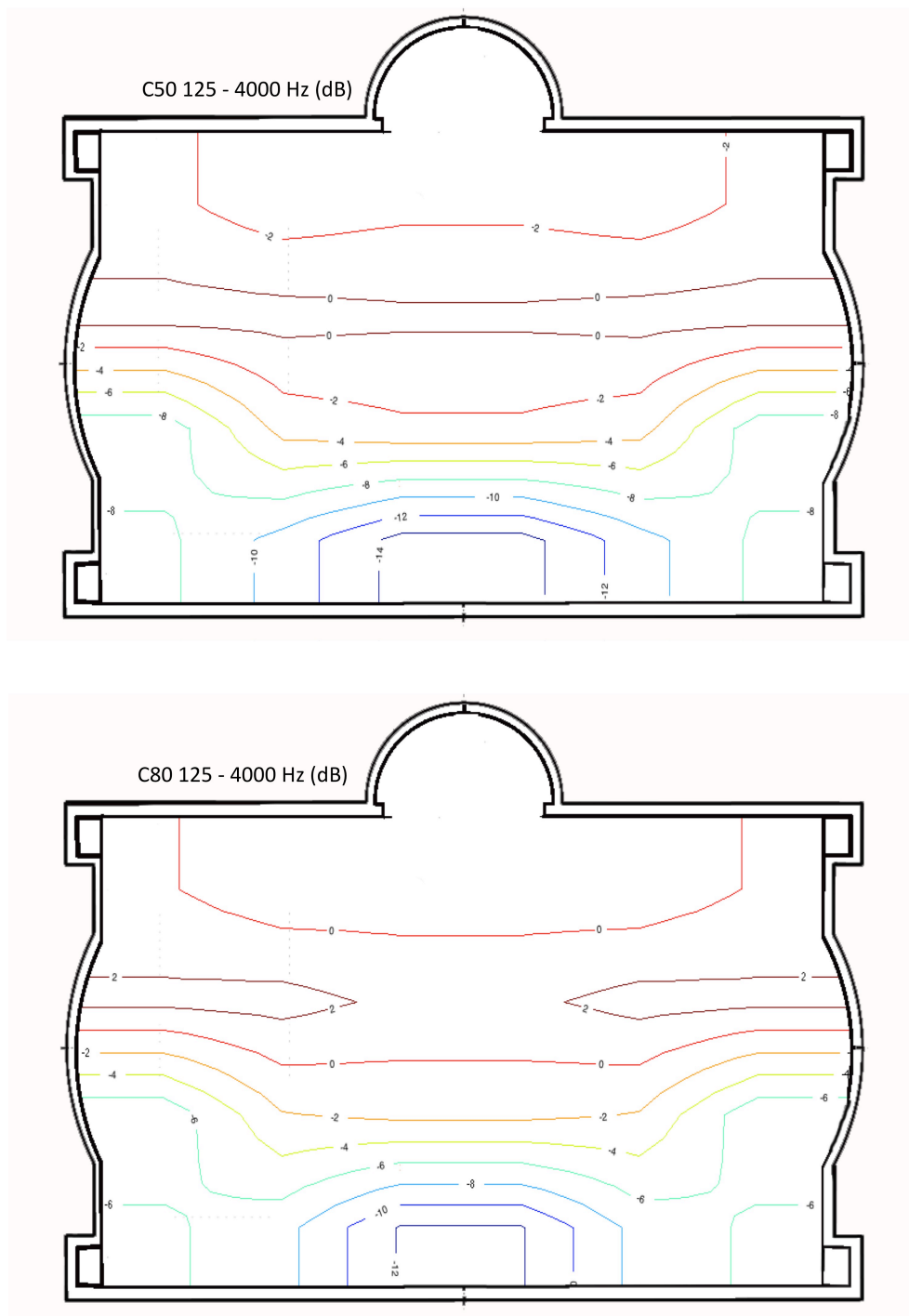
**Obrázek 21: Prostorová závislost parametru  $C_{50}$  v hale Elim**

K analýze bylo záměrně zvoleno oktávové pásmo 2 kHz, jelikož právě frekvence 1-3 kHz jsou stěžejní pro srozumitelnost lidského hlasu [6]. Zajímavým zjištěním je jasně viditelná optimální oblast s hodnotami kolem 0 dB v cca jedné třetině šířky sálu od jeviště. Ta porušuje elementární předpoklad, že srozumitelnost přednesu bude tím vyšší, čím blíže budeme zdroji zvuku. Oktávové pásmo 4 kHz, které také obsahuje velkou část spektra mluveného slova, vykazovalo v rámci prostorové závislosti parametru  $C_{50}$  podobnou charakteristiku a není tedy nezbytné ji zde také vykreslovat.



**Míra jasnosti  $C_{80}$** 

Jasnost vnímané hudební produkce je v porovnání s parametrem  $C_{50}$  pro víceúčelový sál neméně významná. Prostorová závislost míry jasnosti  $C_{80}$  průměrovaná pro všechna frekvenční pásma již byla představena v rámci příkladu výstupu skriptu CGT.m (viz obr. 19). Pro potřeby případné optimalizace akustických vlastností sálu bude ovšem zajímavé porovnat si prostorové závislosti obou parametrů  $C_{50}$  a  $C_{80}$ .

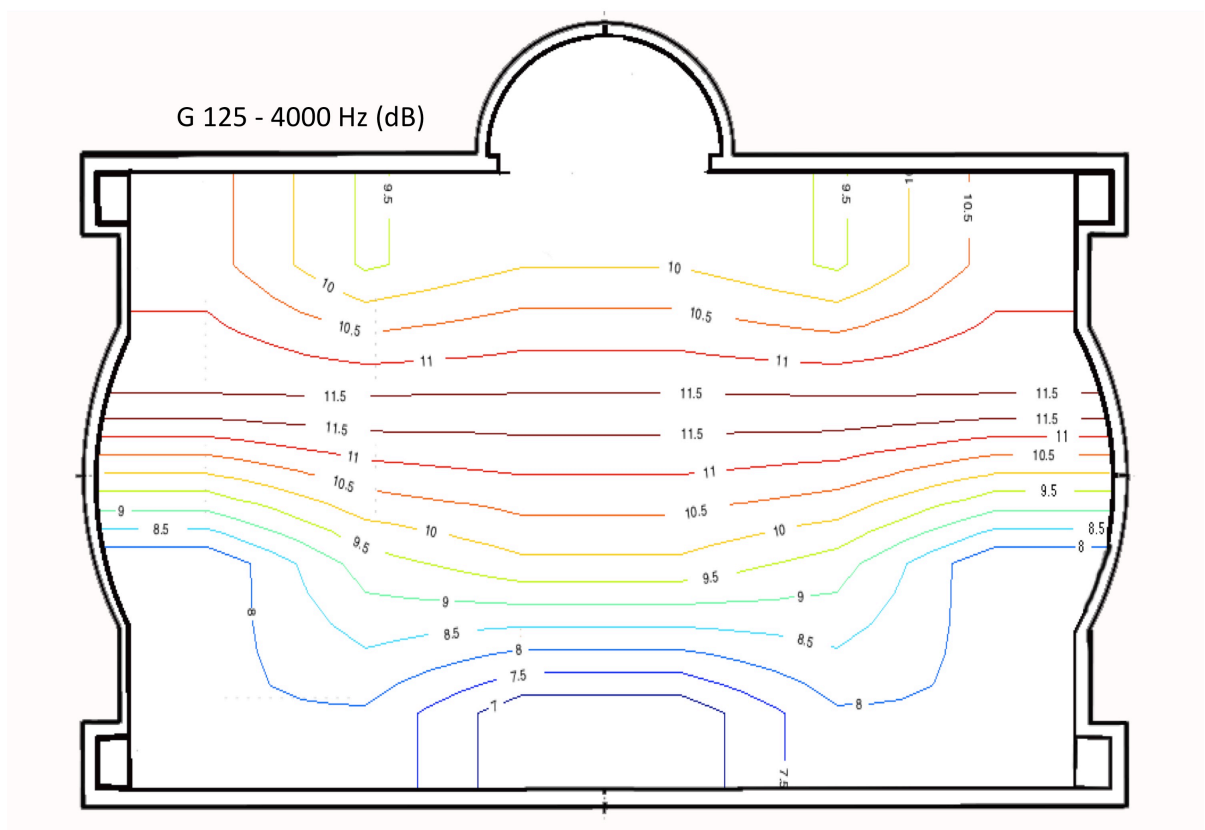


**Obrázek 22: Porovnání prostorové závislosti parametrů  $C_{50}$  a  $C_{80}$  v hale Elim**

Z konturových grafů na obr. 22 je jasně viditelné podobné prostorové rozložení hodnot obou parametrů. V rámci optimalizace míry zřetelnosti, která vykazuje hodnoty o cca 2 dB nižší a tudíž by její optimalizace byla přednější, se tedy dá předpokládat i celkové zlepšení akustických vlastností prostoru pro hudební produkce. Prostorové závislosti jednotlivých frekvenčních pásem obou parametrů se od sebe zásadně neliší, proto nebudou uvedeny.

### **Síla zvuku $G$**

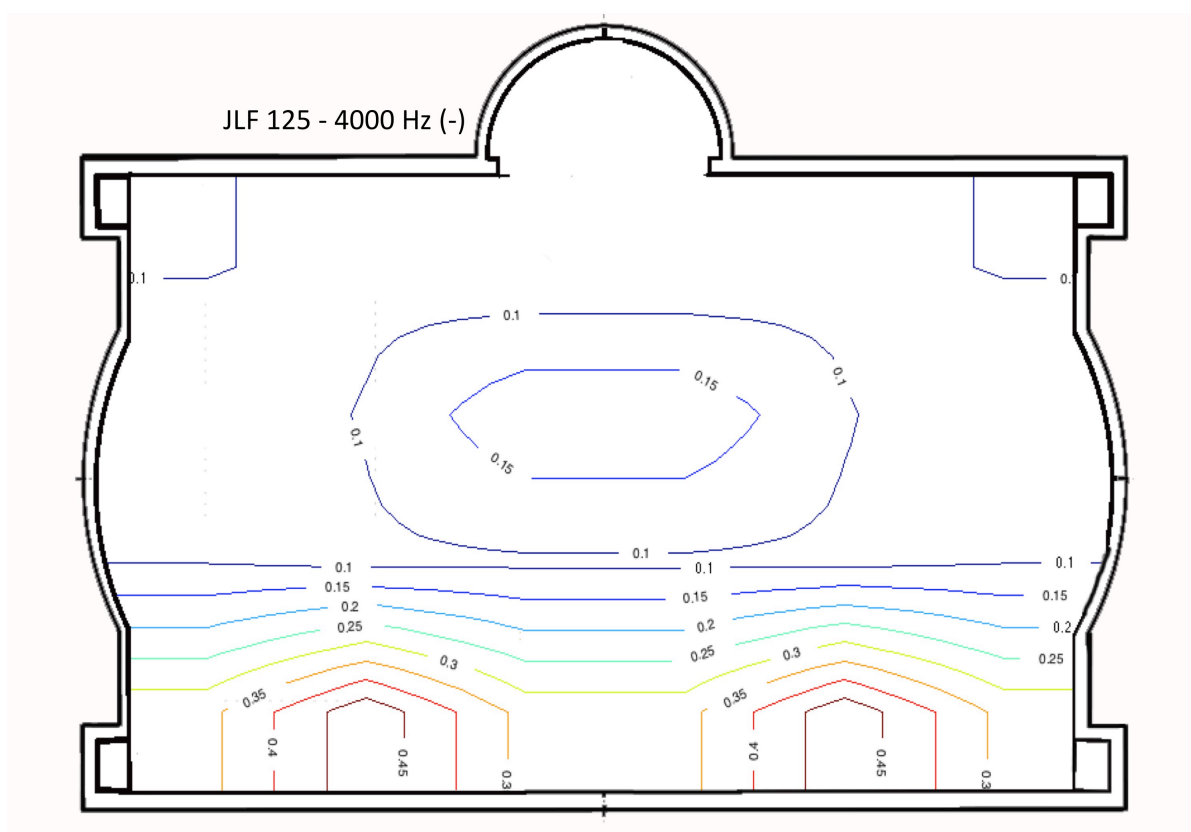
Prostorovou závislost síly zvuku  $G$  průměrovanou pro všechna zkoumaná oktávová pásma znázorňuje obrázek 23. Jasně viditelné jsou zde oblasti určitého „sub-minima“ prostorové závislosti při přední stěně za rohy podia. Ty jsou pravděpodobně zapříčiněny částečným odstíněním přímé vlny od zdroje na jevišti a mohou zde v případě slabšího vybuzení prostoru způsobovat nedostatečnou vnímanou hlasitost produkce. Jasně prokazatelný je zde i téměř lineární pokles síly zvuku  $G$  v závislosti na vzdálenosti měřících bodů od zdroje. Ten začíná od cca jedné třetiny šířky sálu, kde se nachází prostorové maximum síly zvuku. Skutečnost, že se maximum nenachází blízko zdroje, částečně odporuje předpokladu, že parametr  $G$  vykazuje lineární závislost na vzdálenosti od zdroje v jakémkoliv sálu [1, 7]. Poloha maxima v jedné třetině sálu by mohla být vysvětlena podpořením přímé vlny brzkými odrazy směřujícími akustickou energii právě do těchto míst. Prostorové závislosti jednotlivých frekvenčních pásem nejsou opět nijak významně odlišné.



Obrázek 23: Prostorová závislost parametru  $G$  v hale Elim

### Míra počáteční boční energie $J_{LF}$

Obrázek 24 znázorňuje prostorovou závislost parametru  $J_{LF}$ . V oblastech blízko zdroje jsou hodnoty míry počáteční boční energie vcelku nízké. To podporuje teorii samotné definice parametru, který je tím vyšší, čím vyšší je energie zvuku přicházející do měřicího bodu z bočních směrů [1]. V polovině sálu blíže jevišti se tak projeví zejména přímá vlna od zdroje, jelikož zvuk ještě neměl z důvodu velikosti prostoru dostatek možností se odrazit a přijít do oblastí měření z bočních směrů. S rostoucí vzdáleností od zdroje pak poměr boční energie postupně narůstá až do svého maxima, které se nachází v zadní části sálu, kde se mohou uplatnit nejen boční odrazy, ale i odrazy od zadní stěny.

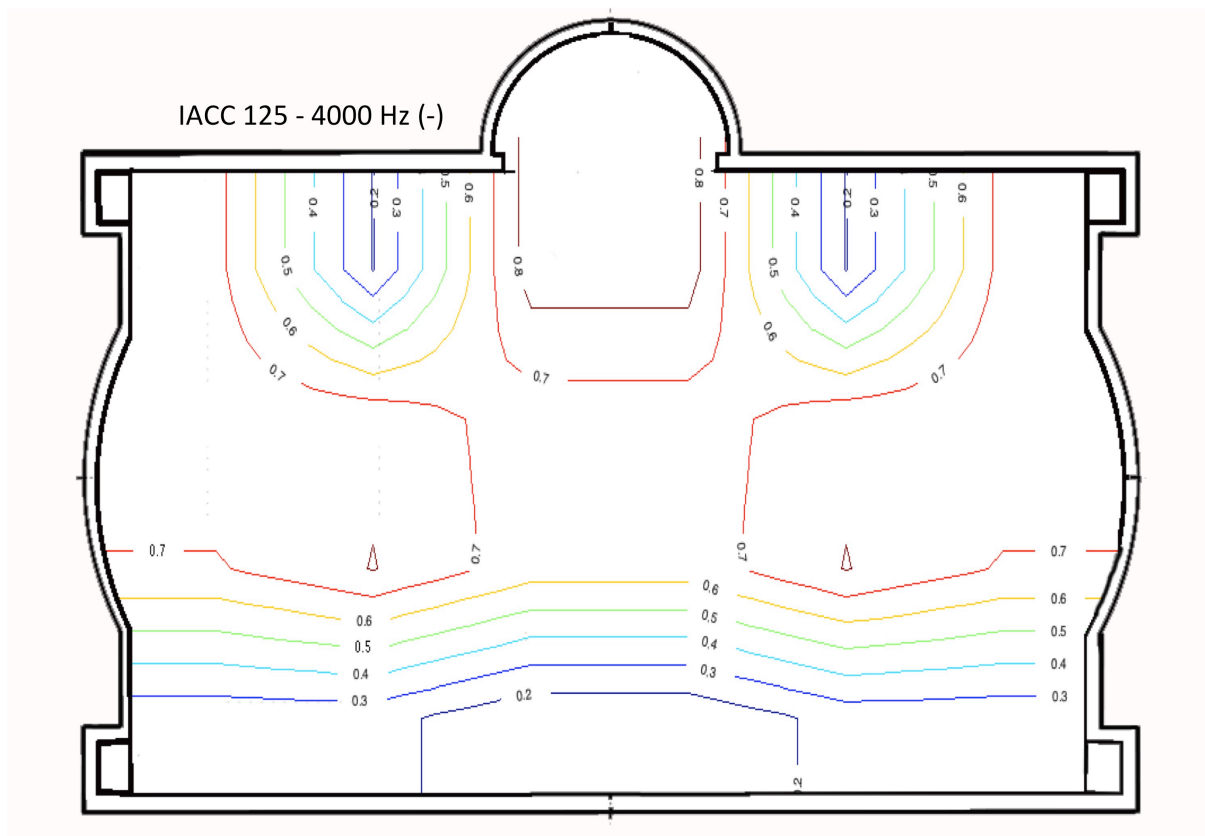


Obrázek 24: Prostorová závislost parametru  $J_{LF}$  v hale Elim

### Binaurální parametr $IACC$

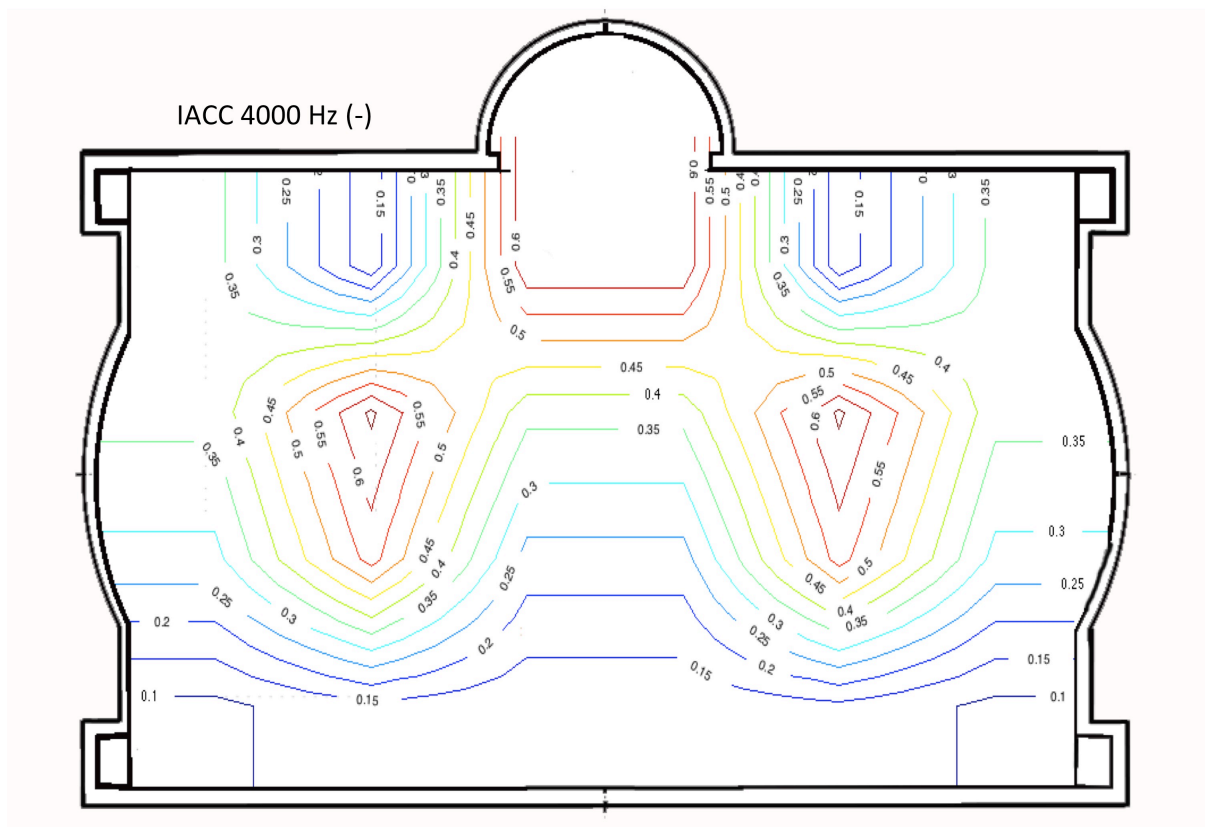
Prostorové vnímání produkovaného zvuku je nedílnou součástí posuzování akustické kvality prostoru, a tak i v rámci víceúčelových sálů musí být zohledněno. Prostorovou závislost binaurálního parametru  $IACC$  v hale Elim znázorňuje obrázek 25. Vysoké hodnoty  $IACC$  jsou asociovány se slabě vnímanou prostorovostí zvuku a naopak [1]. To podtrhuje skutečně naměřené výsledky, kdy se minima prostorové závislosti binaurálního parametru nacházejí zejména u stěn, které četnými odrazy zajistí dostatečnou rozdílnost signálů přicházejících do obou ušních kanálů. Naopak střed sálu disponuje prostorovostí nejslabší a signály obou ušních kanálů zde budou splývat.

Zajímavé může být i porovnání obou parametrů vyjadřujících subjektivní prostorové vnímání zvuku, tedy  $J_{LF}$  a  $IACC$ . Z prostorových charakteristik obou parametrů nelze na první pohled vyvodit určitou korelaci, což potvrzuje i závěry studie [8], která také žádnou souvislost prostorových závislostí nenalezla.



Obrázek 25: Prostorová závislost parametru  $IACC$  v hale Elim

Dalším zajímavým zjištěním může být skutečnost, že vliv obloukových výklenků se v rámci prostorové závislosti  $IACC$  neprojevuje na nízkých frekvencích. Ve vyšších frekvenčních pásmech je však už jejich vliv znatelný, když vytváří maxima v konkrétních a poměrně jasně definovaných bodech, jak je vidět na obrázku 26 na následující straně. Tato skutečnost může souviset i s větší směrovostí zdroje ve vyšších frekvenčních pásmech, která bude zejména hodnoty parametrů prostorovosti zkreslovat. Jako závěr tedy může být vyvozeno doporučení zaměřit se v rámci těchto analýz na oblasti v okolí geometrických zvláštností architektury prostoru a pokusit se případně eliminovat vliv směrovosti zdroje zvuku na vyšších frekvencích. Způsob, jakým toho může být dosaženo, bude uveden v rámci poslední kapitoly práce věnující se návrhu měřicího postupu.



Obrázek 26: Prostorová závislost parametru IACC v pásmu 4 kHz v hale Elim

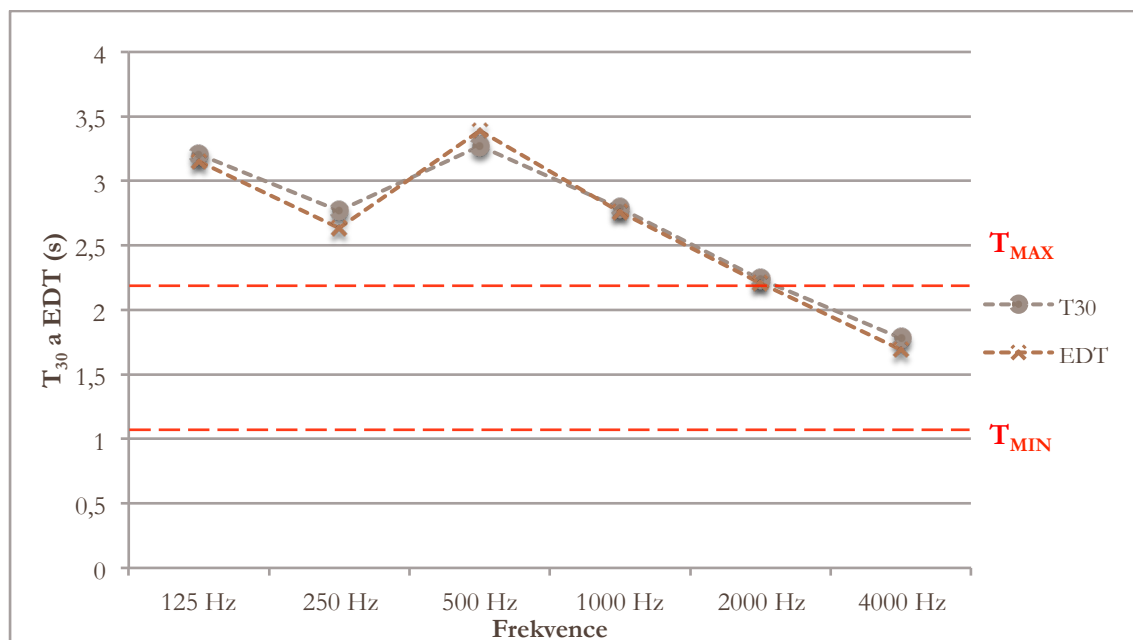
### Frekvenční analýza

V rámci prostorové analýzy vypočtených objektivních akustických parametrů nebyly u většiny parametrů zjištěny zásadní rozdíly mezi prostorovými závislostmi jejich hodnot v jednotlivých zkoumaných frekvenčních pásmech. Samotná frekvenční analýza jednotlivých parametrů, tedy závislost jejich hodnot na daném oktávovém pásmu, však nesmí být opomenuta a je také nedílnou součástí informací potřebných k případnému návrhu optimalizace akustických vlastností prostoru. K tomu účelu byly hodnoty parametrů v daných frekvenčních pásmech prostorově zprůměrovány a vyneseny do grafů níže. Konkrétní hodnoty jednotlivých parametrů pro jednotlivá frekvenční pásma mohou být nalezeny v tabulce 13.

### ***Doba dozvuku $T_{30}$ a počáteční doba dozvuku EDT***

Frekvenční závislost parametrů  $T_{30}$  a  $EDT$  znázorňuje obrázek 27 na následující straně. Je zřejmé, že z hlediska frekvenční závislosti se tyto dva parametry vzájemně neliší tolik, jak bylo prokázáno např. u prostorové analýzy výše. Jistou anomálií ve formě výraznějšího poklesu obě hodnoty vykazují ve frekvenčním pásmu 250 Hz. V tomto pásmu byly nalezeny nečekané odchylky u více objektivních parametrů a tak ho lze považovat za specifikum haly Elim v Písku, které by mohlo být detailněji prozkoumáno. Nižší hodnoty ve vyšších frekvenčních pásmech mohou být produktem

improvizovaných akustických obkladů na stěnách a na stropě, které pro tyto vyšší pásma pravděpodobně dostatečně plní funkci pohlcovače akustické energie.

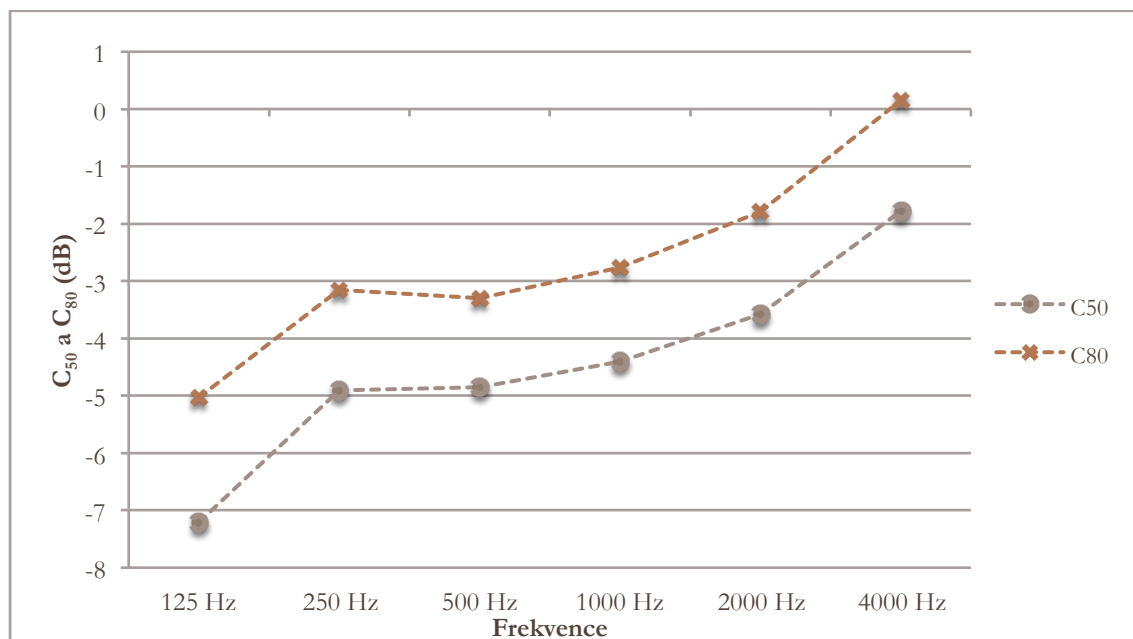


Obrázek 27: Frekvenční závislost parametrů  $T_{30}$  a EDT v hale Elim

V obrázku výše je nastíněno toleranční pásmo pro hodnoty doby dozvuku, které uvádí zdroj [6] jako optimální pro koncertní sály podobné velikosti. Jako závěr lze tedy doporučit, že případná optimalizace doby dozvuku v sálu by byla nasnadě.

### Míra zřetelnosti $C_{50}$ a míra jasnosti $C_{80}$

Stejně jako u prostorové analýzy výše, i v rámci frekvenčních závislostí na obrázku 28 oba parametry  $C_{50}$  a  $C_{80}$  vykazují vzájemnou korelaci.



Obrázek 28: Frekvenční závislost parametrů  $C_{50}$  a  $C_{80}$  v hale Elim

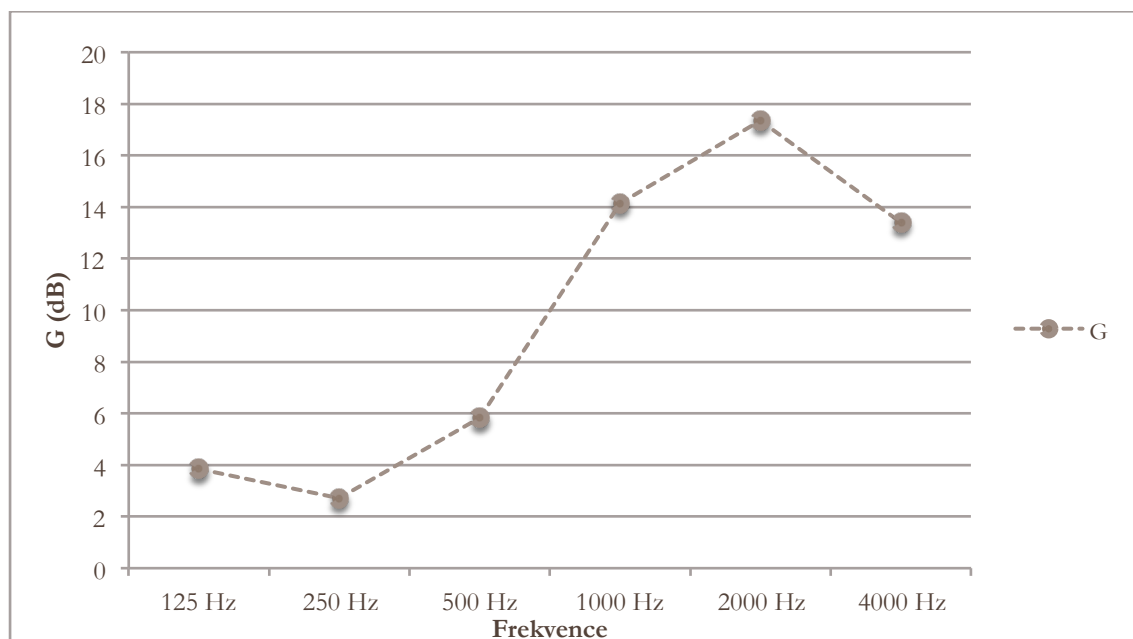
I zde je tedy možné předpokládat, že v případě optimalizace sálu pro produkci mluveného slova dojde ke zlepšení akustických vlastností i pro potřeby hudební produkce.

Trend obou křivek také potvrzuje předpoklad, že jasnost vnímaného zvuku negativně koreluje s dobou dozvuku [7]. Pozitivní je také skutečnost, že hodnoty  $C_{50}$  ve frekvenčních pásmech 2 a 4 kHz, které jsou stěžejní pro srozumitelnost lidského hlasu, jsou vyšší než -4 dB a blíží se tedy optimu 0 dB.

Mezi pásmy 125 a 250 Hz jsou u obou parametrů rozdíly větší než 2 dB a stejně tak jako u doby dozvuku a  $EDT$  se zde tyto nízké frekvence jeví jako specifikum daného prostoru.

### **Síla zvuku $G$**

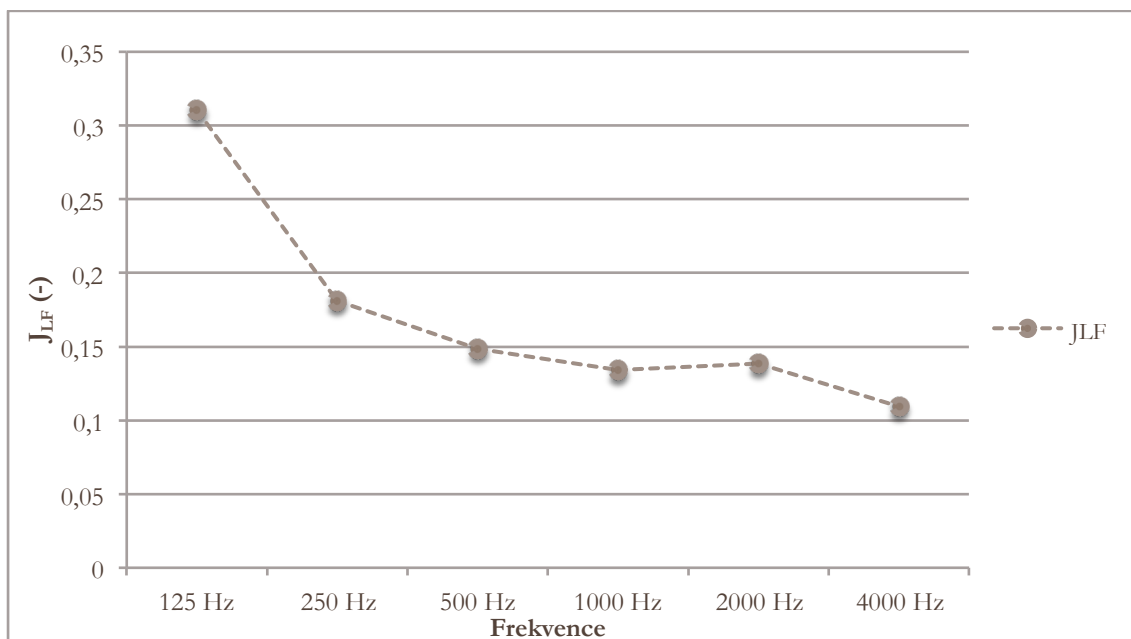
Hodnoty síly zvuku  $G$  pro jednotlivá frekvenční pásma znázorňuje následující obrázek. Na první pohled je zřejmé nedostatečné vybudování sálu na nízkých frekvencích (zejména pak v pásmu 250 Hz). V případě navrhování podpůrného ozvučovacího systému je tak vhodné doporučení zaměřit se právě na basové tóny, aby byl přednes prostoru vyvážený.



Obrázek 29: Frekvenční závislost parametru  $G$  v hale Elim

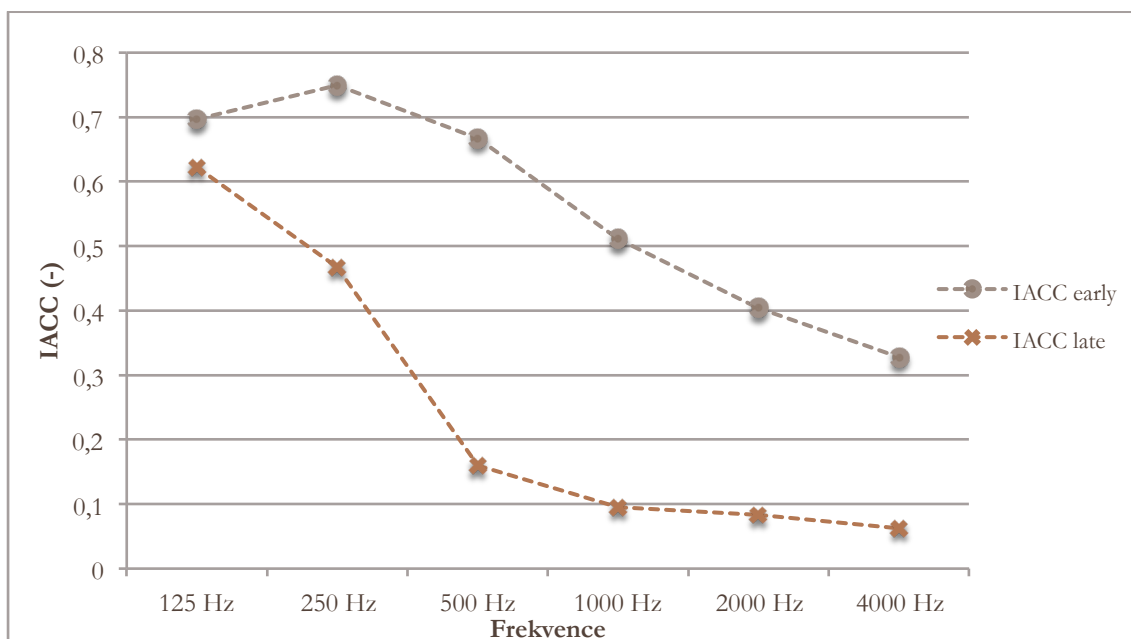
### **Míra počáteční boční energie $J_{LF}$**

Frekvenční závislost vnímané prostorovosti sálu Elim znázorňuje obrázek 30 na následující straně. V případě uvažování teorie, že prostorovost pozitivně koreluje s dobou dozvuku [7], a porovnáním hodnot parametrů  $T_{30}$  a  $J_{LF}$ , lze tento předpoklad na základě zjištěných dat konkrétně pro sál Elim v Písku potvrdit.

Obrázek 30: Frekvenční závislost parametru  $J_{LF}$  v hale Elim

### Binaurální parametr IACC

Z obrázku 31 lze také odvodit částečnou korelaci parametru binaurálního  $IACC$  s mírou počáteční boční energie  $J_{LF}$ , kdy má zejména křivka  $IACC_{late}$ , definující kvalitu binaurálního vjemu pro odražený zvuk, tendenci velice podobnou křivce  $J_{LF}$  v obr. 30. Tato skutečnost potvrzuje i závěry článku [9], který určitou korelaci zejména v pásmech 125 až 1000 Hz také uvádí v případě prostorově průměrovaných hodnot koncertních sálů.



Obrázek 31: Frekvenční závislost parametru IACC v hale Elim



V případě porovnání hodnot *IACC* s typickým rozmezím v koncertních sálech (0,4 – 1,0) se zkoumaný prostor jeví jako optimální pouze pro nízká frekvenční pásma 125 a 250 Hz. Opět tedy vyvstává myšlenka specifika akustických vlastností haly Elim na nízkých frekvencích, které by mohlo být předmětem dalšího průzkumu.

### Shrnutí

Vypočtené objektivní akustické parametry prostoru byly v rámci odstavců výše podrobeny prostorové a frekvenční analýze. Ty mají za účel sloužit jednak k ověření, zda celý výpočetní řetězec navržený v rámci této práce dává dostatečné a smysluplné výsledky, a jednak aby dodaly podklady k návrhu reálného měřicího postupu. Z prostorové analýzy jednotlivých parametrů lze vyvodit několik doporučení, jakým konkrétním skutečností by v rámci reálného měření měla být věnována pozornost. Tyto poznatky budou shrnuty v následující kapitole prezentující právě ucelený návrh měřicího postupu k získání objektivních akustických parametrů víceúčelového sálu.

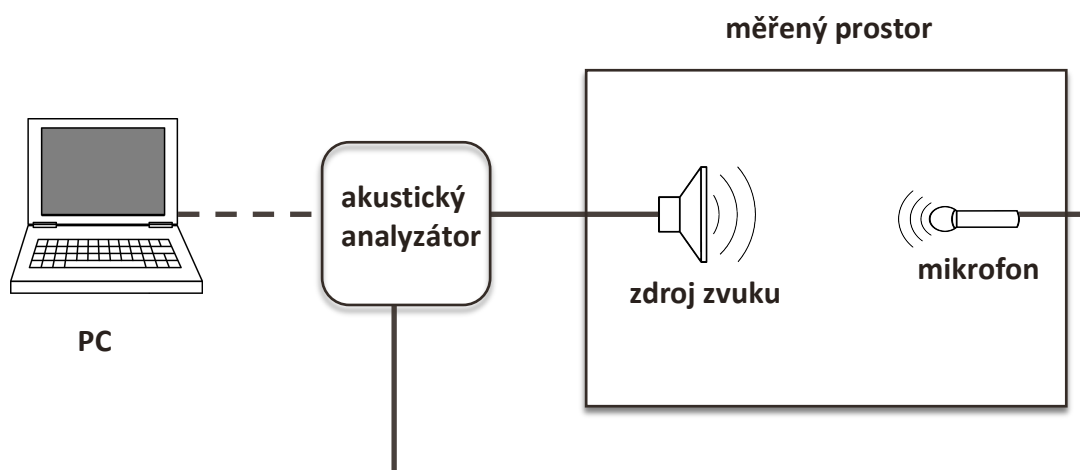
Naměřená data odpovídají specifickým vlastnostem haly Elim, které by mohly být tématem dalšího výzkumu. Kromě toho bylo zjištěno několik vzájemných korelací mezi jednotlivými parametry a data frekvenčních závislostí také poslouží v rámci následující kapitoly k diskusi o frekvenčním průměrování hodnot jednotlivých parametrů.

## 5. Návrh měřicího postupu k získání akustických parametrů víceúčelového sálu

Program vytvořený v rámci této práce a popsáný v předchozí kapitole představuje efektivní nástroj k výpočtu objektivních akustických parametrů libovolného uzavřeného prostoru. Podmínkou jeho správné funkce je ovšem korektně získaná impulsová odezva, která je nahrána na jeho vstupu. Její samotné měření vyžaduje splnění mnoha kritérií kvality vybavení, měřicího procesu i následného zpracování naměřených dat. Tato kritéria jsou částečně obsažena v normě ČSN EN ISO 3382-1 [5], avšak drtivá většina z nich se týká pouze měření doby dozvuku a pro potřeby měření dalších akustických parametrů jsou nedostačující [7]. Je potřeba je tedy doplnit o další podmínky, dané typem konkrétního prostoru a také parametry, které budou v rámci analýzy počítány, aby byly výsledky věrohodné a disponovaly dostatečnou vypovídací hodnotou. V rámci představovaného návrhu budeme uvažovat použití metody TSP, výše popsaného výpočetního řetězce a zohledníme závěry získané z analýzy dat reálného měření víceúčelové haly Elim v Písku z roku 2009 [4].

### 5.1 Měřicí vybavení

Základní podobu měřicího řetězce znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 32: Schéma měřicího řetězce

#### PC

V případě použití programu vyvinutého v rámci této práce jsou jedinými technickými požadavky na PC provádějící výpočet nainstalované prostředí Matlab a dostatečný výkon ke zvládnutí složitějších výpočtů v případě současné analýzy více impulsových

odezev. Rozhraní (např. USB, LAN, LINE IN) pro import a export měřicích dat je samozřejmě také nezbytností.

## Akustický analyzátor

Akustický analyzátor zajišťuje jednak napájení zdroje zvuku výkonem potřebným k dostatečnému vybuzení zkoumaného prostoru, a jednak ovzorkování analogového signálu z mikrofonu k jeho dalšímu zpracování. Norma [5] požaduje, aby zdroj dával hladinu alespoň o 45 dB vyšší, než je hladina akustického tlaku šumu pozadí. Kombinace generátor – zdroj by tak měla být zvolena vhodně dispozcím zkoumaného prostoru, aby tuto hladinu byla schopna vygenerovat. Další otázkou je případné lineární i nelineární zkreslení vzniklé při průchodu signálu obvodu generátoru. Zde je vhodné doporučit použití zesilovačů třídy A pro zajištění minimalizace zkreslení.

Samotný měřicí signál pak může být generátorem přímo vytvářen nebo může být předpřipraven v podobě zvukové stopy (např. ve formátu WAV) v dostatečné kvalitě. V případě signálu ve zvukové stopě pak místo sofistikovaného generátoru signálů postačí běžný výkonový zesilovač.

## Zdroj zvuku

Použitý zdroj zvuku by měl být v první řadě co nejvíce všesměrový. Norma [5] udává maximální odchylku směrovosti zdroje dle následující tabulky:

Frekvence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Max. odchylka (dB)	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

*Tabulka 14: Maximální odchylka směrovosti zdroje v decibelech při buzení oktávovými pásmy růžového šumu a měřená ve volném poli (převzato z [5])*

Toho se nejčastěji dosahuje použitím zdroje ve tvaru symetrického dvanáctistěnu o průměru kolem 400 mm. Problémem těchto zdrojů je skutečnost, že na frekvencích blízkých 4000 Hz se reproduktory ve stěnách stávají směrovými. To může být eliminováno provedením několika měření s rozdílnou orientací reproduktorů a následným průměrováním. V rámci některých měření byl dokonce pro pásmo 4 kHz použit speciální menší dvanáctistěn o průměru cca 100 mm [1, 7]. Ukázkou profesionálního všesměrového zdroje zvuku znázorňuje obrázek 33:



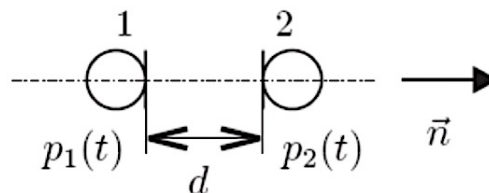
*Obrázek 33: Všesměrový zdroj zvuku (převzato z [14])*

## Mikrofony

Technická norma ČSN EN ISO 3382-1 uvádí, že všechna použitá měřicí zařízení musí splňovat požadavky na typ 1 zvukoměru podle IEC 61672-1. Tyto požadavky přesahují rámec této práce a proto nebyly detailně studovány. Mimo to ovšem norma vyžaduje, aby byl mikrofon co nejmenší, a především aby měl průměr membrány maximálně 13 mm [5].

Kromě požadavků normy je však nutno přizpůsobit použité mikrofony parametrům, které mají být v rámci analýzy prostoru získány. V případě, že analýza vyžaduje výpočet míry počáteční boční energie  $J_{LF}$ , je zapotřebí kromě mikrofonu se všesměrovou snímací charakteristikou také mikrofonu s charakteristikou osmičkovou. Relativní citlivosti obou těchto mikrofonů by pak měly být kalibrovány ve směru maximální citlivosti ve volném poli [5, 7].

Použití dvou různých mikrofonů a potřebné kalibraci se lze vyhnout v případě použití dvoumikrofonní intenzitní sondy, jejíž schéma znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 34: Schéma p-p sondy (převzato z [17])

Z jejich dvou mikrofonů namířených membránami proti sobě lze pak obě směrové charakteristiky získat jednoduchou matematickou úpravou okamžitých hodnot akustického tlaku na obou mikrofonech:

$$p_0(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2}, \quad p_8(t) \approx \frac{c}{d} \cdot \int_0^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau,$$

kde  $c$  je rychlost zvuku,  $d$  je vzdálenost použitých mikrofonů,  $p_8$  je impulsová odezva měniče prvního řádu (s osmičkovou směrovou charakteristikou),  $p_0$  je impulsová odezva měniče nultého řádu (se všesměrovou směrovou charakteristikou) a  $p_1, p_2$  jsou impulsové odezvy snímané prvním resp. druhým mikrofonem [11].

V případě měření síly zvuku  $G$  je také nutné kalibrovat citlivost použitého všesměrového mikrofonu ve volném poli.

## Binaurální vybavení

V případě zkoumání binaurálního parametru  $IACC$  je potřeba vybavení doplnit ještě o zařízení schopné binaurálního záznamu. K tomu může sloužit umělá hlava speciálně určená pro účely binaurálního měření, která musí splňovat požadavky dané doporučením [18] a jejíž použití musí být přesně popsáno ve zprávě o měření [5].

Druhou možností zajištění binaurálního záznamu je použití skutečných hlav průměrných rozměrů, které blíže specifikuje norma [5], vybavených mikrofony u vstupů do zvukovodů. Obě výše uvedené možnosti řešení znázorňuje obrázek 35.



Obrázek 35: Metody binaurálního záznamu (převzato z [15])

## 5.2 Rozložení měřicích bodů a podmínky během měření

Počet a rozložení měřicích bodů by mělo být vždy přizpůsobeno dispozicím zkoumaného prostoru. Vzhledem k tomu, že mnoho objektivních akustických parametrů představených v teoretické části této práce disponuje velkou prostorovou závislostí a mohou se měnit i od sedadla k sedadlu (což bylo i v rámci implementace výpočtů potvrzeno), je potřeba zvolit dostatečný počet míst zdroje a přijímače k charakterizování celého sálu [5]. Kromě samotných měřicích bodů je potřeba nastavit i podmínky v prostoru během měření tak, aby co nejvíce simulovaly stav sálu během reálné produkce, případně výsledky podrobit korekci v případě, že podobné podmínky nelze v čase měření zajistit.

### Polohy zdroje

Norma [5] udává, že pro polohu zdroje by se měly volit nejméně tři body na podiu, v sálech s rozlehlým podiem nebo orchestřištěm bodů více a v malých sálech (např. pro přednes mluveného slova) postačuje bod jeden.

Obecným problémem víceúčelových sálů je skutečnost, že drtivá většina z nich není primárně pro hudební či mluvenou produkci určena, a že se v nich tedy velice často žádná podia (byť jen improvizovaná) nenacházejí. V takovém případě může být vhodné v rámci analýzy akustických vlastností sálu a jejich případné optimalizace navrhnout i vhodné místo, kde by se účinkující během produkce měli vyskytovat. V případě, že sál jakýmkoliv podiem disponuje, měla by být jeho poloha při umístění zdroje respektována. Výška zdroje od podlahy se doporučuje 1,5 m, aby se zabránilo nízkofrekvenční modifikaci výstupního výkonu zdroje ve frekvenčním rozsahu měření [5]. V rámci tohoto návrhu budou představeny dvě možnosti rozložení měřicích bodů pro obecný sál obdélníkového typu.

### Polohy mikrofonů

Stejně tak jako se zdroj umísťuje do míst, kde se během produkce nejčastěji vyskytují účinkující, i měřicí polohy mikrofonů by měly být voleny v oblastech sálu, kde zpravidla sedí či stojí publikum [5]. Výška mikrofonů od podlahy by pak měla být přizpůsobena

právě tomu, zda se jedná o oblasti sedících diváků (1,2 m od země) či místa stojícího publika (1,5 m od země). Norma [5] stanovuje minimální počet přijímacích poloh v závislosti na velikosti poslechového prostoru dle následující tabulky:

Počet sedadel	Minimální počet míst mikrofonu
500	6
1000	8
2000	10

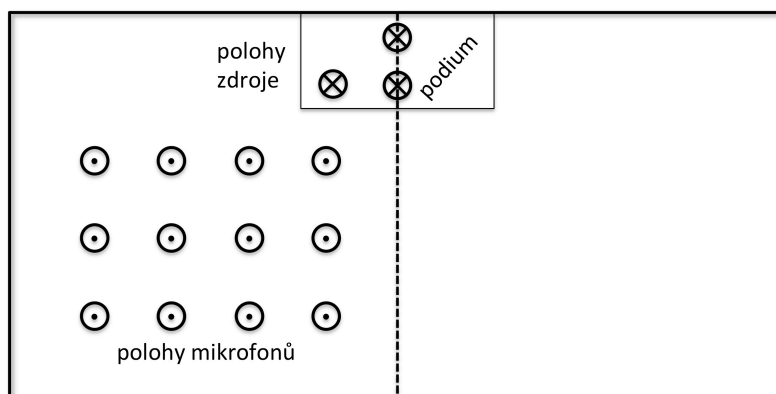
Tabulka 15: Minimální počet přijímacích poloh jako funkce velikosti poslechového prostoru (převzato z [5])

V případě jakékoliv viditelné symetrie měřeného prostoru je vhodné tuto skutečnost zohlednit a polohy zdroje i mikrofonů určit pouze v jedné symetrické polovině sálu s předpokladem, že hodnoty v druhé polovině budou zrcadlově symetrické. Poté je vhodné volit minimální vzdálenost mikrofonů od osy souměrnosti větší než 1 m, aby byly eliminovány zdegenerované hodnoty v okolí symetrie [7].

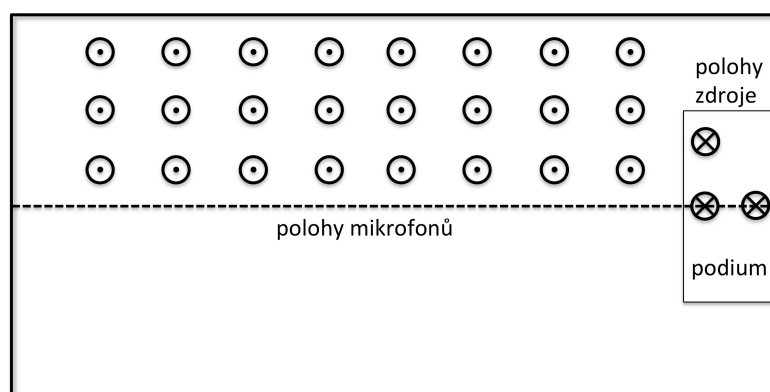
Některé zdroje uvádí i konkrétní doporučené rozmístění měřicích bodů v případě zkoumání konkrétních parametrů. Např. studie [16] uvádí v rámci měření síly zvuku  $G$  ve sportovních halách vzdálenost 10 cm od zdroje zvuku následovanou každou další vzdáleností odpovídající poklesu hladiny o 2 dB (tedy 12.5 cm, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125 cm atd.) na hlavní ose od zdroje. Barron v rámci [7] používá poloměr dozívání, což je vzdálenost od zdroje, kde je energie odrazů rovna energii přímé vlny. Minimální doporučená vzdálenost zdroj-mikrofon je pak podle něj mezi 1,4 až 2,5-násobkem poloměru dozívání v případě, že zkoumáme zejména parametry korelující s jasností a prostorovostí vnímaného zvuku (typicky  $C_x$ ,  $D_{50}$ ,  $J_{LF}$  a  $IACC$ ).

## Návrh rozložení měřicích bodů

V rámci tohoto návrhu byly vytvořeny dvě možnosti rozložení měřicích bodů pro obecný víceúčelový sál obdélníkového typu. Schéma takového sálu znázorňují obrázky 36 a 37. V jednom případě byla uvažována poloha improvizovaného jeviště podél kratší strany sálu, v případě druhém podél strany delší. Stejný systém může být použitý i v případě, že podium v sále není, aby tak mohlo být zjištěno, jaká dispozice bude pro produkci vhodnější. V návrhu je využito symetrie sálu a počet měřicích bodů je zvolen dostatečně tak, aby bylo možné naměřené parametry v jednotlivých bodech prostorově průměrovat. Tím může vzniknout několik větších oblastí, čímž může být vytvořen určitý kompromis mezi popisem parametrů v jednotlivých bodech a popisem sálu jako celku daného průměrováním všech hodnot.



Obrázek 36: Návrh rozložení měřicích bodů (varianta 1)



Obrázek 37: Návrh rozložení měřicích bodů (varianta 2)

Množství bodů by mělo být voleno adekvátně velikosti zkoumaného sálu a mezi jednotlivými polohami mikrofonů a zdrojů by měla být vzdálenost alespoň poloviny vlnové délky, tedy asi 2,0 m při obvyklém frekvenčním rozsahu, aby nedocházelo ke splývání výsledků v příliš blízkých bodech. Vzdálenost kteréhokoliv místa mikrofonu k nejbližšímu odrážejícímu povrchu (včetně podlahy) musí být nejméně čtvrtina vlnové délky, tedy přibližně 1m [5].

### Geometrická specifika prostoru

V případě, že architektura prostoru obsahuje jakékoliv geometrické zvláštnosti a specifika, měla by jim být v rámci rozmístění měřicích bodů věnována zvláštní pozornost [5, 7]. Takovými zvláštnostmi mohou být například výklenky v obvodových stěnách, tribuny, balkony nebo prostory se sníženými podhledy (typicky právě oblasti pod převisy tribun a balkonů). V těchto oblastech by měl být zvolen dostatek měřicích bodů s ohledem na to, jakou částí případného publika budou obsazeny. Z hlediska prostorového průměrování je vhodné k těmto oblastem přistupovat individuálně a měřicí body v nich nezahrnovat do celoprostorového průměru, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků některých parametrů [7].

V případě, že je sál vybaven zatahovacími závěsy či mobilními stěnami, které umožňují rozdělení jeho prostoru, je vhodné jako další variantu rozložení měřicích bodů těmito prvky prostor rozdělit, a ke každé z těchto dispozic přistoupit individuálně [16].

## Podmínky v čase měření

Podmínky a stav samotného sálu se velmi často podstatně liší od situace, kdy v prostoru probíhá reálná produkce. Tyto odlišné podmínky mohou způsobovat zásadní snížení vypovídací hodnoty vypočtených objektivních akustických parametrů v případě, že jim není v rámci měřicího procesu věnována pozornost.

### Obsazení sálu

Prvním a často i nejvýznamnějším rozdílem je skutečnost, že během měření sál není obsazen takovým počtem osob jako v případě skutečné produkce. Norma [5] definuje tři různé stavy obsazení: neobsazený, studiový (pouze s účinkujícími) a obsazený (obsazeno 80% až 100% sedadel). Pro dobu dozvuku sice existují korekce, jakými lze získat z měření neobsazeného prostoru hodnoty pro sál obsazený, nicméně pro ostatní parametry tyto korekce definovány nejsou.

Jednou z možností, jak tuto odlišnost korigovat v rámci měření objektivních parametrů, je nahradit publikum přiměřeným množstvím zvukově absorpčních prvků rovnoměrně rozprostřených v oblastech, kde by se publikum (a i účinkující) během produkce vyskytovali. V případě, že je sál vybaven sedadly s hutným polstrováním, většinou tuto funkci dostatečně zajišťují samotná sedadla, a tak dodatečná instalace absorbérů není nutná [7].

### Vybavení sálu

Stejně tak jako u obsazení sálu publikem a účinkujícími, i vybavení instalované v čase měření by mělo co nejvíce odpovídat situaci reálné produkce. Ideální je tedy během měření zajistit podium včetně židlí pro účinkující, notových stojanů, bicích nástrojů a dalších nezbytných rozměrnějších propriet. Stejně tak hlediště by mělo být osazeno dostatečným počtem židlí [5]. V rámci několika měření bylo zjištěno, že nevybavenost podia oproti stavu při skutečné produkci může zvýšit hodnoty síly zvuku  $G$  v celém sálu dokonce o víc jak decibel [7].

## 5.3 Optimalizace měřicích signálů

Použitý měřicí signál by měl disponovat co nejvyšší hodnotou parametru SNR. K tomu je potřeba optimalizovat jeho parametry konkrétnímu zkoumanému sálu. V případě použití TSP může být vhodný typ signálu snadno zvolen analýzou šumu pozadí. Toto téma překračuje rozsah této práce, nicméně takový nástroj byl vyvinut v rámci práce [4], ve které také může být nalezen detailní popis jeho funkce, která bude nyní krátce představena.

Systém vytvoří *warped* variantu TSP signálu s předem nastavenou vzorkovací frekvencí a délkou. Poté postupně posouvá třetinooktávovými pásmy zlomovou frekvenci  $f_c$ , na které signál přechází z logaritmické amplitudové charakteristiky na lineární, a pro každou verzi signálu počítá porovnáním se šumem pozadí parametr NRR (z anglického *Noise Reduction Ratio* – poměr potlačení šumu). Verzi signálu s nejnižší



hodnotou NRR poté určí jako optimální. Nutno doplnit, že v případě nalezení optima v signálu s  $f_c$  v prvním, resp. poslední zkoumaném pásmu, je vhodné pro měření použít lineární resp. logaritmickou verzi signálu TSP [4].

V případě použití jiné metody (např. MLS), je potřeba optimalizovat signál tak, aby splňoval kritéria použitelnosti dané metody (viz kapitola 2).

## 5.4 Analýza a zpracování získaných dat

Jakékoliv rušivé vlivy během měření mohou být zaznamenány do impulsových odezev prostoru. Některé vlivy, jako je např. stabilní hluk pozadí, nesmí být v rámci měření zanedbány. Ovšem některé typy zkreslení jako je špatné nastavení měřicího řetězce, chyba obsluhy či nenadálé události během měření, jsou v rámci následné analýzy akustických parametrů prostoru nežádoucí a je potřeba je eliminovat.

### Analýza časových průběhů

Po provedení samotného měření je před zahájením samotného výpočtu jednotlivých parametrů vhodné provést analýzu získaných impulsových odezev prostoru. Základní možností jak toto provést je běžná vizuální kontrola časových průběhů IR. Ačkoliv se to může obzvlášť v dnešní automatizované době jevit jako zastaralý postup, oko alespoň trochu zkušeného experimentátora dokáže v časovém průběhu signálu velice rychle odhalit různé typy zkreslení, od nenadálých a unikátních hluků z pozadí až po harmonické zkreslení v podobě vertikálních čar před počátkem impulsové odezvy.

Nejlépe je analýzu provádět průběžně přímo během měření prostoru, kdy není technicky náročné část měření opakovat či proces přizpůsobit objeveným rušivým vlivům a zvýšit tím tak vypovídací hodnotu výsledků.

### Úprava získaných dat

Před zahájením výpočtů je také vhodné získané impulsové odezvy částečně upravit. V případě použití programu vyvinutého v rámci této práce je to dokonce nezbytností. Zaznamenané průběhy je potřeba převést do číselných řad (v případě, že nejsou jako řady ukládány) a ty sjednotit do proměnných, které budou na vstupu programu importovány do pracovního prostoru. V případě zaznamenání delších úseků ticha (resp. šumu pozadí) před samotným vybuzením sálu měřícím signálem a po něm je také vhodné pro zrychlení běhu programu tyto úseky zkrátit.

Při ručním ořezávání signálů je však potřeba dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k nechtěnému odstranění důležitých momentů časového průběhu, jakými mohou být např. ozvěny sálu či úsek šumu před začátkem odezvy dostatečně dlouhý pro možnost hledání začátku IR metodou jeho porovnání.

## Hledání počátku impulsové odezvy

V případě využití jedné z metod hledání počátku impulsové odezvy představené v rámci kapitoly 4 této práce je nutné ji nejprve optimalizovat pro konkrétní paket zkoumaných impulsových odezev, aby byla schopna efektivně odstranit nežádoucí zkreslení a současně správně rozpoznat skutečný začátek IR. Možnosti optimalizace jednotlivých metod jsou popsány v rámci podkapitoly 4.4.1.

V případě použití vlastní metody je potřeba signály nejprve oříznout a poté uložit do zdrojového adresáře programu. Část programu zajišťující právě ořez IR by poté měla být vynechána.

## Oktávová filtrace

V případě použití built-in Matlab oktávových filtrů Butterworthova typu stejných parametrů, jaké byly použity v rámci implementace výpočtů v kapitole 4, by k filtraci průběhů mělo být použito výhradně filtru šestého řádu. Důvody této volby jsou obsahem podkapitoly 4.4.2. V případě použití jiných filtrů je nutné ověřit, zda splňují kritéria normy ČSN EN 61260 [12] a další, taktéž uvedená v kapitole 4.4.2. K tomu může dobře posloužit samostatný nástroj vyvinutého programu *FCT.m* (*Filter Check Tool*)

## Výpočet objektivních akustických parametrů

V případě použití algoritmu implementovaného v praktické části této práce není potřeba výpočetní část jakkoliv upravovat. Je doporučeno předem definovat, které parametry mají být spočteny, aby nedocházelo k plýtvání výpočetního výkonu a paměti na výpočty parametrů, které ve výsledku nebudou analyzovány.

## 5.5 Prezentace výsledků

### Frekvenční průměrování

Jak již bylo ukázáno v rámci analýzy dat reálného měření víceúčelového sálu, většina objektivních akustických parametrů je silně frekvenčně závislá. Vzhledem k tomu, že i případná optimalizace akustických vlastností prostoru vyžaduje pro různé frekvence různé postupy a prvky, frekvenční průměrování přes všechna zkoumaná oktávová pásma nemá prakticky žádnou vypovídací hodnotu o akustických podmínkách v sále a je proto nežádoucí.

Konkrétně víceúčelové sály ovšem z podstaty jejich předpokládaného využití nevyžadují tak detailní frekvenční analýzu, jaká se jeví potřebná např. pro špičkové koncertní prostory a divadla. Kompromisem může být zprůměrování výsledků v oktávách 125 Hz a 250 Hz, reprezentující chování sálu pro nízké frekvence, dále zprůměrování hodnot v oktávách 500 Hz a 1000 Hz pro reprezentaci odezvy sálu pro střední frekvence a konečně zprůměrování v oktávách 2000 Hz a 4000 Hz pro

frekvence vysoké. Tento přístup podporuje i norma ČSN EN ISO 3382 [5]. Jedná se však jen o jednu možnost, jak k frekvenčnímu průměrování přistupovat.

Autoři jednotlivých studií často prezentují svůj vlastní návrh včetně odůvodnění. Např. Barron v rámci [7] použil průměrování v oktávách 125-250 Hz a 500-2000 Hz, čímž rozdělil frekvenční rozsah na oblast basových a středových tónů. Toto rozhodnutí odůvodňuje tím, že právě mezi těmito dvěma frekvenčními pásmy je největší rozdíl z hlediska množství a principů pohlcování akustické energie. Pro pohlcení basových tónů 125-250 Hz je většinou potřeba využít rezonančních absorbérů, zatímco pro frekvence vyšší postačí porézní látky.

## Prostorové průměrování

Stejně jako frekvenčně je většina zkoumaných parametrů i značně prostorově závislá. Z toho důvodu není vhodné v rámci výsledků prezentovat celoprostorové průměry, jelikož ty nevypovídají nic o místních podmínkách a o pozicích nejlepších a nejhorších oblastí hlediště [7].

Výjimku tvoří parametry, jejichž hodnoty se v prostorovém rozložení sálu mění jen lehce. Typickým příkladem je např. doba dozvuku (viz kapitola 4.4.3). Některé parametry také vykazují zřetelnou závislost jejich hodnot na vzdálenosti měřicího bodu od zdroje. Pro takové může být vhodné i grafické vynesení této závislosti. Typickým příkladem může být síla zvuku  $G$ .

Prostorové průměrování několika sousedních měřicích bodů k rozdělení celého sálu do několika menších oblastí už ovšem smysl má. Zejména, vyskytují-li se v sále oblasti s určitými architektonickými zvláštnostmi, které byly popsány výše, je vhodné k nim přistoupit individuálně. V případě optimalizace akustických vlastností sálu je pak možné tyto jednotlivé části specificky přizpůsobit a vyčlenit tím tak prostory, kterým bude přiřazena speciální funkce. Např. lze takto celý sál optimalizovat pro hudební produkci a v rámci jeho jedné části se více zaměřit na zřetelnost pro potřeby diskusí a přednesů mluveného slova.

Nutno dodat, že v případě jakéhokoliv prostorového průměrování by do výpočtů neměly být začleněny hodnoty z oblastí se sníženými podhledy (pod tribunami a balkony), zejména pak u parametrů  $EDT$ ,  $C_{50}$  a  $C_{80}$  [7].

V případě jakéhokoliv průměrování hodnot parametrů, ať už přes frekvenční pásma nebo měřicí body, se u všech parametrů používá aritmetický průměr. Jedinou výjimku tvoří míra počáteční boční energie  $J_{LF}$ , která musí být průměrována energeticky [5].

## 6. Závěr

Měření impulsové odezvy v akustice představuje ideální možnost, jak z malého množství dat získat komplexní informace o akustických vlastnostech zkoumaného prostoru. K jejich získání je ovšem kritický správný postup a eliminace chyb během celého měřicího a výpočetního procesu.

V rámci této práce byly metody měření impulsové odezvy popsány na teoretické úrovni, včetně nastínění možných omezení jejich použití a způsobů optimalizace měřicích signálů. Byly také představeny jednotlivé objektivní akustické parametry, získatelné právě z průběhů impulsových odezev, s důrazem kladeným na jejich korelaci se subjektivním vjemem zvuku.

V praktické části byl vytvořen výpočetní nástroj pro získání těchto parametrů, jehož funkce byla ověřena na datech reálného měření víceúčelového sálu. Následná analýza ukázala určité závislosti a korelace jednotlivých parametrů z hlediska prostorových a frekvenčních vlastností, které posloužily jako podklady k návrhu měřicího postupu pro víceúčelové sály.

Právě v podobě měřicího procesu existují určitá rizika specifická pro víceúčelové sály, která mohou vypovídací hodnotu prezentovaných výsledků ovlivnit v případě, že jim není věnována pozornost. Nedostatečné množství literatury a slabá konkrétnost technických norem ohledně jednotlivých parametrů a průběhu samotného měřicího procesu má za následek, že se přístupy jednotlivých autorů k interpretaci výsledků často zásadně liší a jejich závěry se tak obtížně dávají do souvislostí.

V rámci poslední kapitoly této práce byl proto navržen postup, jakým způsobem by mohlo být měření impulsové odezvy ve víceúčelovém sálu provedeno. Zapracovány byly poznatky z analýzy reálných dat, které byly porovnány s teoretickými předpoklady a závěry jiných studií. V případě provedení dalších měření víceúčelových sálů by sjednocení jejich závěrů mohlo přinést další poznatky, které by měly být v rámci zkoumání těchto prostorů zohledněny. Tyto závěry mohou potvrdit, vyvrátit či doplnit závěry získané v rámci této práce a výsledkem by tak mohl být již dostatečně ověřený a detailní popis postupu získávání objektivních akustických parametrů víceúčelových sálů.

Zvláštní pozornost by také měla být věnována metodám hledání začátku impulsové odezvy. Pokus plně algoritmizovat tyto metody a eliminovat tak vliv subjektivního přístupu lidského faktoru může být také předmětem dalšího výzkumu. Několik metod hledání počátku impulsové odezvy bylo vyvinuto v rámci této práce, ty mohou být stejně jako všechny ostatní závěry této práce využity k dalšímu rozvíjení dané problematiky.

## Použitá literatura

- [1] KUTTRUFF, Heinrich. *Room acoustics*. 5th ed. London: Spon Press/Taylor, 2009, s. 204-261. ISBN 0415480213.
- [2] STAN, Guy-Bart, Jean-Jacques EMBRECHTS a Dominique ARCHAMBEAU. Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*. 2002, 50(4).
- [3] BORISH, Jeffrey a James B. ANGELL. An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise. In: *Journal of the Audio Engineering Society*. New York: JAES, 1983, s. 478-488. 31: 7/8.
- [4] TUČEK, Jan. *Měření impulsové odezvy v akustice*. Praha, 2010. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [5] ČSN EN ISO 3382-1. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky: Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [6] EVEREST, F. Alton a Ken C. POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. New York: McGraw-Hill, 2009, s. 151-178. ISBN 9780071603331
- [7] BARRON, Mike. Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoustical Science and Technology*. 2005. 26(2): 162-169. DOI: 10.1250/ast.26.162. ISSN 1346-3969. Dostupné také z: <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/ast/26.162?from=CrossRef>
- [8] BRADLEY, J.S. Review of objective room acoustics measures and future needs. *Proceedings of the ISRA*. Melbourne, 2010.
- [9] VONDRÁŠEK, Martin a Michael ANTEK ML. Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů. In: *Akustické listy*. Praha: Česká akustická společnost, 2005, s. 9-18. ročník 11, číslo 3.
- [10] GADE, A.C. Acoustic properties of concert halls in the US and in Europe. In: *Proc Sabine Centennial Symposium*. New York: Acoustical society of America, Mass. Woodbury, 1994, s. 191.
- [11] BROTHÁNEK, Marek, Vojtěch JANDÁK, Ondřej JIŘÍČEK a Petr ŠVEC. Monaural and binaural parameters of Rudolfinum concert halls in Prague. *Applied Acoustics*. 2012. 73(11): 1201-1208. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.03.014. ISSN 0003682x.

- [12] ČSN EN 61260. *Elektroakustika - Oktávové a zlomkooktávové filtry*. 1997. Praha: ÚNMZ.
- [13] BIANCHI, Giovanni a Roberto SORRENTINO. *Electronic filter simulation*. New York: McGraw-Hill, 2007. s. 17-20. ISBN 978-0-07-149467-0.
- [14] Omnidirectional Parametric Loudspeaker. *Blogs de La Salle BCN* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://blogs.salleurl.edu/acoustics/2013/09/05/omnidirectional-parametric-loudspeaker/>
- [15] Neumann KU Dummy Head Binaural Stereo Microphone. *ProAudioEurope.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.proaudioeurope.com/microphones/stereo-mics/neumann-ku-100-dummy-head-binaural-stereo-microphone.html>
- [16] LUYKX, Maarten P.M. a Martijn L.S. VERCAMMEN. *Evaluation and measuring procedure for strength in sport halls. Acoustics in Practice*. 2013, 1(No. 1).
- [17] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, s. 65. ISBN 80-01-02460-1.
- [18] ITU Recommendation P.58: 1994, *Head and torso simulator for telephonometry*
- [19] MORISE, Masanori, Toshio IRINO a Hideki BANNO. Warped-TSP: An acoustic measurement signal robust to background noise and harmonic distortion. In: *Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science)*. New York: Wiley, 2007, s. 18-26. ISSN 10420967.
- [20] AcMus - Room Acoustic Parameters. *File Exchange - MATLAB Central* [online]. 2006 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11392-acmus-room-acoustic-parameters/content/impressao.m>
- [21] LONG, Marshall. *Architectural acoustics*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2006, s. 285-312. ISBN 0-12-455551-9.
- [22] SIMON, Ondřej. *Akustické měření impulsové odezvy pomocí metody TSP*. Praha. 2014. Práce v rámci projektu v týmu. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická
- [23] SIMON, Ondřej. *Implementace měření impulsové odezvy metodou TSP a výpočet objektivních akustických parametrů prostoru*. Praha. 2015. Práce v rámci individuálního projektu. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická

## Dodatek 1

### Seznam obrázků a tabulek

<i>Obrázek 1: Princip impulsové odezvy LTI soustavy</i> .....	8
<i>Obrázek 2: Princip metody TSP</i> .....	10
<i>Obrázek 3: Časový průběh logaritmického TSP</i> .....	11
<i>Obrázek 5: Proklad poklesové křivky</i> .....	14
<i>Obrázek 6: Doporučené toleranční pásmo doby dozvuku pro koncertní síně</i> .....	15
<i>Obrázek 7: Struktura pracovního adresáře</i> .....	22
<i>Obrázek 10: Výstup programu</i> .....	25
<i>Obrázek 11: Zkreslení impulsové odezvy</i> .....	26
<i>Obrázek 12: Princip hledání začátku signálu</i> .....	27
<i>Obrázek 13: Příklady použití metod hledání začátku impulsové odezvy</i> .....	29
<i>Obrázek 14: Frekvenční odezvy jednotlivých typů filtrů</i> .....	33
<i>Obrázek 15: Útlum oktávových filtrů II. řádu - Matlab Filter Visualisation Tool</i> .....	33
<i>Obrázek 16: Frekvenční odezva filtru VI. řádu a limit ČSN</i> .....	34
<i>Obrázek 17: Model sálu Elim v Písku</i> .....	36
<i>Obrázek 18: Rozložení měřicích bodů</i> .....	37
<i>Obrázek 19: Prostorová závislost parametru <math>C_{80}</math> v hale Elim</i> .....	38
<i>Obrázek 20: Prostorová závislost parametru EDT v hale Elim</i> .....	39
<i>Obrázek 21: Prostorová závislost parametru <math>C_{50}</math> v hale Elim</i> .....	40
<i>Obrázek 22: Porovnání prostorové závislosti parametrů <math>C_{50}</math> a <math>C_{80}</math> v hale Elim</i> .....	41
<i>Obrázek 23: Prostorová závislost parametru G v hale Elim</i> .....	42
<i>Obrázek 24: Prostorová závislost parametru <math>J_{LF}</math> v hale Elim</i> .....	43
<i>Obrázek 25: Prostorová závislost parametru IACC v hale Elim</i> .....	44
<i>Obrázek 26: Prostorová závislost parametru IACC v pásmu 4 kHz v hale Elim</i> .....	45
<i>Obrázek 27: Frekvenční závislost parametrů <math>T_{30}</math> a EDT v hale Elim</i> .....	46
<i>Obrázek 28: Frekvenční závislost parametrů <math>C_{50}</math> a <math>C_{80}</math> v hale Elim</i> .....	46
<i>Obrázek 29: Frekvenční závislost parametru G v hale Elim</i> .....	47
<i>Obrázek 30: Frekvenční závislost parametru <math>J_{LF}</math> v hale Elim</i> .....	48
<i>Obrázek 31: Frekvenční závislost parametru IACC v hale Elim</i> .....	48
<i>Obrázek 33: Všesměrový zdroj zvuku</i> .....	51
<i>Obrázek 34: Schéma p-p sondy</i> .....	52
<i>Obrázek 35: Metody binaurálního záznamu</i> .....	53
<i>Obrázek 36: Návrh rozložení měřicích bodů</i> .....	55
<i>Obrázek 37: Návrh rozložení měřicích bodů</i> .....	55
<i>Tabulka 1: Konverze MLS signálu</i> .....	9
<i>Tabulka 2: Objektivní akustické parametry</i> .....	21
<i>Tabulka 3: Odchytky hledání začátku signálu</i> .....	28
<i>Tabulka 4: Odchytky parametru <math>C_{50}</math> v závislosti na metodě hledání počátku IR</i> .....	30
<i>Tabulka 5: Odchytky parametru EDT v závislosti na metodě hledání počátku IR</i> .....	30
<i>Tabulka 6: Odchytky parametru IACC<sub>early</sub> v závislosti na metodě hledání počátku IR</i> .....	31

<i>Tabulka 7: Odchyly parametru <math>J_{LF}</math> v závislosti na metodě hledání počátku IR</i> .....	31
<i>Tabulka 8: Přijímací meze poměrného útlumu oktávových filtrů</i> .....	32
<i>Tabulka 9: Filtry vyhovující limitům ČSN</i> .....	34
<i>Tabulka 10: Délka IR oktávových filtrů</i> .....	35
<i>Tabulka 11: Filtry vyhovující kritériu délky IR</i> .....	35
<i>Tabulka 12: Filtry vyhovující oběma kritériím</i> .....	35
<i>Tabulka 13: Objektivní akustické parametry haly Elim</i> .....	37
<i>Tabulka 14: Maximální odchylka směrovosti zdroje v decibelech při buzení oktávovými pásmy růžového šumu a měřená ve volném poli</i> .....	51
<i>Tabulka 15: Minimální počet přijímacích poloh jako funkce velikosti poslechového prostoru</i> .....	54



## Dodatek 2

### Obsah příloženého CD

*BP-Simon-2015*

-----*bp\_simon.pdf*

Elektronická bakalářská práce

-----*kompletni\_vysledky.xlsx*

Exportované výsledky haly Elim

-----*mtb\_source*

Zdrojový adresář pro Matlab