

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru
Elektronika

Ing. Martin Sýkora

Akustická měření pomocí hudebního signálu

Školitel: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D
Datum státní doktorské zkoušky: 30. 5. 2011
Datum odevzdání práce: 8. 11. 2013

V Plzni, 2013

Anotace

Cílem předkládané disertační práce je prozkoumat možnosti využití hudebního signálu při měření v oblasti akustiky. Těžiště práce spočívá v hledání vhodných fragmentů hudebního signálu a v hledání metod schopných využít těchto fragmentů k získání některých akustických parametrů prostoru. Konkrétně jsou detailně popsány dvě metody měření doby dozvuku založené na využití hudebního signálu. Součástí práce je i realizace experimentu, při kterém byly metody založené na využití hudebního signálu porovnány s měřicími metodami běžně užívanými.

Klíčová slova

Akustická měření, ozvučovací systém, hudební signál, prostorová akustika, doba dozvuku

Abstract

The main goals of this thesis are to explain possibilities of acoustic measurement with music signal. Main part of the thesis deals with searching specific fragments in music signal and development measurement methods, which use founded fragments to obtain some acoustic parameters. In detail there are depicted two methods of reverberation time measurement. Important part of thesis is also experiment, which was realized to compare methods based on music signal and common used methods.

Key words

Acoustic measurement, sound system, music audio signal, room acoustics, reverberation time

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této disertační práce.

V Plzni dne

.....

Martin Sýkora

Poděkování

Tuto práci bych chtěl věnovat všem, kteří mě inspirovali a podporovali v mém úsilí, zejména svému školiteli, Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D.

Obsah

1	Úvod do současného stavu problematiky	1
1.1	Cíle disertační práce.....	1
1.2	Ozvučení, ozvučovací systémy	2
1.3	Ozvučení, ozvučovaný prostor.....	3
1.4	Vztah ozvučovacího systému a prostoru	3
2	Měření.....	5
2.1	Parametry ozvučovacího systému.....	5
2.1.1	Měření přenosové funkce zvukového systému.....	5
2.1.2	Měření zpoždění zvukového systému.....	6
2.2	Parametry prostorové akustiky – doba dozvuku.....	8
2.2.1	Měření doby dozvuku metodou přerušného šumu.....	9
2.2.2	Měření doby dozvuku metodou zpětné integrace.....	9
2.3	Impulsní měřicí metody	10
2.3.1	Realizace impulsních metod.....	11
2.3.2	MLS signály	11
3	Měřicí systém na bázi hudebního signálu	13
3.1	Hudba jako měřicí signál	13
3.1.1	Obecný popis hudebního signálu.....	14
3.1.2	Hudební žánr – subjektivní posouzení.....	15
3.1.3	Výběr skladeb pro porovnání vlastností hudebního signálu.....	16
3.1.4	Časové průběhy hudebního signálu	17
3.1.5	Spektrální vlastnosti hudebního signálu	18
3.1.6	Časově-spektrální rozbor hudebního signálu	20
3.2	Časový rozbor	21
3.3	Požadavky na měřicí systém na bázi hudebního signálu	23
3.4	Idea návrhu měřicího systému	23
3.5	Detekce zpoždění	25
3.6	Volba měřicího signálu	27
3.6.1	Algoritmus výběru měřicího signálu	27
3.6.2	Délka okna.....	31
3.6.3	Optimalizace volby měřicího signálu	34
3.6.4	Detailní rozbor problematických pásem.....	34
3.6.5	Shrnutí výsledků korelační analýzy.....	35
3.7	Měření doby dozvuku pomocí hudebního signálu.....	36
3.8	Vyhodnocení doby dozvuku metodou integrace impulsové odezvy	37
3.8.1	Aplikace metody integrované impulsové odezvy.....	37
3.9	Přímé porovnání energetického poklesu.....	39
3.9.1	Aplikace metody vyhodnocení přímého poklesu energie.....	40
3.9.2	Parametry vyhodnocení	41
4	Experiment	44
4.1	Použitý prostor	44
4.2	Měření doby dozvuku v sále	45

4.3	Použitý ozvučovací systém	46
4.4	Použitá měřicí technika.....	47
4.5	Výsledky experimentu	49
4.5.1	Metoda integrace impulsové odezvy – použití MLS signálu	49
4.5.2	Použití hudebního signálu	50
4.5.3	Výsledky metody přímého porovnání poklesu energie	50
4.5.4	Porovnání naměřených hodnot	51
5	Dosažené výsledky	53
6	Závěr	55
	Literatura	57
	Seznam zkratk a specifických názvů.....	59
	Seznam symbolů	60
	Seznam obrázků.....	61
	Seznam tabulek	63
	Tištěné přílohy práce.....	64
	Příloha A – časové průběhy hudebního signálu	65
	Příloha B – Spektrální rozbor hudebního signálu.....	65
	Příloha C – Časově-spektrální rozbor hudebního signálu	72
	Příloha D – Detekce měřicího signálu, korelační analýza.....	75
	Příloha E – Porovnání doby dozvuku	84
	Seznam publikací.....	85
	Zkrácený profesní životopis	88

1 Úvod do současného stavu problematiky

Současný technologický pokrok velmi pomáhá rozvoji ozvučovacích systémů. Je lhostejné, zda jde o malé komerční systémy, např. domácí kina, ozvučení automobilů, či velké profesionální aparatury. Ve všech těchto případech použité číslicové zpracování zvuku pomocí signálových procesorů umožňuje takové úpravy signálu, jež jsou v analogové podobě nerealizovatelné, případně jen pomocí obvodově velmi komplikovaných zařízení. Rostou tak sice možnosti zařízení jako takových, zároveň však stoupají nároky na techniku potřebnou k jejich vývoji. Nedílnou součástí vývoje je i měření dosažených parametrů. Je tedy logické, že úměrně s rostoucí složitostí ozvučovacích systémů rostou i nároky na měřicí metody a techniku. Další rozvoj měření v tomto oboru je vázán faktem, že ozvučovací systémy jsou dnes široce uživatelsky konfigurovatelné a je možné je optimálně nastavit jednotlivě pro každou aplikaci. Dalším vývojovým stupněm je potom možnost měnit konfiguraci ozvučení během produkce. Pokud je ozvučovací systém umístěn v auditoriu, kde probíhá koncert, je výsledný zvukový vjem posluchače ovlivněn nejen vlastnostmi ozvučovacího systému, ale i akustickými vlastnostmi prostoru. Právě tyto vlastnosti se mohou rapidně měnit, například se změnou obsazení hlediště nebo se změnou teploty a vlhkosti vzduchu. Během relativně krátké doby tedy může dojít k výrazné změně celkového zvukového projevu, kterou je díky současné technice teoreticky možné kompenzovat.

Aby bylo možné ozvučení optimalizovat pro konkrétní reálnou aplikaci, je nutné situaci nejdříve vhodně popsat. To znamená především změřit parametry jak ozvučovacího systému, tak prostoru, ve kterém pracuje. Samotná fáze aplikace měřicí metody v reálné situaci je výrazně složitější.

Je totiž potřeba zvážit jak praktické aspekty zvolené měřicí metody, tak její technická řešení, neboť pracovní podmínky během hudební produkce jsou velmi často obtížné. Problematika měření parametrů ozvučovacích systémů a akustických vlastností prostředí v reálných podmínkách je velmi obšírná a v praxi de facto založená na neustálém hledání kompromisů mezi zdánlivě protichůdnými požadavky.

1.1 Cíle disertační práce

Tato disertační práce je orientována do oblasti měření parametrů ozvučovacích systémů a akustických parametrů prostorů v reálných podmínkách. Hlavním cílem práce je posoudit možnost použití hudebního signálu pro tento druh měření. Motivace k výzkumu měřicí metody založené na hudebním signálu je zřejmá. Zvukové aparatury jsou primárně konstruovány

k přenosu hudebního nebo řečového signálu, takže za normálních okolností a provozních podmínek by nemělo docházet k jejich zbytečnému a nepřírozenému namáhání. K takovému přetížení naopak může dojít při použití některých specifických měřicích signálů. Neméně významnou pohnutkou k tomuto zkoumání je možnost provádět měření během samotné produkce nebo možnost provádět měření některých parametrů prostorové akustiky v obsazeném sále. Diváci by v takovém případě nebyli obtěžováni signály, které na poslech působí rušivě - jako například hlasitě reprodukováné pulsy, šumy aj.

Problematiku užití hudebního signálu pro akustická měření lze rozdělit na několik dílčích částí a cíle disertační práce stanovit následovně:

- Rozebrat vlastnosti hudebního signálu z technického hlediska. Zhodnotit jeho časový průběh, spektrální vlastnosti a další parametry. Porovnat jej s běžně užívanými měřicími signály.
- Analyzovat parametry ozvučovacího systému a najít metodu, jak některé tyto parametry měřit pomocí hudebního signálu.
- Analyzovat akustické parametry prostoru – zejména dobu dozvuku a najít metodu měření založenou na hudebním signálu.
- Provést experiment. Vyzkoušet prakticky metody měření založené na hudebním signálu. Zhodnotit získané výsledky a porovnat je s hodnotami získanými klasickými metodami užívanými k měření v prostorové akustice.

1.2 Ozvučení, ozvučovací systémy

Ozvučovacím systémem je míněn soubor elektrických a elektroakustických prvků či přístrojů určených k zesílení a reprodukci obecného zvukového (zpravidla hudebního či řečového) signálu. Praktická realizace ozvučovacího systému může být velice různorodá. Může se lišit účelem použití, složitostí, rozsahem, kvalitou reprodukce atd. Příkladem těch sofistikovanějších jsou třeba vícekanálové systémy v kinech, rozsáhlé ozvučovací aparatury typu line-array pro použití na koncertech, vícekanálové audiosystémy v automobilech vyšší třídy a podobně. Typickým znakem takových systémů je, že jsou obvykle vícepásmové a vícekanálové. Z hlediska jejich konstrukčního řešení to znamená, že kromě velkého počtu samotných elektroakustických měničů obsahují i odpovídající počet zesilovačů, signálových procesorů a dalších zařízení umožňujících úpravy zvuku a řízení systému jako celku.

Účelem ozvučovacího systému je co nejvěrněji přenést audiosignál a zabezpečit ve všech místech posluchačům optimální poslech. Neuvažujeme teď subjektivní názor posluchače na to, co

je optimální sluchový vjem, respektive optimální poslech. Z technického hlediska považujeme za optimální poslech stav, kdy je v celém auditoriu zajištěna frekvenčně vyrovnaná reprodukce s odpovídající hlasitostí. Co nejvíce se přiblížit takovému stavu je však často obtížný a zdoluhavý proces založený většinou na hledání kompromisu mezi omezenými možnostmi ozvučovacího systému a danými podmínkami prostředí.

Ozvučovací systém, resp. jeho jednotlivé komponenty, jsou z aplikačního hlediska charakterizovány technickými parametry, jakými jsou například maximální dosažitelný akustický tlak, frekvenční rozsah, vyrovnanost frekvenční charakteristiky, směrovost vyzařování jednotlivých reproduktorů a některé další. Jejich znalost je podmiňujícím předpokladem pro správnou volbu ozvučovacího systému do dané aplikace a následnou optimalizaci ozvučení.

1.3 Ozvučení, ozvučovaný prostor

Stejně jako ozvučovací systém má i ozvučovaný prostor určité akustické vlastnosti, které vnímaný zvuk ovlivňují. Akustické vlastnosti místnosti jsou dány celou řadou parametrů, které jsou detailně popsány v literatuře zaměřené na prostorovou akustiku např. [1]. Základním parametrem prostorové akustiky je doba dozvuku. Tu ovlivňují především rozměry místnosti, resp. její objem a povrch stěn, dále potom akustická pohltivost použitých materiálů. Kromě doby dozvuku jsou dalšími důležitými parametry rozložení akustického pole, vlastní kmity místnosti, difuzita a některé další. Znalost těchto parametrů je spolu se znalostí parametrů ozvučovacího systému nezbytná právě při návrhu ozvučení jako celku.

1.4 Vztah ozvučovacího systému a prostoru

Výsledný zvukový vjem posluchače je utvářen superpozicí zdroje zvuku a akustických vlastností prostoru. Z hlediska optimalizace ozvučení je tedy nezbytné znát, resp. měřit parametry obojího. Samozřejmostí je, že pro dosažení kvalitního ozvučení se musí vlastnosti ozvučovacího systému a prostoru vzájemně doplňovat. V rámci procesu optimalizace musíme na základě měření a kontrolního poslechu upravit příslušné parametry buď prostorové akustiky, či ozvučovacího systému.

Intuitivně můžeme předpokládat, že měnit parametry ozvučovacího systému v určitých mezích bude snazší, než měnit akustické vlastnosti prostoru. Zatímco úprava vlastností ozvučovacího systému se realizuje změnou nastavení ovládacích prvků, změna parametrů ozvučovaného prostoru naproti tomu velmi často souvisí se stavebními úpravami. O takových úpravách lze uvažovat zpravidla pouze při výstavbě či rekonstrukci. Komplikovanější situace pak na-

stává v případě, kdy mají být akustické vlastnosti prostoru proměnné, například podle aktuálního využití. Za tím účelem byly vyvinuty nejrůznější pohyblivé žaluzie, akusticky pohltivé paravány a podobné mobilní prvky, které umožňují měnit například dobu dozvuku. Taková řešení jsou technicky složitá, nákladná a změna parametrů je obvykle možná jen v omezeném rozsahu.

Uvážíme-li fakt, že parametry prostředí jsou v čase proměnné, může být výsledný poslechový vjem v různých momentech a místech značně rozdílný. Realizace kvalitního ozvučení je potom rozsáhlý a komplexní problém, jenž se fakticky neobejde bez složitého hledání kompromisu. A to nejen mezi čistě akustickými parametry, ale často i mezi dalšími, např. bezpečnostními či designovými požadavky. Nejschůdnější cestou je takový postup, kdy je prostorová akustika zohledněna již v rámci architektonického řešení. Dále následuje volba vyhovujícího ozvučovacího systému a jeho správné rozmístění. Poslední krok představuje správné nastavení systému pro konkrétní aplikaci. Pokud se první zmíněné kroky nepodaří precizně provést, samotné nastavení systému je nemůže vždy v plné míře kompenzovat.

2 Měření

Nedílnou součástí optimalizace parametrů ozvučení je jejich měření. Nejprve je nutné zjistit, tedy nejčastěji změřit, výchozí stav. Také je třeba objektivním způsobem vyhodnotit změnu výsledného zvuku vzhledem k provedeným úpravám. Jak bylo naznačeno v úvodních kapitolách, problematiku ozvučení lze rozdělit na dvě části a stejným způsobem lze rozdělit problematiku měření, tedy je potřeba měřením:

- Stanovit vlastnosti ozvučovacího systému.
- Stanovit vlastnosti ozvučovaného prostoru.

Pro obě kategorie budou dále zmíněny parametry zajímavé jednak z hlediska optimalizace ozvučení a jednak takové, které je potenciálně možné měřit pomocí hudebního signálu.

2.1 Parametry ozvučovacího systému

Na tomto místě jsou uvedeny parametry ozvučovacího systému, které jsou podstatné z hlediska optimalizace ozvučení prostoru. Na ozvučovací systém je přitom pohlíženo jako na celek, jehož vstupem je signál v elektrické podobě, který je odpovídajícím způsobem přeměněn na akustický. Rovněž měření je orientováno na celkové parametry systému, nikoliv na parametry jednotlivých částí. Mezi takové parametry lze zařadit:

- Přenosové vlastnosti ozvučovacího systému.
- Zpoždění ozvučovacího systému.

2.1.1 Měření přenosové funkce zvukového systému

Základním parametrem, který ozvučovací systém charakterizuje, je přenosová funkce. Tou je myšlena obecně komplexní funkce popisující odezvu systému na vybuzení vhodným signálem. Matematicky je vyjádřena vztahem:

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1)$$

kde $X(j\omega)$ je obraz budicího signálu a $Y(j\omega)$ je obraz signálu po průchodu systémem. Frekvenční charakteristika je potom grafické vyjádření komplexního přenosu v závislosti na frekvenci. Vyjádření komplexního čísla v závislosti na frekvenci je však obtížné a nepraktické. Proto se frekvenční charakteristika dělí na amplitudovou a fázovou část – zvlášť se vyjadřuje reálná část, tj. amplitudová frekvenční charakteristika, a zvlášť fázová frekvenční cha-

rakteristika. Obecně měření přenosové funkce systému $G(j\omega)$ spočívá v porovnání obrazu výstupního signálu $Y(j\omega)$ s obrazem signálu budicího $X(j\omega)$. Volba vhodného budicího signálu je dána konkrétním druhem zkoumaného systému a možnostmi analýzy. V akustice se často k měření přenosových funkcí využívá bílého či růžového šumu. Bílý šum má v případě dostatečně dlouhého průměrování rovnoměrné spektrum a zároveň je schopen dostatečně vybudit zkoumaný systém v patřičně širokém frekvenčním rozsahu, neboť bílý šum má spektrum teoreticky nekonečně široké. K získání obrazu jednotlivých signálů lze s výhodou použít Fourierovu transformaci, resp. její modifikace vhodné pro aplikaci výpočetní techniky - FFT. Jistou nevýhodou může být v takovém případě potřebná délka průměrování.

2.1.2 Měření zpoždění zvukového systému

Důležitým měřeným parametrem je rovněž zpoždění v systému. Jeho vznik lze v systému připisat dvěma příčinám. Část vzniká při číslicovém zpracování signálu, kdy zařazováním číslicových filtrů a dalších bloků vzniká latence. Podstatnější část zpoždění vzniká až na akustické straně řetězce. Jde především o situaci, v níž je zvukový signál vyzařován do prostoru více měničů. V ideálním případě by se měly zvukové vlny šířit tak, aby dopadaly na ucho posluchače či měřicí mikrofon ve stejný okamžik. Konečná rychlost šíření zvuku potom znamená, že rozdílná vzdálenost jednotlivých zářičů od bodu poslechu určuje různou dobu šíření patřičného vzruchu prostorem. Může se tak stát, že signály, které byly na elektrické straně vyslány ve stejný okamžik, dorazí v akustické podobě do místa poslechu různě vzájemně zpožděny.

V předchozím textu byl popsán mechanismus vzniku zpoždění. Dále je potřeba zpoždění kvantifikovat a určit, s jakou rozlišovací schopností pracujeme. Rychlost šíření zvuku je dána vztahem:

$$c = 331,5 + 0,607 \cdot t_A \quad (2)$$

kde c je rychlost šíření zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a t_A teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]. Běžně se ve výpočtech při pokojové teplotě používá hodnota $344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pokud uvažujeme vzdálenost poslechového místa v řádu jednotek metrů a vzdálenost jednotlivých zářičů v řádu decimetrů až metrů, odpovídající zpoždění se tak pohybuje v řádech jednotek až desítek milisekund.

Za předpokladu číslicového zpracování signálu, tedy diskretizaci času, vychází základní jednotka zpoždění jako vzdálenost dvou vzorků – tedy vzorkovací perioda, jež je dána vztahem:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (3)$$

kde T_s [s] je vzorkovací perioda a f_s [Hz] vzorkovací frekvence. Při nejnižší běžně užívané vzorkovací frekvenci 44,1 kHz pak vychází vzorkovací perioda přibližně 23 μs . Vyjádříme-li

zpoždění nikoli v jednotkách času, ale jako počet vzorků, dostáváme se řádově na stovky vzorků. Toto číslo samozřejmě roste s vyšší použitou vzorkovací frekvencí.

Pokud budeme uvažovat opačným směrem, můžeme stanovit nejmenší vzdálenost, která odpovídá nejmenšímu rozlišitelnému okamžiku. Vycházíme z rychlosti šíření a vzorkovací periody, jak ukazuje vztah:

$$l_s = T_s \cdot c \quad (4)$$

Pokud do vztahu (4) dosadíme opět hodnoty pro pokojovou teplotu a nejnižší běžně užívanou vzorkovací frekvenci (44,1 kHz), dostáváme se k nejmenší vzdálenosti zhruba 9 mm. Tyto číselné hodnoty jsou důležité pro úvahu, jak přesně je potřeba provádět měření. Poukazují na skutečnost, že je nezbytné zabývat se zpožděním s přesností v řádu jednotlivých vzorků. Posun o několik vzorků odpovídá fyzickému posunu o několik centimetrů. Pro frekvenci a délku zvukové vlny platí následující vztah:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

Pokud za rychlost šíření dosadíme $c = 344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a vlnovou délku uvažujeme v řádu jednotek centimetrů, dostáváme se k frekvencím řádu kilohertzů, které leží ve slyšitelném pásmu. Z toho plyne, že posunutí o několik centimetrů respektive zpoždění o několik vzorků může způsobit slyšitelnou interferenci. Typickým projevem takového posunutí je tzv. efekt hřebenevého filtru, podrobnosti k tomuto jevu jsou blíže popsány v literatuře [2].

Nejjednodušší cestou, jak zpoždění zjistit, je vyšetření geometrického uspořádání zdrojů zvuku a jednotlivých měřicích míst v prostoru. Jestliže známe vzájemnou polohu zdroje zvuku, resp. více zdrojů a mikrofonu, můžeme na základě jejich vzdálenosti a ze známé rychlosti šíření zvuku potom vypočítat příslušné zpoždění. Takto ale můžeme stanovit pouze zpoždění vzniklé šířením zvuku v prostředí. Nelze tímto způsobem zjistit latenci signálu vznikající číslicovým zpracováním zvuku v rámci ozvučovacího systému. Ta je sice obvykle konstantní a ve srovnání se zpožděním daným rozdílnou polohou zdrojů a přijímacího místa menší (běžně pouze několik milisekund). Avšak jak plyne z předchozí úvahy, je nutné zabývat se zpožděním na úrovni jednotlivých vzorků, neboť i takové zpoždění může za určitých okolností způsobit slyšitelné změny ve zvuku.

Další úskalí při měření zpoždění spočívá v rozměrech zdrojů zvuku a přesnosti měření vzdálenosti. Jak bylo odvozeno výše, nejmenší rozlišitelná vzdálenost daná vzorkovacím kmitočtem je menší než 1 cm. Přitom rozměry běžných ozvučovacích reproboxů se pohybují řádově v desítkách centimetrů, vzdálenost jednotlivých zdrojů a poslechového místa může dosahovat až několika desítek metrů. Z toho plyne potřeba měřit délky řádově v metrech

s přesností lepší než centimetry a navíc v provozních podmínkách. Měření vzdáleností klasickým metrem je za daných okolností nepohodlné a nepřesné. Sofistikovanější variantou a v praxi často používanou je laserový dálkoměr, ale i tak zde stále zůstává mnoho negativních faktorů, které mají vliv na přesnost.

Lepším způsobem, jak získat celkové zpoždění, je měření zpoždění mezi elektrickým signálem na vstupní straně a obrazem toho samého signálu zachyceného měřicím mikrofonem v poslechovém bodě. K tomu lze výhodně použít vzájemnou korelační analýzu těchto signálů. Jde o běžně užívanou metodu ke zjišťování shodnosti či podobnosti signálů nebo ke zjištění, zda je signál periodický. Protože pracujeme se signálem diskretizovaným v čase, je vzájemná korelace dvou signálů vyjádřena posloupností podle vztahu:

$$R_{xy} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M x(i + \tau) \cdot y(i) \quad (6)$$

kde $x(n)$ je posloupnost reprezentující jeden signál, posloupnost $y(n)$ reprezentuje druhý signál a R_{xy} potom odpovídá vzájemné korelační funkci obou signálů. Vztah (6) lze interpretovat tak, že se jedná o funkci vzájemného posunutí dvou vyšetřovaných funkcí. Maximum funkce potom odpovídá situaci, kdy jsou obě zkoumané posloupnosti nejpodobnější. Pokud je jedna posloupnost podmnožinou druhé, bude se maximum korelační funkce nacházet v bodě, v němž se shodná místa překryjí. Této vlastnosti je možné využít právě k detekci zpoždění známého signálu, neboť poloha maxima od počátku potom odpovídá vzájemnému zpoždění signálu. Blíže se korelační analýze věnuje literatura např. [3].

2.2 Parametry prostorové akustiky – doba dozvuku

Základním parametrem určujícím akustické vlastnosti prostoru je doba dozvuku. Rozumíme jí čas, za který poklesne hladina zvuku v místnosti po vypnutí zdroje o 60 dB. Doba dozvuku, resp. její frekvenční průběh, má vliv na subjektivní vnímání prostoru a celkový sluchový vjem. Vhodná délka dozvuku v konkrétním případě závisí na druhu využití prostoru, velikosti místnosti a dalších okolnostech. Bližší informace lze nalézt v literatuře orientované na prostorovou akustiku [4] či v normách [5] a [6]. Dobu dozvuku lze zjistit výpočtem nebo měřením. Pro výpočet je nutné znát objem místnosti, dílčí plochy jednotlivých použitých materiálů a jim příslušné činitele akustické pohltivosti. Běžně se k výpočtu užívá Eyringova, Sabinova či Milingtonova vzorce, které lze opět nalézt v příslušné literatuře [4]. Spolehlivějším způsobem

jak dobu dozvuku zjistit, je měření. Standardně se používají dva různé postupy, jež jsou specifikovány příslušnými normami.

2.2.1 Měření doby dozvuku metodou přerušného šumu

Metodu tzv. přerušného šumu popisuje mezinárodní norma [5] a [7]. Při měření je v předemné místnosti vybudena hladina akustického tlaku o 40 dB vyšší, než je hladina hlučkového pozadí. Budícím signálem je obvykle bílý šum. Poté je zdroj vypnut a zaznamenává se pokles hladiny zvuku. Čas, za který hladina poklesne o 30 dB, je základem pro určení doby dozvuku. Protože doba dozvuku je definována pro pokles o 60 dB, určí se následně regresí křivky získané pro pokles menší – právě o 30 dB. Vysvětlení takového postupu spočívá ve skutečnosti, že by potřebná počáteční hladina zvuku v místnosti byla příliš vysoká. Pokud uvažujeme dodržení odstupe od hluku pozadí minimálně o 10 dB, potřebný pokles 60 dB a hodnotu rušivého pozadí např. 40 dB, vychází počáteční hladina akustického tlaku 110 dB. Vybudit objemnější místnost na takovou hladinu akustického tlaku už je poměrně problematické.

Nezbytnou součástí měření je časové a prostorové průměrování. Vzhledem k možnému nerovnoměrnému rozložení akustického pole v místnosti je potřeba měření provést pro více pozic mikrofonů a pro každou pozici měření minimálně třikrát opakovat. Zároveň je potřeba umístit mikrofony nejméně 1,5 m od sebe, 2 m od jakéhokoliv zdroje zvuku a minimálně 1 m od jakéhokoliv povrchu v místnosti. Měření se rovněž realizuje pro různé pozice zdroje zvuku.

2.2.2 Měření doby dozvuku metodou zpětné integrace

Jiná metoda měření doby dozvuku je založena na získání poklesových křivek integrací impulsové odezvy. Detailně je popsána v normě [6]. V tomto případě je prostor vybuděn impulsem, např. elektrickým výbojem, výstřelem nebo jiným zvukem impulsního charakteru. Odezva prostoru na tento podnět je zaznamenána jako časový průběh akustického tlaku. Následnou zpětnou integrací lze získat poklesovou křivku. Proložení křivky ve zmenšeném rozsahu -5 dB až -25 dB a příslušnou extrapolací můžeme odečíst dobu dozvuku T_{20} . Nezbytností je opět časové a prostorové průměrování, aby se vyloučil vliv nerovnoměrného rozložení akustického pole.

Zřejmou výhodou metody zpětné integrace je snadná praktická realizace budícího impulsu, např. výstřelem, a velmi krátká doba jednotlivých měření. Metoda má i některé nevýhody, ta nejpodstatnější spočívá v případném nedostatečném vybudění prostoru. Strmý impuls sice do-

sahuje velké špičkové hodnoty, ale jeho energie je malá. Ve větším prostoru to nemusí stačit k vybuzení dostatečného akustického tlaku, zejména na nižších frekvencích. Řešením je v takovém případě použití signálu, který má podobné vlastnosti jako impuls, ale je energeticky vydatnější např. signály typu MLS nebo TSP.

2.3 Impulsní měřicí metody

Za určitých okolností je použití měřicích metod založených na déletrvajícím buzení systému harmonickým průběhem, šumem nebo podobným signálem nevhodné nebo dokonce nerealizovatelné. Každý systém je mimo jiné charakterizován také impulsní odezvou, kterou je možné využít k jeho popisu.

Pro lineární systém s jedním vstupem a jedním výstupem platí při zachování nulových počátečních podmínek v časové oblasti pro libovolný vstupní signál $x(t)$ následující vztah:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{t_0}^t h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (7)$$

kde $h(t)$ je impulsní charakteristika soustavy. Tou je míněna odezva soustavy na Diracův impuls $\delta(t)$. Přenosová funkce soustavy $H(p)$ je obecně Laplaceovým obrazem impulsní charakteristiky $h(t)$, což lze vyjádřit vztahem:

$$H(p) = L\{h(t)\} = \int_0^{\infty} h(t)e^{-pt} dt \quad (8)$$

kde $p = \sigma + j\omega$ je rovina komplexních kmitočtů. Bude-li soustava v nulovém stavu, udává přenosová funkce $H(p)$ přímou souvislost mezi obrazem $X(p)$ vstupního signálu $x(t)$ a obrazem $Y(p)$ výstupního signálu $y(t)$.

$$Y(p) = H(p) \cdot X(p) \quad (9)$$

Přenosová funkce na ose fyzikálních kmitočtů při $p = j\omega$ je komplexní kmitočtová charakteristika $H(\omega)$. Funkce $H(\omega)$ je potom Fourierovým obrazem impulsní charakteristiky $h(t)$.

$$H(\omega) = F\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt \quad (10)$$

Z předchozích vztahů lze potom odvodit:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt} \quad (11)$$

Komplexní frekvenční charakteristiku pak lze rozdělit na reálnou a imaginární část, resp. vyjádřit modul a fázi přenosové funkce a získat tak amplitudovou frekvenční charakteristiku a

fázovou charakteristiku, které se běžně k popisu systému používají. Detailní odvození přenosové funkce lze nalézt v literatuře, např. [3].

2.3.1 Realizace impulsních metod

Klíčovým krokem výše uvedené metody je získání samotné impulsní odezvy. Protože je impulsní odezva definována jako reakce na Diracův impuls a Diracův impuls jakožto teoretický signál, nekonečně úzký puls s nekonečně velkou amplitudou, je v reálném prostředí neproveditelný, pak je logické, že problematika získání impulsové odezvy se tak posouvá do oblasti hledání vhodného budicího signálu. Jako fyzikálně realizovatelné přiblížení Diracova pulsu se nabízí úzký obdélníkový impuls. Na rozdíl od Diracova pulsu, který má konstantní amplitudu spektra, je spektrum obdélníkového pulsu dáno funkcí $\sin x/x$. Vhodnou volbou časových parametrů obdélníku lze docílit dostatečně vyrovnaného a širokospektrálního vybuzení. Šířka vyšetřovaného pásma musí ležet uvnitř prvního laloku funkce $\sin x/x$. Respektive musí být natolik úzká, aby pokles obálky spektra v rámci prvního laloku bylo možné zanedbat.

Další aspekt, který je potřeba zvážit, je dostatečné energetické vybuzení systému. Samostatný obdélníkový impuls má energii danou jeho šířkou a amplitudou. Jak již bylo uvedeno, aby byla splněna frekvenční podmínka, musí být impuls dostatečně úzký. Dostatečné energetické vybuzení potom lze docílit jedině dostatečně velkou amplitudou. Ta je však také omezená a závislá na konkrétní realizaci. Překročení určitých mezí pak může zavést do systému zkreslení, případně způsobit jeho destrukci.

2.3.2 MLS signály

Řešením situace, kdy vybuzení jedním impulsem není dostačující, je použití sledu impulsů. V praxi se často využívá tzv. MLS signálů (Maximum-Length Sequence). Jsou to pseudonáhodné binární posloupnosti generované pomocí posuvných registrů. Taková posloupnost je v analogové podobě signálem, jenž nabývá hodnot $+A$ pro logickou 0 a $-A$ pro logickou 1, kde A je amplituda signálu. Lidským sluchem je vnímán jako šum. Spektrum je v akustickém pásmu ploché a jeho autokorelační funkce má některé vlastnosti podobné vlastnostem Diracova impulsu. Této podobnosti je využito při získávání impulsové odezvy. Podrobný výklad včetně matematického aparátu je uveden v literatuře, např. v [3] a [8]. Ze zmíněných publikací vychází poznatek, že impulsová odezva je přibližně rovna průběhu vzájemné korelace signálu vstupujícího do soustavy a signálu ze soustavy vystupujícího.

$$h(n) \approx R_{xy}(n) = x(n) \oplus y(n) = \sum_{k=0}^{L-1} x(k+n)y(k) \quad (12)$$

kde $h(n)$ je diskretní impulsová odezva, $x(n)$ je budicí signál a $y(n)$ označuje zachycený signál, n reprezentuje diskretizovaný čas a L je délka posloupnosti. Metoda MLS signálů je výhodná zejména v tom, že je díky delší periodě je mnohonásobně zvětšena energie budicího signálu oproti samostatnému impulsu. Délka jedné periody je dána vztahem:

$$L = 2^N - 1 \quad (13)$$

kde N je počet bitů generujícího posuvného registru neboli řád MLS signálu. Další z vlastností takto generovaného signálu je obecně náhodné spektrum, jež mu dává schopnost časově rozprostřít jakékoliv nekorelované impulsní rušení, čímž se mimo jiné zvyšuje odstup signál - šum. V praxi tak lze aplikovat metodu i za přítomnosti poměrně silných rušivých signálů. Určité omezení v možnostech použití metody MLS signálů představuje délka periody. Proto lze měřit pouze impulsové odezvy, které jsou kratší než doba trvání jedné periody měřícího signálu L . Jinak dochází k tzv. časovému aliasingu a nelze impulsovou odezvu získat. Rovněž je nutnou podmínkou linearita vyšetřovaného systému. Nelineární zkreslení nelze touto metodou potlačit.

3 Měřicí systém na bázi hudebního signálu

3.1 Hudba jako měřicí signál

Pokud je o hudbě uvažováno jako o měřicím signálu, je nutné na ni pohlédnout z technického hlediska - jako na obecný signál, prozkoumat její vlastnosti, popsat je a vyhodnotit. Dále se jeví jako užitečné porovnat hudbu s jinými běžně užívanými měřicími signály. Teprve potom je možné začít hledat vhodný vyhodnocovací algoritmus, jenž umožní využít vlastností hudebního signálu a získávat požadované informace o ozvučovacího systému, resp. ozvučovaném prostoru.

V literatuře je popsán způsob měření parametrů prostorové akustiky obsazeného auditoria, který nepracuje přímo samotným hudebním signálem, avšak využívá jeho maskovací schopnosti. Metoda, popsaná v [9], je založena na tom, že vyhodnocuje průběh přehrávaného signálu a predikuje jeho budoucí vývoj. Pokud algoritmus vyhodnotí, že následující pasáž je dostatečně hlasitá hudba (jsou tak eliminovány tiché pasáže a pauzy), adaptivní systém generuje specifický signál, který je do přehrávané hudby modulován. Takto upravený signál je potom přehráván do sálu. Mikrofony umístěné ve vyšetřovaném prostoru snímají výsledný přehrávaný signál ovlivněný akustickými vlastnostmi prostoru. Vyhodnocující algoritmus má k dispozici informaci o konfiguraci mikrofonů, původním hudebním materiálu a generovaném měřicím signálu. Samozřejmostí je ověření dostatečného odstupů signál – šum a ověření, zda nedošlo k zarušení nějakým nesouvisejícím akustickým jevem. Teprve v této fázi může algoritmus ze všech dostupných dat vyhodnotit parametry prostorové akustiky, např. dobu dozvuku. Jinou cestou, jíž se může výzkum v této oblasti ubírat, je využití hudebního signálu samotného a jeho daných vlastností jako takových. Již dříve bylo ověřeno, že lze hudební signál použít k měření amplitudové frekvenční charakteristiky ozvučovacího systému. Při delší době průměrování je spektrum hudebního signálu dostatečně široké a vyrovnané, což k zamýšlenému účelu stačí, avšak omezujícím faktorem je právě dlouhá doba průměrování. Prakticky je tímto způsobem možné získat pouze tento parametr. Toto zjištění směřuje výzkum k jinému způsobu použití hudebního signálu pro měřicí účely. Inspirace byla nalezena v běžně používaných impulsních metodách. Nosnou myšlenkou navrhované metody je analýza hudebního signálu s cílem hledat v něm fragmenty, které svým charakterem připomínají impuls. Lze uvažovat následovně. Je-li hudba složena nejen z tónů, ale i perkusních zvuků a úderů, lze v záznamu nalézt úseky, které mají vlastnosti podobné skoku, impulsu či sledu im-

pulsů. Pokud se takové pasáže ve skladbě najdou, je možné dále uvažovat o použití či modifikaci vyhodnocovacích algoritmů běžně užívaných u impulsních měřicích metod.

3.1.1 Obecný popis hudebního signálu

Hudba je tvořena harmonickými tóny nástrojů, perkusními zvuky, případně zpěvem a dalšími zvuky obvykle s charakterem náhodného signálu. Je třeba ještě poznamenat, že každý nástroj generuje kromě základního tónu také vyšší harmonické tóny, které podstatně ovlivňují barvu zvuku. Jednotlivé nástroje jsou v hudbě určitým způsobem skládány a kombinovány. Tento způsob bývá obvykle periodický - skladba má rytmus. Ovšem na hráče a nástroje působí také celá řada náhodných vlivů. Z toho lze usuzovat, že hudba jako taková je pseudonáhodný signál, který obsahuje harmonické složky (tóny nástrojů, rytmus), náhodné složky (šum, okolní vlivy) a impulsní složky (perkusní zvuky). Rovněž je nasnadě, že různé žánry, různé skladby, případně různé části jedné skladby mohou mít zastoupení jednotlivých složek odlišné. Výše uvedené vlastnosti samy o sobě dávají tušit, že hudební signál představuje z technického hlediska vcelku široký problém. Dále je třeba vzít v úvahu fakt, že existuje mnoho žánrů hudby s velmi variabilním kombinováním jednotlivých nástrojů či zvuků. Výsledný zvuk může nabývat různého charakteru, čemuž pak odpovídá i jeho případná (ne)vhodnost pro měření.

Základním a nejobecnějším popisem hudebního signálu je prostý poslech. Je jím myšleno sluchové vnímání čistě akustického podnětu, např. bez vyhodnocení textového sdělení skladby. Tedy pouhé přijetí informace, že akustický vzruch existuje a je následkem nějakého děje. Zvuk je charakterizován např. hlasitostí, výškou tónů, zabarvením zvuku atd. Takové posouzení poslechem je samozřejmě silně subjektivní, avšak výše nastíněné termíny jsou natolik srozumitelné, že je jimi možno základní popis zvuku zprostředkovat.

Jiný pohled na hudební signál vychází z hudební teorie. Skladba je kombinací různě zabarvených tónů jednotlivých nástrojů. Je zaznamenávána pomocí notových zápisů či tabulatur. Každá nota má svoji výšku (tón, frekvenci), délku trvání a pozici na časové ose. Skladba je členěna do menších časových úseků – taktů a má určitý rytmus a tempo. To všechno jsou informace, které z hlediska analýzy nejsou zcela exaktní, avšak pomáhají propojit právě technický popis signálu s přirozeným smyslovým vjemem.

Na závěr tedy nezbyvá, než se zaměřit na hudební signál z čistě technického hlediska – jednak popsat jeho časový průběh, jeho spektrum resp. vývoje spektra v čase a rovněž prozkoumat i jeho dynamické vlastnosti či rozložení energie.

3.1.2 Hudební žánr – subjektivní posouzení

Jakkoliv je subjektivní posouzení hudby z hlediska objektivního měření téměř bezpředmětné, nabízí se porovnání sluchem jako dobrý výchozí bod. Je nanejvýš zřejmé, že je-li rozdíl patrný pouhým poslechem, bude objektivně zjistitelný i měřením.

Prvotním kritériem, které je při analýze hudebního signálu zvažováno, je instrumentální povaha hudby – zda je tvořena akustickými nástroji nebo se jedná o hudbu generovanou elektronicky. Přitom je potřeba pamatovat na to, že v dnešní době se běžně užívají umělé elektronické efekty k úpravě zvuku akustických hudebních nástrojů. Otázka se potom spíše posouvá do roviny, jak moc bylo umělých úprav použito. Za akustickou hudbu lze považovat kupříkladu klasickou a vážnou hudbu, více ovlivněn umělými efekty může být folk či jazz. Mnohem markantnější užití elektronických úprav se najde u rockové či metalové hudby. Také nelze opomenout žánry, kde použití elektroniky neslouží pouze k úpravám zvuku nástrojů, ale zvuky jsou přímo uměle vytvářeny elektronickým obvodem. Často tak vznikají signály, které jsou jedinečné, specifické a nemohou být vytvořeny jinak. Zvláštním případem jsou syntetické zvuky generované s cílem napodobit konkrétní reálný nástroj. Generování umělých zvuků může způsobit, že se ve výsledném zvuku objeví složky, které nemají předobraz v reálném světě. Je lhostejné, zda jde o úmysl, či se jedná o nežádoucí produkt syntézy. Z technického hlediska je podstatné, že takové zvuky mají často specifický charakter, odlišný od zvuků přirozených. V důsledku toho mohou neúměrně zatěžovat ozvučovací systém, neboť ten není na přenos takových signálů koncipován. Následkem frekvenčních nebo dynamických úprav může nastat i opačný jev, kdy je naopak část originálního signálu potlačena.

Vlastností zvuku, již lidský sluch okamžitě registruje, je hlasitost, respektive dynamika. Sluchový orgán pracuje do jisté míry integračním způsobem, což má vliv na vnímání hlasitosti v čase. Například koncert velkého symfonického orchestru bude člověk subjektivně vnímat jako méně hlasitý, i když hladina akustického tlaku může v silných pasážích dosahovat až úrovní kolem 120 dB. Takový koncert je většinou velmi dynamický, silné pasáže se v něm střídají s pasážemi velmi tichými. Naopak subjektivně hlasitěji je vnímána produkce, jejíž dynamika je menší. Rozdíl mezi tichými a hlasitými pasážemi je malý, zatímco střední hodnota hladiny akustického tlaku je vyšší - to člověk subjektivně vnímá jako větší hlasitost. Příkladem méně dynamické produkce může být rockový koncert. Efekt snížené dynamiky je bohužel často úmyslně využíván při výrobě záznamů. Ve snaze zajistit co největší zájem posluchače a umožnit přehrání nahrávky i méně kvalitním reprodukčním zařízením je užito přílišné komprese dynamiky. Tím jsou sice naplněny zmíněné požadavky, nahrávka zní „hlasitě“, ne-

potřebuje přenosový systém s velkou dynamikou, ovšem za cenu ztráty hloubky a hudební rozmanitosti.

Na první poslech obvykle také lze postřehnout uspořádání a stavbu skladby. Např. zda je přítomna nějaká výrazná a pravidelná rytmická složka, či je rytmus spíše skrytý za složitějšími melodickými pasážemi. Podvědomě člověk vnímá, zda převládají nižší či vysoké frekvence. To všechno dohromady utváří celkový vjem a dává vzniknout přívlastkům, kterými posluchači zvuk hodnotí jako temný, zvonivý, hutný atd. Takový popis zvuku často budí spíše úsměv, velmi často bývá nesprávně interpretován. Hudba jako umění je subjektivní záležitostí, proto i její popis je často subjektivní.

3.1.3 Výběr skladeb pro porovnání vlastností hudebního signálu

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, první posouzení dané skladby resp. nahrávky lze provést sluchem. Vzhledem k tomu, že existuje nepřeberné množství hudebních, žánrů, skladeb a nahrávek, nelze je z technického hlediska analyzovat všechny. Proto pro dále popisované objektivní zkoumání byly vybrány skladby právě na základě poslechu a subjektivního posouzení.

Při poslechovém hodnocení bylo uvažováno několik kritérií. Cílem bylo vybrat alespoň dvě skladby z běžnějších žánrů a přitom zachovat určitou vzdálenost těchto žánrů. Proto byla vybrána jedna metalová skladba a jedna jazzová. Důvodů směřujících k žánrové odlišnosti obou vybraných skladeb je několik. Jedním z nich je rozdílné charakteristické nástrojové obsazení. Pro metalovou skladbu jsou typické především zkreslené elektrické kytary, doplněné o rytmický základ v podobě rozsáhlé bicí soupravy a elektrické baskytary. Naproti tomu jazzová nahrávka je postavena především na zvuku klavíru, doplněného rytmickým základem v podobě akustického kontrabasů a jednoduché bicí soupravy. Kromě nástrojového obsazení se obě skladby liší tempem a stavbou. Zatímco jazzová skladba je pomalejší a jsou zřetelně rozeznatelné jednotlivé pasáže, metalová skladba má rychlejší tempo a pasáže se střídají velmi razantně.

Při výběru byla rovněž zohledněna kvalita pořízených nahrávek. Z mnoha dostupných nahrávek byly nakonec vybrány skladby:

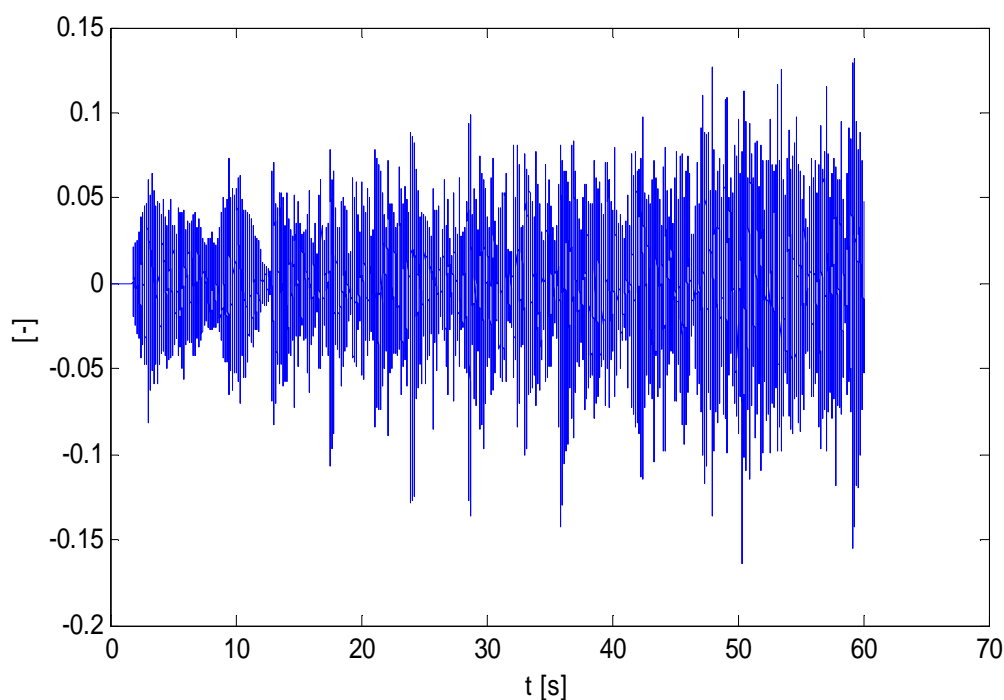
- Diana Krall, *Its wonderful*, album *The very best of*, Universal Music, 2007
- Waltari, Helsinki, album *Blood Sample*, Blulight Records, 2005

Pro testovací účely byly použity nahrávky z originálních CD nosičů, exportované do formátu .wav s parametry vzorkování 16 bitů/44,1 kHz.

3.1.4 Časové průběhy hudebního signálu

Časový průběh slouží jako určitá forma vizualizace zkoumaného signálu. Pokud je časovým průběhem míněno zobrazení okamžité hodnoty akustického tlaku (resp. napětí nebo číselnou hodnotu tomu odpovídající) v čase, můžeme při vhodně zvoleném měřítku tohoto zobrazení vysledovat některé základní atributy hudebního záznamu. Například lze odhadnout dynamiku skladby – střídání tichých a silných pasáží.

Jako příklad může posloužit záznam na obr. 1. Jde o přibližně minutový záznam jazzové hudby. Vzhledem k tomu, jak člověk hudbu vnímá, je takový časový úsek poměrně dlouhý. Při vzorkovací frekvenci v řádu desítek kilohertzů je počet zobrazených vzorků velmi vysoký – několik milionů. Nelze tedy očekávat detailní zobrazení zachyceného signálu. Na první pohled lze však postřehnout dynamické střídání tichých a hlasitých pasáží a postupně rostoucí hlasitost v průběhu skladby.



Obr. 1 – Časový průběh signálu - jazz

V příloze práce jsou uvedeny další časové průběhy zkoumaných skladeb. Porovnáním obrázků obr. 16 a obr. 17 se potvrdila rozdílnost skladeb, která je vnímána sluchem. Zatímco v záznamu jazzové hudby jsou patrné jednotlivé rozdílné pasáže, v případě metalové skladby je není možné při stejném rozlišení téměř rozeznat.

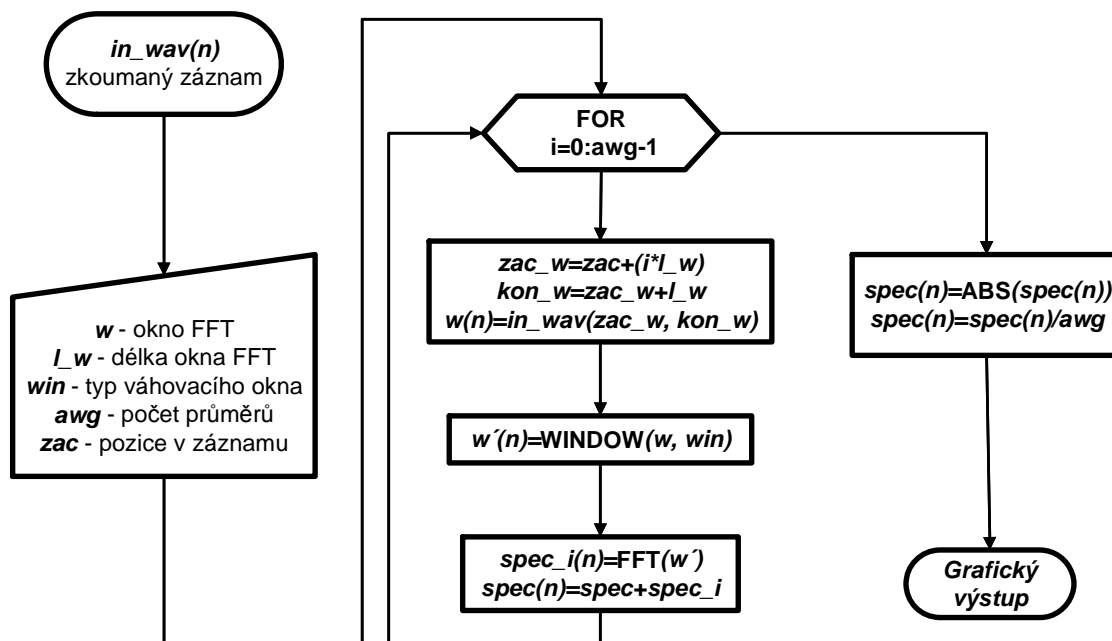
3.1.5 Spektrální vlastnosti hudebního signálu

Neméně důležité je zkoumání hudebního signálu ve frekvenční oblasti. Vyšetření spektra umožňuje jednak porovnání různých druhů hudebního signálu mezi sebou, jednak porovnání hudebního signálu s měřicími signály. V této kapitole je prakticky zkoumáno amplitudové spektrum různých žánrů hudby vybraných v kapitole 3.1.3, přičemž jsou zohledněny další parametry, jako například délka průměrování a vliv vybraného úseku skladby. Primárním cílem je sledovat šířku a vyrovnanost spektra hudebního signálu, respektive jeho podobnost se spektrem bílého šumu.

Pro porovnání byly připraveny záznamy skladeb ve formátu .wav. Jednotlivá spektra byla získána pomocí FFT (Fast Fourier Transform) s délkou okna 8192 bodů, což při použité vzorkovací frekvenci 44,1 kHz odpovídá frekvenčnímu rozlišení metody 5,38 Hz, což je pro danou aplikaci dostačující. Z celého záznamu jsou vybírány úseky příslušné délky a jsou váhovány Hammingovým oknem. Takto získaná spektra se posléze průměrují. Průměrování je lineární a průměrované úseky se vybírají postupně a bez vzájemného překrývání. Předmětem zkoumání byla doba průměrování, respektive počet průměrů. V následujících odstavcích jsou detailně popsány výsledky pro různé délky průměrování různých druhů signálu. Grafická zobrazení spekter získaných při tomto porovnání jsou uvedena v příloze práce, jde o obr. 19 až obr. 28.

Pro získání spekter byl ve výpočetním prostředí MATLAB vytvořen skript, jehož vývojový diagram je zachycen na obr. 2. Skript nejprve importuje zvukový záznam, dále vybírá příslušné úseky, které váhuje oknem. Následuje vlastní výpočet jejich spekter, průměrování a grafický výstup. K výpočtu koeficientů okna a Fourierovy transformace jsou použity interní funkce MATLABu. Nejprve bylo zkoumáno spektrum dvou různých hudebních signálů (jazz a metal) a bílého šumu pro krátkou dobu průměrování. Doba průměrování v tomto případě činila 0,93 s, což odpovídá při daném nastavení analýzy pěti průměrům. Bylo vyhodnocováno spektrum na začátku záznamu a uprostřed, přitom spektrum šumu se projevilo jako téměř vyrovnané nezávisle na zvoleném úseku skladby, zatímco spektrum hudebních signálů bylo velmi zvlněné a v obou místech záznamu se zásadně lišilo.

Obdobné porovnání jako v předchozím případě bylo provedeno pro delší průměrování. Bylo použito 53 průměrů, což odpovídá času 9,84 s. Výsledek porovnání ukázal, že s delší dobou průměrování je spektrum jak hudebních signálů, tak bílého šumu vyrovnanější. Výrazný rozdíl se však objevil mezi spektrem získaným ze začátku a uprostřed záznamu - spektrum hudebních signálů bylo vyrovnanější uprostřed.



Obr. 2 – Vývojový diagram skriptu pro získání spekter

Spektrální analýza byla provedena pro ještě mnohem větší počet průměrů - téměř přes celý záznam, bylo použito 215 úseků, tj. doba průměrování 39,94 s. Analýza byla provedena pouze od začátku záznamu, protože zvoleným počtem průměrů je prakticky pokryta celá jeho délka. Z tohoto porovnání vyplynulo, že spektrum se s delší dobou průměrování dále vyrovnává. Spektrum šumu se v souladu s předpoklady stává téměř ideálně rovné. Naproti tomu u obou vybraných druhů hudebních signálů byl zaznamenán významný pokles vyšších kmitočtů. Takový nález odpovídá obecně platné skutečnosti, že vyšší kmitočty v hudbě mají nižší energii. Rovněž byl zachycen patrný rozdíl mezi oběma žánry. V jazzových skladbách jsou více zřetelné tónové složky. Metalová hudba naopak vykazuje méně zvlněné spektrum, bližší náhodnému šumu, což odpovídá slyšitelně rozdílnému charakteru obou zvuků.

Z výše uvedeného je zřejmé, že doba průměrování má podstatný vliv na změřené spektrum. Kromě porovnání spekter různých signálů při dané délce průměrování byla ještě porovnávána spektra každého signálu pro různé doby průměrování. U šumového signálu bylo dobře vidět, že doba průměrování přibližně 1 s je příliš krátká a spektrum je v tom případě zvlněné. S prodlužováním doby průměrování se zvlnění spektra zmenšuje. Rozdíl mezi průměrováním po dobu 10 s a 40 s nebyl tolik výrazný jako mezi spektry získanými při průměrování o délce 1 s a 10 s. V případě jazzové hudby bylo rovněž patrné zmenšující se zvlnění. Zaznamenána byla ale i změna tvaru spektra. Ta je dána tím, že tento druh signálu je více proměnný v průběhu skladby. U záznamu metalové hudby je trend podobný jako u šumového signálu.

Tvar spektra se pro jednotlivé doby průměrování mění jen málo, s prodlužující se dobou průměrování se postupně zmenšuje jeho zvlnění.

V návaznosti na předchozí zkoumání bylo logicky také zjišťováno, jaký význam má v analýze záznamu a jeho spekter samotný výběr úseku v čase probíhající skladby. Na základě předchozích poznatků byly průměrovány zhruba 10 s úseky záznamu. Nejprve na počátku skladby (pátá sekunda záznamu) a poté zhruba uprostřed skladby (dvacátá sekunda záznamu). Cílem sledování je poukázat na fakt, že při relativně krátkém průměrování může být výběr určitého úseku záznamu signifikantním faktorem. Potvrdilo se, že u bílého šumu je rozdíl mezi spektry v jednotlivých místech záznamu nepatrný, naopak nejmarkantnější rozdíl byl zachycen v případě jazzové hudby.

Provedené frekvenční analýzy dvou druhů hudebního signálu a jejich porovnání s bílým šumem ukazují, že je možné uvažovat o použití hudby jako reálného měřicího signálu např. pro určení amplitudové frekvenční charakteristiky. Klíčovým parametrem vypovídajícím o tom, zda je signál dostatečně deterministický a pro měření použitelný, je doba průměrování. Spektrum musí být průměrováno dostatečně dlouho, aby zvlnění spektra bylo dostatečně malé. Pokud zvolíme dobu dostatečně dlouhou, stírají se rozdíly mezi zvoleným úsekem skladby a částečně také rozdíly mezi žánry. Lze říci, že dostatečná doba průměrování pro takto nastavenou analýzu představuje zhruba 1 minutu.

3.1.6 Časově-spektrální rozbor hudebního signálu

Po zkoumání signálu v časové a frekvenční oblasti se logicky nabízí varianta provádět analýzu vybraných skladeb (viz kapitola 3.1.3) v obou doménách současně. S myšlenkou využití velmi krátkých úseků záznamu přichází v úvahu i jiný způsob analýzy. Celý záznam je přitom vhodné vizualizovat, aby byl zřejmý vývoj spektra signálu v čase. V podstatě se jedná o aplikaci STFT (*Short Time Fourier Transform*), založenou na menším rozlišení FFT, která celou nahrávku analyzuje po kratších úsecích. Bližší informace o STFT lze najít v literatuře [10]. Délka okna FFT byla nastavena na 512 bodů, to při zvolené vzorkovací frekvenci 44,1 kHz odpovídá délce okna přibližně 12 ms. Frekvenční rozlišení metody potom vychází přibližně 86 Hz. Takto zvolené časové vlastnosti jsou dostatečné pro prvotní přiblížení, resp. jeden vybraný úsek je dostatečně krátký a přitom frekvenční rozlišení ještě únosně hrubé.

Čas jedné sekundy je vzhledem k lidským smyslům a konstrukci skladeb dobrý výchozí interval pro porovnání. Proto byly nejprve oba celé záznamy analyzovány právě po úsecích o délce 1 s. Přibližně minutové záznamy byly rozděleny po sekundách. Při použití analýzy s výše uvedenými parametry vychází při lineárním průměrování na každou sekundu 85 průměrů.

Získané spektrogramy jsou uvedeny v příloze práce. Konkrétně je prezentují obr. 29 a obr. 30, na nichž je v obou případech patrný postupný nárůst hladiny v celém spektru na počátku písně. Zřetelný je rovněž rozdíl ve spektru obou nahrávek, korespondující s příslušným žánrem a plynoucí z odlišné stavby obou skladeb. Na obr. 29 je spektrum kromě nárůstu basů téměř vyrovnané, zatímco na obr. 30 je zaznamenán pokles hladiny v oblasti nejvyšších kmitočtů a naopak její nárůst v oblasti vyšších středů. Pokud jde o časový průběh spekter, lze mezi jednotlivými úseky pozorovat jen minimální rozdíly a je tak možné odlišit spíše delší pasáže v rámci skladby. Taková zvolená doba průměrování je ovšem příliš dlouhá, aby dokázala postihnout jednotlivé artefakty skladby.

Proto je nezbytné zkoumané úseky zkrátit, respektive ukazuje se potřeba získávat postupně spektrum jednotlivých krátkých úseků bez průměrování. Zkoumaný úsek je zvolen potom tak, aby obsahoval dostatečný počet vzorků pro spektrální analýzu a přitom byl vzhledem k časovému průběhu hudby dostatečně krátký. Pokud zůstane délka okna výše zmíněných 512 vzorků, získáme spektrogramy jako na obr. 31 a obr. 32 uvedených v příloze. Je na nich zachycen časový průběh spekter pro obě zvolené ukázky. Uvedený pohled na signál je již mnohem průkaznější a lze z něj vysledovat dvě podstatné skutečnosti:

1. Ve spektrogramu jsou zřetelná místa, v nichž dochází k většímu vybuzení signálu a hladina amplitudového spektra dosahuje v krátkém časovém úseku vyšší úrovně než v okolních pasážích. Nedochozí tak ke ztrátě informace („rozmazání“) v těchto momentech průměrováním jako to nastává při předchozím porovnání.
2. V jednotlivých místech skladby dochází k vybuzení různých částí spektra. Přestože můžeme ve skladbě najít velmi krátké silně excitované úseky, jejich vybuzení není dostatečně širokopásmové.

Zobrazení po jednotlivých krátkých časových oknech poskytuje lepší představu o spektru v průběhu skladby, ovšem při velkém počtu vzorků (celá skladba) je již na první pohled takové zobrazení poměrně nepřesné. Proto jsou v příloze uvedeny i obr. 33 a obr. 34, na nichž jsou zobrazeny detaily vybraného úseku o délce 1 s pro obě hudební ukázky. Při takovém zvětšení lze vypořádat, jak se v jednotlivých krátkých časových oknech vzájemně liší spektrum, resp. případně lze zaznamenat nevyrovnanost spekter jednotlivých úseků.

3.2 Časový rozbor

Podstatným faktorem, který má vliv na volbu měřicího signálu a hledání vyhodnocovacího algoritmu, je relativní časové měřítko celého děje. Musíme sledovat, jak se hudební signál vyvíjí v čase, respektive jak často se v něm vyskytují artefakty vhodné pro měření. V souvis-

losti s tím se naskýtá k uvážení, jak rychle se mohou měnit parametry ozvučovacího systému a ozvučovaného prostoru.

Výchozí myšlenka spočívá v tom, že pro účely měření jsou v hudebním signálu zajímavé momenty, které jsou svým charakterem blízké impulsu, skoku nebo nějaké prudké změně. Pravděpodobně se tedy bude jednat nejspíše o údery, perkusní zvuky, trsnutí na strunu a podobně. Takové okamžiky bývají často opakovány s rytmem skladby. Tempo skladby se udává jako počet úderů za minutu, tzv. BPM (*Beats Per Minute*), přičemž v hudební terminologii se za úder nebo dobovou jednotku považuje čtvrt'ová nota. Tj. počet úderů odpovídá počtu čtvrt'ových not za minutu. Běžné střední tempo skladby se udává mezi 90 -120 BPM. Rozmezí pro tempa se pohybuje od 40 BPM pro nejpomalejší skladby až k 160 - 180 BPM pro ty nejrychlejší. Jinak řečeno, časová vzdálenost mezi jednotlivými údery se pohybuje v řádu stovek milisekund až jednotek sekund. Samozřejmě každý úder není automaticky vhodným měřicím signálem. Ten musí být v první řadě dostatečně silný a jeho spektrum musí být dostatečně široké. Rovněž za ním musí následovat dostatečně dlouhý úsek signálu s nižší úrovní, aby jej šlo jednoznačně identifikovat a bylo možné vyhodnotit odezvu systému na něj. Kolik vhodných míst v signálu najdeme, závisí na konkrétní skladbě a dalších okolnostech.

Změny parametrů ozvučovacího systému mohou být výrazně rychlejší. Konstrukce elektroakustických přístrojů obvykle počítá se zpracováním zvukových signálů o maximální frekvenci řádově několika desítek kilohertzů, což odpovídá časovým konstantám v řádu mikrosekund. Tak rychlá změna parametrů je teoreticky možná. Pokud však uvážíme spojitost se zásahem obsluhy ozvučovacího systému, je případná změna mnohem pomalejší. Obsluha obvykle nějakým způsobem reaguje na vzniklou situaci a může změnit nastavení parametrů ozvučovacího systému. V tom případě se co do rychlosti stávají rozhodujícím faktorem právě schopnosti člověka. Mluvíme pak o mnohem pomalejším ději, řádově na úrovni desetin až jednotek sekund.

Nejpomaleji se mění akustické parametry prostoru. Během produkce může mít vliv například počet diváků nebo změna teploty v sále. To jsou jevy s délkou trvání řádově v minutách nebo desítkách minut. Větší záměrné úpravy prostorové akustiky založené na rekonfiguraci prvků s akusticky významnými vlastnostmi (žaluzie, mobilní pohltivé paravány, závěsy atd.) jsou především otázkou optimalizace prostoru pro konkrétní druh představení před jeho začátkem. Z hlediska změny parametrů během vlastní produkce nejsou zásadní.

Z časového rozboru jasně vyplývá, že nejsnáze a nejrychleji se mohou měnit parametry ozvučovacího systému. Naopak pomalu se mohou měnit parametry prostorové akustiky. To zna-

mená, že i měření je vhodné navrhnout tak, aby parametry ozvučovacího systému byly vyhodnocovány častěji než např. trvání doby dozvuku.

3.3 Požadavky na měřicí systém na bázi hudebního signálu

Na tomto místě lze na základě výše uvedených poznatků stanovit požadavky na navrhovaný měřicí systém na bázi hudebního signálu, resp. určit, jaké parametry má smysl měřit s ohledem na jejich možné využití a s ohledem na omezení daná vlastnostmi hudebního signálu. Problematiku měření lze rozdělit, jak bylo uvedeno výše, na dvě oblasti. První z nich je měření parametrů ozvučovacího systému a druhou oblastí je potom měření parametrů prostorové akustiky.

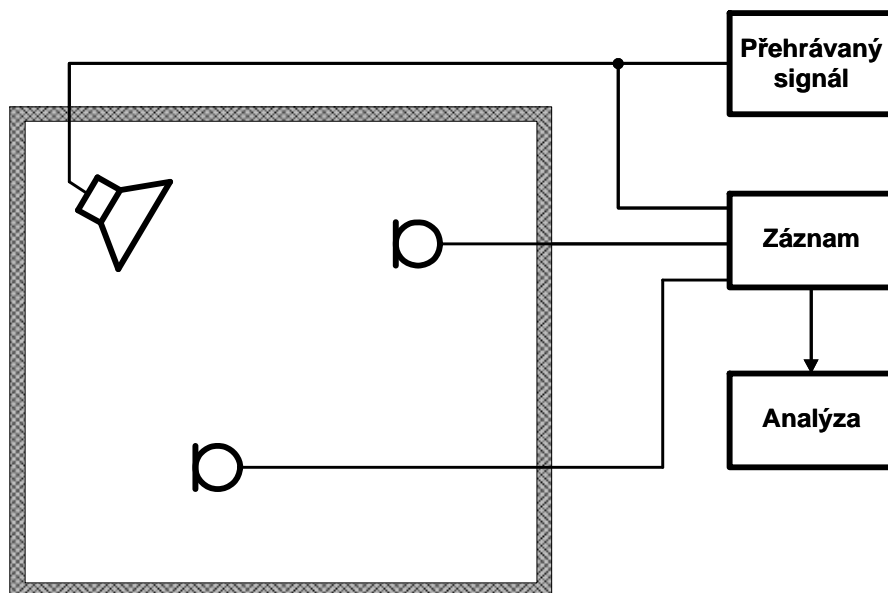
Do první skupiny lze zařadit měření amplitudové frekvenční charakteristiky ve frekvenčním rozsahu daném konstrukcí ozvučovacího systému. Druhým parametrem ozvučovacího systému, který je potřeba měřit je zpoždění. Na základě rozboru vlastností hudebního signálu se jeví tyto požadavky jako realizovatelné. Oba uvedené parametry jsou důležité pro optimalizaci ozvučení a správné nastavení ozvučovacího systému.

Druhou skupinu měřených parametrů představují parametry prostorové akustiky. Z hlediska praktického využití a předpokládaných možností hudebního signálu se jeví jako účelné měřit především dobu dozvuku. Parametry měřicího systému v této oblasti by měly být takové, aby měření doby bylo porovnatelné s klasickými měřicími metodami měření doby dozvuku.

3.4 Idea návrhu měřicího systému

Základní myšlenku měřicího systému založeného na užití hudebního signálu ilustruje blokové schéma na obr. 3. Hudební materiál je přehráván běžným způsobem pomocí ozvučovacího systému do daného prostoru, navíc je v auditoriu umístěn měřicí mikrofón, případně více mikrofónů. Signál zachycený mikrofony je zaznamenáván. Stejně tak je zaznamenáván budicí signál těsně před tím, než je zesílen a vyzářen reproduktory do prostoru. Posléze následuje analýza zaznamenaných signálů a detekce příslušných parametrů jak prostoru, tak ozvučovacího systému. Prostor a ozvučovací systém se samy o sobě stávají objektem zkoumání a jejich parametry jsou dané. Rovněž hardwarová implementace měřicího systému není příliš podstatná. Pokud jsou použity dostatečně kvalitní měřicí mikrofony a záznam s dostatečnou vzorkovací frekvencí, lze počítat s tím, že pro dané účely nebude měřicí hardware nejslabším článkem. Prakticky můžeme takový měřicí systém postavit například na bázi notebooku doplněného kvalitní externí zvukovou kartou, která umožní připojit vhodné mikrofony. Rozmístění mikrofónů je do jisté míry omezeno uspořádáním prostoru a nelze mikrofony rozmístit libo-

volně. Přehrávaný hudební signál se odvíjí od charakteru produkce. Jediným stoprocentně ovlivnitelným článkem měřicího řetězce je způsob analýzy, jež lze rozdělit do několika dílčích kroků, jak ukazuje vývojový diagram na obr. 4. Požadavky na vlastnosti navrhovaného měřicího systému vychází z úvahy v kapitole 3.3.



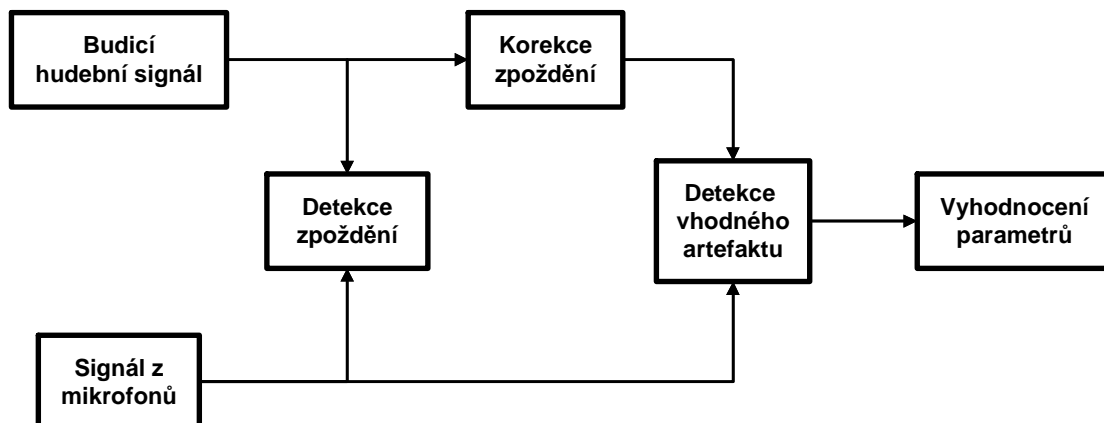
Obr. 3 – Blokové schéma měřicího systému

Pro měření parametrů ozvučovacího systému lze požadavky stanovit následovně:

- Měření zpoždění v řádu desítek až stovek milisekund.
- Rozlišení zpoždění lepší než jednotky milisekund.
- Měření amplitudové frekvenční charakteristiky ve frekvenčním rozsahu ozvučovacího systému, tj. nejčastěji 20 Hz až 20 kHz
- Schopnost vyhodnocovat amplitudovou frekvenční charakteristiku minimálně jednou za několik minut, např. za dobu trvání jedné skladby.

Vlastnosti měřicího systému ohledně měření doby dozvuku by měly splňovat tyto požadavky:

- Frekvenční rozsah 100 Hz – 10 kHz.
- Rozlišovací schopnost určení doby dozvuku 0,1 s.
- Vyhodnocení měřených parametrů minimálně jednou za několik minut, např. během jedné skladby.



Obr. 4 – Vývojový diagram měřicího systému

3.5 Detekce zpoždění

Již bylo naznačeno výše, je nutné znát zpoždění mezi signálem na vstupu ozvučovacího systému a signálem zachyceným pomocí měřicího mikrofonu. Zpoždění je důležitým parametrem samotného ozvučovacího systému, jehož znalost je kromě jiného nezbytná k zajištění správné funkce měřicího algoritmu, jak znázorňuje blokové schéma na obr. 4. Možnostem, jak zpoždění zjistit, se detailně věnuje kapitola 2.1.2. Tamtéž je podrobně vysvětlen význam zpoždění, respektive potřeba stanovit zpoždění co nejpřesněji. Na základě zmíněných poznatků se jako jediný dostatečně efektivní způsob jeví použití korelační analýzy obou signálů. Za tímto účelem byl vytvořen algoritmus, který je znázorněn vývojovým diagramem obr. 5.

Na vstupu algoritmu jsou oba porovnávány signály, resp. jejich záznam. Záznam obou kanálů musí být synchronní, aby detekovaná hodnota zpoždění odpovídala pouze vzájemnému časovému posunutí obou signálů a měření nebylo zatíženo chybou v důsledku různé latence jednotlivých kanálů při záznamu. Následuje odstranění případné stejnosměrné složky ze záznamu a posléze probíhá výpočet vzájemné korelační funkce obou posloupností podle vztahu (6). Pokud jsou oba signály podobné a posunuté pouze v čase, pak maximum korelační funkce odpovídá právě zmíněnému zpoždění. V dalším kroku proto detekujeme maximum korelační funkce, resp. jeho pozici od začátku záznamu. Výstupem je potom počet vzorků odpovídající vzdálenosti nalezeného maxima. Takto stanoveného zpoždění d se využívá v dalších částech měřicího systému. Samozřejmostí je také přepočtení a vyjádření zpoždění v milisekundách podle vztahu:

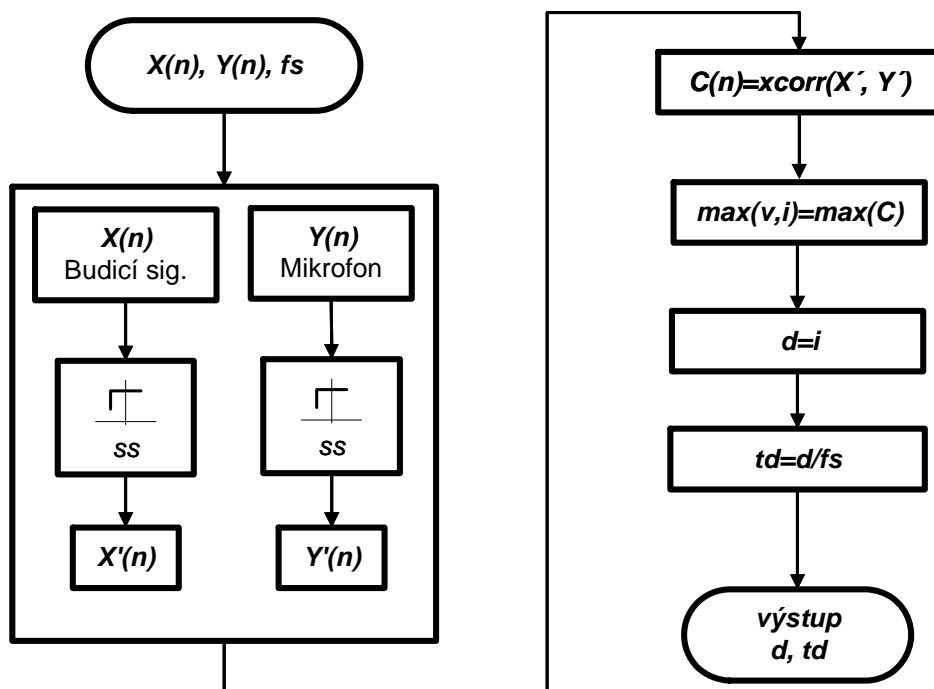
$$td = d \cdot \frac{1}{f_s} \quad (14)$$

resp. případné stanovení vzdálenosti mikrofону od reprosoustavy podle vztahu (4). Rozlišovací schopnost neboli nejmenší detekovatelné zpoždění, je dáno vzorkovací frekvencí, jak již bylo odvozeno v kapitole 2.1.2.

Zmíněný postup detekce zpoždění je teoreticky aplikovatelný pro jakýkoliv obecný signál. Ze vztahu (6) plyne, že výpočetní náročnost korelace dramaticky narůstá s délkou záznamu, respektive posloupností, které do výpočtu vstupují. Rovněž použijeme-li místo obecného signálu konkrétní deterministický signál, bude nalezené maximum korelační funkce výraznější.

Uvažujme skutečnost, že během produkce a tedy v průběhu měření hudebním signálem bude zpoždění konstantní. Za konstantní můžeme zpoždění považovat v situaci, kdy měřicí mikrofony zůstanou po celou dobu na stejných místech a zpoždění nebude měněno elektronicky v signálové cestě. V takovém případě lze zpoždění změřit již před produkcí (tedy před měřením), a to za využití kratšího úseku signálu, či vhodnějšího specifického signálu. Délka použitého záznamu však musí být nutně větší, než předpokládané zpoždění. Obvyklé hodnoty vznikajícího zpoždění se pohybují v řádu stovek milisekund. Lze proto říci, že doba záznamu v trvání několika sekund je dostatečná k tomu, aby bylo vzniklé zpoždění zachyceno.

Popsaný algoritmus byl rovněž naprogramován ve výpočetním prostředí MATLAB. Při prak-



Obr. 5 – Vývojový diagram detekce zpoždění

tickém měření byl jako měřicí využit signál MLS řádu 9, tedy o délce 512 vzorků. Specifické vlastnosti a princip generování MLS signálů shrnuje kapitola 2.3.2, resp. je lze nalézt v literatuře, např. [8], [10] a [11].

3.6 Volba měřicího signálu

Zhodnocením výsledků časově-frekvenčního rozboru hudebního signálu docházíme k závěru, že najít dostatečně krátký úsek záznamu, který je přitom vybuzen na patřičnou úroveň v celém uvažovaném frekvenčním rozsahu měření, je prakticky nemožné. Daří se však najít takové úseky, které dosahují potřebného vybuzení v různých užších frekvenčních pásmech. Nezbyvá tedy, než přístup modifikovat, vyšetřované pásmo rozdělit do několika užších a vhodný artefakt hledat v jednotlivých pásmech zvlášť.

V návaznosti na předchozí úvahu je možné rozdělení celého frekvenčního rozsahu různým způsobem. S ohledem na vlastnosti hudebního signálu bylo uvažováno několik variant. Lineární rozdělení po 1 kHz, případně logaritmické rozdělení do pásem 100 Hz – 1 kHz, 1 kHz – 3 kHz, 3 kHz – 10 kHz. Protože je zapotřebí dosáhnout jemnějšího rozdělení, jak bude detailně rozebráno v kapitole 3.6.1, a pro celou řadu dalších, zejména praktických důvodů, se nakonec přistoupilo k rozdělení do třetinooktávních pásem.

Takové rozdělení se ukázalo dostatečně jemné k tomu, aby bylo možné v jednotlivých pásmech najít dostatečně vybuzený úsek. Logaritmické dělení odpovídá principu vnímání lidského sluchu, respektive navazuje na princip intervalů, jež se vyskytují v hudební teorii. V neposlední řadě se dělení do třetinooktávních pásem běžně užívá právě u ozvučovací techniky a ostatních měřicích metod. Často se v třetinooktávních pásmech měří hladiny akustického tlaku, k případnému vyrovnání frekvenční charakteristiky ozvučovacího řetězce se pak užívá třetinooktávného ekvalizéru. Rovněž frekvenční závislost doby dozvuku se zpravidla udává pro třetinooktávná pásma.

3.6.1 Algoritmus výběru měřicího signálu

Výchozím bodem celého měřicího algoritmu je výběr vhodného signálu pro analýzu. Chceme-li uvažovat o jeho impulsním charakteru, musí vybraný artefakt splňovat následující požadavky:

- Musí být dostatečně krátký.
- Musí být energeticky dostatečně silný, tj. jeho úroveň musí být dostatečně vysoká.
- Musí být v časovém průběhu dostatečně „ojedinělý“. Respektive úroveň bezprostředně následujícího průběhu musí být dostatečně nižší po dostatečně dlouhou dobu.

- Jeho úroveň musí dostatečně převyšovat střední hodnotu úrovně celého signálu.

Pro detekci takového artefaktu byl vytvořen algoritmus, který je znázorněn vývojovým diagramem na obr. 6. Hlavními vstupními proměnnými jsou posloupnosti odpovídající vzorkovanému hudebnímu signálu. Posloupnost $X(n)$ odpovídá přehrávanému signálu, jenž vstupuje do ozvučovacího systému. Posloupnost $Y(n)$ potom reprezentuje signál zachycený v prostoru měřicím mikrofonom. Dalším důležitým vstupním parametrem je zpoždění mezi oběma signály – proměnná označená d . Zpoždění je způsobeno jednak zpracováním v signálovém procesoru a jednak šířením konečnou rychlostí v prostoru mezi reproduktorem a měřicím mikrofonom. Při zachování vzájemné polohy mikrofону lze konstatovat, že je vzniklé zpoždění konstantní a zjištělné. Podrobně se detekci zpoždění věnuje kapitola 3.5.

Při znalosti tohoto zpoždění můžeme obě posloupnosti následně v čase posunout a problematické zpoždění kompenzovat. Taková operace nám umožňuje porovnávat vybraný úsek budičeho signálu s odpovídajícím úsekem signálu, který prošel ozvučovacím systémem a současně byl ovlivněn akustickými vlastnostmi prostoru. Po korekci zpoždění následuje filtrace posloupností $X(n)$ a $Y(n)$. Filtrace slouží k rozdělení frekvenčního rozsahu měření do jednotlivých třetinooktávových pásem. Pro každé třetinooktávové pásmo se pak opakuje stejný algoritmus (znázorněn druhým cyklem ve vývojovém diagramu). Na tomto místě je dobré připomenout, že pracujeme s již dříve digitalizovaným signálem, tedy posloupnostmi jednotlivých vzorků. Pokud mluvíme o jejich délce, vždy je jí míněn počet vzorků. Nejprve vybereme ze vstupní posloupnosti $X(n)$ krátké časové okno $w_x(n)$. Délku okna označme l . Volbou konkrétní délky okna se podrobněji zabývá kapitola 3.6.2. Dále vybereme okno $w_y(n)$ z posloupnosti $Y(n)$, která reprezentuje signál z mikrofону. Výběr oken z obou posloupností můžeme vyjádřit následujícími vztahy:

$$w_x(n) = X(i + d, i + l + d) \quad (15)$$

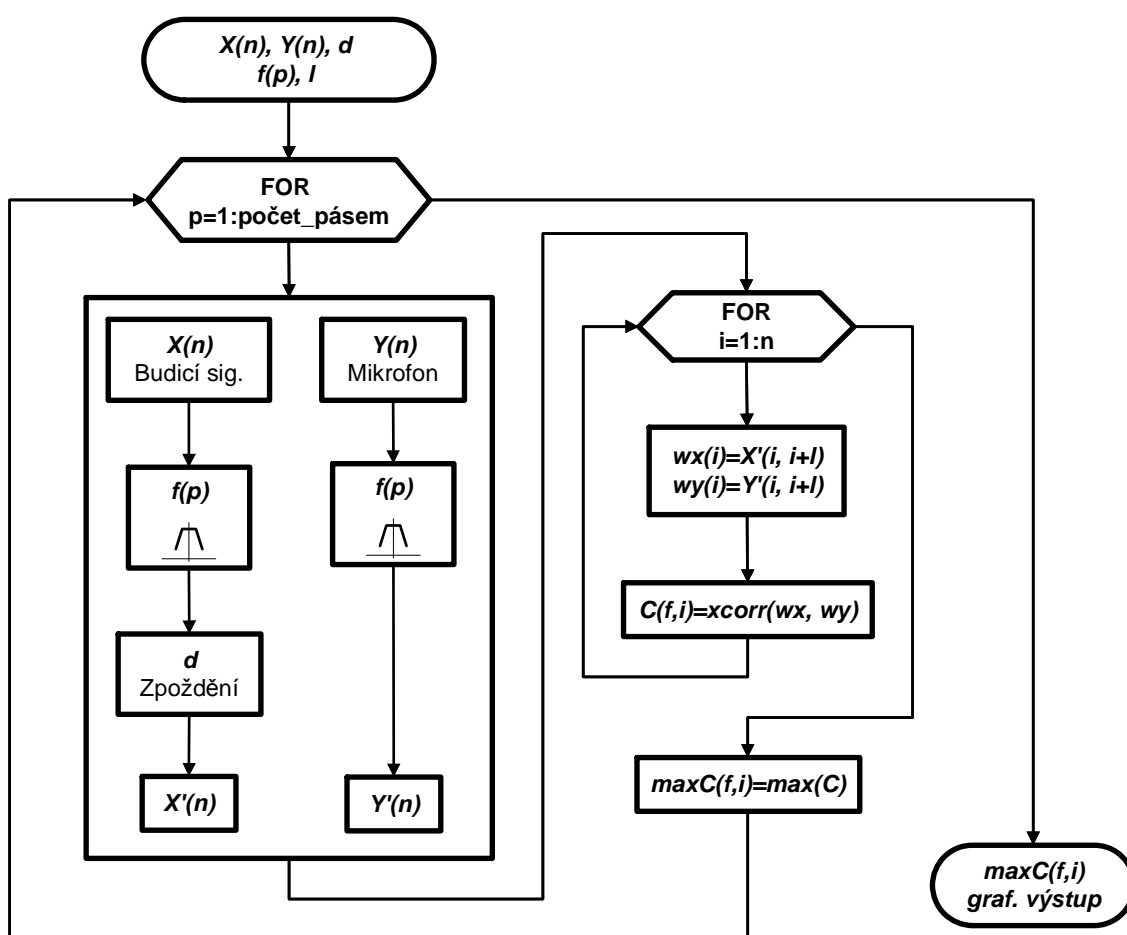
$$w_y(n) = Y(i, i + l) \quad (16)$$

Poté je počítána vzájemná korelační funkce obou vybraných oken a její hodnota je uložena do posloupnosti $C(n)$ pro příslušný index posunutí.

$$C_n = \frac{1}{l} \sum_{k=0}^l w(k + \tau) \cdot w'(k) \quad (17)$$

Takto ve zmíněném cyklu posouváme okno $w_x(n)$, resp. odpovídající $w_y(n)$, vždy o jeden vzorek dále až do konce záznamu. Postupným výpočtem korelace v jednotlivých bodech (pro všechny vzorky záznamu) získáme posloupnost maxim korelační funkce $C(n)$.

Z této posloupnosti potom můžeme určit několik důležitých parametrů. Velikost maxima korelační funkce v podstatě určuje podobnost vstupního a výstupního signálu. Čím vyšší hodnoty korelace nabývá, tím větší je podobnost vybraných oken. Jiným podstatným aspektem je absolutní hodnota vypočtené korelace. Rovněž je potřeba vzít v úvahu průběh maxima podél celého záznamu, konkrétně je důležité sledovat, jak se vyvíjí hodnota korelace v závislosti na posouvání okna. Pokud se zaměříme na samotnou hodnotu vypočtené korelace, její absolutní



Obr. 6 – Vývojový diagram detekce signálu

velikost kromě podobnosti obou oken prakticky vyjadřuje i úroveň a energii signálu. Pokud vypočtená hodnota dosáhne určité úrovně, můžeme tedy hovořit o tom, že signál splňuje první podmínku - je dostatečně silný.

Druhá část rozboru se věnuje průběhu hodnot korelace v závislosti na postupném posouvání okna. V tomto okamžiku je zapotřebí uvažovat délku samotného vybraného okna. Pokud je okno z hlediska časového průběhu signálu dosti krátké, pak má délka okna zásadní vliv na získanou hodnotu korelace. Strmá nespojitost a disproporce v signálu (skok či impuls) se zřetelněji projeví na výsledné hodnotě korelace v případě, kdy je okno krátké, respektive kdy je co do délky srovnatelné s onou disproporcí. Je-li porovnávaný úsek delší, krátká a strmá změna se na celkové hodnotě korelace odrazí méně; jak je ostatně zřejmé ze vztahu (17). Tyto uvedené skutečnosti nám umožní najít změnu impulsního, resp. skokového charakteru. Pokud je totiž absolutní velikost maxima pro daný úsek (okno) mnohem větší než v okolních vybraných oknech, znamená to, že energie je koncentrována právě v tomto vybraném úseku. Pokud je úsek dostatečně krátký, potom můžeme uvažovat, že vybraný úsek je krátkým impulsem.

Z tohoto předpokladu vychází i následující část algoritmu. V každém pásmu je tedy nalezeno maximum posloupnosti $C(n)$. Pro další výpočty je zapotřebí znát pozici nalezeného úseku v dané vstupní proměnné $X(n)$, resp. $Y(n)$. Proto je informace o pozici maxima, resp. indexu posunutí, uložena do samostatné proměnné. Výsledkem činnosti zmíněného algoritmu je matice hodnot korelací. Jeden rozměr matice odpovídá jednotlivým zkoumaným pásmům, druhý potom v podstatě délce zkoumaného signálu. Získanou matici je možno znázornit graficky, příkladem takového zobrazení jsou například obr. 7 a obr. 8. Pro přehlednost je časová osa rozdělena po sekundách a není zobrazen každý bod získaného pole korelací, ale vždy jen maximální hodnota v dané sekundě. Svislá osa reprezentuje jednotlivá třetinooktávová pásma.

Pro lepší názornost grafického zobrazení matice korelací je nezbytné vypočtené hodnoty normalizovat. V každém pásmu se pracuje s jinou délkou okna a rovněž energie signálu se v jednotlivých pásmech liší. Z toho důvodu jsou různé i získané hodnoty korelačních maxim v jednotlivých pásmech. Chceme – li tedy na hudební nahrávku pohlédnout komplexně a ze získané vizualizace zhodnotit rozložení vhodných měřicích artefaktů bez ohledu na frekvenční pásmo, je provedení normalizace nezbytné. Vztažnou hodnotu pro normalizaci vždy představuje vypočtené maximum korelace v daném pásmu. Barevná škála grafu potom reprezentuje normalizované hodnoty v rozmezí 0 až 1.

Prakticky byl algoritmus realizován v prostředí MATLAB. Kromě standardních funkcí bylo použito i knihovny `oct3dsgn.m` dostupné z webu společnosti Mathworks [12]. Ta je využita k výpočtu koeficientů číslicových filtrů. Vlastní filtrace, resp. rozdělení signálu do jednotlivých pásem, proběhla za pomoci standardní funkce MATLABu `filter()`. Nastavení parametrů samotných filtrů vychází z normy, jež udává příslušné střední frekvence jednotlivých pásem. Při výpočtu koeficientů byla zvolena Butterworthova aproximace 3. řádu.

3.6.2 Délka okna

Délka okna představuje podstatný parametr při hledání vhodného impulsního artefaktu pomocí algoritmu popsaného na obr. 6. Klíčovým krokem je tedy stanovení konkrétních délek okna pro jednotlivá pásma. Celý frekvenční rozsah je rozdělen do užších pásem a je potřeba vzít v úvahu, že v každém pásmu je energie rozložena jinak - jak vyšlo z analýzy hudebního signálu. Dále lze předpokládat, že nejsilnějším nositelem energie je první harmonická složka, proto se rozhodujícím faktorem při volbě délky okna stává perioda odpovídající právě první harmonické. Na okno vybírající měřicí signál jsou při tom kladeny protichůdné požadavky:

- Musí být dostatečně krátké, aby vystihlo právě jeden vhodný artefakt – tedy zjevný pokles signálu
- Musí být naopak dostatečně dlouhé – tak aby byl zachycen například pokles daný průběhem první harmonické složky odpovídající danému pásmu.

Níže uvedená tab. 1 předkládá délky period pro harmonický signál odpovídající středním frekvencím jednotlivých třetinooktávových pásem. Kromě údaje o délce trvání jedné periody milisekundách zachycuje i příslušný počet vzorků při použité vzorkovací frekvenci 44,1 kHz.

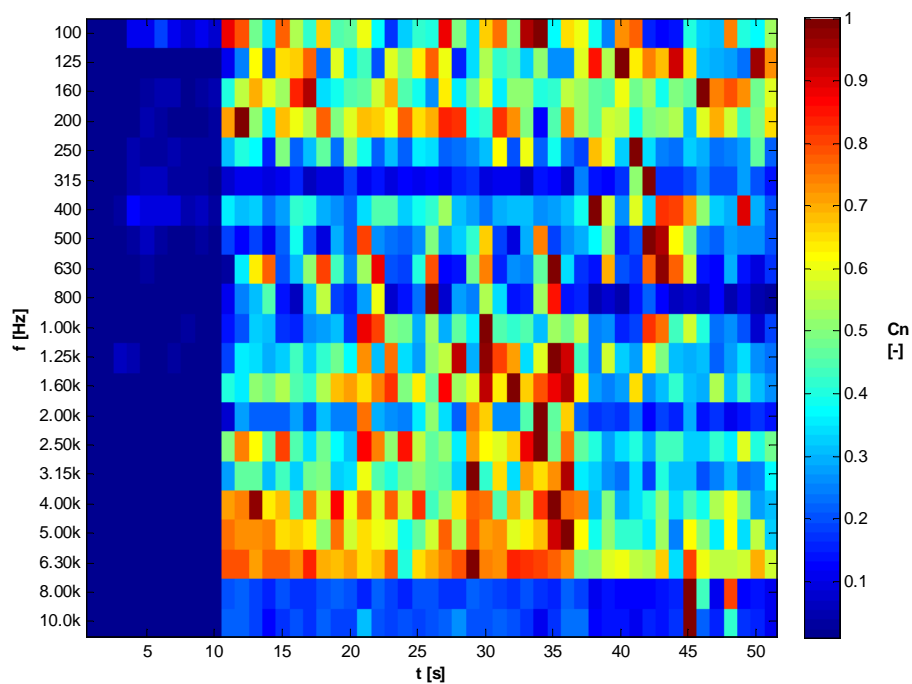
f [Hz]	100	125	160	200	250
T [ms]	10,0	8,0	6,3	5,0	4,0
N	441	353	276	221	176
f [Hz]	630	800	1000	1250	1600
T [ms]	1,6	1,3	1,0	0,8	0,6
N	70	55	44	35	28
f [Hz]	4000	5000	6300	8000	10000
T [ms]	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
N	11	9	7	6	4

Tab. 1 – Porovnání délky oken v jednotlivých pásmech

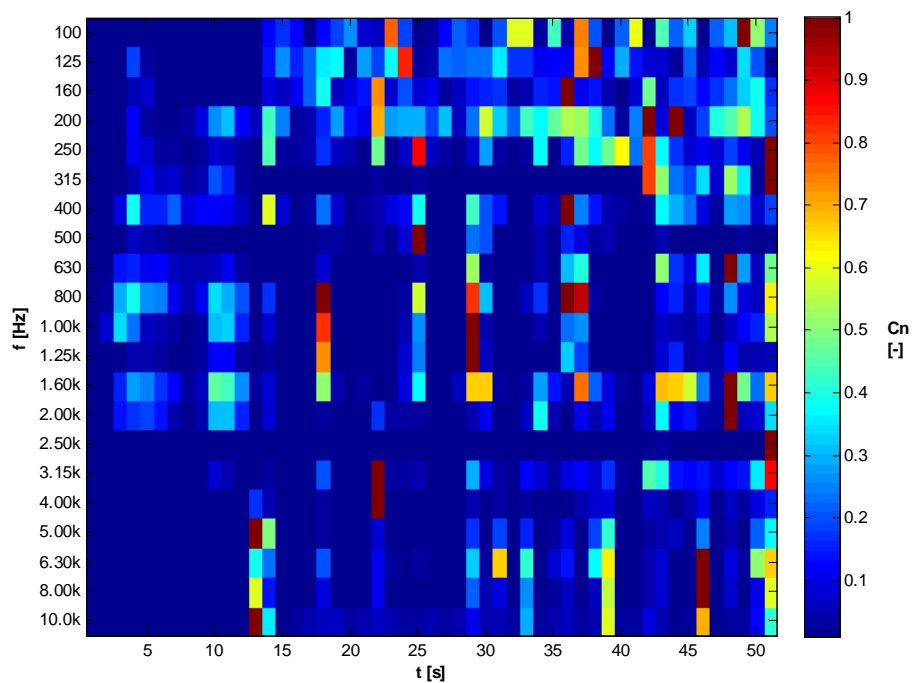
Z tabulky je patrné, že počet vzorků se pro daný rozsah měření pohybuje v řádu několika stovek pro nejnižší pásma až po pouhých několik vzorků v nejvyšších pásmech. Signál je vzorkován s konstantní vzdáleností mezi vzorky. Následně je signál číslicově filtrován - rozdělen do užších pásem. Dělení pásem je logaritmické, tj. střední frekvence filtru a zároveň šířka pásma se logaritmicky zvyšuje, zatímco perioda a počet vzorků v jednotlivých pásmech se logicky snižují.

Volba okna v trvání pouhých několika vzorků je v některých případech nevyhovující. Délky oken pro algoritmus popsaný v kapitole 3.6.1. byly proto zvoleny i s přihlédnutím k jiným kritériím. Kromě hodnot vycházejících z periody odpovídající střední frekvenci jednotlivých třetinooktávových filtrů bylo přihlédnuto i k jiným okolnostem. Úmyslně byly kupříkladu zvole-

ny počty vzorků jako násobky dvou. Jednak z důvodu lepší implementace a zvýšení efektivity výpočtu, jednak pro návaznost na měřicí metodu založenou na signálech MLS. Jak je popsáno v literatuře, např. [10] a [13], signály MLS jsou generovány právě tak, že jejich délka vychází jako mocnina dvou. Proto, pokud má být součástí práce i zjištění doby dozvuku pomocí algoritmu běžně používaného pro vyhodnocování impulsové odezvy ze signálů MLS, je volba takových hodnot zřejmá. Algoritmus popsáný v kapitole 3.6.1 byl prakticky aplikován na dva zhruba minutové záznamy různých hudebních žánrů. Výsledky prvního porovnání prezentují obr. 7 a obr. 8. Za úspěšně nalezený artefakt vhodný k měření je považována situace, kdy normalizovaná hodnota korelace přesáhne úroveň 50 %, tedy hodnotu 0,5. Té při zvoleném barevném schématu odpovídá ve všech grafech zelená barva. Hodnoty nižší jsou vyjádřeny odstíny modré, zatímco hodnoty vyšší postupně přechází od žluté po červenou barvu. Jelikož se jedná o hodnotu normalizovanou k maximu, v každém pásmu se objevuje jeden bod, který dosahuje normalizované hodnoty 1. Z porovnání výsledků získaných pro různé žánry hudebního signálu vyšla celá řada na první pohled zřejmých rozdílů. Byly tak potvrzeny předpoklady, stanovené časově-frekvenčním rozbořem hudebního signálu v kapitole 3.1. Z grafického vyjádření je patrný odlišný charakter obou. Použitý vzorek metalové hudby obsahuje mnohem více míst naplňujících výše uvedené kritérium hodnoty korelace než zvolená jazzová ukázka. Potvrzuje se, že v důsledku rychlejšího tempa hudby (v našem případě metalového žánru) se vhodné artefakty k měření vyskytují častěji a v čase záznamu jsou rovnoměrněji rozloženy. Rovněž díky vyšší průměrné hlasitosti a širokopásmovějšímu charakteru zvuku jsou samotné vypočtené hodnoty korelace vyšší u metalové skladby než u jazzové. Naproti tomu v záznamu jazzové nalézáme mnohem méně míst vhodných k měření, v čase záznamu přitom bývají tyto artefakty rozmístěny spíše sporadicky. Uvedené závěry vycházejí ze skutečnosti, že u použité jazzové nahrávky jsou jednotlivé nástroje velmi dobře odlišitelné a málokdy se překrývají. Totéž lze vysledovat i z grafu. Na obr. 8 se objevují střídavě místa, kdy je vybudeno jen některé pásmo, což odpovídá právě okamžiku střídání nástrojů, resp. zvuků, které jsou charakteristické právě pouze určitým frekvenčním rozsahem. Rovněž je patrné, že ve skladbě pomalejšího tempa se vhodné artefakty k měření nacházejí méně často. Stejně tak celková hlasitost jazzové skladby je nižší než metalové, takže ani absolutní hodnoty vypočtených korelací nedosahují takové výše.



Obr. 7 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an8)



Obr. 8 – Korelační analýza – jazz (soubor pasm_an13)

3.6.3 Optimalizace volby měřicího signálu

Délka okna zvolená v jednotlivých pásmech na základě délky periody střední frekvence daného pásma nepřinesla úplně uspokojivé výsledky, proto s ní bylo dále experimentováno. V kapitole 3.6.2 byl nastíněn způsob stanovení výchozích hodnot délky okna v jednotlivých pásmech. Skript byl aplikován i s jinými délkami okna, při tom bylo opět dodrženo pravidlo, že zvolená hodnota musí být rovna mocnině dvou. Cílem zkoumání bylo potvrdit či vyvrátit stanovený předpoklad, že délka okna musí být zvolena v souladu s délkou periody odpovídající střední frekvenci daného pásma. Dále jsme sledovali, jak změna délky okna ovlivní počet nalezených vhodných artefaktů a jak se změní hodnoty vypočtených korelací.

Výsledky tohoto srovnání dokumentují obr. 35 až obr. 38, jež jsou, vzhledem k jejich počtu, uvedeny v příloze D. Kromě samotných obrázků jsou tamtéž k nahlédnutí tabulky se zvolenými délkami oken v jednotlivých pásmech. Potvrdilo se, že délka okna souvisí se střední frekvencí daného pásma. Tedy že pro nižší frekvence je nezbytné použít delší okno než pro pásma s frekvencí vyšší. Nejmarkantnější vliv na počet vhodných artefaktů má délka okna v nejvyšších pásmech cca. od 6,3 kHz do 10 kHz. V těchto pásmech je užitá nahrávka zjevně nedostatečně vybuzená - neobsahuje žádné specifické zvuky, které by svým frekvenčním spektrem zasahovaly do zmiňovaných pásem, respektive byly v těchto pásmech dostatečně hlasité. Vypočtené hodnoty korelací dosahují menších hodnot než v ostatních pásmech. Postupným zkracováním délky okna z 64 bodů až na 16 se ukázalo, že počet vhodných artefaktů v signálu se sice výrazně nezvýšil, ale zvýšila se hodnota vypočtené korelace. Takové zjištění signalizuje určité problémy. Zkracování okna na vyšších frekvencích sice přináší lepší detekci, avšak příliš krátké okno potom znamená komplikaci při vyhodnocování doby dozvuku, jak bude ještě rozvedeno v dalších kapitolách. Nezbyvá tedy než zvolit kompromisní hodnotu 32 bodů.

3.6.4 Detailní rozbor problematických pásem

V rámci hledání optimální délky okna se objevil ještě jeden negativní jev. Ze všech dosud provedených pokusů se ukázalo, že v některých pásmech hudebního záznamu nelze vhodný artefakt najít vůbec. Resp. vždy u určitého pásma se i přes volbu různé délky okna nepodařilo vhodný artefakt zachytit. U prvního záznamu (metal) se jako kritické projevilo pásmo 315 Hz, u druhého záznamu (jazz) pak pásmo 2,5 kHz. V obou těchto pásmech nebylo prakticky možno najít jediný bod s vyšší hodnotou korelace, jež by byla srovnatelná s ostatními pásmy.

Oba vybrané záznamy hudebního signálu byly testovány stejným skriptem a za stejných podmínek. Vzhledem k tomu, že se co do výskytu vhodného artefaktu ukázalo jako problematické pásmo u každého záznamu jiné, lze říci, že tento jev není způsoben použitým ozvučovací systémem. Ve snaze zjistit, zda je tento jev způsoben samotným signálem, či jde o vliv vyhledávacího algoritmu, byl skript znovu aplikován v případě záznamu metalové hudby pouze na problematické pásmo 315 Hz. Kromě různé délky okna bylo ještě zkoušeno otočení fáze zachyceného signálu o 180°. Důvodem k otočení fáze byla domněnka, že snímací mikrofón mohl být umístěn v nevhodné pozici.

Nakonec bylo ještě provedeno obdobné porovnání zahrnující otočení fáze a různé délky okna pro nejbližší okolní pásma (250 Hz a 400 Hz). Ve všech případech vyšly téměř stejné hodnoty jako v případě prvním.

3.6.5 Shrnutí výsledků korelační analýzy

Výsledkem výše představené části metody hledání artefaktu vhodného pro měření jsou následující skutečnosti:

- Potvrdilo se, že délka okna použitého k výběru měřicího signálu souvisí s frekvencí daného pásma.
- Potvrdily se předpoklady dané analýzou samotného hudebního signálu – zejména to, že podle žánru konkrétní skladby se výrazně liší vlastnosti signálu a tudíž jeho vhodnost pro měřicí účely.
- Ukázalo se, že ne každý signál je vhodný jako měřicí, respektive může docházet k nedostatečnému vybuzení řetězce v některých frekvenčních pásmech
- Konkrétním výstupem provedeného rozboru jsou popsáním algoritmem nalezené artefakty hudebního signálu dále použité pro měření doby dozvuku.

3.7 Měření doby dozvuku pomocí hudebního signálu

V této kapitole jsou popsány metody měření doby dozvuku s využitím hudebního signálu, respektive jeho artefaktů nalezených způsobem rozebraným v kapitole 3.6. O době dozvuku jako takové a o konvenčních metodách měření je pojednáno v kapitole 2.2 a příslušných podkapitolách, případně v literatuře, např. [5], [6], [1] a mnoha dalších. Oproti klasickým metodám přináší snaha o využití hudby jako měřicího signálu určité komplikace.

Doba dozvuku je vždy vyhodnocována z poklesu akustické energie v daném prostoru. Není podstatné, zda se tak děje u zpětně integrované impulsové odezvy prostoru či vyhodnocením postupného poklesu po vypnutí zdroje. Kromě vlastní podstaty, tedy vyhodnocení energetického poklesu, je potřeba ještě vzít v potaz dostatečný odstup měřeného signálu od hlukového pozadí a dostatečné vybuzení prostoru, aby byl pokles energie zřetelný. Obě stávající klasické metody (metoda přerušného šumu i metoda integrace impulsové odezvy) mohou podmínku dostatečného odstupu snadněji naplnit, neboť používají právě specifické signály, jejichž vlastnosti lze zvolit. Rovněž takové měření obvykle probíhá za podmínek, jež jsou do jisté míry ovlivnitelné. Kupříkladu je možné měření plánovat na dobu, kdy nebude rušeno okolním hlukem. Tím můžeme uměle zvětšit rozdíl hladin zvuku ve vybuzeném a nevybuzeném stavu. Zajištění dostatečného rozdílu mezi oběma stavy je nezbytnou podmínkou vyhodnocení doby dozvuku - čím výraznější rozdíl hladin, tím snáze lze dobu dozvuku určit.

Při použití hudebního signálu pro vyhodnocení doby dozvuku je situace poněkud jiná. Průběh skladby vychází z podstaty samotné kompozice a nelze jej změnit. Stejně tak je dán i průběh tichých a hlasitých pasáží, jejich střídání a poměr. Jediné, co můžeme částečně ovlivnit, je celková úroveň přehrávaného signálu a tím zlepšit jeho odstup od rušivého pozadí. Je ovšem potřeba připomenout, že hlasitost hudební produkce nelze zvyšovat do nekonečna. Zejména připadá-li v úvahu měření v sále obsazeném diváky. V takové situaci je nutno pamatovat mimo jiné i na hygienické limity a komfort diváků. Rovněž nemůžeme opomenout limity ozvučovacího systému, který nesmí být přetěžován. Uvažujeme-li použít hudební signál pro výše zvolený druh měření, pak v dalším postupu logicky narůstá důležitost volby měřicího signálu, respektive výběr vhodného úseku skladby, protože ostatní okolnosti měření ovlivnit nemůžeme.

Byly rozpracovány a budou dále popsány dva odlišné způsoby vyhodnocení doby dozvuku při využití hudby coby budicího signálu. Jeden vychází z principu integrace impulsové odezvy, který se běžně používá u impulsních metod založených například na signálech MLS. Druhý je potom založen na přímém vyhodnocení energetického poklesu. Oba zkoumané postupy byly

prakticky vyzkoušeny a porovnány s jinými metodami měření doby dozvuku, jak je popsáno v kapitole 4.5.

3.8 Vyhodnocení doby dozvuku metodou integrace impulsové odezvy

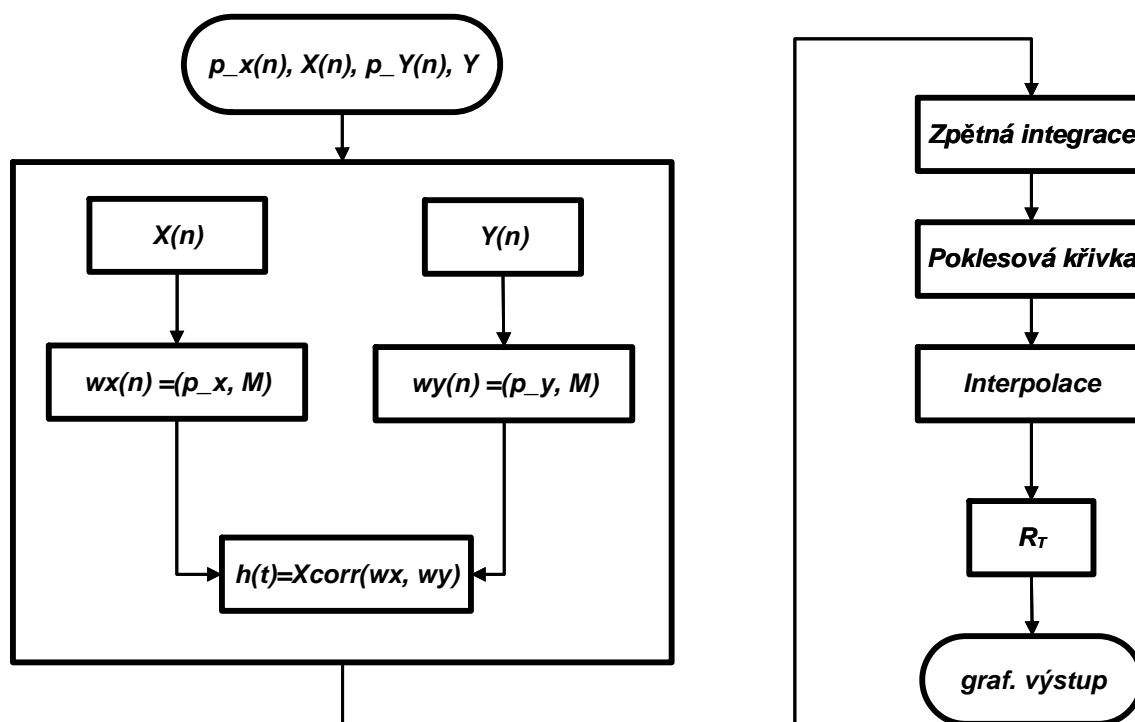
Doba dozvuku byla nejprve vyhodnocována metodou založenou na zpětné integraci impulsové odezvy – tedy na principu běžně užívaném při impulsních metodách měření. Způsobů, jak ji impulzovou odezvu místnosti zjistit, existuje více. Jednou z možností je časový záznam vybuzení prostoru vhodným impulsem, jímž může být např. výstřel, akustický projev elektrického výboje či jiný zvuk podobného charakteru. Největší úskalí tohoto postupu představuje samotný impulzní způsob vybuzení. Ve větších prostorech totiž nemusí ojedinělý impuls vybudit dostatečnou hladinu akustického tlaku. Právě od potřeby dostatečného a opakovatelného vybuzení prostoru se odvíjí řada modifikací této metody, které spočívají v použití sledu impulsů, například signálů MLS. Odpovídající impulsovou odezvu stanovujeme pomocí kruhové korelace.

Zpětnou integrací nalezené impulsové odezvy získáváme poklesovou křivku. Následným proložením poklesové křivky v daném rozsahu (nejčastěji v rozsahu -5 dB až -35 dB pro T_{30}) obdržíme směrnici přímky, která reprezentuje dobu dozvuku. Extrapolací této přímky pro rozsah poklesu 60 dB pak určíme hledanou dobu dozvuku. Uvedená metoda vyhodnocení doby dozvuku pracuje s impulsním charakterem budicího signálu, logicky byl tedy přijat předpoklad, že podobným způsobem by bylo možné analyzovat dobu dozvuku i tehdy, není-li vstupním signálem umělý impuls či jejich sled, ale artefakt impulsního či skokového charakteru nalezený v přirozeném hudebním signálu.

3.8.1 Aplikace metody integrované impulsové odezvy

Úvaha rozvedená v předchozím odstavci, představovala teoretický podklad pro realizaci měření doby dozvuku pomocí integrované impulsové odezvy. Cílem bylo naprogramovat algoritmus pracující na zmíněném principu a vyzkoušet jej pro dva různé druhy budicího signálu – vhodného MLS a vybraných artefaktů z hudebního signálu. Algoritmus vyhodnocení byl prakticky proveden opět jako skript ve výpočetním prostředí MATLAB. Jeho činnost znázorňuje vývojový diagram na obr. 9. Vstupními parametry jsou proměnné obsahující budicí signál a mikrofonom zachycená odezva vybuzeného sálu. Samotný proces výběru budicího signálu je rozebrán v několika dílčích kapitolách, v případě hudebního signálu se jedná o kapi-

tolu 3.6, nezbytné detaily týkající se parametrů signálu MLS jsou pak zmíněny v kapitole 4.5.1 věnované experimentu.



Obr. 9 – Vývojový diagram měření doby dozvuku pomocí kruhové korelace

Na vstupu algoritmu tedy máme posloupnosti vzorků odpovídající budicímu signálu a rovněž posloupnosti příslušné zaznamenané odezvy. Protože dobu dozvuku vyhodnocujeme v jednotlivých třetinooktávových pásmech, je nezbytným mezikrokem filtrace vsrupních signálů do třetinooktávových pásem. Pokud máme k dispozici již frekvenčně omezené signály, můžeme provést cyklickou korelaci obou vstupních posloupností podle vztahu (13) a vypočítat impulsovou odezvu. Dále je třeba provést zpětnou integraci získané impulsové odezvy. Prakticky je tento výpočet realizován jako cyklus, ve kterém se od konce posloupnosti odpovídající impulsové odezvě počítá energie signálu. Jejím postupným přičítáním získáváme průběh energie. V další fázi přistupujeme k výpočtu Schröderovy poklesové křivky, jež je dána vztahem:

$$D(t) = 10 \cdot \log \left(1 - \frac{E_T}{E_\infty} \right) \quad (18)$$

Následně je poklesová křivka zobrazována jako časový průběh energie. K získání číselné hodnoty doby dozvuku je nezbytné provést interpolaci poklesové křivky přímkou a ze získané směrnice přímky potom vypočítat dobu dozvuku. V konkrétní realizaci k tomu bylo využito in-

teraktivního nástroje CFTOOL, který je součástí MATLABu. Rozsah interpolace byl nejprve nastaven v souladu s normou jako T_{30} , tedy v rozsahu -5 dB až -35 dB.

Výhodou nástroje CFTOOL je možnost současné vizuální kontroly interpolovaného průběhu resp. možnost kontrolovat, zda byl měřený prostor dostatečně vybuzen a zda byl dodržen dostatečný odstup užitečného signálu od rušivého hlukového pozadí. Případné nedostatky se na poklesové křivce projeví tzv. „dvojitým zlomem“. Za normálních okolností poklesová křivka od určitého bodu pouze přibližně lineárně klesá se směrnici, která odpovídá době dozvuku. Pokud je však dozívání prostoru rušeno jiným energeticky významným akustickým signálem, není pokles křivky monotónní. Je zřejmé, že pokud by byla zachována pouze podmínka interpolace v určitém rozsahu úrovní (např. pokles o 30 dB v rozsahu -5 dB až -35 dB) a pokud by pásmo proložení obsahovalo i zmíněný druhý zlom, následně získaná hodnota doby dozvuku by byla nesmyslná.

Výše popsany algoritmus byl v rámci experimentu prakticky aplikován jak na připravený MLS signál, tak na artefakty vybrané ze záznamu hudby - výsledky jsou detailně rozebrány v kapitole 4.5.

3.9 Přímé porovnání energetického poklesu

Další rozpracovaná metoda pro stanovení doby dozvuku spočívá v přímém porovnání energetického poklesu dvou signálů. Situaci ilustruje obr. 10.

Podstata tohoto přístupu je v tom, že energie signálu zachyceného mikrofonom se skládá nejen z energie samotného budicího signálu (respektive jeho zesíleného obrazu), ale i z energie, která v prostoru zůstává jako důsledek odrazů. Pokud tedy neuvažujeme samotný průběh signálu, ale bereme v potaz i jeho energii za určitou dobu, můžeme v čase pozorovat, že energie prostoru klesá pomaleji než energie budicího signálu. Takový jev lze ovšem zaznamenat pouze ve specifickém případě - když má budicí signál charakter skoku. Logicky se nabízí předpoklad, že množství energie odpovídající dozvuku je menší než energie přehrávaného signálu. Pokud je prostor silně vybuzen, je mnohonásobně nižší energie odrazů budicím signálem maskována. Pokud však budicí signál poklesne s dostatečnou strmostí, energie úměrná dozvuku bude klesat pomaleji a rozdíl energií se stane pozorovatelným.

Princip přímého porovnání energetického poklesu je aplikovatelný za splnění následujících podmínek:

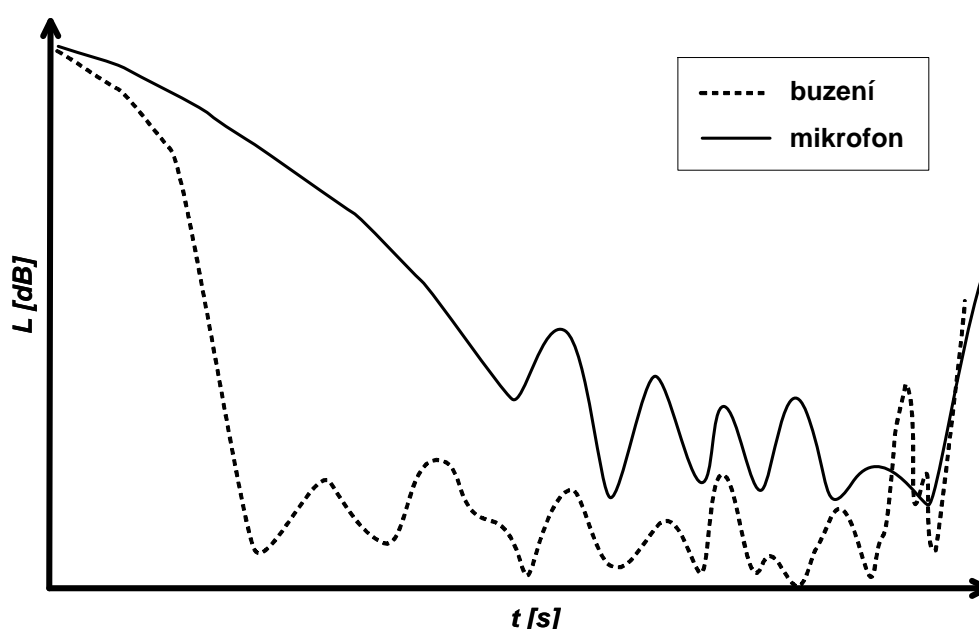
- Použitý artefakt pro měření musí v budicím signálu skokově poklesnout s dostatečnou strmostí.

- Pokles energie musí být dostatečný, a to o takovou úroveň, aby byl rozdíl v poklesu zřetelný.
- Doba, po kterou je budicí signál na nižší úrovni, musí trvat dostatečně dlouho, aby nedocházelo k zamaskování dozvuku silnějším budicím signálem.

3.9.1 Aplikace metody vyhodnocení přímého poklesu energie

Metoda vyhodnocení přímého poklesu energie byla realizována podle vývojového diagramu na obr. 11. Algoritmus byl opakovaně prováděn pro jednotlivá třetinooktávová pásma.

Vstupující parametry představovaly záznam budicího signálu, záznam odezvy zachycené mikrofonem a pomocí předchozího postupu detekovaný vhodný artefakt (viz. kapitola 3.6), resp.

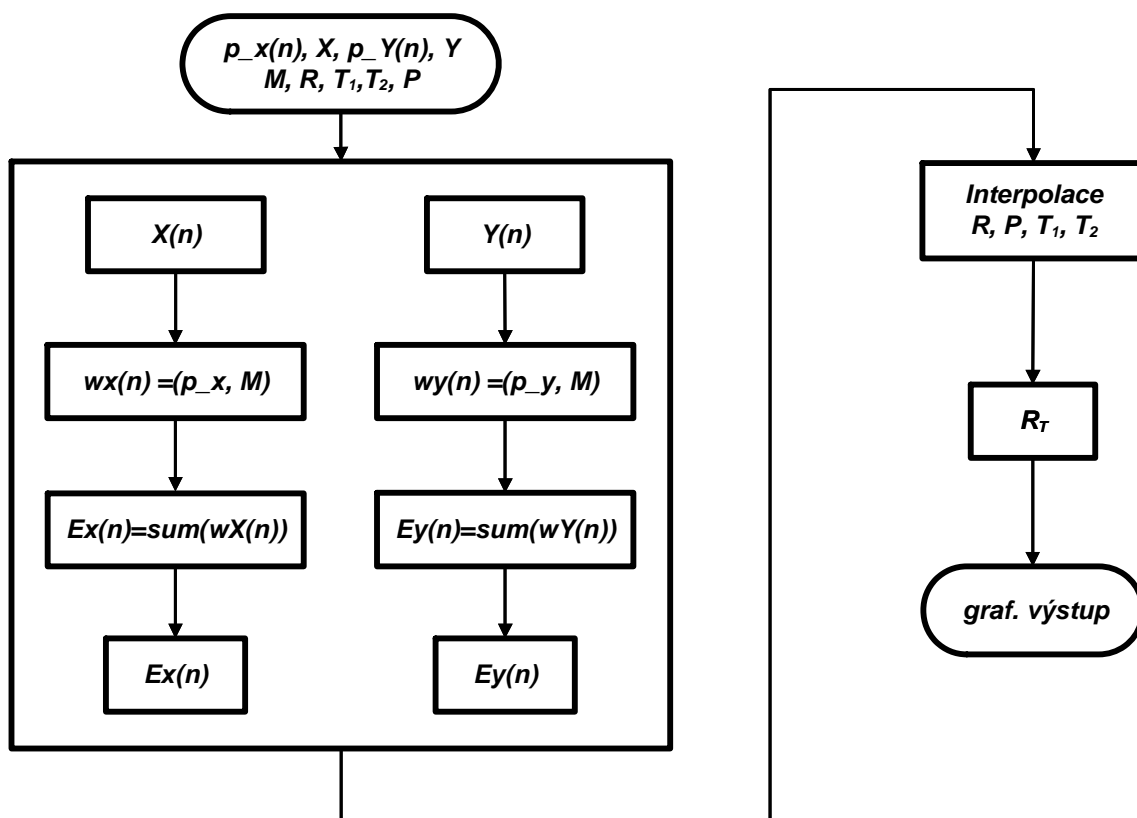


Obr. 10 – Rozdílný průběh energie

jeho pozice v záznamu. Následně bylo přistoupeno k vyhodnocení poklesu energie. Vychází se z bodu, v němž byl zaznamenán skokový pokles budicího signálu. Od počátečního okna stanoveného bodu se posléze po určitou dobu počítá energie, postupuje se při tom podle vzta-
hu:

$$E(n) = \sum_{k=1}^M p^2(n+k) \quad (19)$$

Délka okna je označena M . Okno se posouvá a postupným přičítáním energií se získává její průběh. Výsledkem jsou tedy dva průběhy energie v čase, které se graficky znázorňují (jak ilustruje obr. 10) a které jsou základem k samotnému určení doby dozvuku. Současně je však ještě třeba nastavit parametry vyhodnocování poklesu energie, zejména délka úseku, po který se integruje, neboli délku M . Následně je nutné stanovit, po jakou dobu má smysl průběh energie zkoumat, aby z něj bylo možné získat dobu dozvuku, způsob interpolace a další.



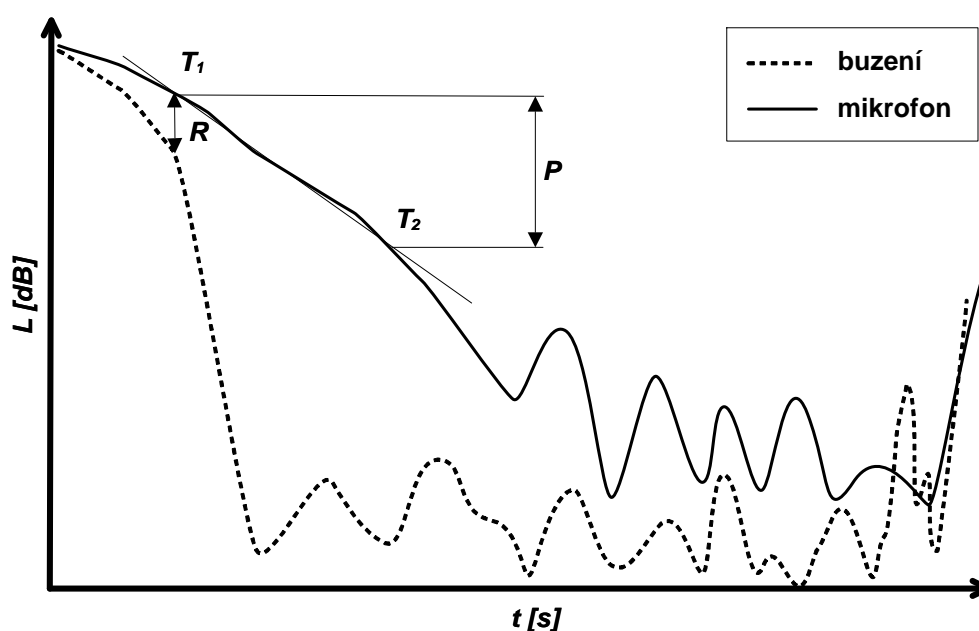
Obr. 11 – Vývojový diagram algoritmu pro přímé vyhodnocení poklesu energie

3.9.2 Parametry vyhodnocení

Samotný průběh energie zmíněný v předchozí kapitole, je sice jistým vodítkem ke stanovení doby dozvuku, ale sám o sobě k jejímu určení nestačí. Již bylo uvedeno, že princip stanovení doby dozvuku spočívá v tom, že energie budicího signálu se v případě skokového signálu mění (klesá) rychleji než energie zachyceného signálu mikrofonem – ta je ovlivněna právě dozváním zvuku v prostoru. Nezbyvá tedy než určit bod, respektive okamžik, odkud se v čase bude doba dozvuku vyhodnocovat. Situaci ilustruje obr. 12, na kterém jsou znázorněny dvě křivky. Rychleji klesající křivka odpovídá budicímu signálu, zatímco pomaleji klesající

křivka odpovídá signálu reprezentujícímu odezvu prostoru. Hledaný okamžik, kdy v zachyceném signálu na mikrofonu převažuje energie doznívajícího prostoru, se tedy logicky musí nacházet v místě, ve kterém je rozdíl mezi oběma signály dostatečný.

Je třeba zdůraznit, že při vyhodnocování doby dozvuku jakožto časového parametru není tedy podstatná absolutní velikost hladin signálů, ale rozdíl v průběhu jejich poklesu. Rovněž je důležité mít na paměti, že oba signály mají rozdílnou fyzikální podstatu, byť reprezentují přenos stejné informace. Proto je nezbytné oba signály vhodným způsobem normalizovat, aby bylo možno je porovnat. Oba průběhy energie jsou proto vyjadřovány jako hladiny v logaritmické míře a zároveň normalizovány na maximum, kterému je potom přiřazena hladina 0 dB. Tím je možnost vlastního porovnání usnadněna.



Obr. 12 – Vyhodnocení dozvuku z poklesu energie

Máme-li k dispozici dvě porovnatelné křivky, lze přistoupit k samotnému vyhodnocení doby dozvuku. Nejprve je nutné stanovit okamžik, kdy v signálu převažuje energie odrazů. Takový okamžik leží v místě, ve kterém je energie budícího signálu dostatečně malá (klesá rychleji než signál zachycený mikrofonem), nachází se tedy v místě, kde se obě křivky „rozcházejí“. Počáteční bod je tedy místo na časové ose, kdy se obě křivky vzdálí o určitou hodnotu. Na obr. 12 je tento rozhodný okamžik označen symbolem T_1 . Rozdíl obou průběhů v okamžiku T_1 je označen R , jeho hodnota byla zvolena 3 dB. Pro interpolaci zachyceného průběhu je rovněž nezbytné stanovit časový okamžik T_2 , jež definujeme jako pokles o určitou hodnotu od bodu T_1 . Hodnotu poklesu je označena jako P . Zde je tedy analogie s proložením poklesové

křivky, jak bylo popsáno u předchozí metody. Následně přistupujeme k provedení lineární regrese mezi body T_1 a T_2 . Ze směrnice takto získané přímky potom můžeme určit dobu dozvuku.

Klíčovými parametry celého postupu jsou tedy časové okamžiky T_1 a T_2 , resp. rozdíl hladin R (pro určení okamžiku T_1) a pokles P . V případě hudebního signálu je volba hodnoty P kompromisem. Kromě dostatečného poklesu (větší hodnota P) nezbytného pro vyhodnocení doby dozvuku je potřeba vzít ještě v úvahu dostatečný odstup obou průběhů od úrovně dané následujícím průběhem signálu a rušením. Ten naopak zvolenou hodnotu P nutně snižuje, neboť bod T_2 musí ležet v místě, kde ještě nedochází k opětovnému nárůstu energie v důsledku dalšího vývoje skladby.

V souladu s principy popsány v této kapitole byl naprogramován skript v MATLABu pro praktickou realizaci algoritmu uvedeného na obr. 11. Grafickým výstupem zmíněného skriptu je potom průběh energií obou signálů, ze kterého je vyhodnocena doba dozvuku. Program byl aplikován na artefakty hudebního signálu nalezené způsobem popsáným v 3.6. Získané výsledky v rámci experimentu jsou zmíněny v kapitole 4.5.3.

4 Experiment

Součástí práce je i vlastní experiment. Jeho cílem bylo vyzkoušet navržené měřicí metody založené na hudebním signálu v reálných podmínkách a porovnat jejich výsledky s klasickými metodami měření. S ohledem na dostupné prostory, možnosti a vybavení byla zvolen postup, kdy byla modelová situace simulována jako reálná hudební produkce. Ve vybraném společenském sále byl instalován běžně užívaný ozvučovací systém. Nejprve byly změřeny parametry prostoru (doba dozvuku, rozložení akustického pole) i použitého ozvučovacího systému (amplitudová frekvenční charakteristika) konvenčním způsobem. Následně byl k měření použit zvolený hudební signál a ve stejných měřicích bodech byl proveden časový záznam signálu z mikrofonů. Na takto získané záznamy byly posléze aplikovány navržené metody založené na využití hudebního signálu.

4.1 Použitý prostor

Celý experiment byl realizován v sále kulturního domu obce Žilov. Jedná se o univerzální sál pro divadelní a hudební představení, koncerty, plesy a různá společenská setkání. Prostor je členěn na tři části: přísálí, jeviště a vlastní sál. Rozměry sálu jsou 10,4 m x 8,8 m při výšce



Obr. 13 – Pohled do sálu

4 m, maximální obsaditelnost (uspořádání pro divadelní představení) představuje cca. 120 diváků. Sál je stavební součástí budovy původního hostince z počátku minulého století. Současný stav je výsledkem úprav provedených v roce 1979, kdy bylo dostavěno přísálí a jeviště. Použité technologie a materiály odpovídají době realizace. Z hlediska akustických vlastností materiálů stojí za zmínku parketová podlaha, umakartový kazetový strop a částečný umakartový obklad stěn. Jako akusticky pohltivé v sále působí těžké závěsy na oknech, opona a dělicí závěsy mezi sálem a přísálím. Nejsou zde realizovány žádné specifické akustické úpravy jako instalace pohltivých či rozptylových prvků. Současný vzhled sálu zachycuje obr. 13.

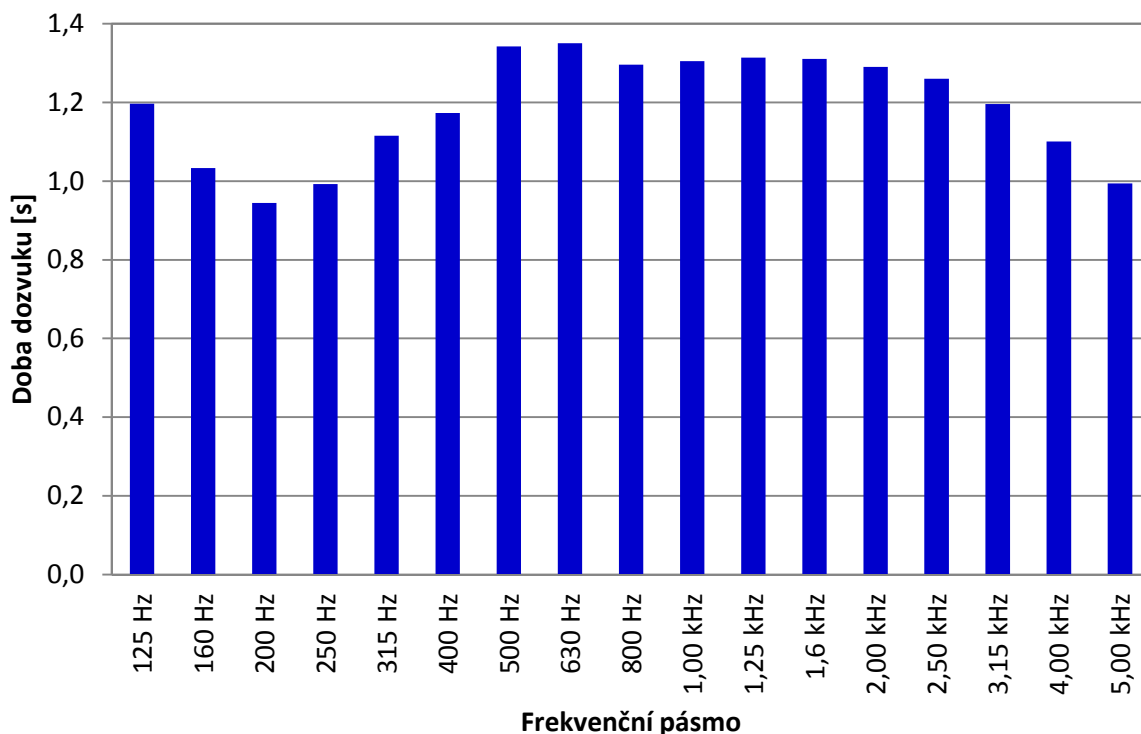
4.2 Měření doby dozvuku v sále

V rámci experimentu byla změřena doba dozvuku a rozložení akustického pole v prostoru. Součástí měření prostorové akustiky bylo samozřejmě i vyhotovení dokumentace geometrického uspořádání zdrojů zvuku a mikrofonů.

Měření doby dozvuku bylo provedeno v souladu s doporučením normy [5] metodou přerušného šumu. Vzhledem k možnému nerovnoměrnému rozložení akustického pole v místnosti bylo dodrženo pravidlo pro časové a prostorové průměrování. Při použití čtyř mikrofonů ve třech různých umístěních bylo provedeno průměrování pro celkem 12 míst. Každé měření bylo třikrát opakováno. Zároveň bylo dodrženo umístění mikrofonů nejméně 1,5 m od sebe, minimálně 2 m od jakéhokoliv zdroje zvuku a 1 m od jakéhokoliv povrchu v místnosti. Měření bylo provedeno pro dvě pozice zdroje zvuku. Celé měření doby dozvuku bylo řízeno specializovanou SW aplikací pro multianalyzátor B&K PULSE. Tím je automaticky vyřešeno průměrování, dodržení odstupů od rušivého pozadí a řízení průběhu celého měření. Změřené doby dozvuku pro jednotlivá pásma jsou uvedeny v tab. 2 a graficky znázorněny na obr. 14.

Pásma	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz
R_T [s]	1,20	1,03	0,94	0,99	1,12	1,17
Pásma	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1,0 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
R_T [s]	1,34	1,35	1,30	1,30	1,31	1,31
Pásma	2,0 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4,0 kHz	5,0 kHz	
R_T [s]	1,29	1,26	1,20	1,10	0,99	

Tab. 2 – Doba dozvuku v sále změřená metodou přerušného šumu



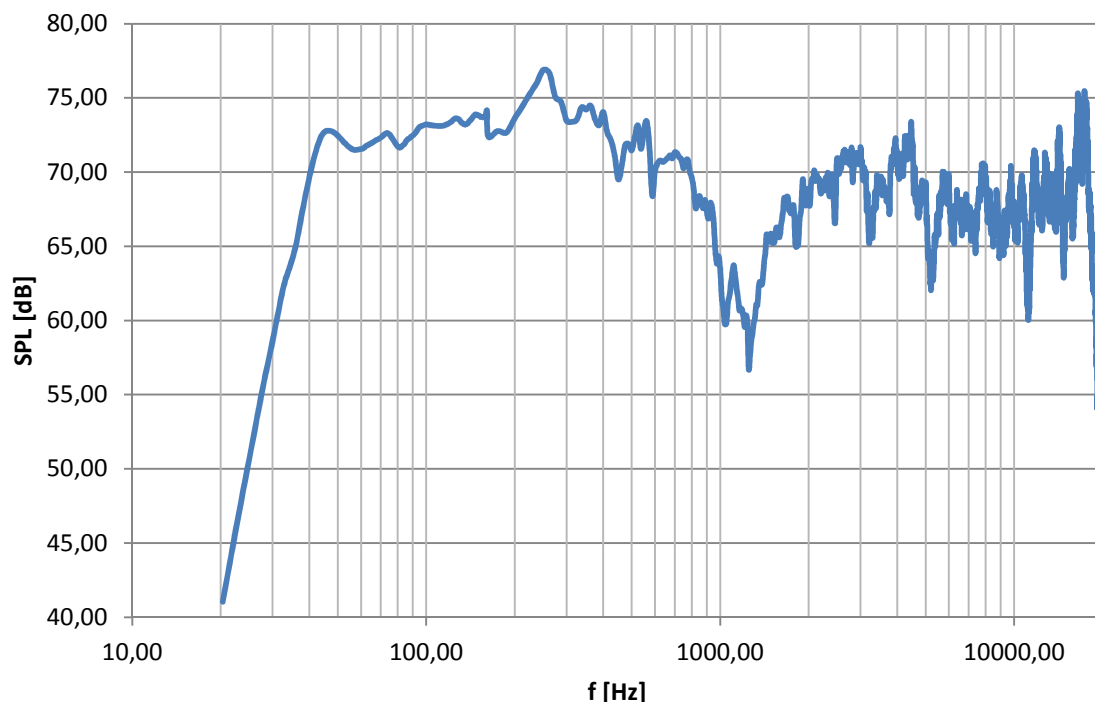
Obr. 14 – Frekvenční průběh doby dozvuku

4.3 Použitý ozvučovací systém

K experimentu byl využit středně velký ozvučovací systém běžně používaný na koncertech. Systém byl koncipován jako stereofonní a čtyřpásmový. Jeho základ představovaly třípásmové reproboxy EAW AS660i, jeden pro každý kanál sterea. Sestava byla dále doplněna o dva subbasové boxy pro každý kanál. O rozdělení signálu do zesilovačů pro jednotlivá pásma se staral digitální signálový procesor Sabine NAV4800. Využity byly celkem tři stereofonní zesilovače. Jeden pro subbasové boxy, jeden pro hlubotónovou sekci a jeden společně pro středový a výškový reproduktor, mezi nimiž je frekvenční dělení zajištěno pasivní výhybkou uvnitř boxů. Signálový procesor kromě frekvenční výhybky obstarává i ekvalizaci jednotlivých pásem podle doporučení výrobce a případnou korekci zpoždění. Rovněž poskytuje funkci limiteru, aby nedocházelo k přetěžování reproduktorů. Pro účely experimentu bylo nastavení signálového procesoru upraveno tak, aby nedocházelo k ovlivnění měření a bylo možné provést objektivní porovnání. Byla vyřazena veškerá zpoždění, ekvalizéry a dynamické procesory. Procesor pracoval pouze jako frekvenční výhybka.

Uspořádání ozvučovacího systému bylo provedeno stejně jako při běžné produkci, tím je myšlen počet reprosoustav, jejich prostorové uspořádání a směřování. Zvolená konfigurace nebyla zcela optimální, avšak s ohledem na ostatní okolnosti je systém takto běžně provozovaný.

ván. Pro úplnost byla ještě změřena amplitudová frekvenční charakteristika systému v bezodrazové komoře, metodou vycházející z normy [14]. Výsledná charakteristika je znázorněná na Měření bylo provedeno rovněž bez ekvalizace v signálovém procesoru. Naměřené zvlnění charakteristiky dobře odpovídalo problematickým frekvencím, které výrobce doporučuje korigovat.



Obr. 15 – Frekvenční charakteristika ozvučovacího systému

4.4 Použitá měřicí technika

Jádro měřicího řetězce představuje multianalyzátor zvuku a vibrací PULSE dánské firmy Brüel & Kjaer. Konkrétně použitý model 3560C v sobě kombinuje dva nezávislé signálové generátory a čtyři analogové vstupy. Analogové vstupy mohou zpracovávat obecné napěťové signály o frekvencích do 25 kHz nebo k nim mohou být připojeny měřicí mikrofony či jiné snímače. Podporuje přitom snímače standardu TEDS. Přístroj je propojen pomocí rozhraní Ethernet s řídicím počítačem, na kterém je instalován ovládací software. Poměrně propracovaná platforma umožňuje multianalyzátor využít pro mnoho druhů akustických měření.

Vestavěné generátory signálů umožňují vytvářet běžné měřicí signály (harmonické průběhy, filtrovaný šum, atd.), případně přehrát uživatelem definovaný zvukový soubor. Všechny tyto možnosti bylo během experimentu postupně využito. Pro měření pomocí šumu bylo využito interního generátoru, MLS signál byl připraven pomocí jiných nástrojů a do analyzátoru na-

hrán jako standardní zvukový soubor typu .wav. Pro přehrávání vzorků hudebního signálu byl použit externí CD přehrávač, neboť omezená paměť multianalyzátoru neumožnila importovat dostatečně dlouhý záznam hudebního signálu.

Pro snímání akustického tlaku v jednotlivých bodech byly k analyzátoru připojeny měřicí mikrofony od stejného výrobce. Během experimentu byly použity dva druhy mikrofonů. Při měření doby dozvuku a rozložení akustického pole byly použity mikrofony pro difúzní akustické pole typu 4243. Pro ostatní měření pak byly použity mikrofony typu 4190C pro volné akustické pole. V obou případech se jednalo o ½" mikrofony vyhovující svým frekvenčním rozsahem dané aplikaci. Před každým měřením byla správná funkce mikrofonů ověřena kalibrátorem.

Analyzátor umožňuje použít FFT analýzu se široce konfigurovatelnými parametry případně i 1/n-oktávovou analýzu, rovněž s možností uživatelského nastavení. Nad těmito základními druhy analýz také existuje celá řada rozšiřujících softwarových aplikací pro složitější měření. Součástí multianalyzátoru je tzv. Data Recorder. Jedná se v podstatě o aplikaci schopnou zaznamenávat časový průběh všech měřených veličin na harddisk řídicího počítače. Zaznamenaná data je potom možné přehrávat a provádět jejich analýzu stejně, jako by se jednalo o měření probíhající v reálném čase. To je výhodné zejména v případě, kdy měření nelze z nejrůznějších důvodů opakovat. Záznam se provede pouze jednou a na získaná data je poté možné aplikovat různé metody analýzy, resp. analýzu daného jevu lze libovolně opakovat. Využit také můžeme přímého exportu záznamu v různých formátech. Data Recorder byl použitý právě při provedeném experimentu. V terénu byly pořízeny časové záznamy, poté následoval jejich převod do formátu .wav a v další fázi byly analyzovány. Specializovaných SW aplikací dodávaných s analyzátozem bylo použito pouze při měření rozložení akustického pole a pro změření doby dozvuku metodou přerušovaného šumu. Pro měření frekvenční charakteristiky ozvučovacího systému stačí pouze vhodně nakonfigurovaná základní aplikace.

Při práci se signály, které bylo nutno přehrávat z jiného zdroje, byl měřicí řetězec konfigurován tak, že jeden kanál analyzátoru nahrával pro kontrolu budicí signál a ke zbývajícím třem byly připojeny mikrofony. Jeden mikrofón byl typu 4943 optimalizovaný pro difúzní pole a dva typu 4190 optimalizované pro volné pole. Celkem byla v prostoru zvolena čtyři měřicí místa s ohledem na vzdálenost jednotlivých zdrojů, překážek apod. To znamená, že pro každý druh měřicího signálu bylo nutné měření dvakrát opakovat, aby se dvěma mikrofony pokryla 4 měřicí místa.

4.5 Výsledky experimentu

Hlavním posláním experimentu bylo porovnat různé způsoby měření doby dozvuku. Doba dozvuku v sále byla nejprve měřena běžně užívanou a osvědčenou metodou, tj. metodou přerušného šumu. Detailní informace o provedeném měření, měřicí metodě a získané výsledky jsou uvedeny v kapitole 4.2. Zjištěné hodnoty byly následně porovnány s výsledky měření dozvuku za pomoci hudebního signálu. Prakticky byly realizovány metody popsané v kapitolách 3.8 a 3.9, a to za stejných podmínek jako proběhlo úvodní měření klasickou metodou, tedy bez vnějšího rušení. Tím je myšleno měření v sále bez diváků a bez přítomnosti nějakého dalšího zvukového signálu, který by měření mohl ovlivnit. V tomto stádiu vývoje nebyly měřicí metody koncipovány tak, aby dokázaly automaticky eliminovat rušení způsobené například hlučícími diváky.

4.5.1 Metoda integrace impulsové odezvy – použití MLS signálu

Bližší popis metody založené na zpětné integraci impulsové odezvy je uveden v kapitole 3.8. Jelikož je tato metoda běžně používána v případech, kdy je budicím signálem impuls nebo sled impulsů, bylo pro porovnání nejprve provedeno měření za použití MLS signálu s následujícími parametry:

- MLS řádu 9, tj. 512 členů posloupnosti;
- Vzorkovací frekvence 44,1 kHz;
- Úroveň signálu $\pm 0,99$ rozsahu wav souboru.

K získání budicího signálu byl použit skript v MATLABu, jehož základem je generující posloupnost 9. řádu vytvořená způsobem popsaným v [13]. Vygenerovaná posloupnost byla upravena tak, aby ji bylo možné dále zpracovat a exportovat do nekomprimovaného formátu vhodného k přehrání do reprodukcího řetězce. Členy posloupnosti nabývají pouze dvou stavů -1 a +1. K zamezení případného přebuzení a zkreslení signálu při jeho exportu do formátu wav byla jejich amplituda omezena na 99 % možného rozsahu. Takto připravený signál byl uložen do generátoru přístroje PULSE a přehráván do prostoru.

Měření bylo prováděno opakovaně, aby bylo možné pro zpřesnění získané hodnoty průměrovat. Konkrétně byly získané hodnoty průměrovány pro dvojí umístění mikrofону v sále a pro dvě opakování. Tento mechanismus průměrování byl zvolen proto, aby byl v souladu s počtem průměrování při použití hudebního signálu, jak bude zmíněno v následující kapitole. Získané průměrované hodnoty doby dozvuku pro jednotlivá pásma jsou uvedeny níže v tab. 3 a v tab. 8, která srovnává jednotlivé metody a je uvedena v kapitole 5.

Pásmo	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz
R_T [s]	1,00	0,98	0,87	0,96	0,98	1,18
Pásmo	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1,0 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz
R_T [s]	1,26	1,19	1,01	1,16	1,18	1,12
Pásmo	2,0 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4,0 kHz	5,0 kHz	
R_T [s]	1,11	1,13	1,13	1,01	0,96	

Tab. 3 – Doba dozvuku měřená pomocí signálu MLS

4.5.2 Použití hudebního signálu

Algoritmus popsáný v kapitole 3.8.1 byl posléze aplikován na zvolený hudební signál, přesněji řečeno na artefakty vybrané způsobem detailně rozebraným v kapitole 3.6. Stejně jako v předchozím případě bylo měření opakováno a získané hodnoty byly průměrovány. Celkem byla průměrována čtyři měření, a to za podmínek stejných jako v předchozím případě – pro dvě místa v prostoru a pro dva různé druhy hudebního signálu, jak ukazuje tab. 4. Doba dozvuku byla přitom vyhodnocována pro jednotlivá oktávová pásma.

Signál R_T [s]	Pásmo					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Metal - bod A	1,26	1,63	1,82	1,32	1,54	2,37
Metal - bod B	0,66	1,12	1,44	2,26	1,71	1,97
Jazz - bod A	0,91	1,27	0,74	0,83	2,79	1,63
Jazz - bod B	1,18	0,56	1,01	0,94	1,20	0,99

Tab. 4 – Doba dozvuku měřená pomocí hudebního signálu

Během praktického měření se ukázalo, že dobu dozvuku pro stanovené parametry bylo možno vyhodnocovat pouze jako T_{20} , neboť poklesové křivky získané tímto způsobem větší rozpětí interpolovaného úseku neumožňovaly. Výsledné průměrované hodnoty jsou prezentovány níže, v tab. 5, a v rámci souhrnné tabulky srovnávající získané hodnoty všech použitých měřících metod (Tab. 8).

Pásmo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
R_T [s]	1,00	1,15	1,25	1,34	1,81	1,74

Tab. 5 – Výsledné průměrované hodnoty doby dozvuku

4.5.3 Výsledky metody přímého porovnání poklesu energie

Dalším krokem byla praktická realizace metody přímého porovnání poklesu energie navržená v kapitole 3.9. Při měření bylo použito artefaktů hudebního signálu jako v případě metody

uvedené v předchozí kapitole. Opět bylo provedeno stejné průměrování. Metoda byla aplikována pro dva body v prostoru a dva druhy hudebního signálu. Zprvu bylo experimentováno s parametry vyhodnocení. Byly testovány různé varianty s cílem dosáhnout co největšího využití dané dynamiky použitých hudebních signálů, resp. nalezených artefaktů. Vzhledem k daným vlastnostem signálu byly nakonec zvoleny následující parametry analýzy: Délka okna integrace energie 441 vzorků tj. 0,01s. Jako počáteční bod poklesu bylo zvoleno místo, kde hodnota rozdílu $R = 3$ dB (viz obr. 12). Pro určení jednotlivých okamžiků (T_1 a T_2) kterými je vedena aproximační přímka, byl zvolen pokles hladiny akustického tlaku $P = 10$ dB. Zde vychází najevo určité nevýhody zmiňovaného postupu, neboť vyšší hodnoty rozsahu aproximace se vzhledem k vlastnostem použitého signálu nepodařilo dosáhnout. Postupně byly určeny doby dozvuku v jednotlivých pásmech pro všechna provedená měření, tyto jsou uvedeny v tab. 6.

Signál R_T [s]	Pásmo					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Metal - bod A	0,66	2,04	0,30	0,73	0,77	0,63
Metal - bod B	0,76	1,70	0,46	0,60	1,25	0,47
Jazz - bod A	0,45	0,30	1,76	0,42	0,65	0,31
Jazz - bod B	2,60	0,98	0,98	0,96	2,30	0,60

Tab. 6 – Doba dozvuku získaná pomocí hudebního signálu – přímý pokles

Stejně jako v předchozích případech, byly doby dozvuku v jednotlivých pásmech získané při každém z opakovaných měření průměrovány, jak ukazuje tab. 7. Výsledné hodnoty jsou rovněž pro snazší porovnání s ostatními metodami uvedeny v tab. 8.

Pásmo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
R_T [s]	1,12	1,26	0,88	0,68	1,24	0,50

Tab. 7 – Průměrované hodnoty doby dozvuku – přímý pokles

4.5.4 Porovnání naměřených hodnot

V kapitolách 4.5.1 a 4.5.2 je popsán způsob vyhodnocení doby dozvuku metodou zpětné integrace získané impulsové odezvy. Klíčovou část výzkumu představuje porovnání této metody aplikované na obvykle užívaný budicí signál typu MLS a na vybrané artefakty hudebního signálu. Vzájemným srovnáním hodnot v tab. 3 až tab. 5 docházíme ke zjištění, že v pásmech 125 Hz až 1 kHz jsou vypočtené hodnoty pro oba dva typy signálu srovnatelné. Resp. jejich rozdíl není větší než 0,1 s, tedy je dostatečně malý a odpovídá přesnosti běžně používaných metod. Podstatně více se liší hodnoty doby dozvuku v pásmech od 1 kHz výše. V souvislosti s tímto jevem je také nutno připomenout význam průměrování. V obou případech byly prů-

měřovány celkem čtyři průběhy měření. Z tabulky je patrné, že rozptyl změřených hodnot je výrazně větší právě ve vyšších frekvenčních pásmech. Rovněž je zřejmé, že v případě budícího signálu MLS je rozptyl získaných hodnot doby dozvuku menší než v případě jednotlivých druhů hudebního signálu. Tyto poznatky potvrzují, že kromě vlivu průměrování je nejpodstatnějším faktorem volba budícího signálu. Ukazuje se, že vyhodnotit dobu dozvuku ve vyšších frekvenčních pásmech je složitější. Vzhledem k charakteru hudebního signálu vzniká problém s dostatečným vybuzením na těchto frekvencích a tudíž problém s rozsahem poklesové křivky. To lze přičíst tomu, že energie hudebního signálu ve vyšších kmitočtech je obecně nižší, a to ať již v porovnání s ostatními částmi spektra hudebního signálu, tak zejména v porovnání s klasickými měřicími signály. To ostatně vyplývá i z technického rozboru hudebního signálu, kterému se detailně věnuje kapitola 3.1 a související podkapitoly.

Výsledky metody vyhodnocení přímého poklesu energie jsou popsány v kapitole 4.5.3. Pohledem do tabulky tab. 6 zjistíme, že doby dozvuku změřené touto metodou pro jednotlivé měřicí pokusy mají větší rozptyl, než hodnoty získané metodou integrace impulsové odezvy. Rovněž porovnání průměrovaných hodnot indikuje, že ve většině případů se hodnoty získané přímým porovnáním energetického poklesu výrazněji odlišují nejen od hodnot získaných metodou kruhové korelace, ale zejména od provedeného kontrolního měření osvědčenou metodou přerušového šumu. Lze se důvodně domnívat, že danou odchylku kromě samotného principu metody způsobují především zvolené parametry vyhodnocení, respektive vlastnosti použitého hudebního signálu.

5 Dosažené výsledky

V první části byly detailně rozebrány vlastnosti hudebního signálu. Na základě tohoto rozboru byly vybrány dvě konkrétní nahrávky, jejichž vlastnosti byly podrobně analyzovány. Na základě toho potom byla navržena koncepce měřicího systému, který by vlastností hudebního signálu dokázal využít pro měření některých parametrů jak ozvučovacího systému, tak ozvučovaného prostoru.

V případě měření parametrů ozvučovacího systému se prokázalo, že lze použít hudební signál k měření amplitudové frekvenční charakteristiky ozvučovacího systému. Ukázalo se, že vzhledem k vlastnostem hudebního signálu je v tomto případě klíčová doba průměrování spektrální analýzy. Jako druhý parametr ozvučovacího systému, který lze měřit pomocí hudebního signálu, se jeví zpoždění zvukového systému. Potvrdilo se, že na základě korelační analýzy lze určit zpoždění mezi vstupním signálem a signálem zachyceným pomocí měřicího mikrofону.

Největší část práce je potom věnována měření parametrů ozvučovaného prostoru – konkrétně měření doby dozvuku. Na základě rozboru hudebního signálu byl zvolen následující postup. Nejprve jsou v hudebním signálu vyhledávány specifické artefakty impulsního či skokového charakteru. Za tímto účelem byl vytvořen algoritmus pracující rovněž na principu korelační analýzy. Nalezené artefakty jsou potom dále využity k určení doby dozvuku. Pokud jde o určení doby dozvuku, byly navrženy dvě metody. První z nich využívá principu integrace získané impulsové odezvy, druhá je potom založena na přímém porovnání energetického poklesu budicího signálu a signálu zachyceného měřicím mikrofónem ve zkoumaném prostoru.

Součástí práce je rovněž experiment, při kterém byly porovnány výsledky změřené oběma metodami založenými na hudebním signálu s výsledky získanými měření pomocí klasických metod. Pro porovnání tedy bylo provedeno měření doby dozvuku metodou přerušného šumu a metodou integrace impulsové odezvy založené na signálech MLS. Výsledky provedeného experimentu shrnuje tab. 8. Graficky potom výsledky dosažené jednotlivými měřicími metodami ukazuje obrázek v příloze D. Z tab. 8 je zřejmé, že metoda užívající hudební signál inspirovaná klasickým impulsním způsobem měření dává výsledky srovnatelné s klasickými způsoby měření. Přitom je vidět, že odchylka naměřených hodnot je větší ve vyšších pásmech. Tuto odchylku lze vysvětlit nedostatečným vybuzením prostoru v těchto frekvenčních pásmech, což je dáno vlastnostmi použitého signálu. Doby dozvuku z měření v pásmech 125 Hz až 1 kHz se liší v maximálně o 2 s, což lze vzhledem k obvyklým odchylkám klasických metod považovat za dobrý výsledek. Výsledky získané metodou přímého porovnání po-

klesu energie budicího signálu a signálů z měřicího mikrofónu vykazují odchylku větší. To lze přičíst tomu, že tato metoda je citlivější na nastavení parametrů vyhodnocení.

R_T [s]	Pásmo								
	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
PULSE - přerušný šum	1,20	1,03	0,94	0,99	1,12	1,17	1,34	1,35	1,30
Impulsní metoda - MLS	1,00	0,98	0,87	0,96	0,98	1,18	1,26	1,19	1,01
HUDBA - kruhová korelace	1,00	X	X	1,15	X	X	1,25	X	X
HUDBA - přímý pokles energie	1,12	X	X	1,26	X	X	0,88	X	X
R_T [s]	Pásmo								
	1,00 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz	2,00 kHz	2,50 kHz	3,15 kHz	4,00 kHz	5,00 kHz	
PULSE - přerušný šum	1,30	1,31	1,31	1,29	1,26	1,20	1,10	0,99	
Impulsní metoda - MLS	1,16	1,18	1,12	1,11	1,13	1,13	1,01	0,96	
HUDBA - kruhová korelace	1,34	X	X	1,81	X	X	1,74	X	
HUDBA - přímý pokles energie	0,68	X	X	1,24	X	X	0,51	X	

Tab. 8 – Souhrnná tabulka naměřených dob dozvuku

6 Závěr

Cílem předložené disertační práce bylo prozkoumat možnosti využití hudebního signálu pro akustická měření. Nejdříve bylo uvažováno praktické hledisko dané problematiky, tedy to pro jaký druh měření je takové řešení největším přínosem a jaké parametry má smysl měřit právě pomocí hudebního signálu. Na základě této úvahy byla navržena koncepce měřicího systému schopného měřit jednak některé parametry ozvučovacího systému a jednak parametry ozvučeného prostoru. Postupně pak byla věnována pozornost jednotlivým dílčím problémům.

Logicky první část výzkumu byla věnována samotnému hudebnímu signálu. Pro různé žánry byly posouzeny jak obecné vlastnosti hudebního signálu, tak zejména jeho technické parametry. Rozborem spektrálních a časových vlastností bylo potvrzeno, že je možné uvažovat o použití hudebního signálu pro měření. Následně byla hledána vhodná metoda vyhodnocení, resp. idea měřicího systému, jež by byl schopen pracovat právě s hudebním signálem a přitom v reálném provozu. Konkrétně byla pozornost orientována na využití specifických artefaktů v hudebním signálu, resp. využití krátkých úseků impulsního či skokového charakteru, které jsou dobře popsitelné a odlišitelné v celém časovém průběhu.

Jednou z klíčových otázek je v takovém případě hledání vhodného artefaktu. V kombinaci s předchozí analýzou hudebního signálu bylo zjištěno, že je zapotřebí frekvenční rozsah rozdělit do dílčích pásem, neboť specifika hudebního signálu neumožňují najít takovou pasáž, která by umožňovala měření v celém frekvenčním rozsahu najednou. Kromě vývoje samotného algoritmu bylo nutné řešit některé související problémy jako optimálního rozdělení frekvenčního rozsahu měření a optimalizace délky okna atd.

Následně byly rozpracovány dvě metody pro určení doby dozvuku za pomoci specifických artefaktů vybraných z hudebního signálu. První metoda je částečně inspirována klasickou impulsní metodou založenou např. na signálech MLS. Druhá metoda potom vychází z přímého porovnání poklesu energie signálu v prostoru. Obě zmíněné metody byly prakticky realizovány a prakticky vyzkoušeny v rámci experimentu, který byl proveden. V reálných pracovních podmínkách bylo realizováno měření jednak klasickým způsobem a potom oběma metodami založenými na užití hudebního signálu.

Zásadním zjištěním a hlavním výstupem práce je potvrzení faktu, že lze využít hudební signál k měření v oblastech akustiky, elektroakustiky a ozvučování. Skutečnosti zjištěné rozborem samotného hudebního signálu a experimentálním ověřením některých postupů se ukázalo, že kromě samotných metod jsou klíčové parametry konkrétního hudebního signálu, jež chceme využít.

Celá problematika užití hudebního signálu pro měření je velmi obsáhlá a výsledky výzkumu uvedené v této práci jsou jen velmi malou partií, která může být dále rozvíjena. Během výzkumu se objevila celá řada problémů a komplikací, jež mohou ukázat další směr vývoje. Jednou z oblastí dalšího vývoje je praktická implementace a optimalizace představené metody. Patrně nejrozsáhlejším okruhem, který si zasluhuje další pozornost je samotný hudební signál, resp. způsob jeho využití, neboť jak se ukázalo, dané a neměnné parametry hudby jsou značně omezujícím faktorem.

Literatura

- [1] **Beranek, Leo.** *Concert halls and opera houses.* New York , Springer, 2004, ISBN 0-387-95524-0
- [2] **Vlachý, Václav.** *Praxe zvukové techniky.* Praha, Muzikus, 2008, ISBN-978-80-86253-46-5
- [3] **Jan, Jiří.** *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů.* Brno, VUTIUUM, 2002, ISBN 80-214-1558-4
- [4] **Škvor, Zdeněk.** *Akustika a elektroakustika.* Praha, Academia, 2001, ISBN 80-200-0461-0
- [5] **ČSN EN ISO 3382-2.** *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech.* Praha, ÚNMZ, 2008
- [6] **ČSN EN ISO 3382-1.** *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: - Prostory pro přednes hudby a řeči.* Praha, ÚNMZ, 2009
- [7] **ČSN EN ISO 354.** *Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti.* Praha, ÚNMZ, 2003
- [8] **Rife, D. a Vanderkoy, J.** *Transfer function measurement with Maximum-Lenght Sequences,* AES, 1989
- [9] **Ren, G., Bocko, M. a Headlam, D.** *Time-frequency Test Signal Synthesis for Acoustic Measurements During Music Concerts,* San Antonio, 2009.
- [10] **Kadlec, František.** *Zpracování akustických signálů.* Praha, ČVUT, 1996, ISBN 80-01-01525-4
- [11] **Tuček, Jan.** *Měření impulsové odezvy v akustice.* Diplomová práce, Praha, FEL ČVUT, 2010
- [12] **Couvreur, Christophe.** *Generates normalized A-weighting, octave and one-third-octave digital filters,* Soubor skriptů pro výpočetní prostředí MATLAB, dostupné online: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69-octave>
- [13] **Vanderkooy, J.** *Aspects of MLS measuring systems,* AES, 1994.
- [14] **ČSN IEC 260 – 5.** *Reproduktory.* Praha, ÚNMZ 1996
- [15] **Brown, Christopher.** *Generates maximum length sequences, pseudorandom noises useful for acoustic measurements,* Skript pro výpočetní prostředí MATLAB, dostupné online: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1246-mls-m>
- [16] **Havelock, D., Kuwano, S. a Vorlander, M.** *Handbook of signal processing in Acoustics, volume 1.* New York : Springer, 2008, ISBN 978-0-387-77698-9

- [17] **Doňar, B. a Zaplatílek, K.** *MATLAB pro začátečníky*. Praha, BEN - Technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-175-6
- [18] **Doňar, B. a Zaplatílek, K.** *MATLAB začínáme se signály*. Praha, BEN - Technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-200-0
- [19] **Doňar, B. a Zaplatílek, K.** *MATLAB tvorba uživatelských aplikací*. Praha, BEN - Technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-133-0.
- [20] **Pollák, P. a Sovka, P.** *Vybrané metody číslicového zpracování signálů*. Praha : ČVUT, 2003, ISBN 80-01-02821-6.

Seznam zkratk a specifických názvů

FFT	Fast Fourier Transform – rychlá Fourierova transformace
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet – Elektronický datový list snímače – technologie, která umožňuje ukládat parametry snímače do paměti EPROM jež je jeho součástí
MATLAB	MATrix LABoratory - výpočetní prostředí pro vědeckotechnické výpočty
BPM	Beats Per Minute – počet úderů za minutu, jednotka vyjadřující tempo skladby
MLS	Maximum Length Sequence – sekvence konečné délky, signál používaný v akustice

Seznam symbolů

$G(j\omega)$	Přenosová funkce
$X(j\omega)$	Vstupní signál
$Y(j\omega)$	Výstupní signál
C	Rychlost šíření zvuku
t_A	Teplota okolí
T_s	Vzorkovací perioda
f_s	Vzorkovací frekvence
l_s	Vzdálenost odpovídající zpoždění zvukové vlny
F	Frekvence
Λ	Vlnová délka
R_{xy}	Vzájemná korelace
i, n	Indexy polí
$x(i)$	Vstupní posloupnost
$y(i)$	Výstupní posloupnost
T	Posunutí
T_{20}	Doba dozvuku vyhodnocená pro pokles o 20 dB
T_{30}	Doba dozvuku vyhodnocená pro pokles o 30 dB
R_T	Doba dozvuku
$x(t)$	Časový průběh vstupního signálu
$y(t)$	Časový průběh výstupního signálu
$h(t)$	Impulsní charakteristika systému
t	Čas
$H(P)$	Laplaceův obraz impulsní odezvy systému
$X(P)$	Laplaceův obraz vstupního signálu
$Y(P)$	Laplaceův obraz výstupního signálu
L	Délka
N	Řád posloupnosti MLS

Seznam obrázků

Obr. 1 – Časový průběh signálu - jazz.....	17
Obr. 2 – Vývojový diagram skriptu pro získání spekter.....	19
Obr. 3 – Blokové schéma měřicího systému	24
Obr. 4 – Vývojový diagram měřicího systému.....	25
Obr. 5 – Vývojový diagram detekce zpoždění	26
Obr. 6 – Vývojový diagram detekce signálu	29
Obr. 7 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an8)	33
Obr. 8 – Korelační analýza – jazz (soubor pasm_an13).....	33
Obr. 9 – Vývojový diagram měření doby dozvuku pomocí kruhové korelace.....	38
Obr. 10 – Rozdílný průběh energie.....	40
Obr. 11 – Vývojový diagram algoritmu pro přímé vyhodnocení poklesu energie	41
Obr. 12 – Vyhodnocení dozvuku z poklesu energie.....	42
Obr. 13 – Pohled do sálu.....	44
Obr. 14 – Frekvenční průběh doby dozvuku	46
Obr. 15 – Frekvenční charakteristika ozvučovacího systému	47
Obr. 16 – Časový průběh hudebního signálu - jazz.....	65
Obr. 17 – Časový průběh hudebního signálu - metal	65
Obr. 18 – Spektra signálů, doba průměrování 0,93 s, začátek záznamu	66
Obr. 19 – Spektra signálů, doba průměrování 0,93 s uprostřed záznamu	66
Obr. 20 – Spektra signálů, délka průměrování, 9,84 s, začátek záznamu	67
Obr. 21 – Spektra signálů, délka průměrování 9,84 s, uprostřed záznamu	67
Obr. 22 – Spektra signálů, délka průměrování 39,94 s.....	68
Obr. 23 – Spektra bílého šumu pro různé doby průměrování.....	68
Obr. 24 – Spektra hudebního signálu „jazz“ pro různé doby průměrování.....	69
Obr. 25 – Spektra hudebního signálu „metal“ pro různé doby průměrování	69
Obr. 26 – Spektra šumového signálu v různých místech záznamu	70
Obr. 27 – Spektra hudebního signálu „jazz“ v různých místech záznamu.....	70
Obr. 28 – Spektra hudebního signálu „metal“ v různých místech záznamu.....	71
Obr. 29 – Průběh spektra v čase po sekundách - jazz.....	72
Obr. 30 – Průběh spektra v čase po sekundách - metal	72
Obr. 31 – Průběh spektra při délce okna 512 vzorků - jazz.....	73

Obr. 32 – Průběh spektra při délce okna 512vzorků - metal	73
Obr. 33 – Detail spektra mezi – jazz (53 s – 54 s záznamu).....	74
Obr. 34 – Detail spektra – metal (57 s – 58 s záznamu)	74
Obr. 35 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an8).....	75
Obr. 36 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an9).....	76
Obr. 37 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an10).....	77
Obr. 38 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an11).....	78
Obr. 39 – Korelační analýza – jazz (soubor pasm_an12)	79
Obr. 40 – Korelační analýza – jazz (soubor pasm_an13)	80
Obr. 41 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an_pp2)	81
Obr. 42 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an_pp3)	82
Obr. 43 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an_pp4)	83
Obr. 44 – Graf porovnání doby dozvuku změřené různými metodami	84

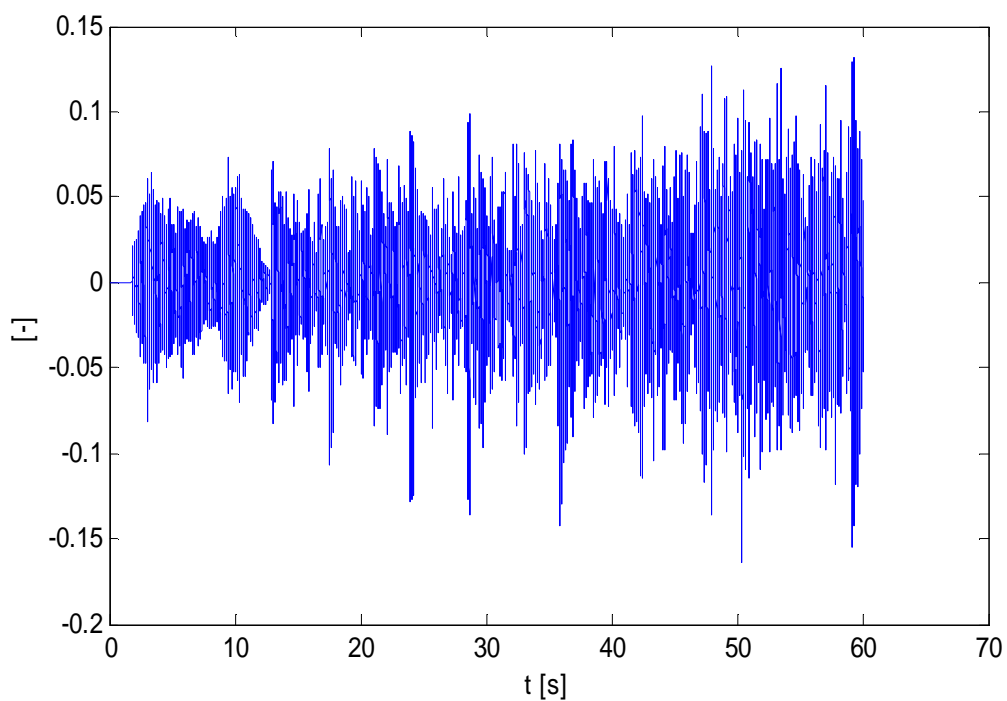
Seznam tabulek

Tab. 1 – Porovnání délky oken v jednotlivých pásmech	31
Tab. 2 – Doba dozvuku v sále změřená metodou přerušného šumu.....	45
Tab. 3 – Doba dozvuku měřená pomocí signálu MLS	50
Tab. 4 – Doba dozvuku měřená pomocí hudebního signálu	50
Tab. 5 – Výsledné průměrované hodnoty doby dozvuku	50
Tab. 6 – Doba dozvuku získaná pomocí hudebního signálu – přímý pokles	51
Tab. 7 – Průměrované hodnoty doby dozvuku – přímý pokles.....	51
Tab. 8 – Souhrnná tabulka naměřených dob dozvuku.....	54
Tab. 9 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an8)	75
Tab. 10 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an9)	76
Tab. 11 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an10)	77
Tab. 12 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an11)	78
Tab. 13 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an12)	79
Tab. 14 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an13)	80
Tab. 15 -Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an_pp2).....	81
Tab. 16 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubory pasm_an_pp3 a pasm_an_pp4).....	82

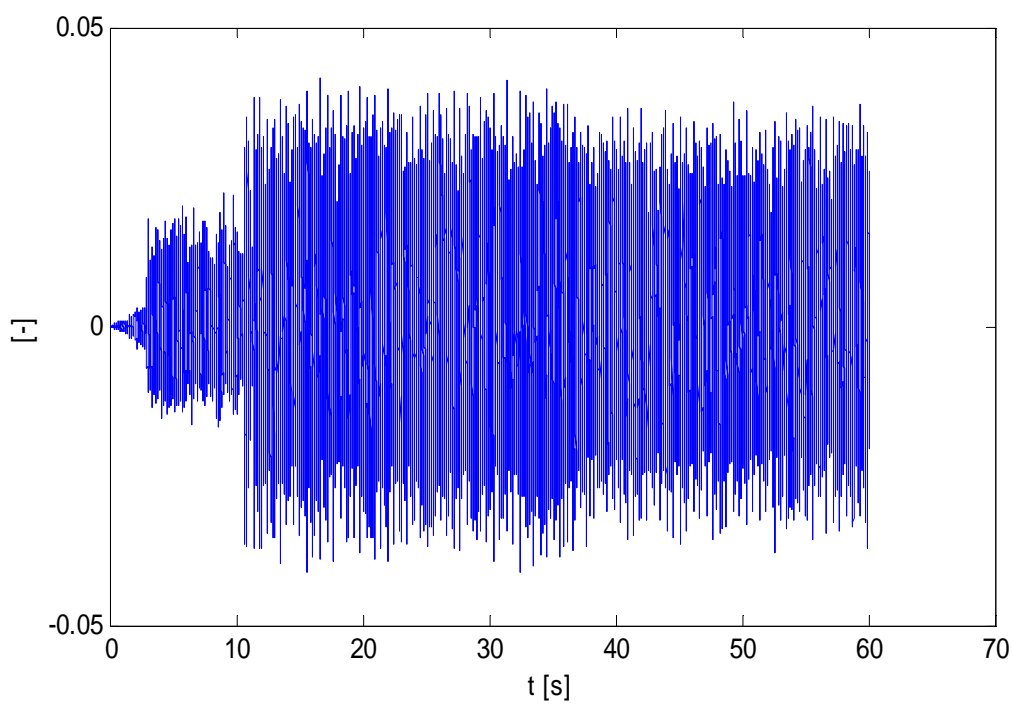
Tištěné přílohy práce

- grafické výstupy výpočtů a simulací
- seznam publikací
- zkrácený profesní životopis

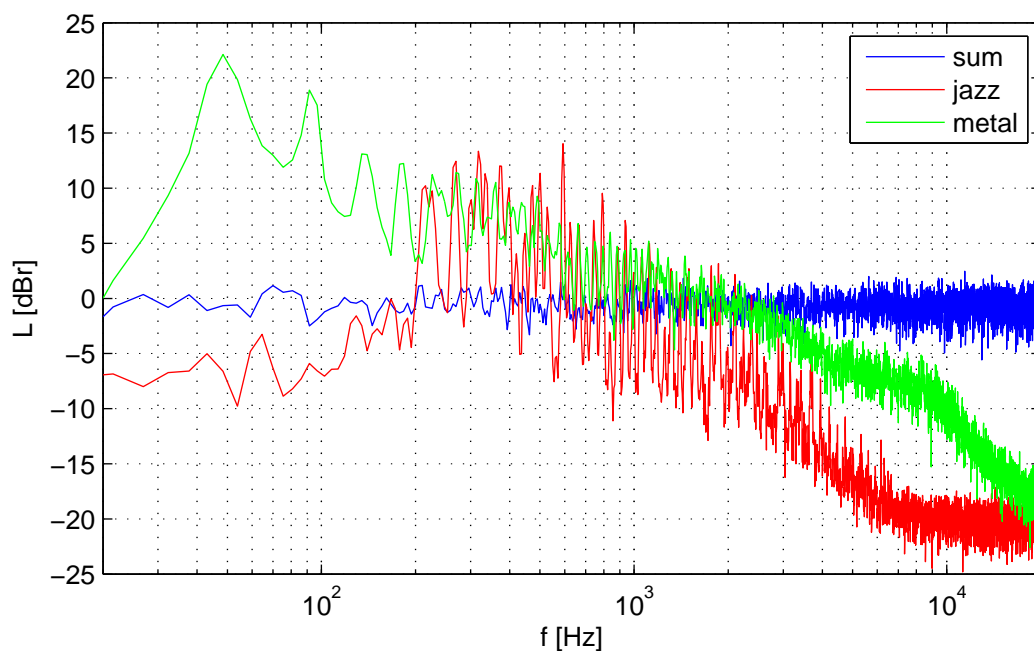
Příloha A – časové průběhy hudebního signálu



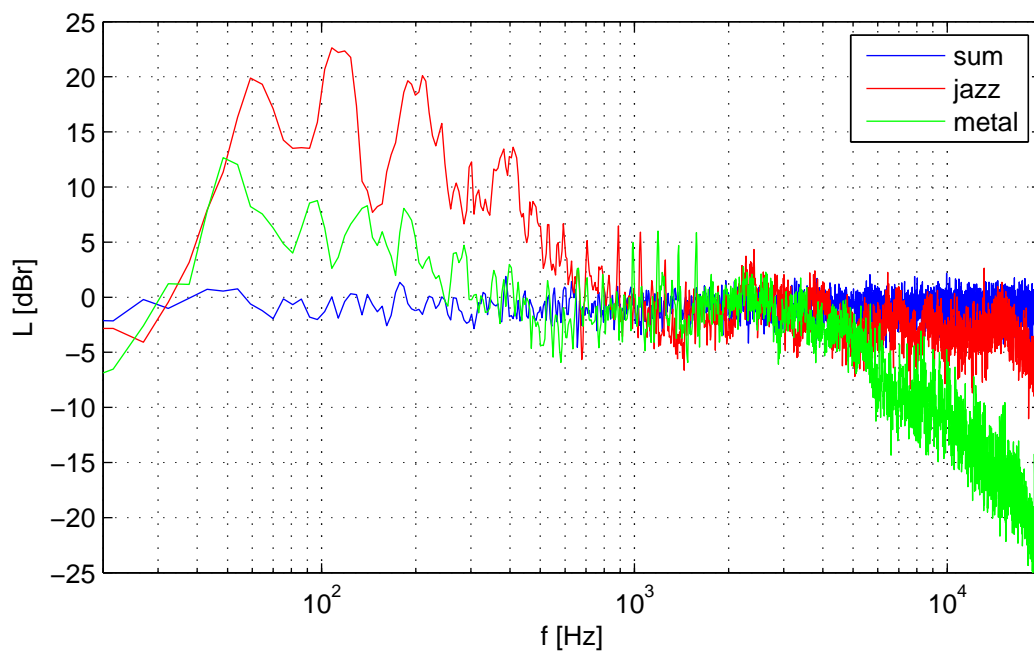
Obr. 16 – Časový průběh hudebního signálu - jazz



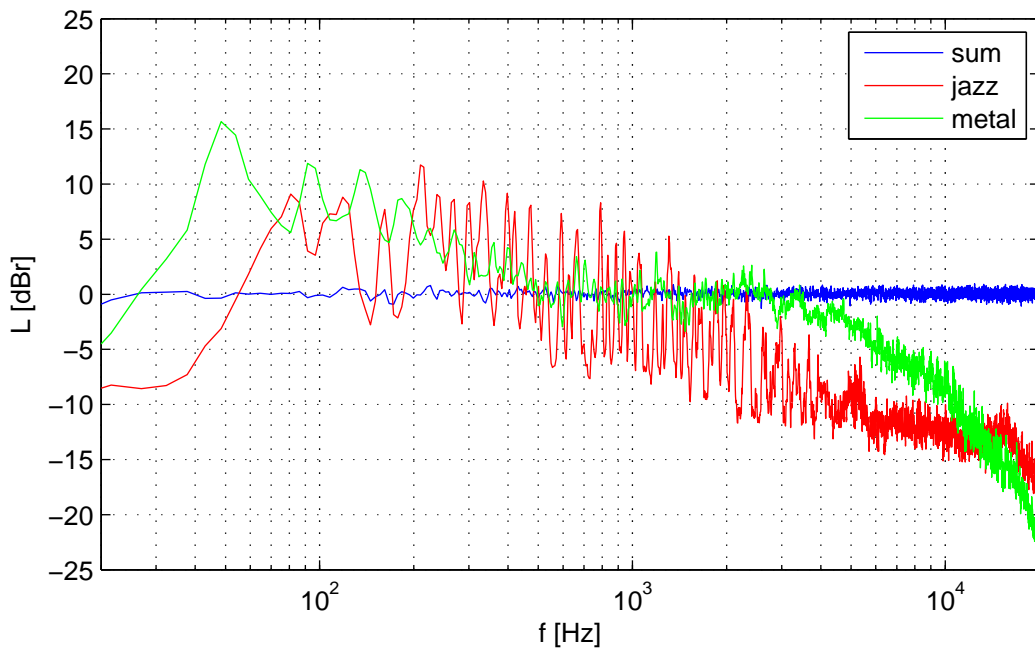
Příloha B – Spektrální rozbor hudebního signálu



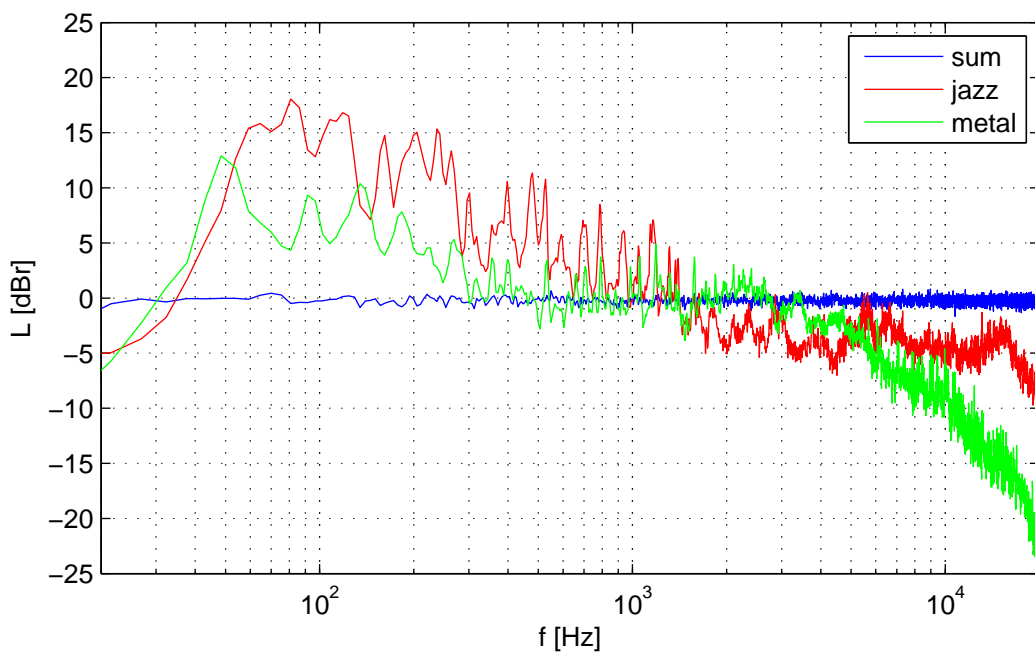
Obr. 18 – Spektra signálů, doba průměrování 0,93 s, začátek záznamu



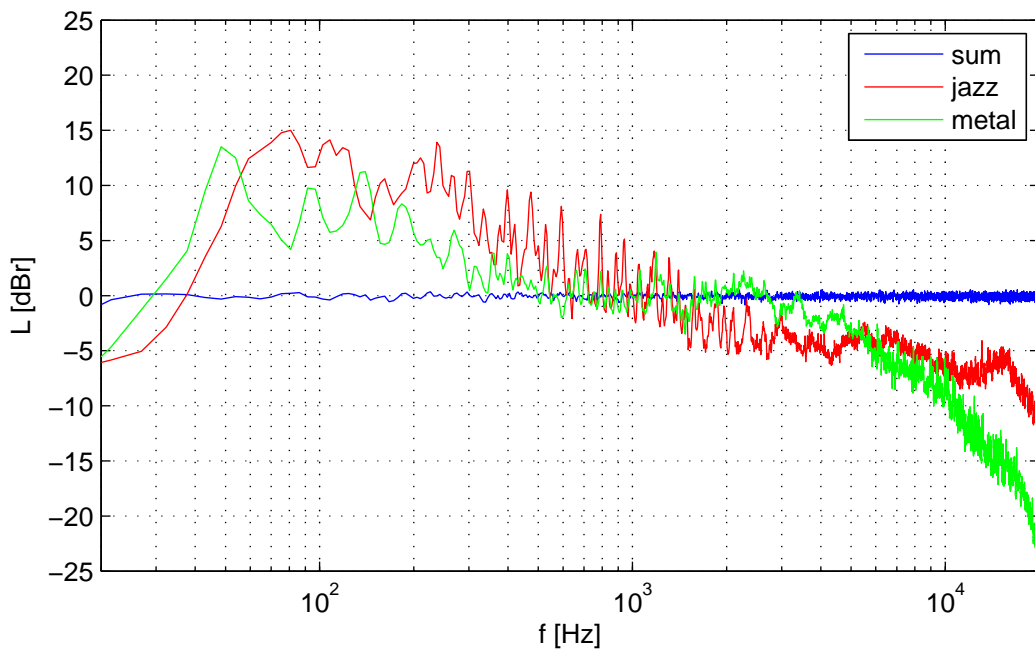
Obr. 19 – Spektra signálů, doba průměrování 0,93 s uprostřed záznamu



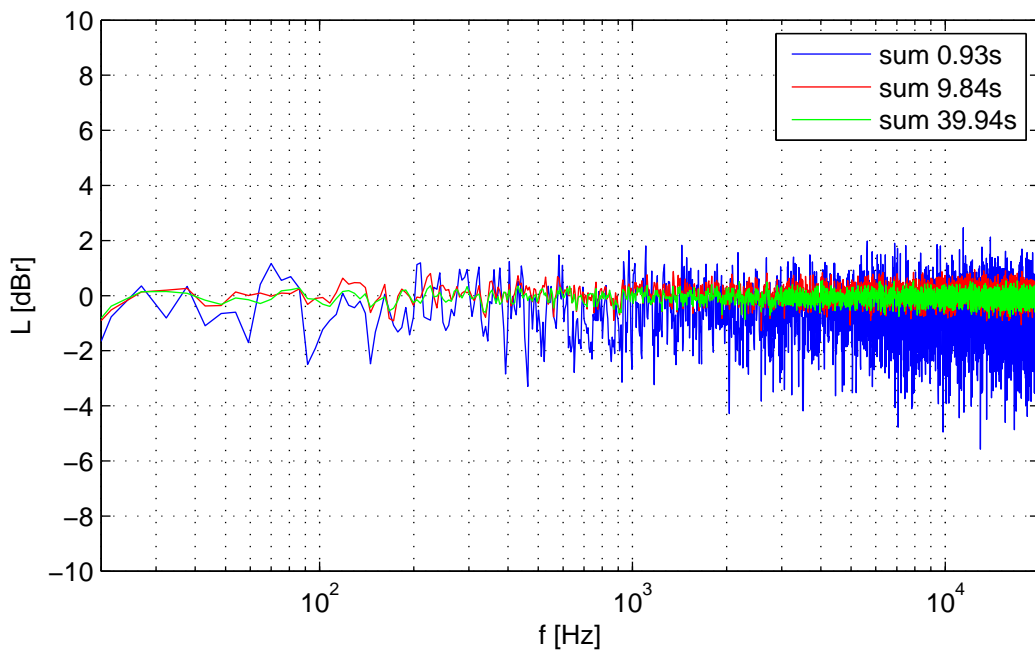
Obr. 20 – Spektra signálů, délka průměrování, 9,84 s, začátek záznamu



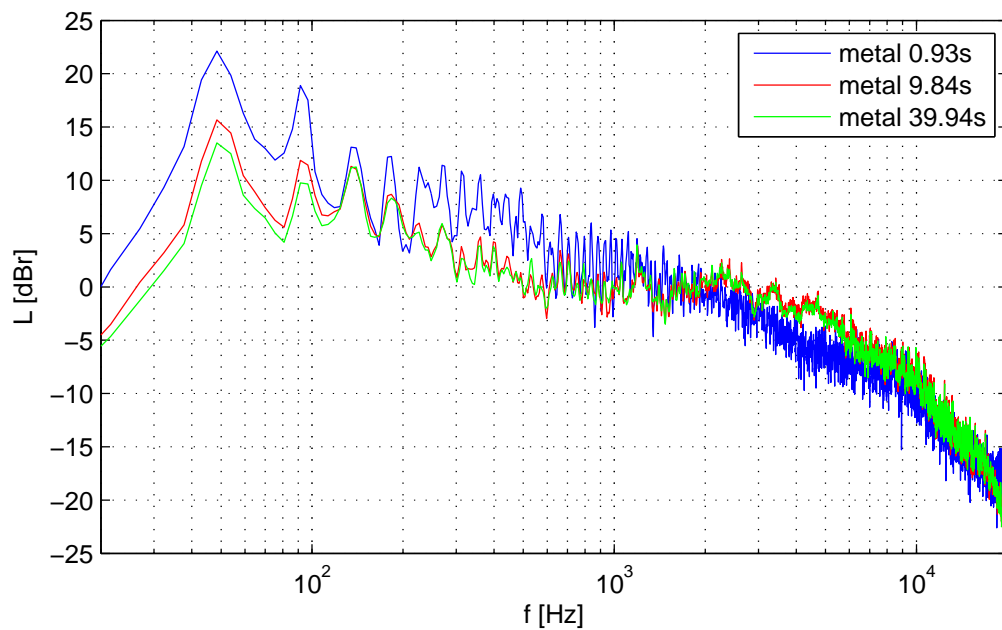
Obr. 21 – Spektra signálů, délka průměrování 9,84 s, uprostřed záznamu



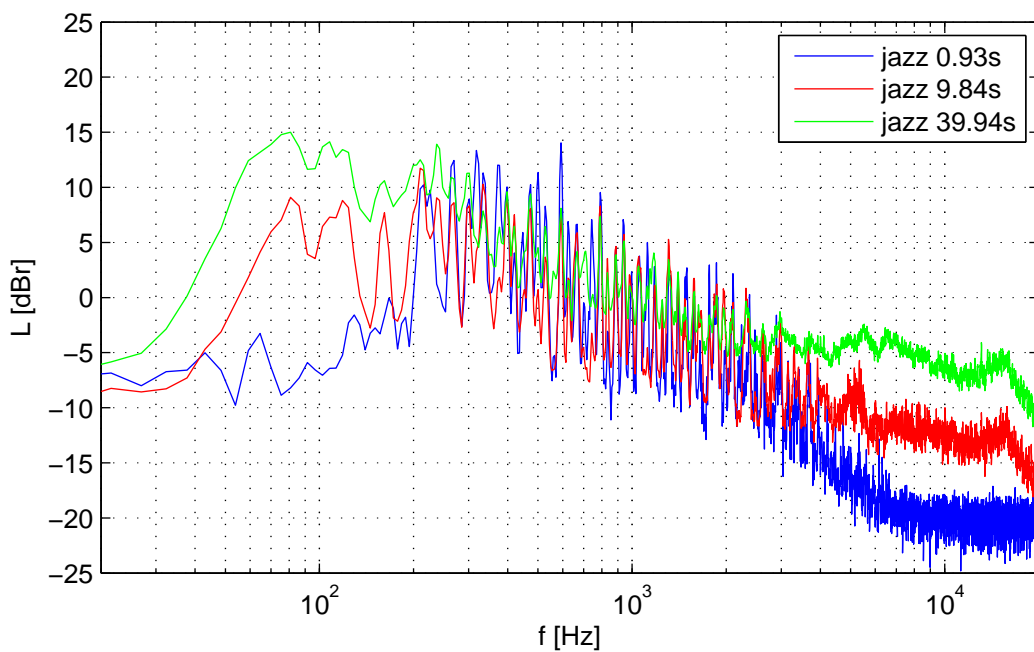
Obr. 22 – Spektra signálů, délka průměrování 39,94 s



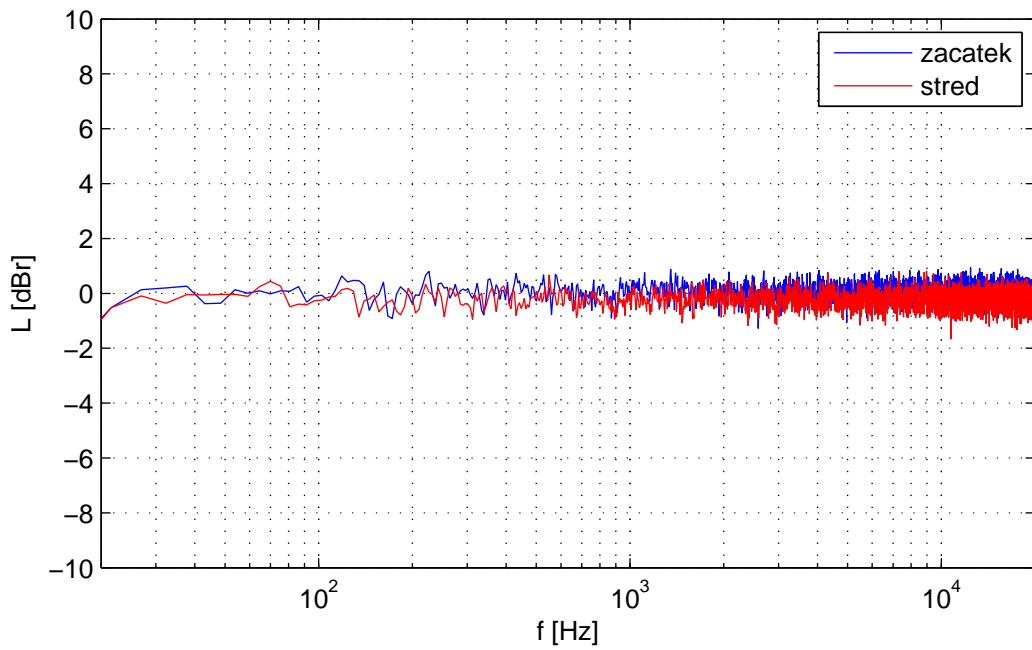
Obr. 23 – Spektra bílého šumu pro různé doby průměrování



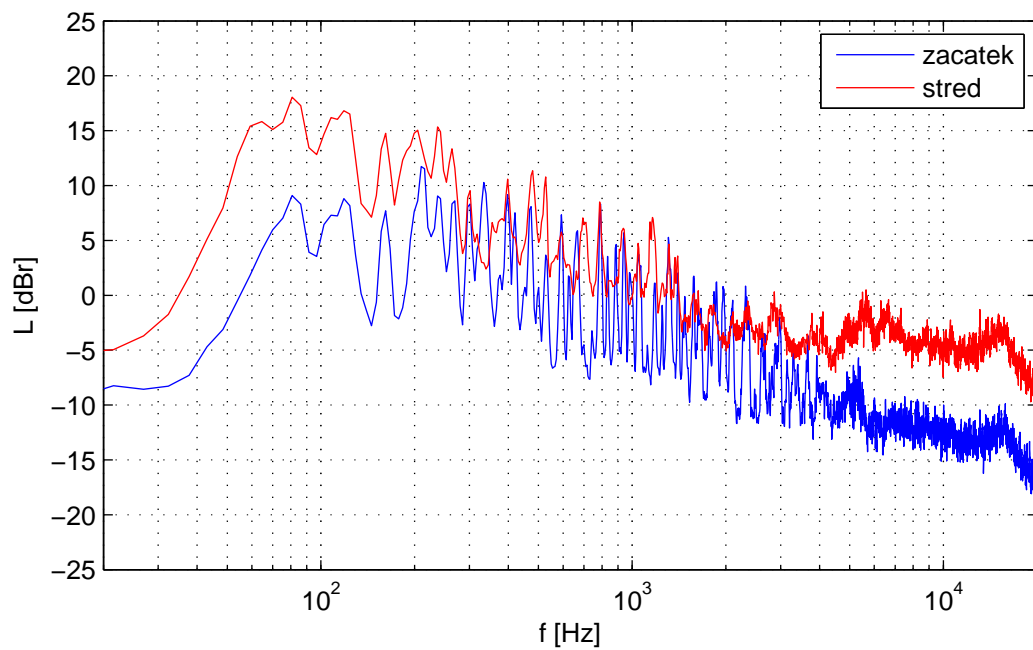
Obr. 24 – Spektra hudebního signálu „jazz“ pro různé doby průměrování



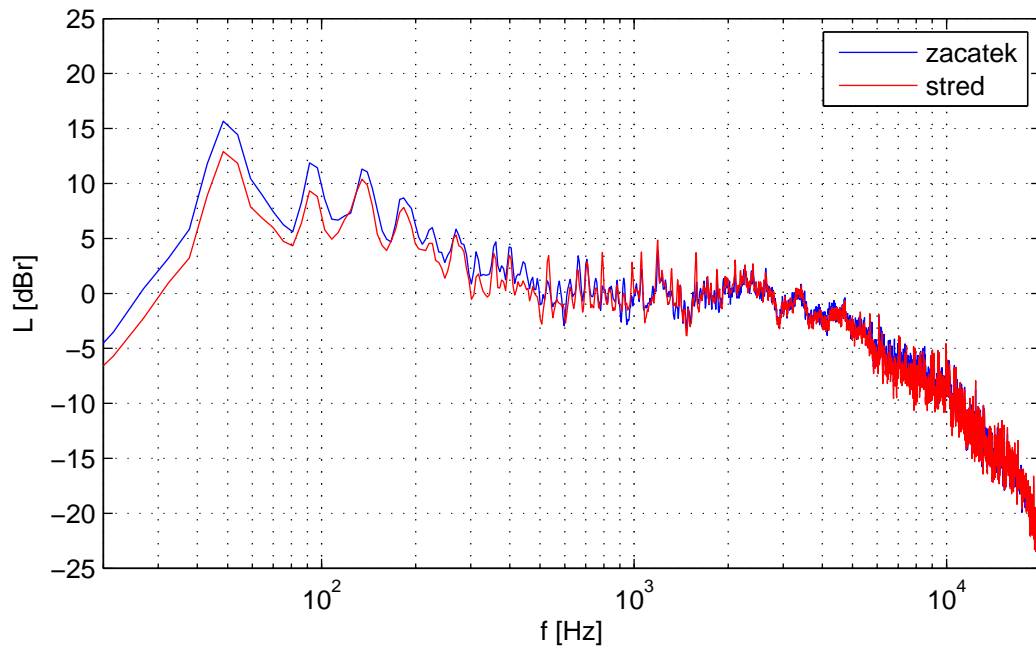
Obr. 25 – Spektra hudebního signálu „metal“ pro různé doby průměrování



Obr. 26 – Spektra šumového signálu v různých místech záznamu

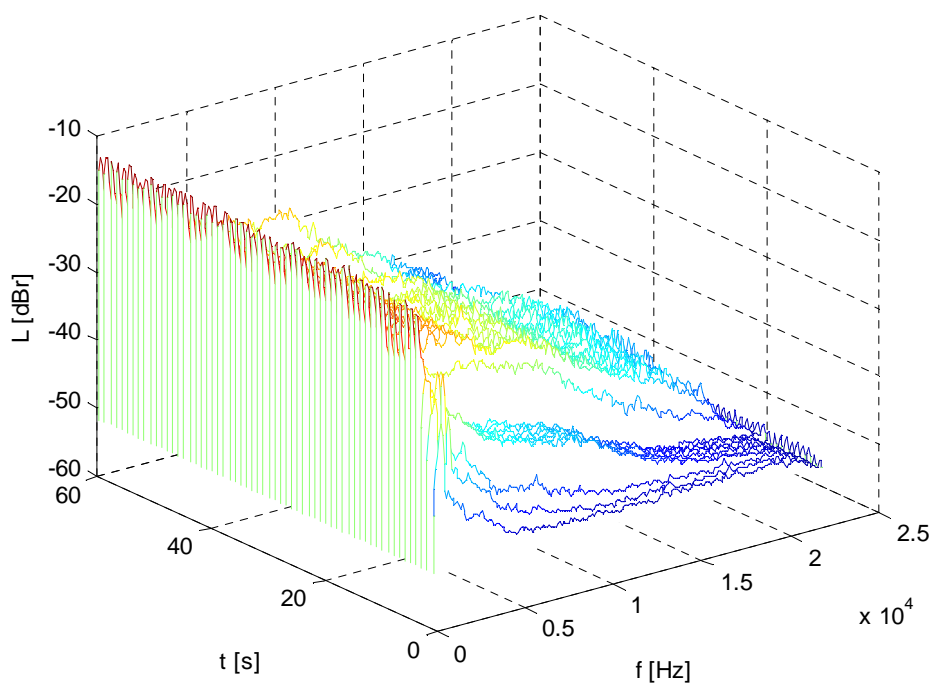


Obr. 27 – Spektra hudebního signálu „jazz“ v různých místech záznamu

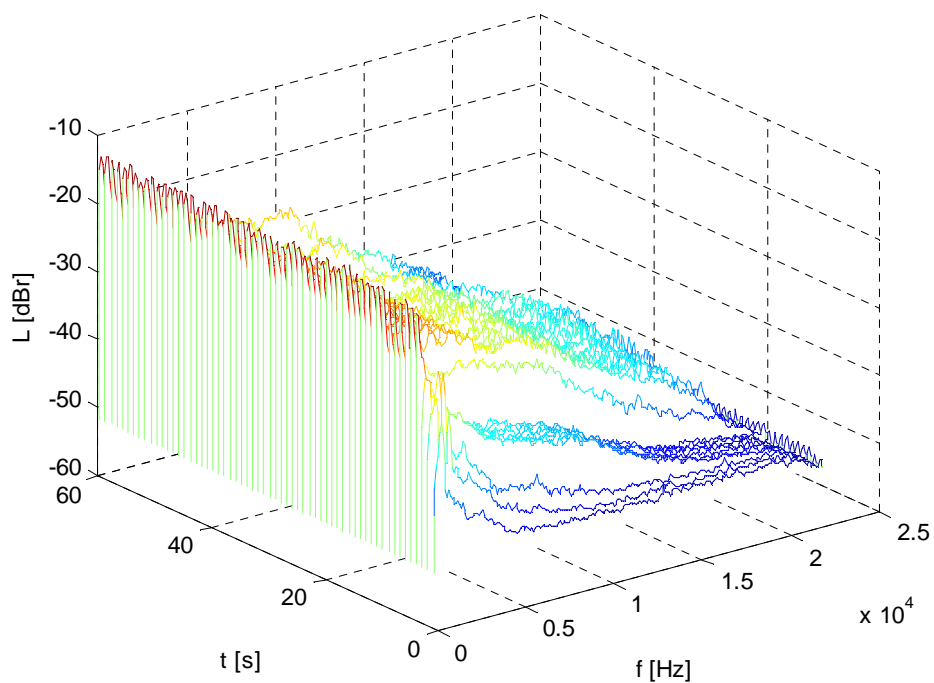


Obr. 28 – Spektra hudebního signálu „metal“ v různých místech záznamu

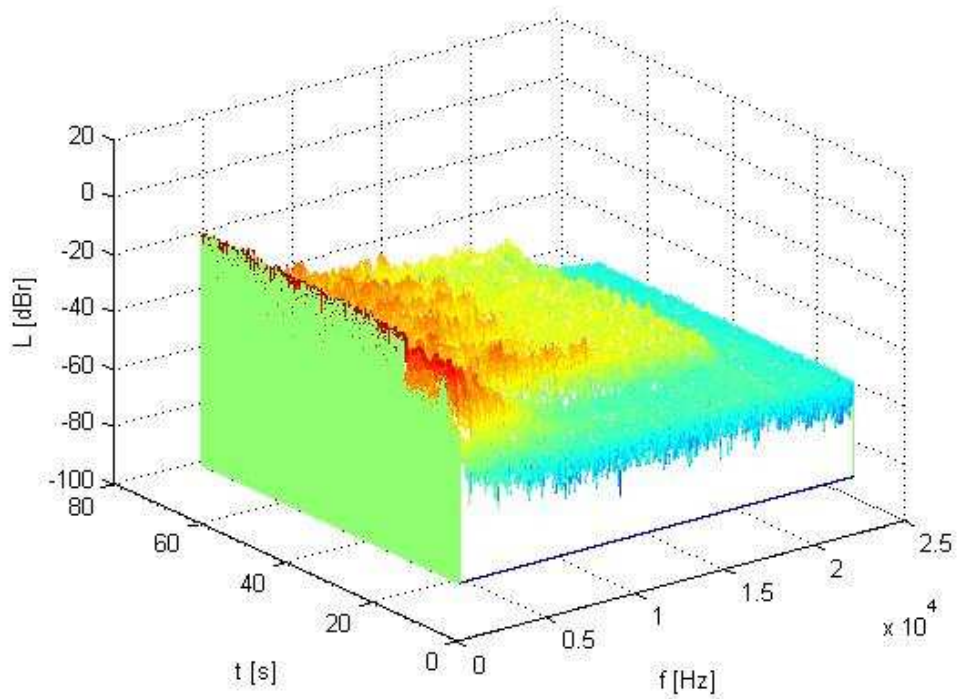
Příloha C – Časově-spektrální rozbor hudebního signálu



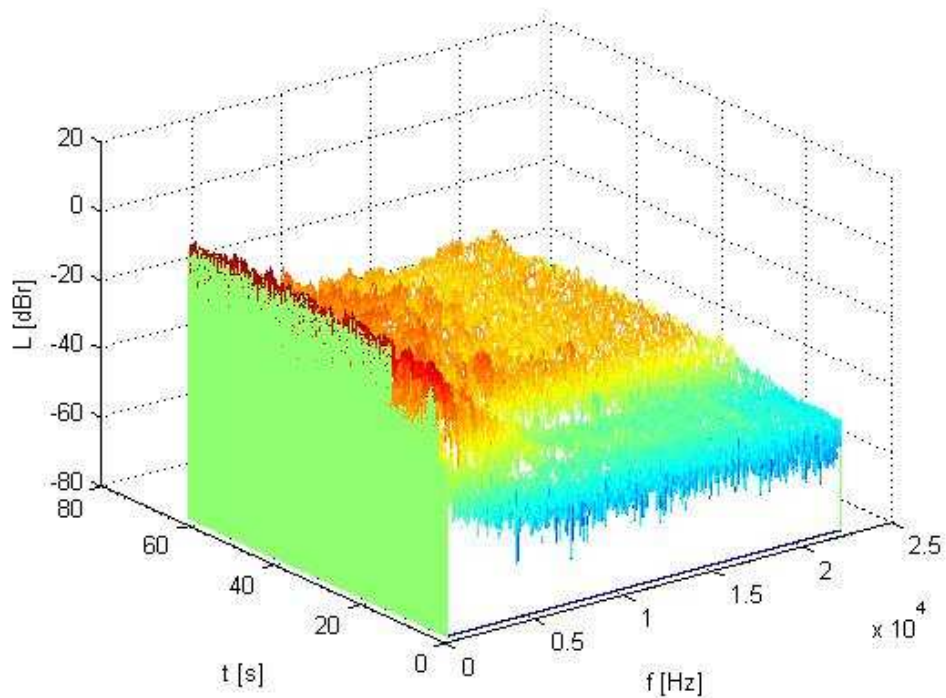
Obr. 29 – Průběh spektra v čase po sekundách - jazz



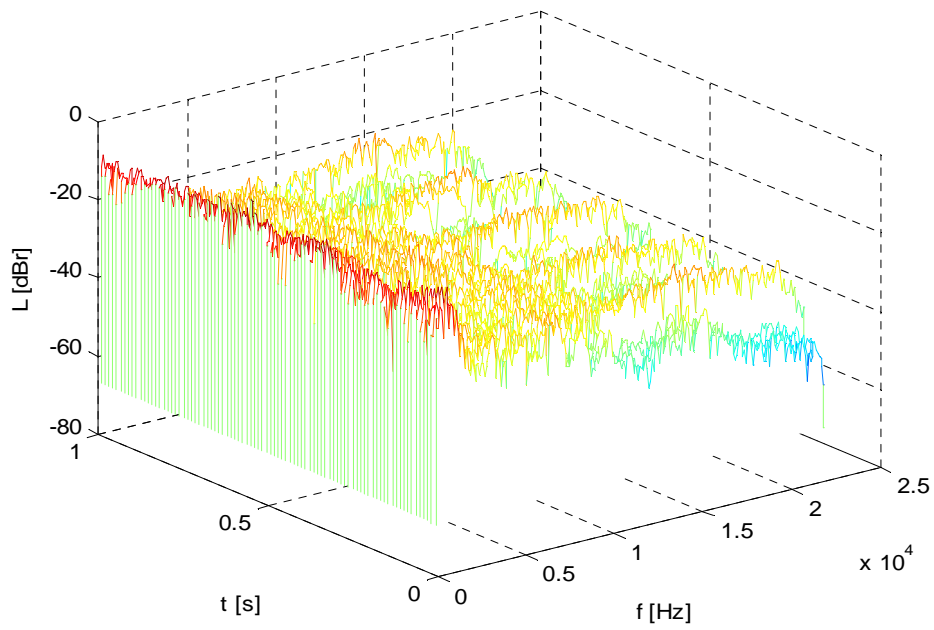
Obr. 30 – Průběh spektra v čase po sekundách - metal



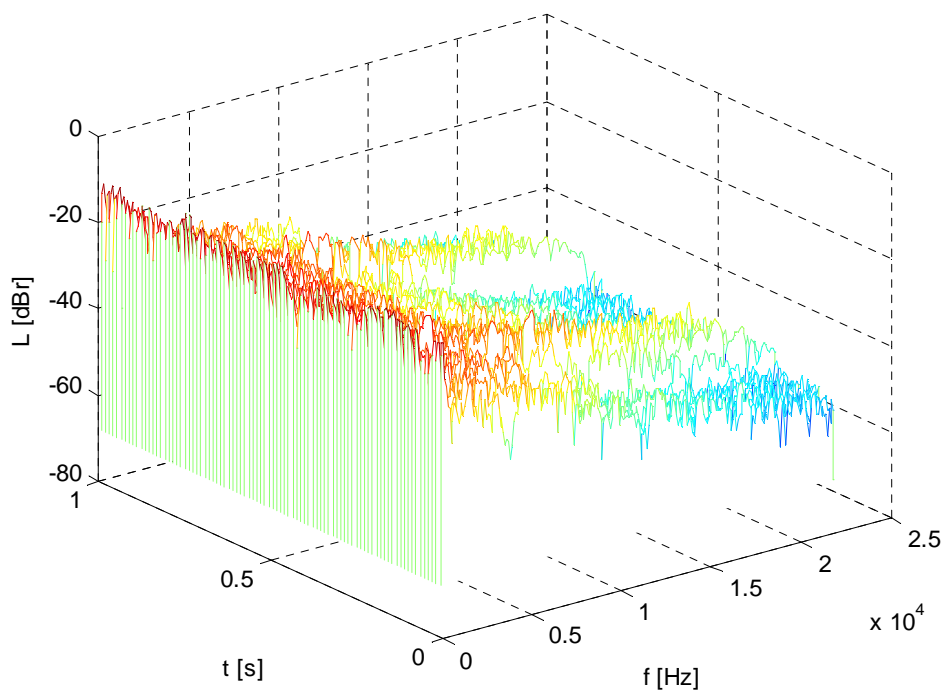
Obr. 31 – Průběh spektra při délce okna 512 vzorků - jazz



Obr. 32 – Průběh spektra při délce okna 512vzorků - metal

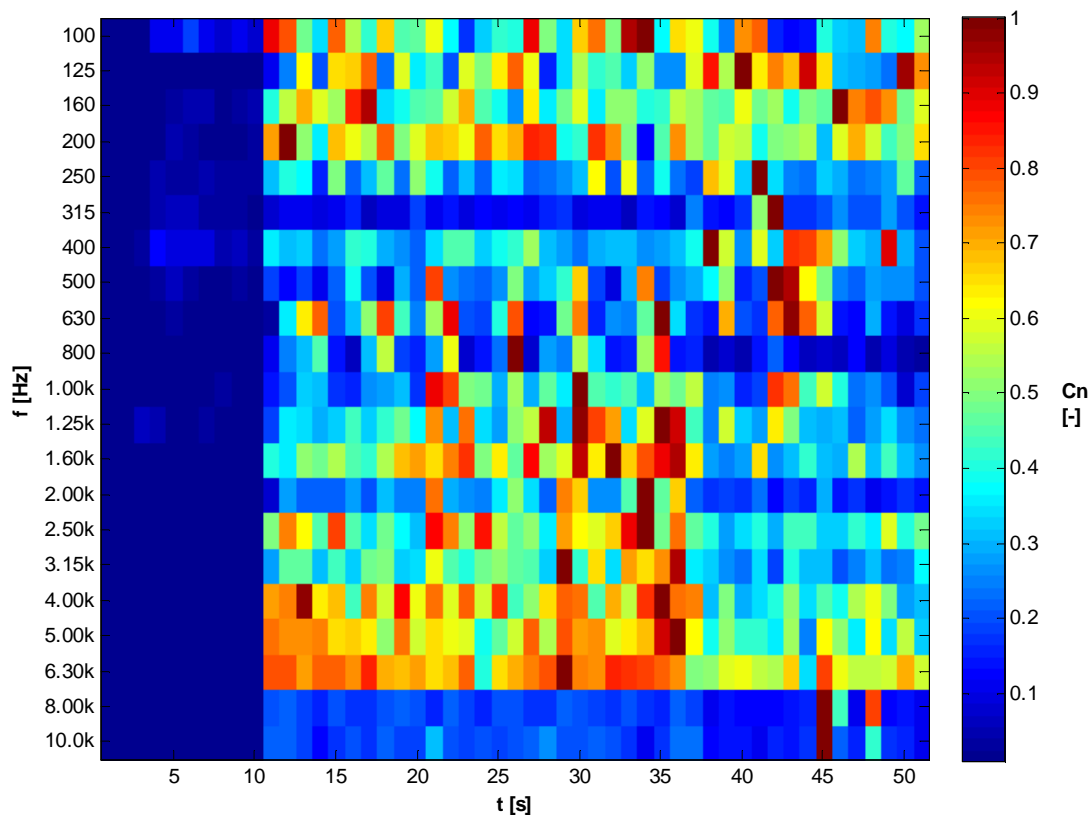


Obr. 33 – Detail spektra mezi – jazz (53 s – 54 s záznamu)



Obr. 34 – Detail spektra – metal (57 s – 58 s záznamu)

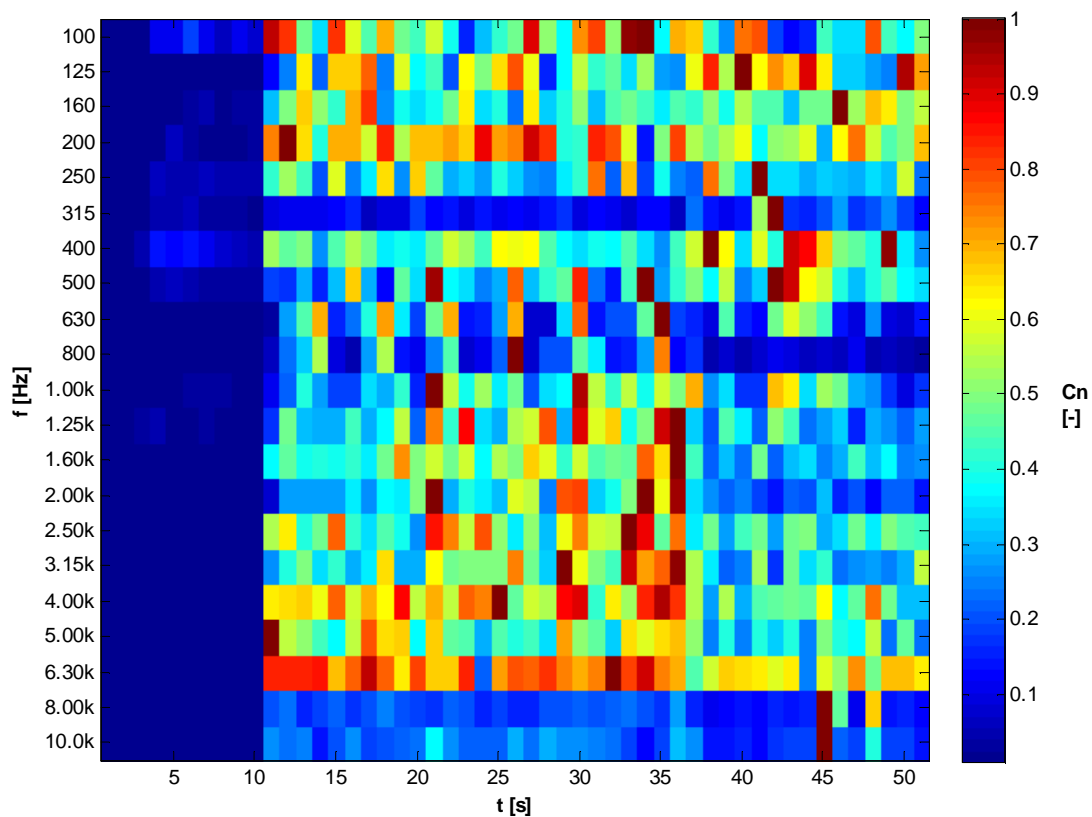
Příloha D – Detekce měřicího signálu, korelační analýza



Obr. 35 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an8)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	100	1024	12.	1250	512
2.	125	1024	13.	1600	512
3.	160	1024	14.	2000	512
4.	200	1024	15.	2500	256
5.	250	1024	16.	3150	256
6.	315	512	17.	4000	256
7.	400	512	18.	5000	256
8.	500	512	19.	6300	256
9.	630	512	20.	8000	128
10.	800	512	21.	10000	128
11.	1000	512			

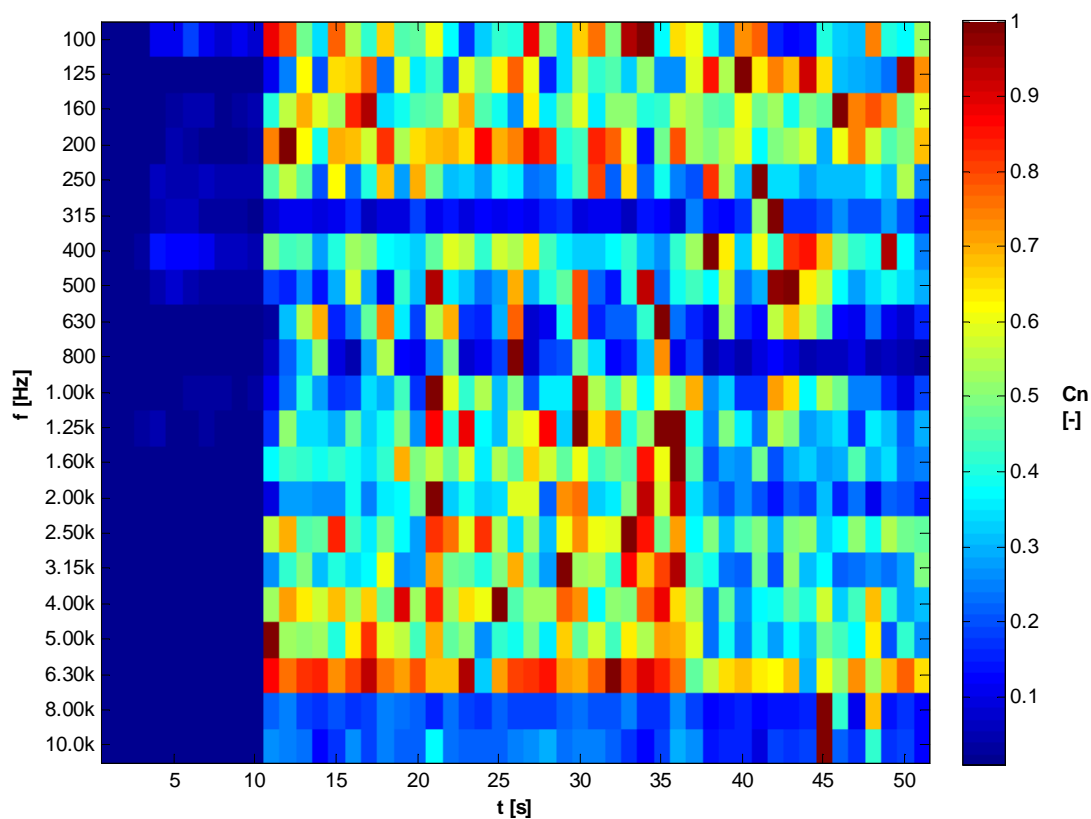
Tab. 9 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an8)



Obr. 36 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an9)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	100	512	12.	1250	64
2.	125	512	13.	1600	32
3.	160	512	14.	2000	32
4.	200	256	15.	2500	32
5.	250	256	16.	3150	32
6.	315	256	17.	4000	32
7.	400	128	18.	5000	32
8.	500	128	19.	6300	32
9.	630	128	20.	8000	32
10.	800	64	21.	10000	32
11.	1000	64			

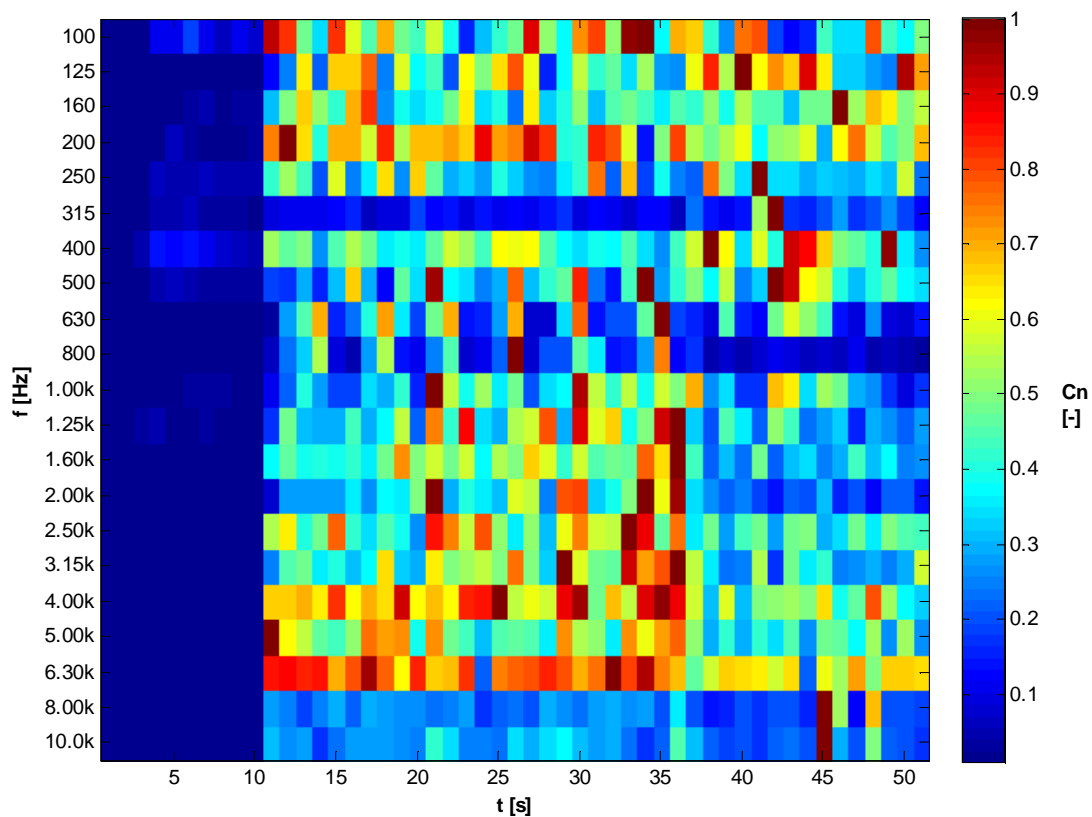
Tab. 10 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an9)



Obr. 37 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an10)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	100	1024	12.	1250	128
2.	125	1024	13.	1600	64
3.	160	1024	14.	2000	64
4.	200	512	15.	2500	64
5.	250	512	16.	3150	64
6.	315	512	17.	4000	64
7.	400	256	18.	5000	64
8.	500	256	19.	6300	64
9.	630	256	20.	8000	64
10.	800	128	21.	10000	64
11.	1000	128			

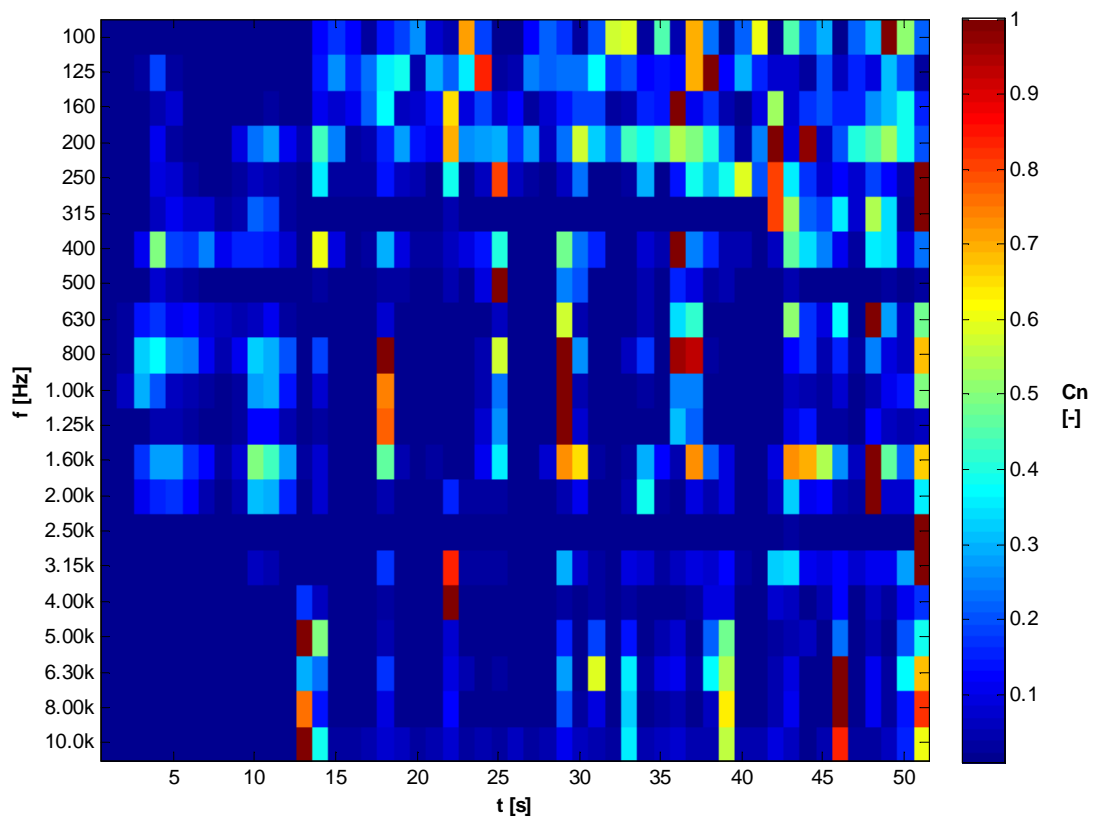
Tab. 11 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an10)



Obr. 38 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an11)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	100	512	12.	1250	64
2.	125	512	13.	1600	32
3.	160	512	14.	2000	32
4.	200	256	15.	2500	32
5.	250	256	16.	3150	16
6.	315	256	17.	4000	16
7.	400	128	18.	5000	16
8.	500	128	19.	6300	16
9.	630	128	20.	8000	16
10.	800	64	21.	10000	16
11.	1000	64			

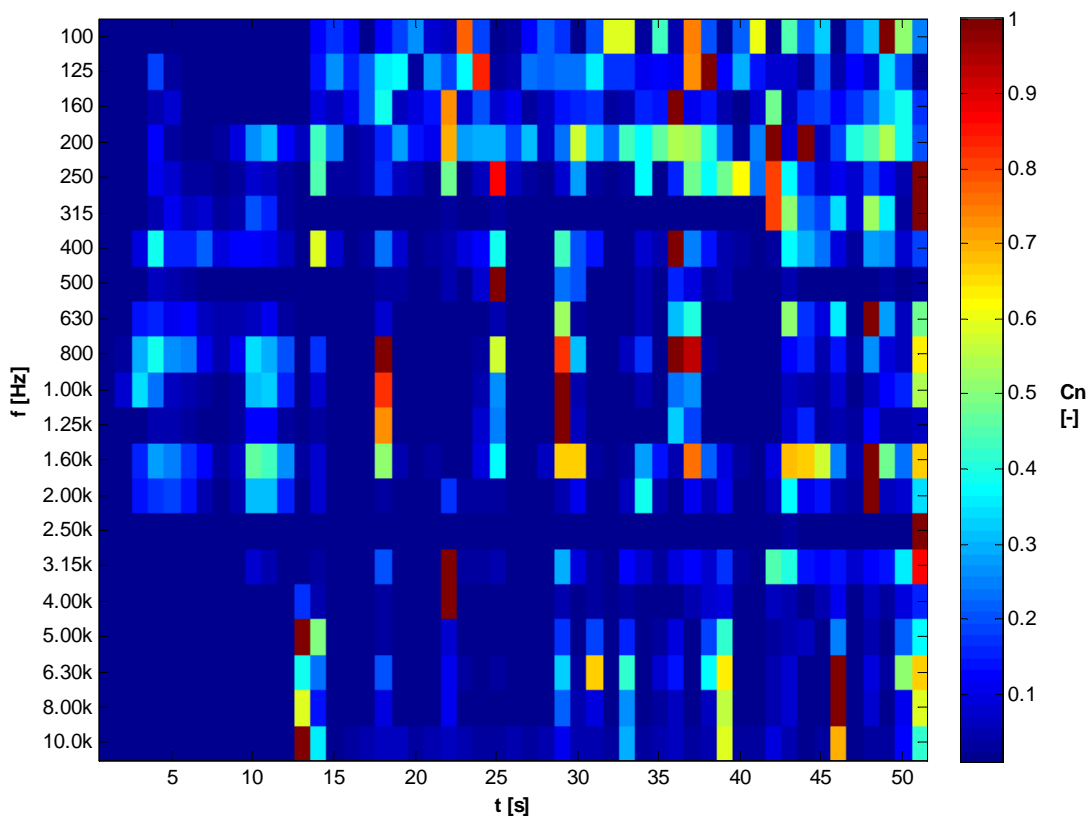
Tab. 12 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an11)



Obr. 39 – Korelační analýza – jazz (soubor pasm_an12)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	100	512	12.	1250	64
2.	125	512	13.	1600	32
3.	160	512	14.	2000	32
4.	200	256	15.	2500	32
5.	250	256	16.	3150	32
6.	315	256	17.	4000	32
7.	400	128	18.	5000	32
8.	500	128	19.	6300	32
9.	630	128	20.	8000	32
10.	800	64	21.	10000	32
11.	1000	64			

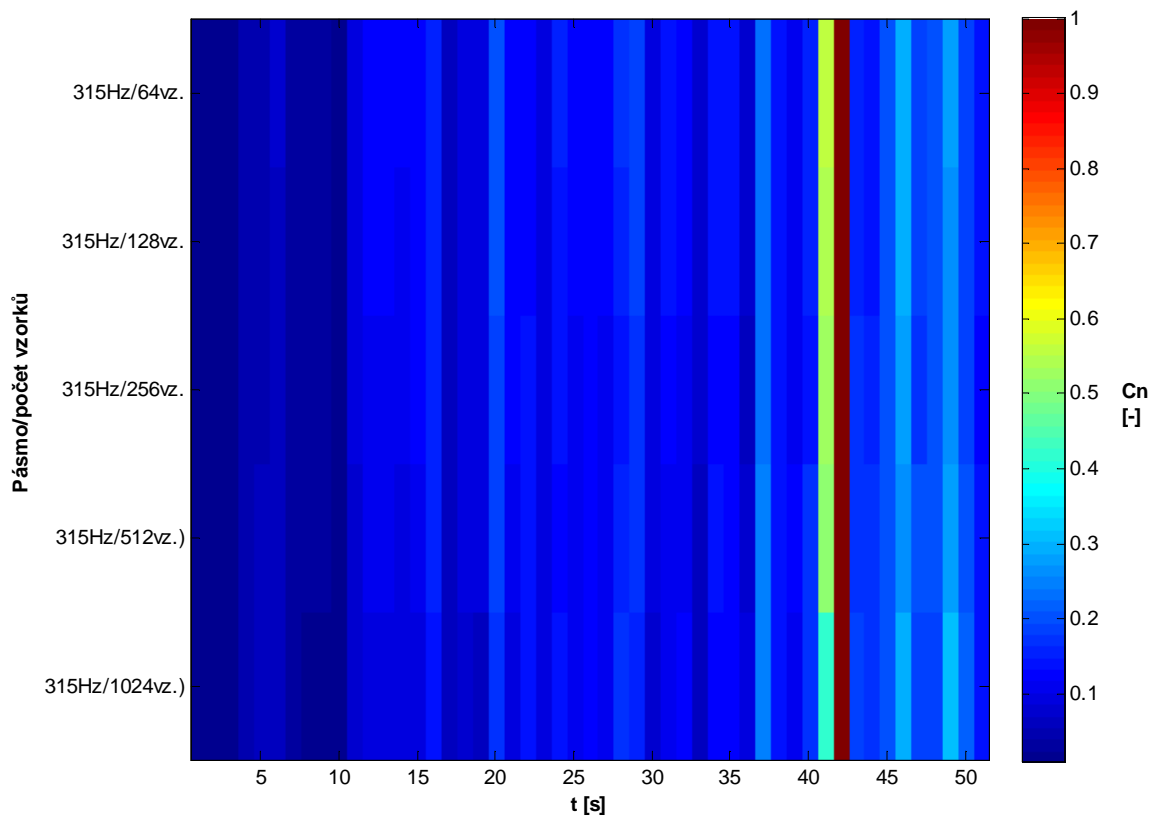
Tab. 13 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an12)



Obr. 40 – Korelační analýza – jazz (soubor pasm_an13)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	100	1024	12.	1250	128
2.	125	1024	13.	1600	64
3.	160	1024	14.	2000	64
4.	200	512	15.	2500	64
5.	250	512	16.	3150	64
6.	315	512	17.	4000	64
7.	400	256	18.	5000	64
8.	500	256	19.	6300	64
9.	630	256	20.	8000	64
10.	800	128	21.	10000	64
11.	1000	128			

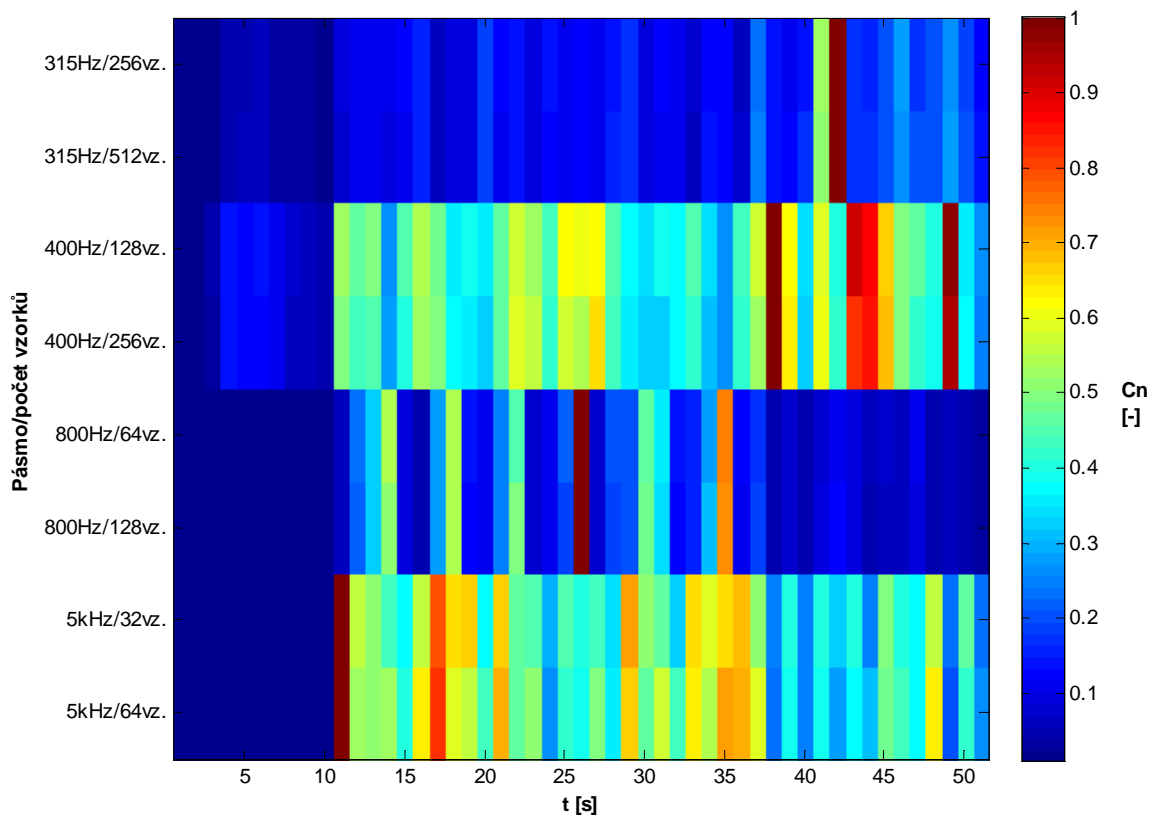
Tab. 14 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an13)



Obr. 41 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an_pp2)

Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	315	64
2.	315	128
3.	315	256
4.	315	512
5.	315	1024

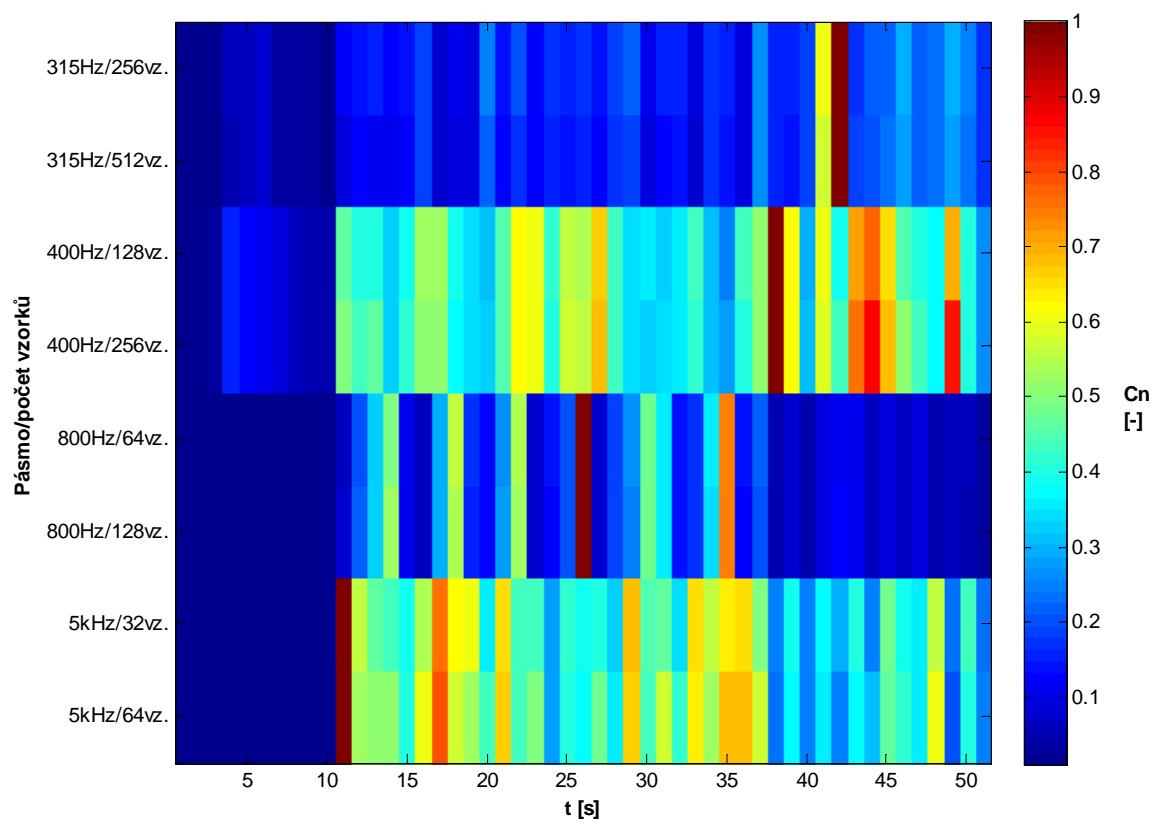
Tab. 15 -Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubor pasm_an_pp2)



Obr. 42 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an_pp3)

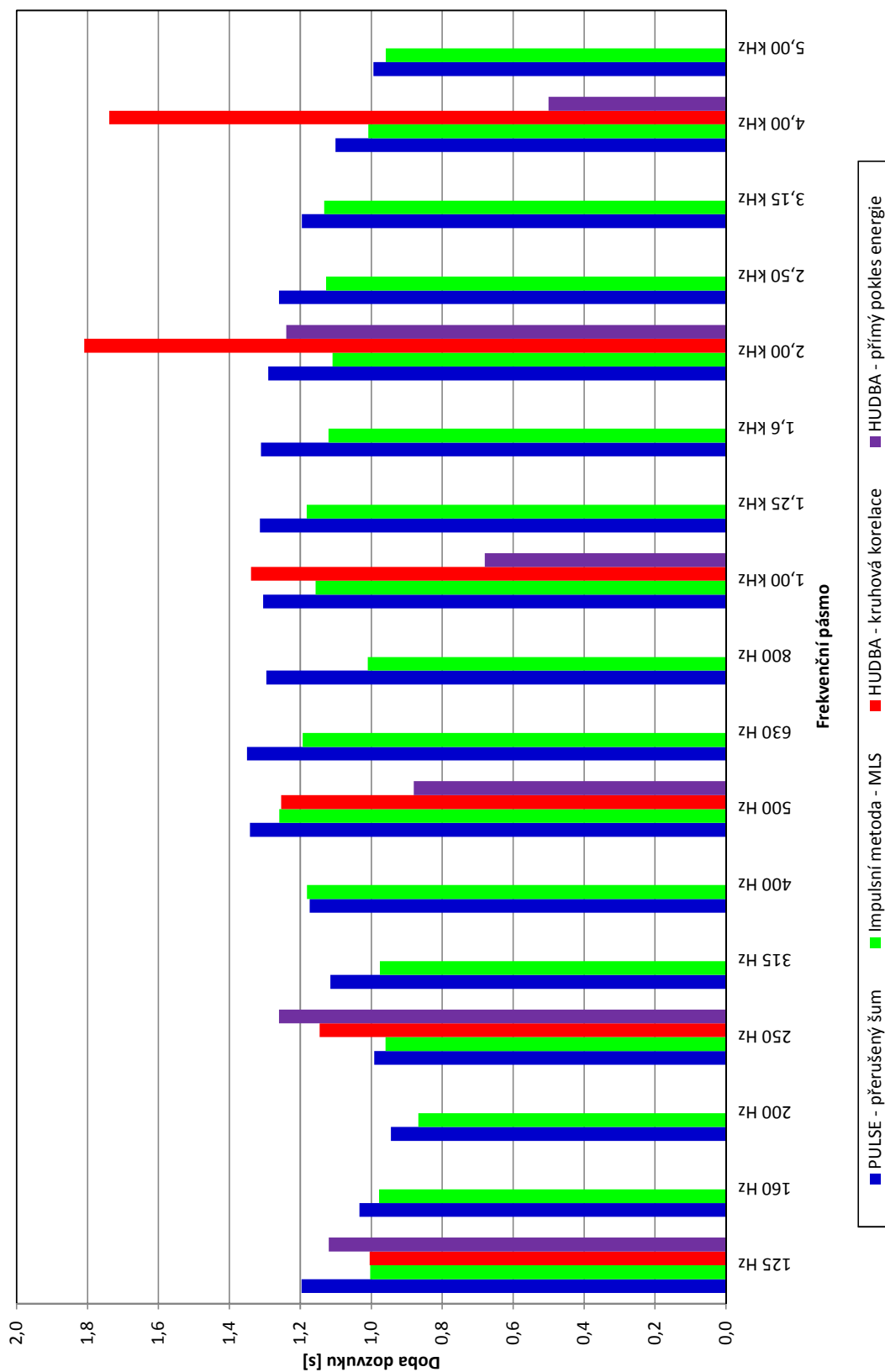
Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]	Pásmo	f [Hz]	Okno [poč. vz.]
1.	315	256	5.	800	64
2.	315	512	6.	800	128
3.	400	128	7.	5000	32
4.	400	256	8.	5000	64

Tab. 16 – Počet vzorků v jednotlivých pásmech (soubory pasm_an_pp3 a pasm_an_pp4)



Obr. 43 – Korelační analýza – metal (soubor pasm_an_pp4)

Příloha E – Porovnání doby dozvuku



Obr. 44 – Graf porovnání doby dozvuku změřené různými metodami

Seznam publikací

Výzkumné zprávy

TUREČEK, Oldřich a SÝKORA, Martin. *C-types standard loudspeakers measurement*, 2007, spoluautor, spolupráce se Škoda AUTO

TUREČEK, Oldřich a SÝKORA, Martin. *Měření hlučnosti palivových čerpadel*, 2007, spoluautor, spolupráce s Robert BOSCH České Budějovice

TUREČEK, Oldřich a SÝKORA, Martin. *Měření parametrů aktivní reproduktorové soustavy QSC HPR 122i.* , 2007 , spoluautor

TUREČEK, Oldřich a SÝKORA, Martin. *Měření parametrů reproduktorů pro systém SK 461.* , 2007 .spoluautor, spolupráce se Škoda AUTO

SÝKORA, M a SCHLOSSER, M., *Noise level evaluation of air pressure regulators*, 2011, spolupráce s firmou Lekov

SCHLOSSER, M. a SÝKORA, M., *Závislost hladiny akustického výkonu na měřicí vzdálenosti*, 2012, spolupráce s firmou ATMOS

SCHLOSSER, M. a SÝKORA, M., *Porovnání metod měření hladiny akustického výkonu v uzavřeném prostoru*, 2012, spolupráce s firmou ATMOS

Články v časopisech

Monitory KRK V8 Series 2. *Muzikus* , 2007

spoluautor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 4/2007

CME Matrix X. *Muzikus* , 2007 .

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 7/2007

CME Matrix Y. *Muzikus* , 2007

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 8/2007

Studio Projects LSD2. *Muzikus* , 2007 .

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 10/2007

RODE NT3. *Muzikus* , 2008 .

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 6/2008

RODE NTK. *Muzikus* , 2008 .

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 7/2008

Mikrofon AKG D7. *Muzikus* , 2008 .

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 1/2008

Mikrofon AKG C214. *Muzikus* , 2008 .

autor, odborný článek (recenze) v časopise MUZIKUS (ISSN 1210-1443), číslo 2/2008

Sýkora, Martin, *Akustická měření pomocí hudebního signálu*, článek v časopise Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, číslo 3/2013, dostupné online: <http://www.media4u.cz/>

Účast na konferencích

Akademický rok 2006-2007

Elektrotechnika a informatika 2006

1.-2. 11. 2006, Zámek Nečtiny

Příspěvek a prezentace: Systémy pro ovládání osvětlovací techniky

5. setkání uživatelů PULSE

24.-27. 4. 2007, Pec pod Sněžkou

Příspěvek a prezentace: Vyhodnocování výsledků měření reprosoustav pomocí systému MATLAB

Akademický rok 2007-2008

Elektrotechnika a informatika 2007

31. 10.-1. 11. 2007, Zámek Nečtiny

Příspěvek a prezentace: Měření reproduktorů a reproduktorových soustav

6. setkání uživatelů PULSE

20.-23. 5. 2008, Trojanovice

Příspěvek a prezentace: Měření aktivních reprosoustav systémem PULSE

Akademický rok 2008-2009

Elektrotechnika a informatika 2008

6.-7. 11. 2008, Zámek Nečtiny

Příspěvek a prezentace: Zjištění a zhodnocení parametrů reprosoustavy

7. setkání uživatelů PULSE

25.-28. 5. 2009, Vílanec

Příspěvek a prezentace: Měření Mikrofonů pomocí PULSE

Akademický rok 2009-2010

Elektrotechnika a informatika 2009

4.-5. 11. 2009, Zámek Nečtiny

Příspěvek a prezentace: Ověřování parametrů automobilových audiosystémů

8. setkání uživatelů PULSE

25.-28. 5. 2010, Seč

Příspěvek a prezentace: Mapování akustické intenzity ve stavbách

Akademický rok 2010-2011

9. setkání uživatelů PULSE

23.-26. 5. 2011, Železná Ruda

Příspěvek a prezentace: Měření sirén

Setkání České akustické společnosti 2011

10.-12. 5. 2011, Rusava

Akademický rok 2012-2013

11. setkání uživatelů PULSE

20.-23. 5. 2013, Horní Cerekev

Příspěvek a prezentace: Akustická měření pomocí hudebního signálu

Zkrácený profesní životopis

Ing. Martin Sýkora – narozen v roce 1982, v roce 2001 absolvovalo studium na Střední průmyslové škole elektrotechnické v Plzni, obor Výpočetní technika, v roce 2006 získán titul Ing. na FEL ZČU v Plzni, od téhož roku doktorské studium v oboru Elektronika a informatika na FEL ZČU v Plzni a působení v Akustických laboratořích FEL, aktivní zvukař.

Odborné působení v oblastech

akustika (elektroakustika, akustická a elektroakustická měření, měření elektroakustických měničů), zpracování zvuku (snímání, záznam a úpravy zvuku) práce v produkčním SW Steinberg Nuendo, měření a analýza hlučnosti zařízení, měření v systému Brüel & Kjaer PULSE, měření elektrických parametrů elektroakustických zařízení – měřicí systém Audio-precision

Výuka v předmětech:

Základy sdělovací techniky, Audiovizuální technika, Zpracování zvuku a obrazu, Technická podpora zpracování zvuku, Akustika

Grantové zaměření:

Měření v oblasti akustiky, elektroakustiky, hluku a vibrací (menší projekty v rámci interních grantových programů), oblast snímání a zpracování zvuku (spoluřešitel projektu FRVŠ F1/b 1207/2009 Příprava praktických cvičení předmětu Technická podpora zpracování zvuku)