



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLIV ŘEŠENÍ OPERNÍ SCÉNY A ORCHESTRÁŘSTVÍ NA AKUSTIKU SÁLU

INFLUENCE OF DISPOSITION OF OPERA STAGE AND ORCHESTRA PIT ON THEATRE ACOUSTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Berky

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Martin Berky

ID: 162259

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Vliv řešení operní scény a orchestřiště na akustiku sálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte měření doby dozvuku a monaurálních a binaurálních impulsních odezev Divadla na Orlí při umístění zdroje zvuku v orchestřišti a jevišti a to v konfiguraci sálu před instalací scény a poté s nainstalovaným scénickým řešením. V prostředí Matlab realizujte funkce, které budou z těchto odezev počítat kmitočtovou odezvu a všechna objektivní monaurální a binaurální kritéria kvality poslechových prostorů. Zaměřte se na statistické zpracování měření a rozdíly mezi různými konfiguracemi sálu a pozicemi měření. Vypracujte obecná doporučení pro řešení operní scény Divadla na Orlí z hlediska akustiky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s., ISBN 0451480

[2] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. „Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů“. Akustické listy, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18.

[3] ČSN EN ISO 18233: Akustika – Aplikace nových akustických metod měření stavebních konstrukcí, v budovách a v místnostech. Česká technická norma, Český normalizační institut, listopad 2006.

[4] VONDRÁŠEK, M., MIKEŠ, M., FLEISHMAN, R., Akustika hudebních prostorů v České Republice. Akademie múzických umění v Praze, 2008. ISBN 978-80-7331-141-4

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., *předseda oborové rady*

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ANOTACE

Tato semestrální práce se zabývá měřením doby dozvuku, monaurálních a binaurálních impulsních odezev Divadla na Orli při umístění zdrojů zvuku v orchestřišti a na jevišti. V teoretické části jsou popsány měření doby dozvuku a objektivní kritéria kvality poslechových sálů. V praktické části je popsáno měření v Divadle na Orli a výpočty v programu Matlab. Práce vyhodnocuje popsané parametry v různých konfiguracích sálu a popisuje obecná doporučení pro řešení operní scény Divadla na Orli.

Klíčová slova: Měření doby dozvuku, impulsní odezva, objektivní kritéria kvality poslechových sálů, všesměrový zdroj, směrový zdroj, opera, orchestřiště, jeviště, hlediště.

ABSTRACT

This semestral thesis describes measurement of reverberation time, monaural and binaural impulse response Divadlo na Orli during positioning of sound-source in orchestra pit and on the stage. Theoretical part describes measurement of reverberation time and objective criteria of soundfield quality in concert and opera. The practical part describes measurement in Divadlo na Orli and computations in program Matlab. The thesis compares results in various configuration of theatre hall and describes common advices for operas in Divadlo na Orli.

Keywords: Measurement of reverberation time, impulse response, objective criteria of soundfield quality in concert and opera, omnidirectional source, directional source, opera, orchestra pit, stage, auditorium.

BERKY, M. *Vliv řešení operní scény a orchestřiště na akustiku sálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 52 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Jirí Schimmel, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „*Vliv řešení operní scény a orchestřiště na akustiku sálu*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňce Vlachovské, svému konzultantovi Mgr. Janu Košuličovi za zprostředkování v Divadle na Orlí a Ing. Martinu Vondráškovi za pomoc při realizaci měření.

V Brně dne

.....

podpis autor

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	x
Úvod	1
1 Akustika uzavřených prostor	2
1.1 Doba dozvuku RT	2
1.1.1 Doba dozvuku podle P. E. Sabina.....	2
1.1.2 Doba dozvuku podle C. F. Eyringa.....	3
1.1.3 Doba dozvuku podle Millingtona	3
2 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	4
2.1 Metoda přerušovaného šumu	4
2.2 Schödrova metoda.....	5
2.3 Impulsní charakteristika prostoru	5
2.4 Měření impulsové charakteristiky prostorů	6
2.5 Dekonvoluce	6
3 OBJEKTIVNÍ KRITÉRIA KVALITY KONCERTNÍCH a operních SÁLŮ	8
3.1 Časové a frekvenční kritéria	8
3.1.1 Doba dozvuku	8
3.1.2 Doba dozvuku T_{20}	8
3.1.3 Doba dozvuku T_{30}	9
3.1.4 Počáteční doba dozvuku EDT	9
3.1.5 Míra hlubokých tónů (basový poměr) BR	9
3.1.6 Míra vysokých tónů HFR	9
3.2 Energetická kritéria	10
3.2.1 Míra přímého zvuku C_7	10
3.2.2 Míra jasnosti C_{80}	10
3.2.3 Míra zřetelnosti C_{50}	10
3.2.4 Zřetelnost D_{50}	11
3.2.5 Míra doznívání H (Reverberance Measure).....	11
3.2.6 Síla zvuku G (Strength of arriving energy)	11

3.2.7	Čas těžiště impulsové odezvy t_s (Center Time)	11
3.2.8	Počáteční prodleva <i>ITDG</i>	12
3.2.9	Koeficient difuzity povrchů <i>SDI</i>	12
3.2.10	Lateral Energy Friction - <i>LF</i>	12
3.2.11	Činitel interaurální vzájemné korelace <i>IACC</i>	14
4	Princip měření v DnO	15
4.1.1	Pozice zdrojů zvuku a mikrofonu (umělé hlavy).....	15
4.2	Postup prvního měření – opera <i>Mirandolina</i>	16
4.2.1	První měření.....	16
4.2.2	Druhé měření	16
4.2.3	Třetí měření.....	17
4.2.4	Čtvrté měření	17
4.3	Postup druhého měření – opera <i>Impresario v Koncích</i>	17
4.3.1	První měření.....	17
4.3.2	Druhé měření	17
4.3.3	Třetí měření.....	17
4.3.4	Čtvrté měření	18
4.3.5	Páté měření	18
4.4	Sál Divadla na Orli	18
5	Měření směrové charakteristiky reproduktoru Event 2020	19
6	Výsledky Z programu Matlab	20
6.1	Získané z monaurálních impulsních odezev	20
6.2	Výpočet objektivních kritérií	21
6.3	Výpočet z binaurálních impulsních odezev	23
7	obecná doporučení pro řešení operní scény v divadle na orlí	25
8	Závěr	26
	Literatura	27
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	28
	Seznam příloh	29

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Průchod, odraz a útlum energie zvukových vln na překážce (převzato z [5]).	2
Obr. 2.1:	Pokles hladiny akustického tlaku při měření T_{60} metodou přerušovaného šumu (převzato z [5]).	4
Obr. 2.2:	Aproximace impulsní odezvy poslechového prostoru (převzato z [5]).	5
Obr. 2.3:	Proces dekonvoluce pomocí spektrálního dělení (převzato z [8]).	6
Obr. 4.1:	Blokové schéma měřicího systému (převzato z [3]).	15
Obr. 6.1:	Impulsní odezva získaná z programu Matlab.	20
Obr. 6.2:	Schrödrův integrál (lineární a logaritmický) ze získané impulsní odezvy.	22
Obr. 7.1:	Jednoduchý obrázek akustických úprav v orchestřišti při zdroji zvuku S [4].	25

ÚVOD

Bakalářská práce vznikla na základě stížností akademických pracovníků JAMU v Brně na špatné akustické vlastnosti v sále a také herců a zpěváků na špatnou srozumitelnost na jevišti. Proto se MgA. Jan Košulič zasadil o provedení akustických měření v sále Divadla na Orlí.

Základním cílem této práce je změření monaurálních a binaurálních impulsních odezev v sále DnO, při umístění zdroje zvuku v orchestřišti a na jevišti. Důraz je kladen především na různé konfigurace sálu. A to v extrémně odlišných případech, při plně vytlumenném sálu, a při nezatlumeném sálu, také při dalších úpravách, které úzce souvisejí se samotnou scénou oper, která v těchto prostorách proběhla a jsou popsána podrobně níže.

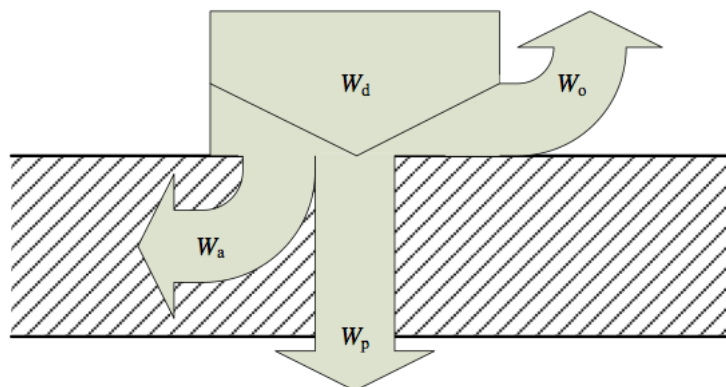
Jelikož programy Easera ani Dirac, které byly pro měření použity, podporují více kanálový záznam, pouze dvoukanálový. Proto byly použity pro záznam binaurálních odezev z umělé hlavy. Abychom získali monaurální impulsní odezvy, celkem ze 17 měřících mikrofónů, zaznamenávali jsme zdroj e-sweepu a e-sweepty z jednotlivých mikrofónů, ze kterých jsem mohl následně, po sestřihání, provést dekonvoluci v programu matlab.

K popisu akustických parametrů sálu slouží, objektivní kritéria kvality koncertních sálů, které jsou vypočítány ze získaných impulsních odezev a průměrovány dle jednotlivých kroků měření, díky kterým je možné srovnání nejen v různých konfiguracích prostoru Divadla na Orlí, ale také srovnání s různými sály po celém světě, které byli již dříve změřeny.

Operní scéna je specifickým řešením prostoru divadla. Tato práce by měla vyhodnotit rozdíly v řešení dvou, zcela odlišných konfigurací operních scén. Do budoucna by tato práce měla být materiálem, který by napomohl scénografům a režisérům, při rozmyšlení realizace scény, protože různá konfigurace sálu a stejně tak různé materiály, mají zásadní vliv na níže uvedené parametry.

1 AKUSTIKA UZAVŘENÝCH PROSTOR

Zákony šíření zvuku v uzavřených prostorech se v podstatě řídí obecnými zákony šíření zvuku. Nachází-li se ve směru šíření zvukové vlny nějaká reálná překážka, potom dojde k odrazu, ohybu a k částečnému pohlcení zvukové energie překážkou (viz obr. 1.1).



Obr. 1.1: Průchod, odraz a útlum energie zvukových vln na překážce (převzato z [5]).

Kde W_d je dopadená, W_o je odražená, W_p je procházející a W_a je absorbovaná energie zvukových vln na překážku. [5]

1.1 Doba dozvuku RT

Abychom mohli určit vlastnosti uzavřeného prostoru, jsou pro nás důležité přechodové jevy, které se dějí při zapnutí a vypnutí zdroje zvuku. Zvuk, šířící se prostorem po vypnutí zdroje, jehož energie zvukových vln bude vlivem pohltivosti stěn v prostoru ubývat, se nazývá dozvuk. Doba, po kterou dozvuk existuje, je doba dozvuku.

Ve statické akustice je standardní doba dozvuku definována jako doba, za kterou hustota energie nebo intenzita zvuku klesne po vypnutí zdroje na 10^{-6} původní hodnoty. Pro výpočet doby dozvuku existuje několik definic [1].

1.1.1 Doba dozvuku podle P. E. Sabina

Sabinův vzorec vyhovuje v praxi pouze pro prostory s malým činitelem pohltivosti stěn.

$$T = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \text{ [s]}, \quad (1.1)$$

kde V je objem místnosti, α činitel pohltivosti stěn, S celková plocha všech ohraňujících stěn místnosti.

1.1.2 Doba dozvuku podle C. F. Eyringa

V praxi se ukázalo, že Eyringův vzorec nedává uspokojivé informace v případech, kdy jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti větší než 0,8.

$$T = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1-\alpha)} \text{ [s]}, \quad (1.2)$$

kde α je střední hodnota činitele pohltivosti stěn, V je objem místnosti a S celková plocha všech ohraňujících stěn místnosti.

1.1.3 Doba dozvuku podle Millingtona

Millington předpokládal, že stěny, které ohraničují uzavřený prostor, se skládají z celkem n ploch s různými činiteli zvukové pohltivosti.

$$T = 0,164 \frac{V}{\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_i)} \text{ [s]}, \quad (1.3)$$

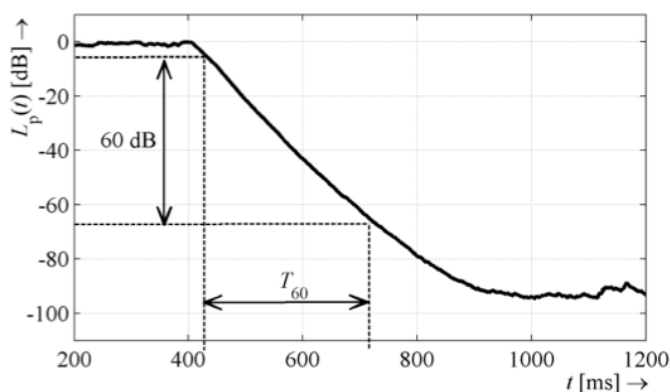
kde S_i jsou plochy jednotlivých stěn s různými činiteli pohltivosti α_i . Millingtonův vzorec dává pro $\alpha > 0,8$ přesnější výsledky, avšak v praxi se vzhledem ke svojí složitosti moc nepoužívá. [5]

2 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU

Dobu dozvuku lze měřit pomocí metody přerušovaného šumu nebo spočítat ze změřené impulsové charakteristiky prostoru. Do měřené místnosti se postaví zdroj zvuku do výšky 1,5m nad podlahou¹, do prostoru se umístí všesměrový mikrofon takovým způsobem, aby nebyl v poli přímých vln (předpokládáme existenci difuzního pole). Vzdálenost mikrofonu od nejbližší odrazivé plochy (včetně také podlahy) nesmí být menší než čtvrtina vlnové délky nejnižšího zkoumaného kmitočtu (v praxi se často volí hodnota 1 metr). Jelikož v praxi není v žádném prostoru ideální difuzní zvukové pole, měření provádíme ve více bodech a výsledky následně průměrujeme. Určuje se nejen střední hodnota $a(T_{60})$, avšak také rozptyl hodnot² $D(T_{60})$ doby dozvuku. Polohy mikrofonů by měly být od sebe vzdáleny alespoň polovinu vlnové délky nejnižšího zkoumaného vlnového kmitočtu (v praxi se často volí 2 metry)

2.1 Metoda přerušovaného šumu

Prostor je vybuzen šumovým signálem³ a po ustálení se zdroj zvuku vypne a zaznamená se křivka poklesu hladiny akustického tlaku. Z této křivky se počítá doba, za kterou poklesne hladina akustického tlaku z hodnoty -5 dB na hodnotu -65 dB (viz obr. 2.1).



Obr. 2.1: Pokles hladiny akustického tlaku při měření doby dozvuku T_{60} metodou přerušovaného šumu (převzato z [5]).

¹ Pokud možno všesměrový zdroj zvuku, který má schopnost zajistit ustálenou hladinu akustického tlaku ve všech bodech prostoru.

² Rozptyl hodnot měření, kterého bychom díky variabilitě měření dosáhli při opakovaných měřeních, charakterizuje tzv. *nejistotu měření*. Ta je podle ČSN 01 0115 definovaná jako: “parameter přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které mohou být původně přisuzovány k měřené veličině.” [5]

³ Podle [1] lze kromě šumového signálu použít též kmitočtově modulovaný sinusový signál s modulačním kmitočtem většinou kolem 10 Hz. Čistě sinusového signálu se používá zpravidla jen v malých prostorech při speciálních měřeních např. měření útlumových konstant individuálních vlastních kmitů.

Protože vždy není možné zajistit, aby byla hladina akustického tlaku před vypnutím zdroje o více než 60 dB vyšší než hladina zvuku v pozadí, je možné dobu dozvuku vypočítat při dynamickém rozsahu nižším než 60 dB a extrapolovat ji⁴. [5]

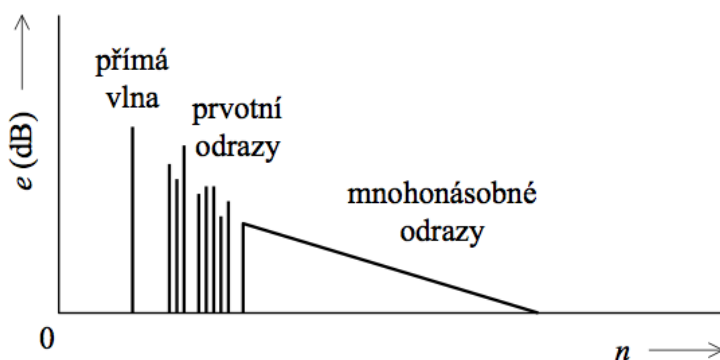
2.2 Schödova metoda

Neboli metoda integrované impulsové odezvy, která vychází z faktu, že doba dozvuku souvisí s odrazy v uzavřeném prostoru, lze tedy očekávat, že bude souviset s Diracovým impulsem. Tato myšlenka byla rozvinuta Schrödrem v šedesátých letech minulého století a zavedl tak další definici doby dozvuku vypočtené na základě impulsové odezvy. [5]

2.3 Impulsní charakteristika prostoru

Je odezva lineárního časově invariantního systému (LTI) na tzv. Diracův (jednotkový) impuls. [6] Uzavřený prostor můžeme z hlediska zpracování signálu považovat za systém s několika vstupy a výstupy. Vstupy toho systému jsou zdroje zvukového signálů a výstupy jsou přijímače zvukového signálů (mikrofony nebo uši posluchače).

Pro analýzu akustického prostoru lze tedy využít metod lineárních časově invariantních systémů⁵, jako je kmitočtová nebo přechodová charakteristika, přenosová funkce. Impulsová charakteristika prostoru simuluje šíření zvukových vln v akustickém prostoru s daným počtem vstupů a výstupů. Tvar impulsové charakteristiky byl popsán pomocí logaritmické obálky impulsní charakteristiky e (dB) (viz obr. 2.2).



Obr. 2.2: Aproximace impulsní odezvy poslechového prostoru (převzato z [5]).

Skládá se z přímé vlny, která dorazí k posluchači přímou cestou od zdroje zvukového signálu, dále z prvotních odrazů (neboli Early reflections), které jsou jasné

⁴ Příkladem je doba poklesu akustického tlaku o 20 a 30 dB (označovaných jako T_{20} , T_{30}), z nichž se doba dozvuku T_{60} , vypočítá vynásobením těchto hodnot třemi respektive dvěmi. [5]

⁵ LTI systém chápeme jako dynamický systém, provádějící jednoznačnou transformaci vstupního diskretního signálu $x[n]$ na výstupní diskretní signál $y[n]$. Pro lineární diskretní systém platí princip superpozice a časově invariantní (neboli neparаметrický) diskretní systém znamená, že daná transformace nezávisí na časovém posunutí. [7]

slyšitelné a dobře lokalizovatelné odrazy přicházející k posluchači po prvním odrazu od stěn (či podlahy) akustického prostoru (Jsou tedy důležité především pro dobrou lokalizaci zdroje zvuku) a nakonec z mnohonásobných odrazů, které jsou směsí zvukových signálů přicházejících do míst poslechu po několikanásobných odrazech od stěn (či podlahy) akustického prostoru. [5]

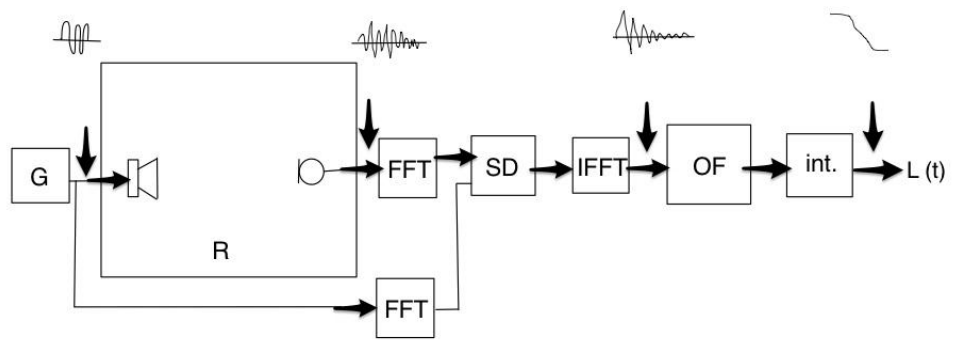
2.4 Měření impulsové charakteristiky prostorů

Jak již bylo výše uvedeno, impulsovou charakteristiku akustického prostoru je možné teoreticky získat vybuzením prostoru Diracovým impulsem, a jeho zaznamenáním mikrofonom, v místě posluchače. Avšak vzhledem k přenosovým vlastnostem všech známých konstrukcí akustických měničů, není prakticky možná realizace akustického Diracova impulsu, a proto se používají její aproximace, tj. zdroje zvuku s co nejkratší dobou trvání, co nejrovnoměrěji rozloženou spektrální hustotou výkonu a nejvyšším akustickým výkonem, pro minimalizování chyb měření, způsobených hlukem pozadí. V praxi se využívá výstřelu ze signální pistole.

Z teorie systému a jak uvádí [8] víme, že výstupní signál lineárního a časově invariantního systému lze získat konvolucí vstupního signálu s jeho impulsní charakteristikou systému. A naopak, pokud známe vstupní a výstupní signál, lze impulsní charakteristiku získat jejich dekonvolucí. Pro vstupní signál platí opět požadavek pro rovnoměrně rozloženou spektrální hustotu výkonu a co nejvyšší akustický výkon. Tomuto požadavku vyhovuje např. bílý, či růžový šum. Jak již bylo napsáno, při samotném akustickém měření je však problém se zkreslením signálu reprodukčním řetězcem. Proto se využívá deterministických signálů, namísto stochastických. Mezi nejpoužívanější metody, které jsou v [8] popsány jako nové akustické metody měření, využívající deterministických signálů patří metoda TDS (Time Delay Spectrometry) užívající přeladovaného harmonického signálu a metoda MLS (Maximum Length Sequence) využívající pseudonáhodný binární šum. [5]

2.5 Dekonvoluce

Frekvenční odezva může být získána buď přímou dekonvolucí nebo spektrálním dělením odezvy a budícího zdroje. Na obr. 2.3 je naznačena transformace mezi časovou a frekvenční oblastí. Je vyjádřena pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Impulsní odezva je získána po zpětné transformaci do časové oblasti (pomocí inverzní FFT neboli IFFT), ze které lze dále získat funkci $L(t)$.



Obr. 2.3: Proces dekonvoluce pomocí spektrálního dělení (převzato z [8]).

Kde G je generátor přeladovaného sinusového signálu (sweep), R je místnost (room), FFT je rychlá Fourierova Transformace, SD je spektrální dělení, IFFT je zpětná rychlá Fourierova Transformace, OF je oktavový filtr. [8]

3 OBJEKTIVNÍ KRITÉRIA KVALITY KONCERTNÍCH A OPERNÍCH SÁLŮ

Základní charakteristikou, popisující vlastnosti uzavřených prostorů z hlediska prostorové akustiky, je doba dozvuku, což je, jak již bylo napsáno, doba, kdy hladina akustického tlaku v prostoru poklesne o 60dB oproti původní hladině. Při samotném měření se ovšem hodnota doby dozvuku nezjistí sledováním celého poklesu o 60dB, avšak pouze na základě části tohoto poklesu. Existuje několik způsobů vyhodnocení. Podle zvoleného způsobu se potom zjištěná doba dozvuku označuje. Nejčastěji se používá doba dozvuku T_{30} , dalšími užívanými dobami dozvuku jsou T_{20} , T_{10} a tzv. počáteční (brzká) doba dozvuku EDT .

Avšak doba dozvuku, byť vyhodnocená několika různými způsoby, zdaleka nepopisuje akustickou kvalitu uzavřeného prostoru beze zbytku. Proto bylo v předchozích desetiletích definováno několik dalších charakteristik, z nichž část je sice s dobou dozvuku do velké míry korelována, přesto však popisují také aspekty akustického chování prostoru, o kterých hodnoty doby dozvuku nevypovídají zcela dostatečně. Proto byly dle zdrojů vybrány ty aspekty akustiky prostoru, které souvisejí s kvalitou poslechu hudby v auditoriu. [3]

Akustické parametry sálů popisující kvalitu bychom měli v první řadě rozdělit na ty, které počítáme z monaurální a binaurální impulsních odezev, dále je můžeme rozdělit na objektivní a subjektivní. V této práci se budeme zabývat objektivními, které dále dělíme na časové, energetické a ostatní, které není možno zařadit ani do jedné z předešlých kategorií. [2]

3.1 Časové a frekvenční kritéria

Tyto kritéria se určují z časového úseku poklesu dozvukové křivky, mezi nejnámější z nich patří doba dozvuku a počáteční doba dozvuku. Mezi frekvenční kritéria bychom mohli zařadit poměr basových a vysokých kmitočtů. [2]

3.1.1 Doba dozvuku

Jak již bylo napsáno výše, je to doba, za kterou poklesne hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku po vypnutí zvukového zdroje na 10^{-6} původní hodnoty, tj. poklesne o 60 dB. Je určena přímkou se směrnici b , proloženou dozvukovým poklesem $D(t)$ v úseku mezi hladinami $D = -5$ dB až $D = -35$ dB

$$T_{60} = -\frac{60}{b} [s]. [2] \quad (3.1)$$

3.1.2 Doba dozvuku T_{20}

Doba dozvuku získaná z poklesu o 20 dB (od 5 do 25 dB), je kmitočtově závislá. Jednočíselně se vyjadřuje nejčastěji jako T_{20mid} , což je průměr hodnot doby dozvuku T_{20}

v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz. [3]

3.1.3 Doba dozvuku T_{30}

Doba dozvuku získaná z poklesu o 30 dB (od 5 do 35 dB). Jedná se o nejčastěji používaný způsob vyhodnocení doby dozvuku.

Doba dozvuku T_{30} je taktéž kmitočtově závislá. Jednočíselně se nejčastěji vyjadřuje jako T_{30mid} , což je průměr hodnot doby dozvuku T_{30} v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz

3.1.4 Počáteční doba dozvuku EDT

Doba získaná z počátečních 10 dB poklesu. Ačkoliv se nejedná o nejčastěji používaný způsob vyhodnocení doby dozvuku, hodnoty EDT nejvíce odpovídají subjektivnímu vnímání doby dozvuku prostoru. Počáteční doba dozvuku je kmitočtově závislá. Jednočíselně se vyjadřuje jako EDT_{mid} , což je průměr hodnot s počáteční doby dozvuku EDT v oktávových pásmech 500 Hz a 1 kHz. [3]

Jak počáteční doba dozvuku EDT , tak standartní doba dozvuku RT , se získávají měřeními ze sklonu křivky oktávového pásma integrované impulsní odezvy. [2]

3.1.5 Míra hlubokých tónů (basový poměr) BR

Je míra podpory hlubokých tónů doznívání sálu. Určí se z poměru doby dozvuku v oktávových pásmech 125 a 250 Hz, ku době dozvuku v oktávových pásmech 500 a 1000 Hz.

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}} [-], \quad (3.2)$$

kde RT_{125} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 125 Hz, RT_{250} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 250 Hz, RT_{500} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 500 Hz, RT_{1000} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 1000 Hz. Hodnoty BR by měly být blízké od shora 1, avšak neměly by klesnout pod tuto hodnotu. [2]

Tato charakteristika odpovídá subjektivnímu vjemu spektrálního průběhu doznívání. [3]

3.1.6 Míra vysokých tónů HFR

Vztah pro výpočet HFR je dán rovnicí

$$HFR = \frac{RT_{500} + RT_{1000}}{RT_{2000} + RT_{4000}} [-], \quad (3.3)$$

kde RT_{500} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 500 Hz, RT_{1000} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 1 kHz, RT_{2000} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 2 kHz, RT_{4000} je doba dozvuku v oktávovém pásmu 4 kHz.

Hodnoty HFR by podle [2] měly být blízké zdola 1, avšak neměly by se výrazně

odchylovat.

3.2 Energetická kritéria

Tato kritéria vychází z energetických poměrů signálu pro definované časové úseky průběhů získané impulsní odezvy prostoru. [2]

3.2.1 Míra přímého zvuku C_7

Je definována poměrem energií přicházejících do 7 ms, ku energii od 7 ms. Její hodnota se udává v decibelech a používá se k odhadu síly přímého zdroje zvuku (lokalizace přímého zvuku).

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{7 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7} \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

kde $p(t)$ je impulsová odezva prostoru, t je čas, E_{∞} značí úhrnnou energii impulsové odezvy a E_7 úhrnnou energii impulsové odezvy v jejích prvních 7 ms.

Hodnoty nad -15 dB připouští dobrou lokalizaci zdroje zvuku. Čím více se blíží hodnoty 0 dB, tím lepší je hodnota lokalizace zdroje zvuku. Podle: Reichardt, W.: Grundlagen der technischen Akustik. 1968, se uvádí jako hodnota přímého zvuku hranice 5 ms. [2]

3.2.2 Míra jasnosti C_{80}

Zakotvená v normě ČSN 73 0525 udává akustické kritérium pro hudbu (definována pro oktávové pásmo 1 kHz) a je definována desetinásobkem dekadického logaritmu poměru zvukové energie do 80 ms a po 80 ms.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

kde $p(t)$ je impulsová odezva prostoru, t je čas, E_{∞} značí úhrnnou energii impulsové odezvy a E_{80} úhrnnou energii impulsové odezvy v jejích prvních 80 ms.

V současné době představuje zatím nejlepší korelát poslechového atributu „jasnost“ pro časové rozlišení tónů v rychlých hudebních pasážích. Optimální hodnoty C_{80} velmi záleží na hudebním žánru. [2]

3.2.3 Míra zřetelnosti C_{50}

Toto kritérium udává akustické kritérium srozumitelnosti pro řeč. Je definováno poměrem energií přicházejících do 50 ms ku přicházejícím po 50 ms, hodnota je v decibelech a je dána rovnicí

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \text{ [dB]}. \quad (3.6)$$

Hodnoty vycházející nad 0 dB ve standardní místnosti ukazují na dobrou srozumitelnost mluveného slova, oproti tomu pod -5 dB na více odrazivou místnost, než by byla vhodná pro mluvený přednes. [2]

3.2.4 Zřetelnost D_{50}

Je definována poměrem energie přicházející do 50 ms ku energii přicházející do nekonečna. Svoji hodnotou je ekvivalentem parametru srozumitelnosti C_{50} . Vzájemný přepočít je definován vztahem

$$C_{50} = 10 \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}}. \quad (3.7)$$

3.2.5 Míra dozívání H (Reverberance Measure)

Tento parametr nám popisuje dozvukový prostorový dojem hudebního výkonu. Vypočítá se pro oktákové pásmo 1 kHz z dekadického logaritmu poměru zvukové energie od 50 ms ku energii přicházející do 50 ms. Z čehož vyplívá vzájemná souvislost mezi mírou zřetelnosti C_{50} a mírou dozívání H . Stejně tak bychom mohli odvodit souvislost s parametrem zřetelnosti D .

3.2.6 Síla zvuku G (Strength of arriving energy)

Je zakotvená v normě ČSN 73 0525 a udává míru hlasitosti. Nejvíce odpovídá subjektivnímu parametru hlasitosti.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{\infty}}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} [dB] \quad (3.8)$$

kde $p(t)$ je impulsová odezva prostoru, p_A je impulsová odezva snímaná ve volném poli v referenční vzdálenosti 10m, t je čas, E_{∞} značí úhrnnou energii impulzové odezvy. [2] Síla zvuku je kmitočtově závislá. Pro snazší orientování se uvádí též průměr značený G_{mid} pro sílu zvuku v oktákových pásmech 500 Hz a 1 kHz. [3]

Podle [2] jsou optimální hodnoty G_{mid} v rozmezí +4 až +5,5 dB. Pro koncertní prostory je optimální rozmezí -2,4 až +1 dB.

Pro rychlé zjištění hodnoty lze využít zjednodušený vztah

$$G_{pred.} = 10 \log \left(\frac{T_{60}}{V} \right) + 45., \quad (3.9)$$

kde V je objem prostoru a T_{60} doba dozívku.

3.2.7 Čas těžiště impulsově odezvy t_s (Center Time)

Tato veličina má vypovídající hodnotu prostorového dojmu a jasnosti pro hudbu a mluvené slovo.

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{E_\infty} \quad [s] \quad (3.10)$$

kde $p(t)$ je impulsová odezva prostoru, t je čas, E_∞ značí úhrnnou energii impulsově odezvy. Pro hudbu se hodnoty v oktávovém pásmu 1 kHz pohybují v rozsahu 70 až 150 ms. [2]

3.2.8 Počáteční prodleva *ITDG*

Počáteční prodleva je časové spoždění prvních odrazů od bočních stěn nebo stropu (resp. od zadní stěny jeviště) za přímým zvukem s odrazy nejbližších ploch (zejména podlahy podia, židlí a stojanů not atp.) Hodnota *ITDG* je pro celý sál určována z impulsově odezvy, obvykle poblíž středu přízemí na jeho podélné ose. Zdroj je umístěn ve středu podélné osy podia (jeviště), obvykle 1,5 až 2m (lit. [3] udává cca 3m) od jeho přední hrany. Upřednostňovány jsou hodnoty menší než 20 ms. [2] Podle lit. [3] tato charakteristika odpovídá subjektivnímu vjemu intimity.

3.2.9 Koeficient difuzity povrchů *SDI*

Posluchači obecně preferují, je-li počátek tónu čistý a měkký a přichází-li počátek doznívání z mnoha směrů. Každý úspěšný sál vykazuje makro i mikro nepravidelnosti povrchů ohraničujících stěn. Tyto struktury napomáhají vytvořit difuzní⁶ zvukové pole, a tím dodávají zvuku bohatou „patinu“ a měkkost. Z fyzikálního hlediska difuzní pole ovlivňuje hudební zážitek dvěma způsoby, a to: počátečními odrazy (prvotními odrazy nebo také Early Reflection) a dozvukovým polem. (Je-li hudebník, či snad posluchač v místnosti s pravoúhlými a hladkými stěnami, vždy dochází vlivem interferencí přímého zvuku s „tvrdými“ zpožděnými odrazy ke vzniku „hřebenového filtru“⁷.)

Metodu vypracovali Haan a Fricke (odhad rozptylnosti povrchů), jedná se o vztah mezi akustickou kvalitou koncertních síní a vizuálním ohledáním stupně nepravidelnosti povrchů stěn a stropu. (nazvali ho „stupeň rozptylnosti“ neboli degree of diffusity) Každému stupni rozptylnosti přiřadili autoři číselný váhový koeficient: „vysoce rozptylné“ = 1, „středně rozptylné“ = 0,5, „nízká rozptylnost“ (včetně pohltivých ploch) = 0. Rozptylnost povrchu sálu je podíl celkové bodové hodnoty všech ploch (kromě zadní stěny) a celkové plochy stropu a bočních stěn⁸.

3.2.10 Lateral Energy Friction - LF

Získává se pomocí tzv. „bi-directional“ mikrofonů. Tedy za pomoci vedle sebe umístěných mikrofonů, jednoho s všesměrovou charakteristikou a druhého

⁶ Difuzní pole je fikce, usnadňující výpočty v akustice. Má tři následující vlastnosti: je homogenní (všude je konstantní energie), isotropní (tok energie je ve všech směrech konstantní) a platí čistě energetický součet. Dozvukové pole v ustáleném stavu se méně, či více blíží difuznímu poli, avšak nikdy difuzní není. [2]

⁷ Pro všechny kmitočty, kdy lichý násobek poloviny jejich vlnové délky je roven dráhovému rozdílu ($d = (2n + 1) \lambda/2$, kde n je celé číslo), dochází v místě příjmu k odečítání, až vyrušení, akustického tlaku. (zvuk dostává nepříjemný „tvrdý“ charakter nebo nepříjemnou barvu.

⁸ London Barbican Hall, považovaný za jeden ze tří nejlepších sálů světa, má nejnižší hodnotu s *SDI* = 0,23.

s osmičkovou směrovou charakteristikou. Dle [2] by se optimální hodnoty měli pohybovat v rozsahu 0,1 až 0,25. Vzorec pro výpočet je dán rovnicí

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2(t)dt}{\int_0^{80ms} p^2(t)dt} = \frac{E_{80b_i} - E_{5b_i}}{E_{80}}. \quad (3.11)$$

Kde index $_8$ u impulsní odezvy v čitateli (stejně tak $_{b_i}$ v energetické rovnici) značí osmičkovou směrovou charakteristiku a do jmenovatele dosazujeme impulsní odezvu získanou impulsní odezvu z všesměrového měřicího mikrofonu. [2]

3.2.11 Činitel interaurální vzájemné korelace *IACC*

Proces slyšení je binaurální (česky obou-ušní). Subjektivní studie poslechových prostorů ukázaly, že činitelé interaurální vzájemné korelace *IACC*, měřené, buď pomocí umělé hlavy s torzem, nebo za pomoci reálného posluchače, kterému jsou u vstupu zvukovodů (ušních boltců) umístěny mikrofony, dobře korelují se subjektivní kvalitou (dojmu prostorovosti) v koncertním sále. Funkce interaurální vzájemné korelace *IACF* je definován vzorcem

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t)p_r(t+\tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t)dt}}, [-] \quad (3.12)$$

kde $p_l(t)$ je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu (umělé hlavy) a $p_r(t)$ totéž pro pravý ušní kanál, t je čas a značí časový posun mezi body vyhodnocení impulsových odezev v místě levého a pravého ucha.

Činitel interaurální vzájemné korelace *IACC* je dán rovnicí

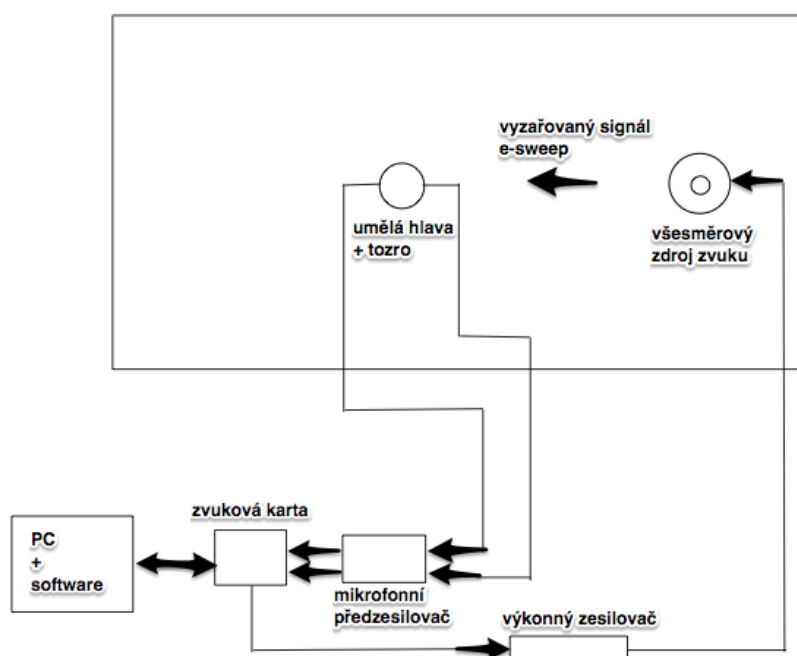
$$IACC_{t_1, t_2} = \max|IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, \quad -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}. \quad (3.13)$$

Hodnoty $1 - IACC_E$ by se měly podle nejpřísnějších požadavků (v oktávových pásmech 500 Hz, 1 a 2 kHz) pohybovat v rozsazích hodnot 0,4 až 1, kde 1 znamená maximální rozdílnost zvukových signálů na obou uších (čím menší hodnota, tím větší vnímaná prostorovost).

Písmena **E**, **L** a **A** udávají integrační časové meze parametru *IACC*. ($IACC_E$: $t_1 = 0$ ms, $t_2 = 80$ ms, $IACC_L$: $t_1 = 80$ ms, $t_2 = 1000$ ms, $IACC_A$: $t_1 = 0$ ms, $t_2 = 1000$ ms). Číslo za tímto písmenem udává, pro která třetinooktávová pásma je hodnota *IACC* určena (**3**: 500 Hz, 1 a 2 kHz, **4**: 500 Hz, 1, 2 a 4 kHz). Nejlépe hodnocené sály mají hodnoty [$1 - IACC_{E3}$] okolo 0,6.

4 PRINCIP MĚŘENÍ V DNO

Měření akustických charakteristik bylo provedeno metodou integrované impulsní odezvy. Jako budící signál byl použit exponenciálně přeladovaný sinusový signál (neboli e-sweep), který byl vyzařován do prostoru pomocí všesměrového (respektive směrového) zdroje zvuku. E-sweep signál byl třikrát periodicky opakován, aby mohly být výsledky měření průměrovány. Měřicí signál byl zaznamenáván pomocí deseti všesměrových kondenzátorových mikrofónů v hledišti, čtyřech všesměrových kondenzátorových mikrofónů na jevišti, dále třemi kondenzátorovými mikrofóny s osmičkovou charakteristikou v hledišti a také pomocí umělé hlavy s torzem (blokové schéma můžeme vidět na obr. 4.1, pro stanovení kritéria *IACC*. [3])



Obr. 4.1: Blokové schéma měřicího systému (převzato z [3]).

4.1.1 Pozice zdrojů zvuku a mikrofónu (umělé hlavy)

Byly zvoleny čtyři pozice (viz příloha A) všesměrového zdroje zvuku v orchestřišti, které byly ve výšce 1,6 metrů. Dále 3 pozice směrového zdroje zvuku na jevišti, jejichž výška středu zdroje nad podlahou byla vždy 1,4 metrů. Tato výška koresponduje s přibližnou výškou úst zpěváků a tři zásadní polohy dle pohybu zpěváků na jevišti.

Na jevišti byly dále umístěny čtyři všesměrové kondenzátorové mikrofóny, ve výšce 1,6 metrů, což koresponduje s výškou uší zpěváků a opět čtyři různé polohy, dle nejrozdílnějších postavení zpěváků na jevišti. Protože prostor divadla je symetrický, deset všesměrových kondenzátorových mikrofónů, umístěných v hledišti, je rozmístěno na jedné polovině, podél imaginární osy ve výšce 1,2 metrů, předpokládané výši uší posluchače, sedícího v hledišti. Jako poslední, pro měření monaurální impulsní odezvy,

byly použity tři kondenzátorové mikrofony s osmičkovou charakteristikou, taktéž ve výšce 1,2 metru. Pro binaurální měření byla použita umělá hlava s torzem, ta byla umístěna přibližně ve středu hlediště, ve výšce 1,27 metru (taktéž koresponduje s výškou sedícího posluchače). Měřicí hlava byla po celou dobu měření natočena čelem ke středu jeviště (orchestríště).

4.2 Postup prvního měření – opera *Mirandolina*

Dne 6. listopadu 2015 jsme provedli měření v Divadle na Orlí, kde měla 21. listopadu 2015 premiéru komorní, komická opera *MIRANDOLINA*, Hudební fakulty JAMU v Brně, od autora Bohuslava Martinů.

Jak již bylo napsáno v úvodu, operní řešení scény divadla je velmi specifické provedení. Na jevišti se odehrává hlavní dění, zastoupeno zpěváky, před jevištěm se nachází orchestríště, které je pomocí kolejnic spuštěno dolů, v našem případě to bylo na max. hodnotu tj. 2,1m pod úroveň jeviště tak, aby bylo vidět na zpěváky.

Měření tedy probíhalo s naistalovanou scénou této opery, ve které se většina předmětů skládala ze spíše odrazivých materiálů. Veškerá měření byla prováděna v neobzazeném stavu hlediště. Sedadla mají střední polstrování sedáku a opěráku (konstrukční požadavek na stohovatelné židle, mobilní provedení, lehká manipulace), nicméně tyto židle nekorespondují s pohltivostí člověka. V DnO není možnost instalace orchestrální mušle, jejímž hlavním principem je především nasměrování odrazu zvuku z jeviště, nad jevištěm je tzv. komín, kde jsou umístěny mechanické tahy na světla a dekorace a není možné tento prostor "odříznout". Hlavní opona byla vytažena, zadní opona na jevišti byla odstraněna a nahrazena show fólií, která by měla mít příznivější vlastnosti, narozdíl od opony, šál a závěsu, které jsou z těžkého, pohltivého sametu. Orchestríště nebylo žádným způsobem zakryto, pouze kolem něj bylo z bezpečnostních důvodů zábradlí.[3] Po podlaze byly rozsypány kousky korku, jako imitace písčité pláže.

4.2.1 První měření

V prvním měření jsme zaznamenávali všesměrový zdroj zvuku umístěný v orchestríšti ve čtyřech pozicích, zdroj zvuku uprostřed orchestríště, v orchestríšti vlevo (v $\frac{1}{4}$ šířky orchestríště na levé straně⁹), v orchestríšti vpravo (v $\frac{1}{4}$ šířky orchestríště na pravé straně⁹) a v orchestríšti vzadu.

4.2.2 Druhé měření

Ve druhé měření jsme umístili směrový zdroj zvuku do třech pozic, a to na jevišti: v ose vpředu, vzadu a vpravo⁹, z důvodů, které byli již popsány výše.

V prvním a druhém měření byly šály na jevišti vytaženy nahoru, tak aby neměli žádný vliv na akustiku prostoru, a závěsy po bocích hlediště byly roztaženy a ponechány na volno, tak jak bývají běžně na představení.

⁹ Vždy z pohledu z jeviště.

4.2.3 Třetí měření

Při třetí měření proběhly scénické úpravy. Tři páry šál po boku jeviště byly staženy dolů, závěsy po bocích hlediště byly ponechány stejně jako v předchozích dvou krocích. Následovala měření čtyř pozic všesměrového a třech pozic směrového zdroje zvuku, stejně jako v předchozích měřeních.

4.2.4 Čtvrté měření

V posledním měření byly odstraněny všesměrové pohltivé prvky, tedy šály ze třetího měření byly opět vytaženy nahoru. Závěsy po bocích hlediště nebylo možno po technické proveditelnosti vytáhnout na ochoz kolem sálu, byly ovšem staženy do zadních rohů hlediště na nejmenší možný objem.

4.3 Postup druhého měření – opera Impresário v Koncích

Dne 10. března 2016 bylo provedeno druhé měření s sále Divadla na Orlí, kde měl v sobotu 19. března I. premiéru komedie HF JAMU v Brně - Impresário v Koncích od autora Domenica Cimarosy.

K opernímu řešení scény bylo napsáno již u prvního měření. Rozdílnost řešení této scény spočívala v tom, že orchestřiště před jevištěm bylo zpuštěno pouze 1 metr pod úroveň, opět bylo kolem orchestřiště zábradlí. Na jevišti bylo minimum předmětů, pouze pár židlí, které byly umístěny na praktikáblech, které zabíraly více než polovinu jeviště, ve výšce cca 0,4 metrů. V zadní části jeviště nebyla umístěna neprůhledná show fólie, jako to mu bylo u opery Mirandolina. Podlaha byla tentokrát „holá“ bez jakékoliv pokrývky. Hlavní opona byla opět vytažena do maximální výšky. Podoba elevace byla mírně rozdílná, tento rozdíl byl však zanedbatelný. Dalším rozdílem oproti prvnímu řešení bylo vysunutí stolu, v zadní části jeviště, v jedné části scény na maximální výšku, což bylo cca metr.

Metodika měření byla zachována jako v předchozím měření, čili v neobsazeném stavu s elevací, na které byly židle, které jsou popsány výše, taktéž bez orchestrální mušle.

4.3.1 První měření

Byl zaznamenán všesměrový zdroj zvuku umístěný ve 4 pozicích v orchestřišti (viz. příloha A2). Šály byly v prvním i druhém měření vytaženy na ochozech. Závěsy po bocích hlediště byly zpola roztaženy, tak jak vždy bývají.

4.3.2 Druhé měření

Ve druhé části měření byly zaznamenány tři pozice směrového zdroje zvuku (viz. příloha A2).

4.3.3 Třetí měření

U třetího kroku měření následovaly scénické úpravy, tak jako tomu bylo v listopadovém

měření. Byly spuštěny tři páry šál. Závěsy po bocích hlediště byly ponechány jako v přechozích dvou krocích měření. Zaznamenány byly čtyři pozice všesměrového a tři pozice směrového zdroje zvuku.

4.3.4 Čtvrté měření

V předposledním kroku měření byly odstraněny veškeré pohltivé prvky. Šály byly opět vytaheny na ochozy a závěsy po bocích hlediště byly staženy do zadních rohů na co nejmenší objem, stejně tak jako při listopadovém měření. Zaznamenali jsme opět čtyři pozice všesměrového a tři pozice směrového zdroje zvuku.

4.3.5 Páté měření

Poslední krok měření nekoresponduje s listopadovým měřením. Bylo ovšem provedeno nejen z časového důvodu, kdy v plánovaném úseku byl ještě prostor, ale především proto, že toto scénické řešení bylo součástí představení, tudíž mělo vliv na akustiku prostoru. Scénickým řešením bylo vyjetí stolu v zadní části jeviště na maximální výšku cca 1 metr.

4.4 Sál Divadla na Orlí

Ze změřených parametrů sálu a volně dostupných parametrů ze zdroje [9] můžeme vytvořit Tab. 1.1 stejně jako ve zdroji [3] a následně porovnat s prostory s podobným objemem a využitím, jako například s Městským divadlem Mariánské Lázně o objemu 1550 m³ dle [10] nebo Vrchlického divadlem Louny o objemu 1620 m³ dle [11].

Tab. 1.1: Základní rozměrové charakteristiky prostoru Divadla na Orlí

Objem [m3]	1638
Půdorisná plocha jeviště [m2]	72
Půdorisná plocha hlediště [m2]	100
Plocha proscéniového otvoru [m2]	72
Délka hlediště [m]	10
Šířka hlediště [m]	12
Výška hlediště [m]	6,5
Objem na 1 osobu [m3]	10,92
Kapacita sálu [osob]	150
Poměr výška hlediště : šířka hlediště	0,5
Poměr délka hlediště : šířka hlediště	0,83

5 MĚŘENÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU EVENT 2020

Měření směrové charakteristiky reproduktoru Event 2020 proběhlo v bezodrazové komoře pomocí měřicího systému Pulse. Výsledkem měření je polární diagram akustického tlaku v konstantní vzdálenosti od reproduktoru v závislosti na úhlu α při stálém kmitočtu. Měření probíhalo automaticky po 1° v $1/3$ oktávových pásmech od 100Hz do 8kHz. Z přiložených grafů (viz příloha C) je vidět, že se vzrůstajícím kmitočtem roste směrovost a membrána vyzařuje energii více do směru osy. [12]

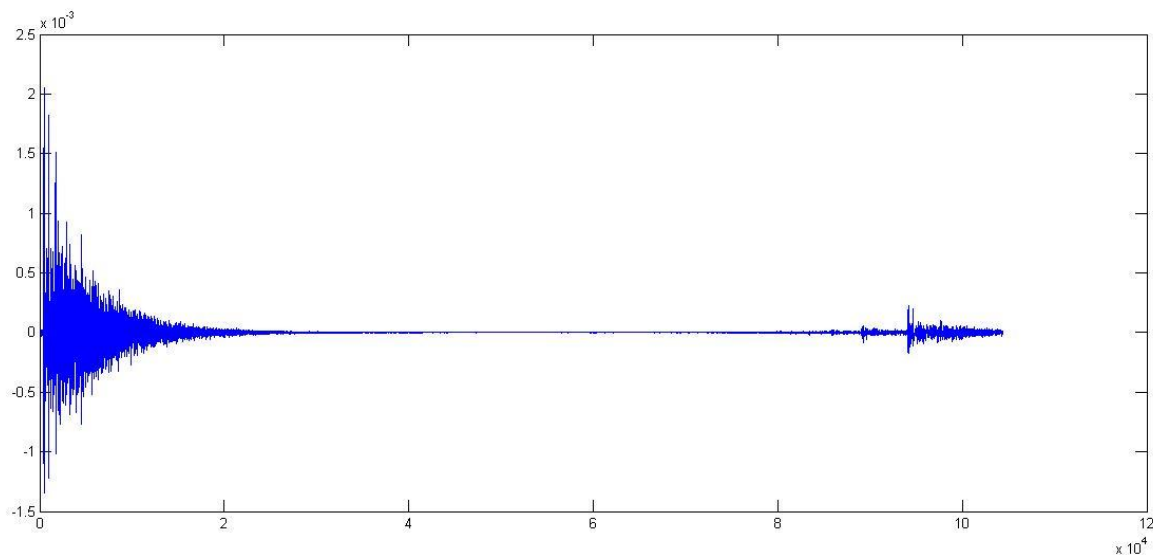
6 VÝSLEDKY Z PROGRAMU MATLAB

6.1 Získané z monaurálních impulsních odezev

Ze zaznamenaných wave souborů zdrojů zvuku a z mikrofonů nahraných záznamů, jsem, pomocí volně dostupného programu Tracks Live 1.1 od firmy Waves, nastříhal z audio stop jednotlivé vzorky exponenciálně přeladovaných sweepů, ze kterých jsem pomocí funkcí v prostředí Matlab počítali impulsní odezvy, které budou dále využity k dalším výpočtům.

Funkce *impulsniodezva.m* načítá zaznamenaný budící zdroj e-sweepu označovaný jako x a zaznamenaný e-sweep odezvy z z mikrofonů umístěných v hledišti a jevišti (viz. příloha A). Pomocí rychlé Fourierovy transformace *FFT*, spektrálního dělení a zpětné Fourierovy transformace *IFFT*, vypočítá impulsní odezvu prostoru. Protože se v průběhu ukládání objevil problém s přesažením maximální hladiny hlasitosti 0 dBFS (které odpovídají hodnotě 1) v CLIP, byla nutnost u některých impulsních odezev tento problém odstranit podělením maximální absolutní hodnotou signálu a vynásobením 0,99, což eliminovalo hodnoty 1, které jsou mimo rozlišení fixed-point .wav souboru.

Na obr. 5.1 můžeme vidět ukázkou jedné reálné impulsní odezvy získané pomocí skriptu popsaného výše. Při roztažení obrázku bychom mohli vidět typický průběh impulsní odezvy, tak jak bylo popsáno v teoretické části výše (přímá vlna, prvotní odrazy a mnohonásobné odrazy). Navíc můžeme v pravé (nelineární) části vidět další (drobnou) impulsní odezvu, což je tzv. impulsní odezva vyšší řádu neboli kernel, což znamená nelineární zkreslení signálu (zřejmě z reproduktoru).



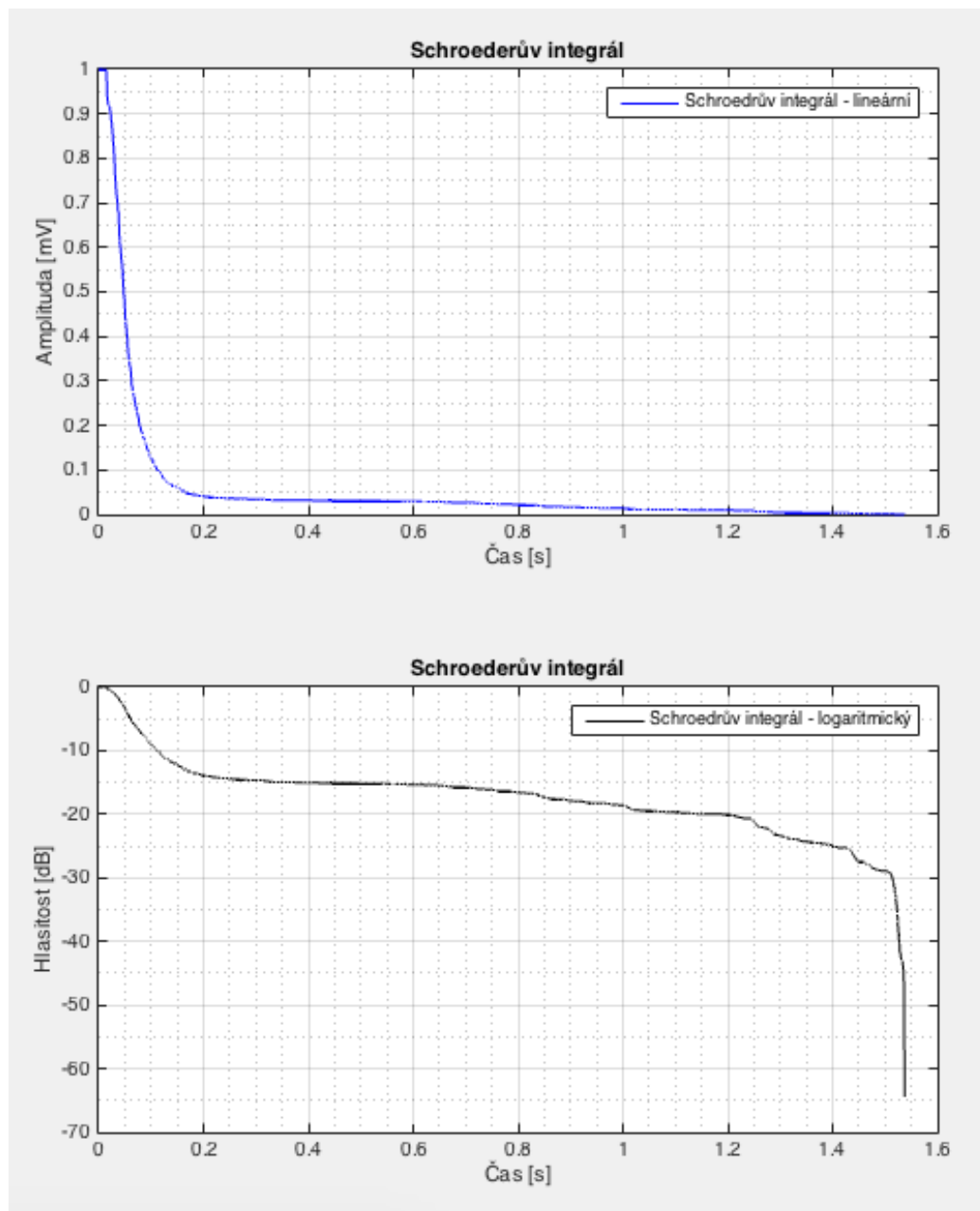
Obr. 6.1: Impulsní odezva získaná z programu Matlab.

6.2 Výpočet objektivních kritérií

Protože výsledky monaurálních impulsních odezev vyhodnocené pomocí skriptu *objektivni.m* nebyly dle zdroje [2] v přípustných rozsazích, bylo následně při porovnávání s výsledky s profesionálním programem Easera zjištěno, že tento program má automaticky zapnutou redukci šumu.

V prvním měření byla doba jednoho sweepu 3 vteřiny a u druhého měření jen jednu vteřinu. Z rychlejšího sweepu jsou impulsní odezvy prostoru lepší (s menším podílem šumu) než pomalejší, ovšem i tak byl problém získat nezkreslené výsledky. V příloze B jsou přiloženy grafy výsledků *EDT*, které mají z výše uvedených důvodů velké výkyvy a nejsou přípustné a také grafy C_{80} , které ovšem také nesplňují podmínky (dle [2] nesmí v žádném místě překročit 8dB). Dále jsou v této příloze výsledky kritéria LF, které také nesplňují podmínku rozptylu hodnot mezi 0,1 až 0,25.

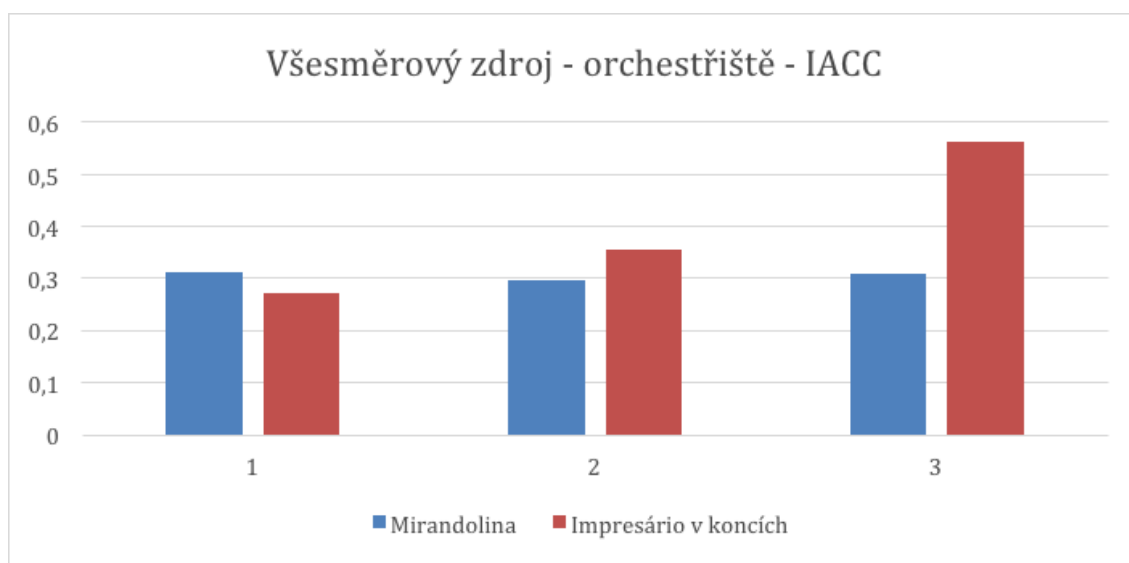
Na obr. 6.2 lze vidět, že při poklesu hladiny akustického tlaku se nám již při -15 dB promítá hluk pozadí (šum místnosti). Proto nebylo možné z tohoto poklesu získat dobu *RT*, která se počítá aproximací z poklesu od -5 dB po -35 dB, jak bylo uvedeno výše, ale ani *EDT*, která se počítá z počátečních 10 dB poklesu. Tento problém vedl i ke špatným výsledkům při vyhodnocování energetických kritérií. I při snaze opětovných výpočtů a zkrácení času energie z nekonečna na pouze 300ms vedlo pouze k částečným správným výsledkům u části impulsních odezev některých mikrofonů a některých kroků měření. Což ale při průměrování jednotlivých kroků měření všesměrového zdroje zvuku v orchestřišti a směrového zdroje zvuku na jevišti zvlášť a zvlášť různé konfigurace sálu vedlo k celkovým špatným výsledkům nespádajících do přípustných rozsahů dle zdroje [2].



Obr. 6.2: Schröderův integrál (lineární a logaritmický) ze získané impulsní odezvy.

6.3 Výpočet z binaurálních impulsních odezev

Binaurální impulsní odezvy vyexportované z programu Dirac a Easera jsou již s kompenzací šumu pozadí, nebyl tedy problém jako u monaurálních impulsních odezev pomocí skriptu *IACC.m* vypočítat vzájemnou korelaci levého a pravého ucha posluchače. Výsledky [$1-IACC_E$] se pohybují okolo hodnoty 0,6, což je dle [2] hodnota nejlépe hodnocených sálů. Avšak je nutné podotknout, že výsledky získané umělou hlavou jsou pouze z jedné statické pozice vpředu v hledišti (viz. příloha A), což vypadá podle výsledků na vhodnou polohu pro poslech v Divadle na Orli, nicméně hodnota je v knize [3] průměrována z více pozic, což v našem případě není.



Graf 1.1: Všesměrový zdroj v orchestřišti – parametr IACC

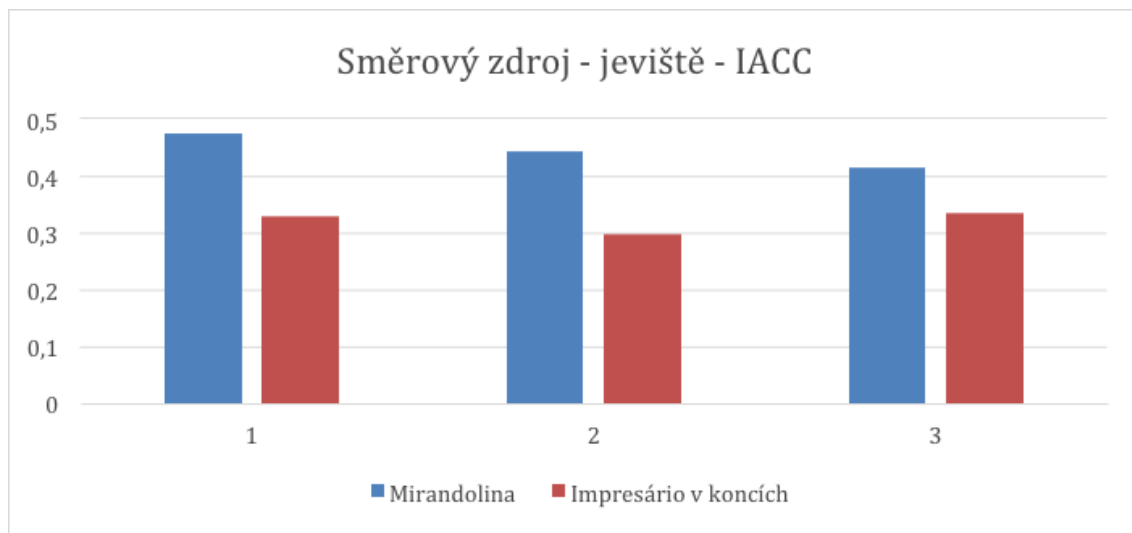
Pokud vyjdeme z [2], hodnoty [$1-IACC_E$] se pohybují mezi 0,4 až 1, kde 1 znamená maximální rozdílnost zvukových signálů na obou uších (tzn. maximální difuzitu zvukového pole), což odpovídá dle výše uvedeného vztahu nižším hodnotám $IACC_E$. Ve zdroji [3] je také doplněno, jak je již v teoretické části, že odpovídá subjektivnímu vjemu prostorovosti a čím je nižší toto číslo, tím je větší vnímaná prostorovost.

V grafu 1.1 vidíme srovnání měření opery Mirandolina a Impresário v Koncích, kde 1 je běžná konfigurace sálu při představeních, 2 je s třemi spuštěnými páry šál, z těžkého pohltivého sametu, po bocích jeviště a 3 je s veškerými odstraněnými pohltivými prvky, což, jak bylo napsáno výše, bylo stažení bočních závěsů v hledišti a vytažení šál zpět na ochozy. Z tohoto srovnání všesměrového zdroje v orchestřišti tedy vychází nejlépe konfigurace v opeře Impresário v Koncích se všemi odstraněnými pohltivými prvky, oproti nejhorsímu výsledku je konfigurace také impresária, ale v běžném stavu na začátku měření.

Další nejmarkantnější rozdíl (v podstatě dvojnásobný) je ve třetí konfiguraci s odstraněnými pohltivými prvky mezi Mirandolinou a Impresáriem, což se bývalo dalo předpokládat, protože jak bylo napsáno výše v opeře Mirandolina bylo orchestřiště sjeto na nejnižší možnou hloubku (2,1m) a v opeře Impresário bylo pouze 1m hluboko a již s

akustickými úpravami.

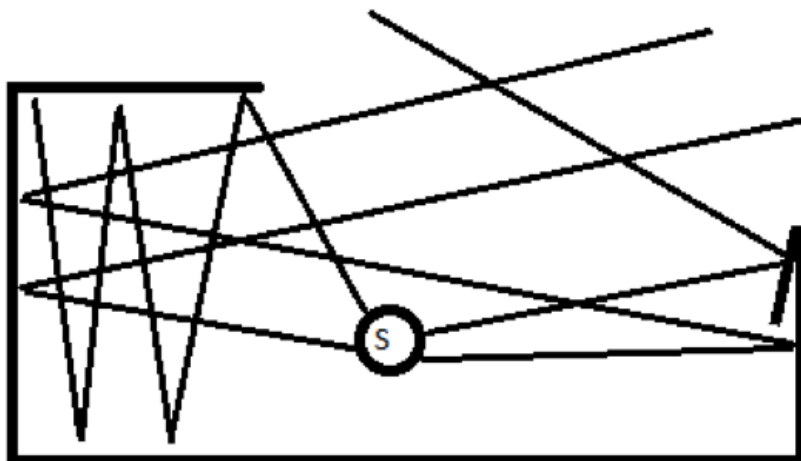
Oproti tomu ve výsledcích směrového zdroje zvuku (viz graf 1.2) jsou hodnoty v jednotlivých konfiguracích pro jednotlivé opery dost podobné a nejlépe z nich vychází *Mirandolina* v první konfiguraci, tedy v běžném stavu sálu. V tomto případě odvedla svoji roli show fólie, která na opeře *Mirandolina* byla umístěná v zadní části jeviště. A další příčinou naopak horšího výsledku v opeře *Impresário*, byla existence praktikáblů na jevišti ve výšce 0,4m. Záměrně jsme dali zdroje zvuku i měřící mikrofony do stejné výšky jako při prvním měření (výška úst/uší zpěváka), protože zpěváci se po těchto praktikáblech v opeře pohybovali.



Graf 1.2: Směrový zdroj na jevišti – parametr $IACC_E$

7 OBECNÁ DOPORUČENÍ PRO ŘEŠENÍ OPERNÍ SCÉNY V DIVADLE NA ORLÍ

Z předchozí kapitoly je zjevné, že akustická úprava orchestřiště má zásadní vliv na subjektivní vjem, což potvrzuje veliký rozdíl v parametru IACCE u všesměrového zdroje zvuku ve 3 konfiguraci s odstraněnými pohltivými prvky.



Obr. 7.1: Jednoduchý obrázek akustických úprav v orchestřišti při zdroji zvuku S [4].

Umístění akustických panelů pouze na bocích orchestřiště (viz. obr. 7.1) ovlivní zdroj zvuku na nižších frekvencích a kobercem pokrytá podlaha může přitlumit některé hlasité nástroje. Naopak odrazivá deska umístěná vepředu orchestřiště (nakloněná přímo proti jevišti) napomůže prvotním odrazům z orchestřiště na jeviště zpěvákům. Tyto akustické úpravy zlepšují nejen srozumitelnost orchestru na jevišti, ale zcela jistě také poměr orchestru a zpěvu/děje z jeviště pro diváka v hledišti.

Dalším „problémem“ k zamyšlení jsou 3 páry šál po bocích jeviště (případně již odstraněná zadní opona). Plní sice estetickou funkci, především tedy praktickou, aby se herec, či v případě opery zpěvák, mohl nečekaně zjevit a zase zmizet na scéně. Avšak v Divadle na Orlí je nad jevištěm vysoký komín, ve kterém jsou tašky, které musí být stále volné, tudíž není možnost orchestrální mušle, tento komín ubere na srozumitelnosti v sále a pokud jsou ještě svěšeny dolů šály z těžkého a pohltivého sametu, který vezme zdroj zvuku především vyšší část spektra, což může zase zásadně ovlivnit barvu zvuku. Z důvodů právě zmiňovaného komínu je pro srozumitelnost lepší volit scénu ze spíše odrazivých materiálů, než-li pohltivých.

8 ZÁVĚR

Byla provedena dvě měření monaurálních a binaurálních impulsních odezev v DnO, před premiérou dvou zcela odlišných oper, především s důrazem na odlišné scénické řešení sálů, a to měření v běžné konfiguraci sálu, s částečným zatlumením a s odstraněnými veškerými pohltivými prvky.

Použili jsme všesměrový zdroj zvuku v orchestřišti, směrový zdroje zvuku na jevišti a celkem sedmáct kondenzátorových mikrofónů pro monaurální impulsní odezvy, tři mikrofóny s osmičkovou směrovou charakteristikou a umělou hlavu s torzem pro binaurální impulsní odezvy.

U samotného měření bylo zásadní mít nachystán plánek divadla, laserovým metrem změřit vzdálenosti zdrojů zvuku a mikrofónů, a zakreslit si je pečlivě do něj. U každého kroku měření si psát poznámky, jinak by byl zaznamenaný materiál nepoužitelný. Díky této znalosti bylo druhé měření o něco rychlejší. Na obě dvě měření jsem musel poprosit čtyři dobrovolníky, kteří pomohli při stavění a balení měření a v průběhu změny pozic zdrojů zvuku a scénickými úpravami.

Protože jsme z technických důvodů nemohli přímo zaznamenat monaurální impulsní odezvy, bylo nutné veškeré měření zaznamenat v DAW Protools - budící signál a zaznamenaný signál z mikrofónů. Ten následně sestříhat na jednotlivé vzorky sweepů, ze kterých dekonvolucí získat potřebné impulsní odezvy prostoru.

Hlavním cílem práce bylo realizovat funkce v matlabu, které budou počítat veškerá objektivní kritéria kvalit poslechových prostor. Čemuž jsem se věnoval, avšak pozdní zjištění chybně uložených, vyexportovaných impulsních odezev a jejich kompletní přepisování a následné objevení problému se šumem, sem nestihl vypočítat všechna monaurální kritéria, z důvodů časové náročnosti, protože mnou vytvoření m-skript počítal pomalu (s ohledem na počet impulsních odezev – skoro 1500). A nemohl jsem je srovnávat s výsledky v [11], [12] a s výsledky měření v DnO z r. 2012, která jsem měl k dispozici a v plánu.

Výsledky IACC ze získaných binaurálních impulsních odezev jsou zprůměrovány a vyhodnoceny v textu. Dále jsou také popsána obecná doporučení pro řešení operní scény v DnO.

LITERATURA

- [1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2, vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s., ISBN 0451480
- [2] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. „Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů“. Akustické listy, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18.
- [3] VONDRÁŠEK, M., MIKEŠ, M., FLEISHMAN, R., Akustika hudebních prostorů v České Republice. Akademie muzických umění v Praze, 2010. ISBN 978-80-7331-141-4
- [4] Internal commission for acoustics: Opera house of acoustics [online]. Dostupné z: http://www.icacommission.org/Proceedings/ICA2001Rome/5_09.pdf
- [5] SCHIMMEL, J., Elektroakustika. Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-4716-5
- [6] Wikipedia, *Impulsní charakteristika*. [online]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Impulsní%20charakteristika>
- [7] SMÉKAL, Z., Analýza signálů a soustav. Vysoké učení technické v Brně, 2012, ISBN 978-80-214-4453-9
- [8] ČSN EN ISO 18233: Akustika – Aplikace nových akustických metod měření stavebních konstrukcí, v budovách a v místnostech. Česká technická norma, Český normalizační institut, listopad 2006.
- [9] Divadlo na Orlí, *Pronájem, Technický popis sálu*. [online]. Dostupné z <http://divadlonaorli.jamu.cz/upload/pronajem/ke-stazeni/technicky-popis-salu-def-HDL.pdf>
- [10] VONDRÁŠEK, M., HRÁDEK, T., MOTL, K., POSEKANÝ, L., Akustika hudebních prostorů 3 v České Republice. Akademie muzických umění v Praze, 2010. ISBN 978-80-7331-196-4
- [11] VONDRÁŠEK, M., HRÁDEK, TUČEK, L., T., MOTL, K., POSEKANÝ, L., Akustika hudebních prostorů 4 v České Republice. Akademie muzických umění v Praze, 2011. ISBN 978-80-7331-315-9
- [12] Elektroakustika, *Laboratorní úloha č. 11* [online]. Dostupné z https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/199962/mod_page/content/2/bela-1-11.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

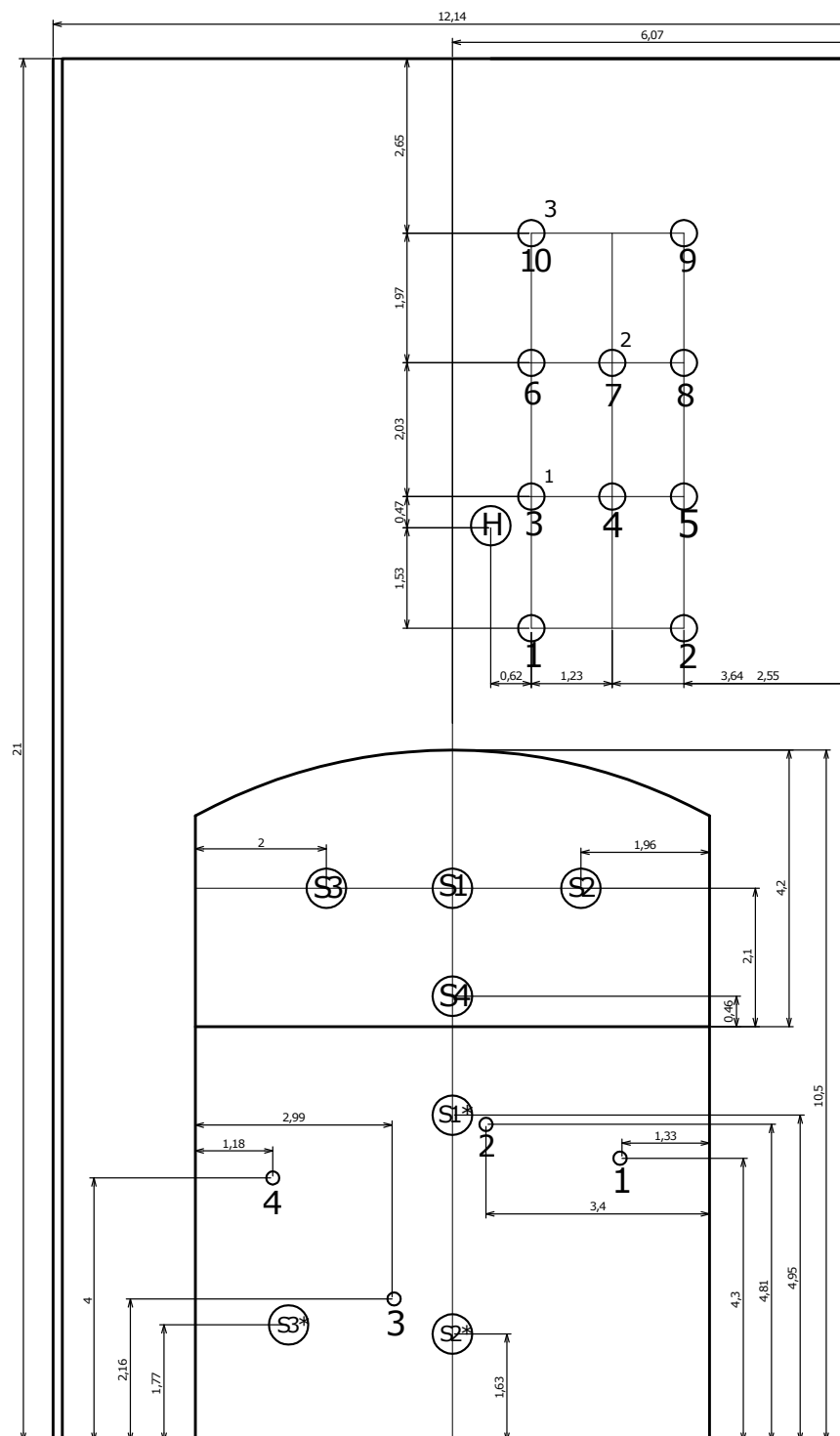
LTI	Linear Time Invariant
TDS	Time Delay Sequence
MLS	Maximum Length Sequence
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformation
<i>IFFT</i>	Inverse Fast Fourier Transformation
SD	Spectral Division
G	Sweep generator
R	Room
OF	Ocatve filter
<i>RT</i>	Reverberation Time
<i>EDT</i>	Early Decay Time
<i>BR</i>	Bass Ration
HFR	High Frequency Ratio
<i>IACC</i>	InterAural cross Correlation Coefficient
<i>ITDG</i>	Initial Time Delay Gap
<i>SDI</i>	Surface Diffusion Index
DnO	Divadlo na Orli
e-sweep	exponenciálně přeladovaný sinusový signál
dBFS	decibel Full Scale
JAMU	Janáčkova akademie muzických umění
WAV	Waveform audio file format
DAW	Digital audio Workstation
S	Source

SEZNAM PŘÍLOH

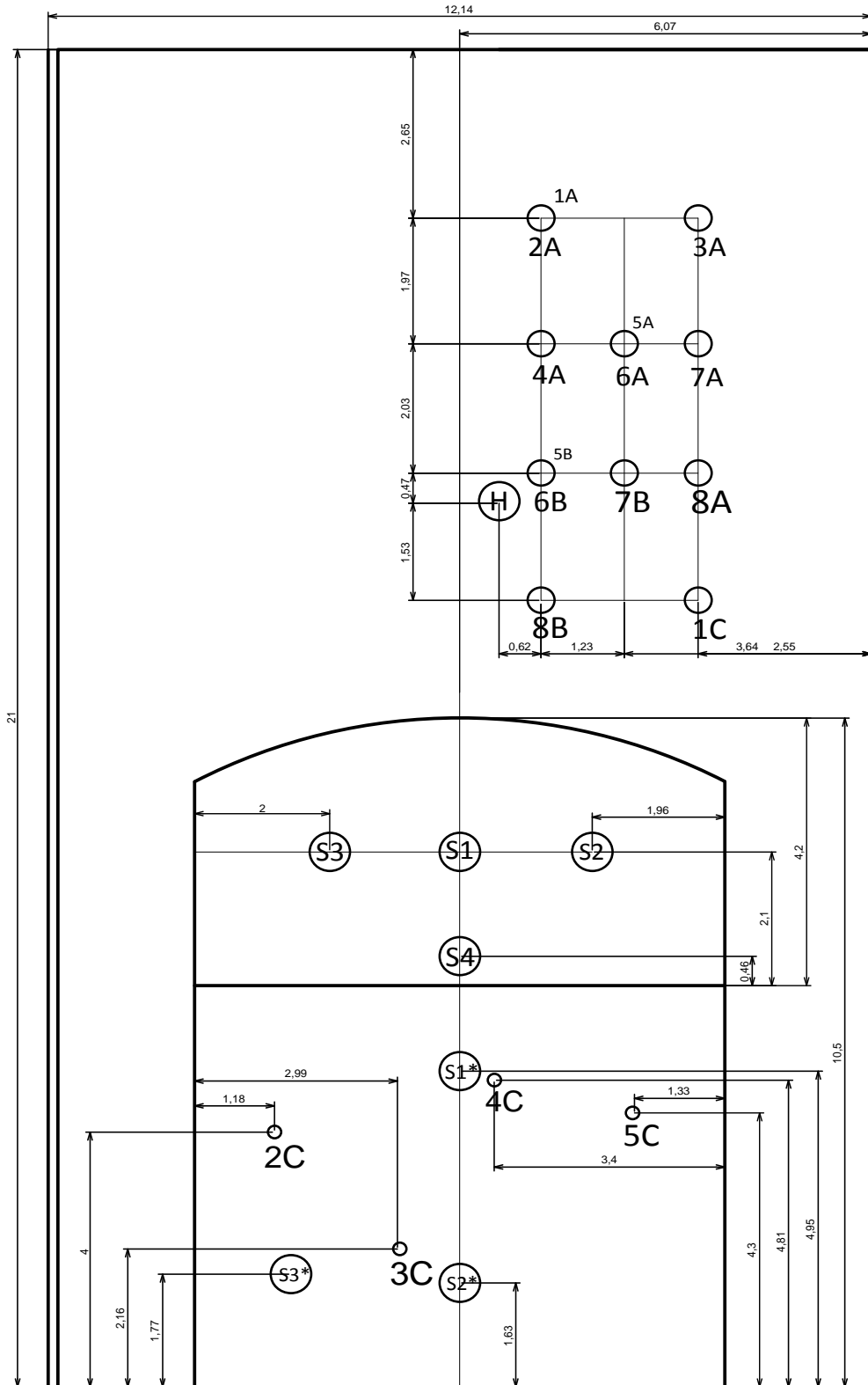
A	Technická dokumentace měření	30
B	Grafy spočítaných výsledků	32
C	Grafy směrové charakteristiky reproduktoru Event 2020	35
D	Kódy m-skriptu z Matlabu	38

A TECHNICKÁ DOKUMENTACE MĚŘENÍ

A.1 Mirandolina



A.2 Impresário v Koncích



B GRAFY

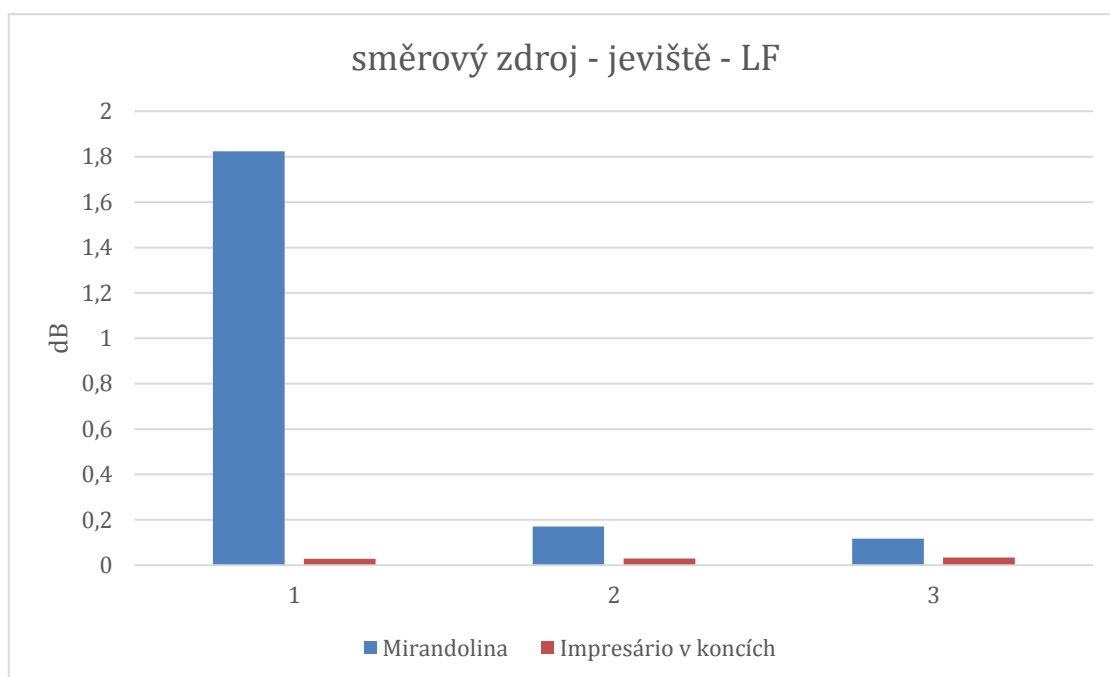
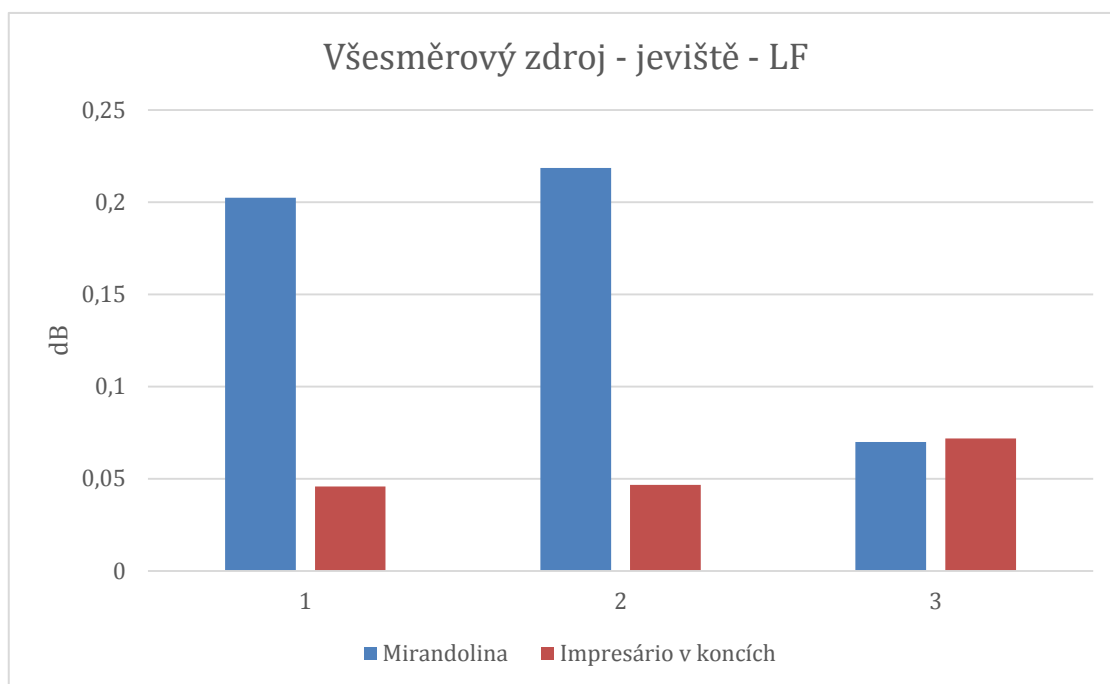
B.1 Grafy parametru EDT



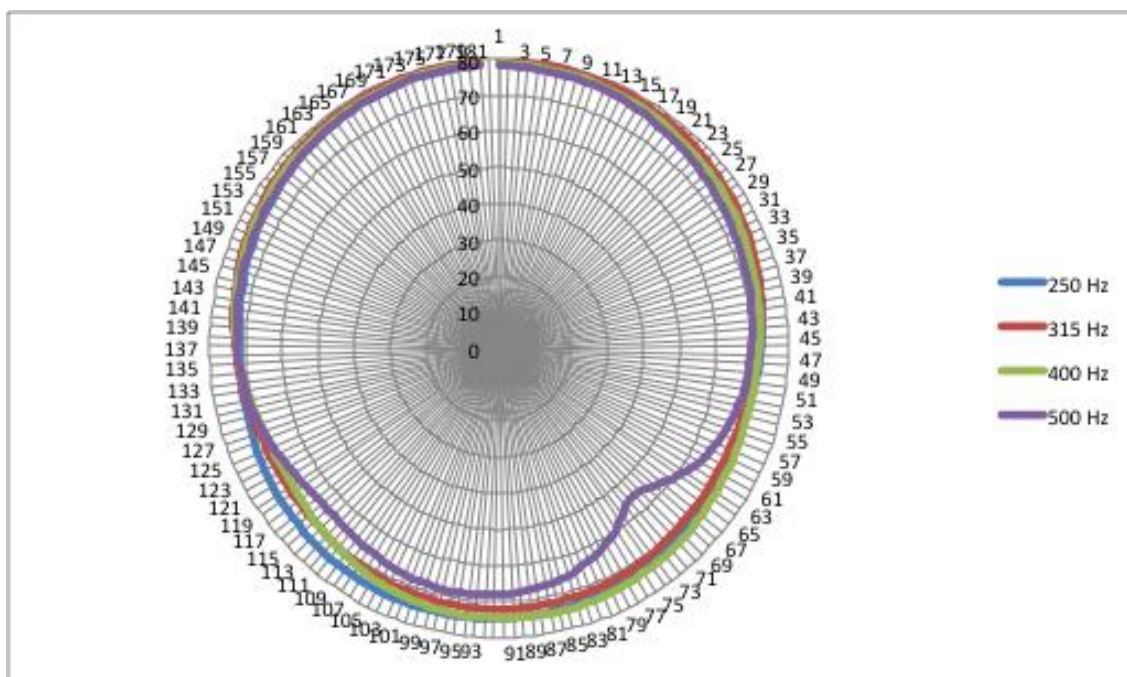
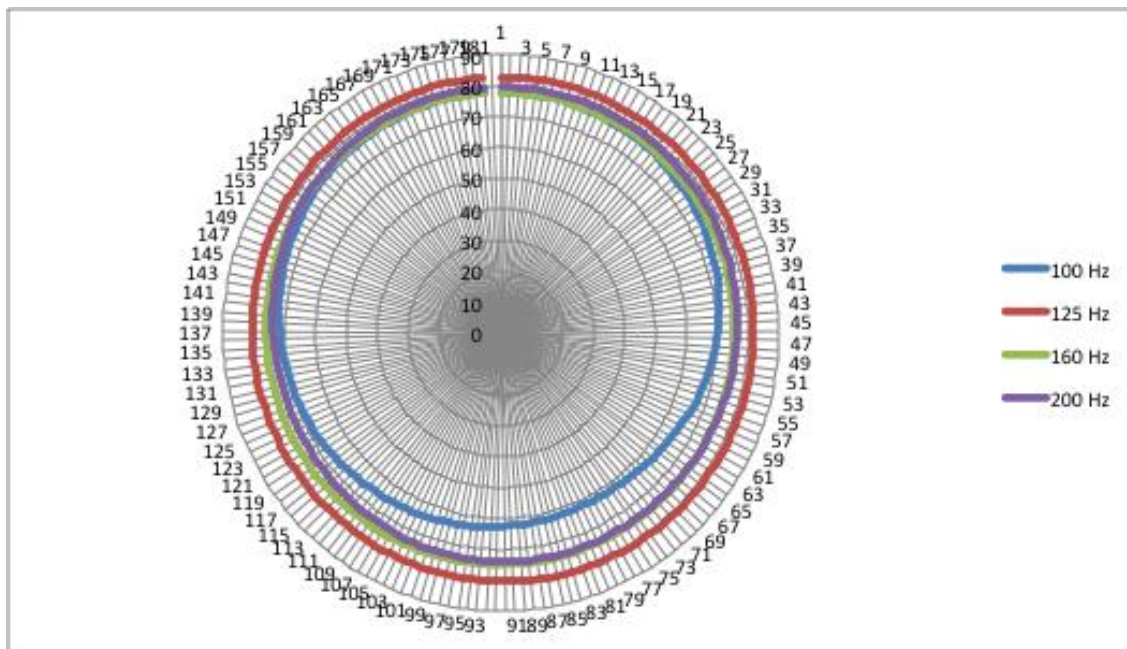
B.2 Grafy parametru C₈₀

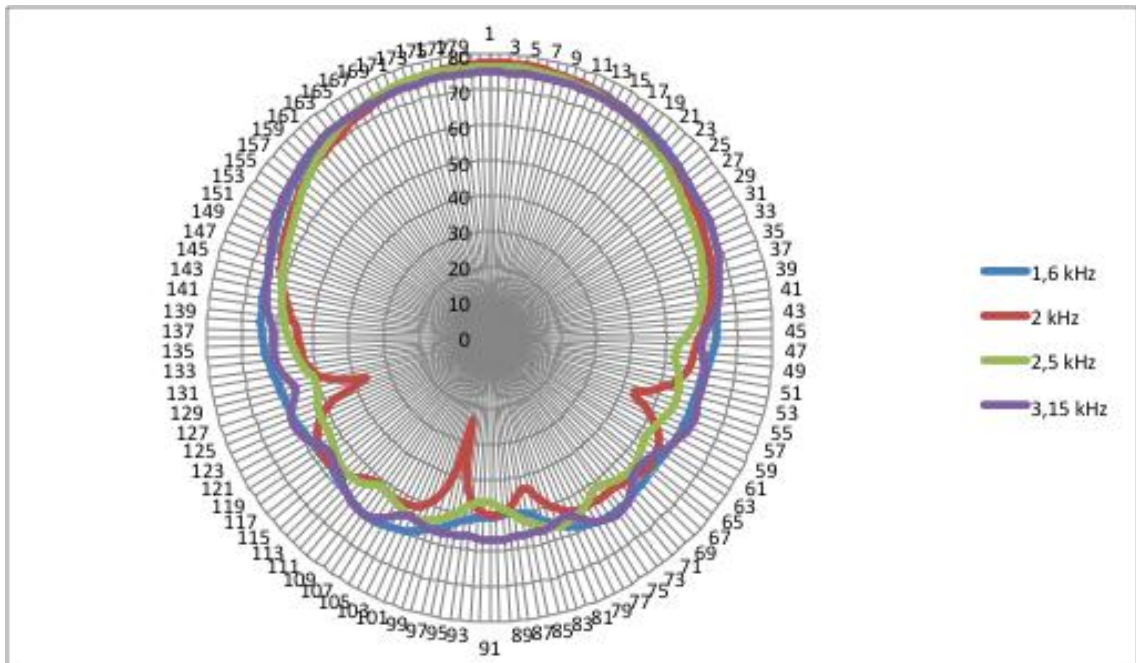
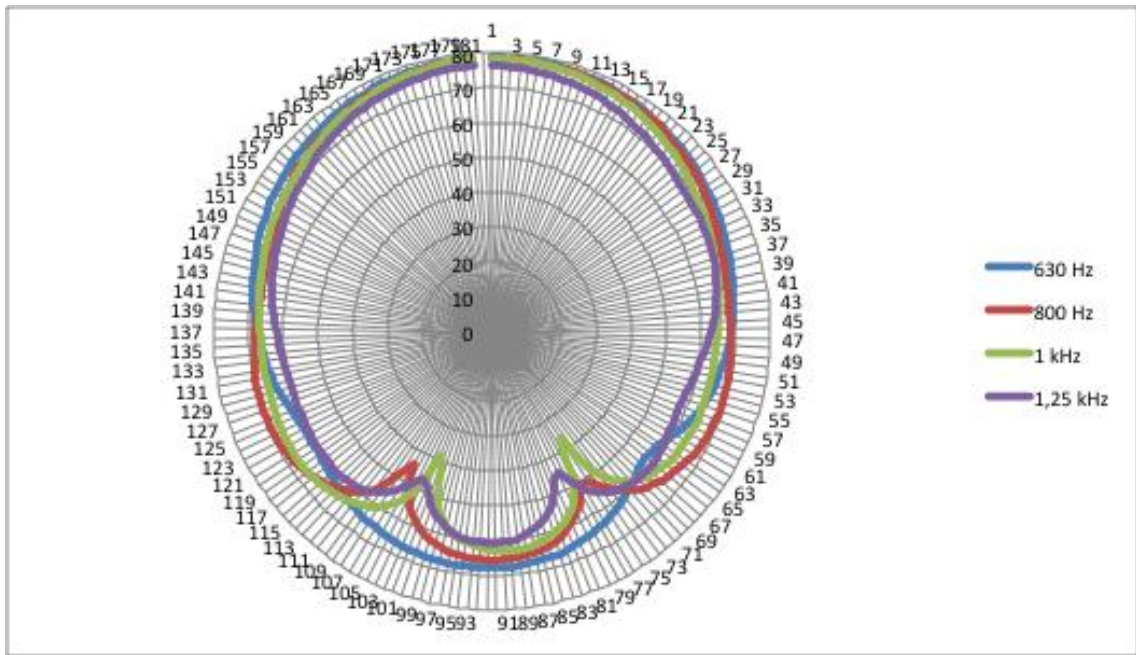


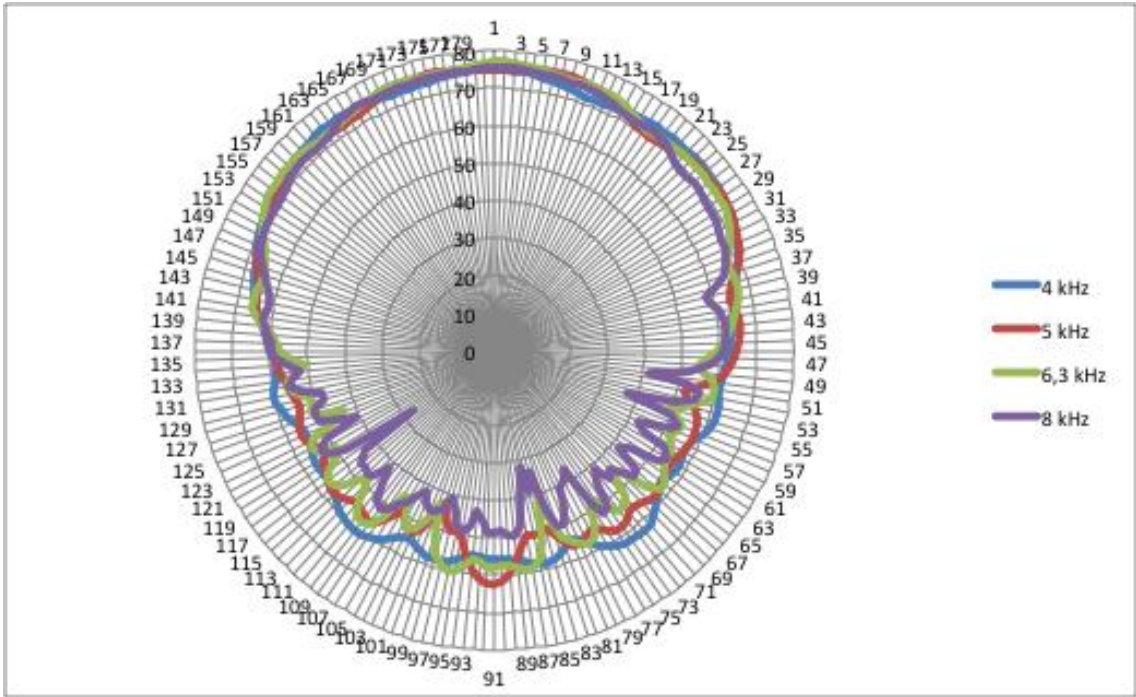
B.3 Grafy parametru LF



C GRAFY SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU EVENT 2020







D KÓDY M-SKRIPTU Z MATLABU

D.1 Impulsní odezva

```
function impulsniodezva()

% IMPULSNI ODEZVA - výpočet ipulsní odezvy z budícího signálu x a
% zaznamenaného (z mikrofonu)y

%Načtení signálu
x=audioread('Loop_source_02_Tracks Live.wav'); % ZDROJ sweepu
y=audioread('Loop_omni stage 3_02_Tracks Live.wav'); % mikrofon -
zaznamenaný sweep

%Výpočet impulsní odezvy
y=y(1:length(x)); %zkrátí y na délku x
X=fft(x); %rychlá Fourierova transformace
Y=fft(y);
H=Y./X; %skalární podíl
h=ifft(H); %zpětná Fourierova transformace
h1=real(h); %realná část imp. odezvy
plot(h1); %kontrolní vykreslení imp. odezvy

% Ošetření PEAKu
i=h1./max(abs(h1));
m=0.99.*i;

% Uložení impulsní odezvy
q = [input('What is your name','s') '.wav'];
audiowrite(q,m,48000); %dle názvu
```

D.2 IACC

```
%% IACC - Inter Aural Cross Correlation - binaurální kritérium
% hodnoty [1-IACCe] - od 0,4 po 1 (1 je největší rozdílnost)
%načtení binaurální impuslní odezvy
[signal, Fvz,] = audioread('01_koule_vpredu_3D_stred_hlediste.wav');

%velikost signálu
size(signal);

%rozdělení kanálů
IRl=signal(:,1);
IRr=signal(:,2);

ARIA = abs (IRl);
riamax = max ( ARIA );
startRIA = find( ARIA > ( riamax ) * 0.01 );
startRIA = startRIA(1);
clear ARIA;
```



```

start=startRIA(1);
ende=size(IRl,1);

s80=round(0.08*Fvz+start);
d50=round(0.05*Fvz);

%IACC pro 0<t<80ms - IACCe (vynulování přední a zadní části a
vyříznutí potřebné části)
IRl(1:start-1) = zeros (1,start-1);
IRl(s80+1:ende) = zeros (1,(ende-s80));
IRr(1:start-1) = zeros (1,start-1);
IRr(s80+1:ende) = zeros (1,(ende-s80));

IRlk = IRl(1 : s80 + d50);
IRrk = IRr(2 : s80 + d50);

%cross correlation - signal processing toolbox - čitatel vzorce IACF
XCORR=xcorr(IRrk, IRlk);

%jmenovatel vzorce IACF
plot(XCORR);
IRlk=(IRlk.^2);
IRrk=(IRrk.^2);
norm = sqrt(sum(IRlk)*sum(IRrk));

%IACF
IACF=XCORR/norm;

%-lms<tau<lms
left = round( size(IACF,1) / 2 - 0.001 * Fvz );
right = round( size(IACF,2) / 2 + 0.001 * Fvz );
IACF(1:left-1) = zeros (1,left-1) ;
IACF(right:size(IACF,2)) = zeros (1,size(IACF,2)-right+1);

%výsledné IACC
iacc= max(IACF);

```

D.3 LF

```

%% Lateral Energy Fraction - LF
%získaná pomocí "bi-directional" mikrofonů - všesměr. a osmičkový
mikrofon
% optimální hodnoty mezi 0,1 a 0,25
%% Načtení impulsních odezev z mikrofonů
[signal1, Fvz] = audioread('FOE3.wav'); % mikrofon s osmičkovou
charakteristikou

[signal2, Fvz] = audioread('omni10.wav'); % mikrofon s všesměrovou
charakteristikou

%% mikrofon s osmičkovou charakteristikou
vzorkydo80msbi=(Fvz*80)/1000;
signaldo80msbi=zeros(1,vzorkydo80msbi);

```

```

for n=1:length(signaldo80msbi)
signaldo80msbi(n)=signal1(n);
end

energiedo80msbi=0;
for n=1:length(signaldo80msbi)
energiedo80msbi=energiedo80msbi+(signaldo80msbi(n)*signaldo80msbi(n));
end

vzorkydo5msbi=(Fvz*5)/1000;
% proměnná pro uložení vzorků do 5ms
signaldo5msbi=zeros(1,vzorkydo5msbi);
% vytvoření matice nulových prvků
signaldo5msbi(1:vzorkydo5msbi)=signal1(1:vzorkydo5msbi);

energiedo5msbi=0;
% nulování proměnné pro nový průchod for cyklu
for n=1:length(signaldo5msbi)
energiedo5msbi=energiedo5msbi+(signaldo5msbi(n)*signaldo5msbi(n));
end

%% mikrofon s všesměrovou charakteristikou
vzorkydo80ms=(Fvz*80)/1000;
signaldo80ms=zeros(1,vzorkydo80ms);
signaldo80ms(1:vzorkydo80ms)=signal2(1:vzorkydo80ms);

energiedo80ms=0;
for n=1:length(signaldo80ms)
energiedo80ms=energiedo80ms+(signaldo80ms(n)*signaldo80ms(n));
end
%% Výpočet LF
LF=(energiedo80msbi-energiedo5msbi)/energiedo80ms);

```

D.4 Objektivní parametry

```

%% Načtení impulsní odezvy
[signal, Fvz] = audioread('stage4.wav');
[Nbits, kanal] = size(signal);
%% Normalizace impulsní odezvy
signal=signal./max(signal);

vzorkydo300ms=(Fvz*300)/1000;
% proměnná pro uložení vzorků do 7ms
signaldo300ms=zeros(1,vzorkydo300ms);
% vytvoření matice nulových prvků
signaldo300ms(1:vzorkydo300ms)=signal(1:vzorkydo300ms);

for n=1:length(signaldo300ms)
signaldo300ms(n)=signal(n);
% přiřazení n-tého signálu proměnné signálu do 7ms
end

energiedo300ms=0;
% nulování proměnné pro nový průchod for cyklu

```

```

for n=1:length(signaldo300ms)
energiedo300ms=energiedo300ms+(signaldo300ms(n)*signaldo300ms(n));
end
%% Výpočet C50 - míra zřetelnosti (pro mluvenné slovo)
vzorkydo50ms=(Fvz*50)/1000;
signaldo50ms=zeros(1,vzorkydo50ms);
%signaldo50ms(1:vzorkydo50ms)=signal(1:vzorkydo50ms);
for n=1:length(signaldo50ms)
signaldo50ms(n)=signal(n);
end

energiedo50ms=0;
for n=1:length(signaldo50ms)
energiedo50ms=energiedo50ms+(signaldo50ms(n)*signaldo50ms(n));
end

C50=10*log10(energiedo50ms/(energiedo300ms-energiedo50ms));
%C50=10*log10(D50/(1-D50));
%% Výpočet C80 - míra jasnosti (1+-2dB)
vzorkydo80ms=(Fvz*80)/1000;
signaldo80ms=zeros(1,vzorkydo80ms);

for n=1:length(signaldo80ms)
signaldo80ms(n)=signal(n);
end

energiedo80ms=0;
for n=1:length(signaldo80ms)
energiedo80ms=energiedo80ms+(signaldo80ms(n)*signaldo80ms(n));
end
C80=10*log10(energiedo80ms/(energiedo300ms-energiedo80ms));
%% Výpočet D50 - zřetelnost
D50=(10^(0.1*C50))/(1+10^(0.1*C50));
%D50=energie_do50ms/energie_vse;

%% Výpočet Schroederova integrálu (Výpočet RT60 - doba dozvuku pro
pokles o 60dB)
N = length(signal);
n = 0:N-1;
%t = n./Fvz; % graf - časov. osa
t = linspace(0, length(signal)/Fvz-1, length(signal));

E = sum(signal.^2); % suma energie signálů
Et = zeros(1,length(signal)); % matice do které zapisuje
%Et = cumsum(signal.^2);

for k = 1:length(signal),
Et(k) = sum(signal(1:k).^2); % do proměnné Et (k) se ukládá suma
energií všech signálů
end;
%LINEÁRNÍ
Eg =(1-Et./E);
%LOGARITMICKÝ
Dt=10*log10(1-Et./E);
%% Výpočet EDT
EDT= 6*dozvuk(Eg, [-5 -15], Fvz);
%% Výpočet T20

```

```

T20 = 3*dozvuk(Eg, [-5 -25], Fvz);
%% Výpočet a zobrazení frekvenční charakteristiky
fa = Fvz/N.*n;
H = 1./sqrt(N).*(fft(signal));
%% Vykreslení grafů
figure          % vytvoří 4 grafy
for k = 1:4
    b(k) = subplot (2,2,k);
end
subplot (b(1));          % 1. ze 4 grafů (impuls.char.&Schroed.int.)
plot(t, signal, 'r');    %vykreslí 2 grafy do jednoho
title('Impulsní odezva');
xlabel('»as [s]');
ylabel('Amplituda [mV]');          %popisek osy y
%legend('Impulsní odezva');
subplot(b(2));          %Schroedrův integrál
plot(t, Eg, 'b');
grid on
grid minor
title('Schroederův integrál');
xlabel('»as [s]');
ylabel('Amplituda [mV]');
legend('Schroedrův integrál - lineární');
subplot (b(3));          % kmitoĚ. char.
Hc = 20*log10(abs(H(1:floor(N/2))));
%f=linspace(Fvz/240,Fvz/2.4);
plot(fa(1:floor(N/2)), Hc);
title('FrekvenĚní charakteristika');
xlabel('Frekvence [Hz]');
ylabel('Hlasitost [dB]');
legend('FrekvenĚní charakteristika');
subplot (b(4));          %
plot(t, Dt, 'k');
grid on
grid minor
title('Schroederův integrál');
xlabel('»as [s]');
ylabel('Hlasitost [dB]');
legend('Schroedrův integrál - logaritmický');
%% Pro Uložení do excelu
T = {C80, C50, D50, EDT, T20};

```

D.5 Funkce dozvuk

```

%funkce na vypocet doby dozvuku RT, EDT, T20, T30 vstupem je Schoedrův
integral impulsni odezvy, rozsah ze ktereho ma byt doba dozvuku
(RT,EDT,T20,T30) vypocitana a Fvz - vzorkovaci kmitocet
function [t,E] = dozvuk(signal,y_fit,Fvz) %premena na decibely,
normalizace k 0 dB a odstraneni nekonecných hodnot
E = 10.*log10(signal);
E = E-max(E);
E = E(1:find(isinf(E),1)-1);
% najde hodnoty na ose x
IX = find(E<=max(y_fit),1):find(E<=min(y_fit),1);
% rozsah decibelu na extrapolaci vysledneho casu
diff_y = abs(diff(y_fit));
t = (max(IX)-min(IX))/Fvz; % doba dozvuku

```